

SAFAP 2018

SICUREZZA E AFFIDABILITA' DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio a 130 anni dalla prima legge sulla sicurezza delle caldaie a vapore

INAIL

Bologna - 28 e 29 novembre 2018

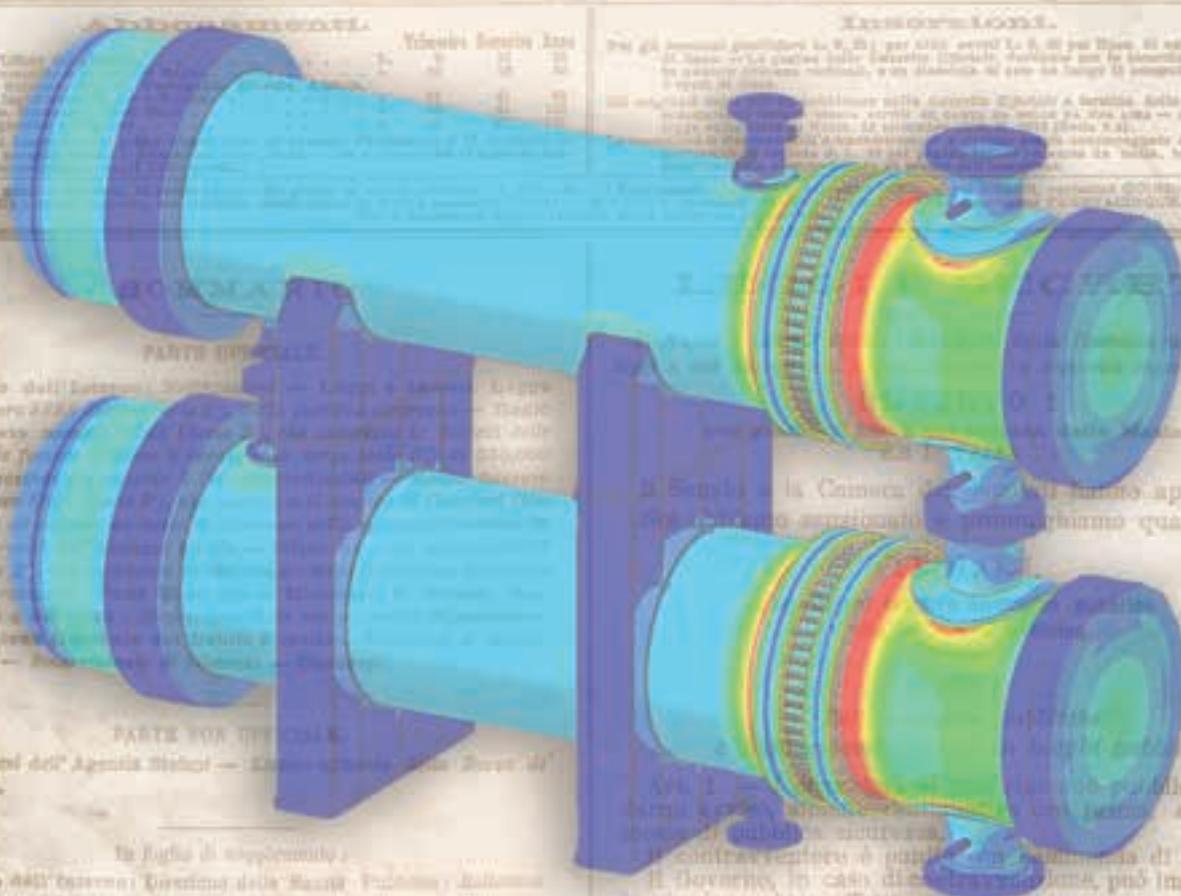
GAZZETTA UFFICIALE

DEL REGNO D'ITALIA

ANNO 1888

ROMA — SABATO 29 GENNAIO

N.° NUM. 22



PARTE UFFICIALE

MINISTERO DELL'INTERNO

Atti di Convegno

The logo for INCIL, consisting of the letters 'INCIL' in white, uppercase, sans-serif font, positioned on a solid orange rectangular background.

INCIL

SAFAP 2018

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE
ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio dalla costruzione
all'esercizio a 130 anni dal primo
decreto sulla sicurezza delle caldaie a
vapore

Bologna, 28 e 29 novembre 2018

Edizione 2018

Pubblicazione realizzata da

INAIL

Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici (Dit)

A cura di

Francesca Ceruti
Daniela Gaetana Cogliani

Grafica di copertina

Francesco Di Palo

per informazioni

INAIL - Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it
www.inail.it

© 2018 INAIL
isbn 978-88-7484-139-4

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

Sessione Integrità strutturale

- E. Di Ponzio, V. Galasso, A. Mele, N. Altamura, A. Scialpi, V. Camodeca**
Case history: Life Cycle Assessment di un forno dell'unità Steam Reforming della raffineria Eni SpA di Taranto..... pag. 1
- F. Di Maio, S. M. Hoseyni, E. Zio**
Stima probabilistica del rischio di rottura di componenti in pressione soggetti a creep e monitoraggio continuo delle condizioni..... pag. 14
- A. Salvo, G. Merckling**
Metallografia non distruttiva innovativa per la previsione della vita residua di materiali metallici..... pag. 21
- L. Scano, L. Esposito**
Effetti della modellazione del creep primario e secondario sulla vita residua dei componenti a pressione calcolata secondo API 579-1 ID 43..... pag. 32
- N. Terlizzi, F. Bresciani, P. Nardoni**
Rilevazione di indicazioni planari nelle placature di reattori in acciaio debolmente legato al Cr Mo eserciti ad alta temperatura e ad alta pressione di idrogeno e indicazioni operative per le metodologie di controllo..... pag. 43
- L. Casiraghi, G. Merckling**
Ipotesi di correlazione quantitativa di risultati microstrutturali con la durata di esposizione per acciai al 9%Cr..... pag. 56

Sessione Progettazione e fabbricazione

- R. Iovene, R. Vasile, M. Di Giacomo, M. Chendi**
Centrale Termoelettrica di Gissi (CH). Riparazione della tubazione HP OTC COOLER delle Unità 1 e 2..... pag. 66
- N. Altamura, G. de Gennaro, V. Galasso, A. De Sandre**
Aspetti Tecnici afferenti le riparazioni di Generatori di Vapore Semifissi eseguite secondo il d.m. 329/04..... pag. 75
- F. Bonori, M. Cevasco, L. Bagnoli**
Revamping Caldaia Hera Pozzilli (IS) per far fronte a fenomeni di corrosione e ridurre al minimo le fermate straordinarie, tecniche adottate e certificazione PED..... pag. 90
- A. Falla, A. Blanco, C. Percolla**
Temporanee Riparazioni delle membrane a pressione. Sviluppi sull'impiego dei materiali compositi..... pag. 96
- L. Comel, R. Grassetti**
Rinforzi strutturali in materiale composito PRS per apparecchiature in pressione: esperienze in materia di durabilità e monitoraggio nel tempo..... pag. 107
- R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, A. Barbon, R. Nicosia, G. Saputi**
Sviluppo di un tappo filettato per l'esclusione dall'esercizio di tubi di scambiatori a fascio tubiero in condizioni di effettiva sicurezza per le persone operanti in prossimità..... pag. 116

Sessione Rischi Natech

P. Castellano, G. Gorrino, F. Fournier

Affidabilità dei sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe: attuazione del piano di controllo condotto sulle attrezzature a pressione della Valle d'Aosta..... pag. 124

N. Mordà, C. De Simone

Applicazione della valutazione del rischio sismico dei luoghi di lavoro..... pag. 134

D. Barbagallo, L. Bonetti

Analisi sperimentale sulla caratterizzazione dei materiali dei serbatoi criogenici ai fini della valutazione antisismica..... pag. 147

A. Lambertini, C. Di Girolamo

Impatto del rischio NaTech sugli scenari incidentali previsti nel rapporto di sicurezza: analisi di un deposito di prodotti petroliferi..... pag. 155

A. Altieri, E. Andriuzzi, A. Castellano, A. Fraddosio, N. Pecere, M.D. Piccioni

Lo studio di vulnerabilità sismica in ottemperanza alle nuove NTC2018 dei serbatoi in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante..... pag. 166

M. Ciucci, A. Marino, A. Lio

Approcci metodologici innovativi per la gestione del rischio sismico in impianti industriali a rischio di incidente rilevante..... pag. 176

Sessione Materiali e meccanismi di danno

D. Lega, M. Romitelli

Indagine sulla corrosione localizzata di un sistema di tubazioni facenti parte di un impianto antincendio..... pag. 186

P. Traini, N. Palumbo, F. Rossetti, G. Pitti

Flow Accelerated Corrosion: case study relativamente ad un GVR di un Ciclo Combinato dell'Enipower Mantova..... pag. 196

F. Perini, S. Sarti, S. Cavalleri, M. Camposaragna

Verifica secondo API 579 - Fitness for service - dell'idoneità al mantenimento in esercizio di un reattore per hydrocracking con indicazione di un difetto planare propagato dalla placcatura inossidabile interna nel materiale base..... pag. 210

C. Andenna, D. Lega, C. Mennuti, E. Pichini Maini, C. Ratti

Caratterizzazione del degrado strutturale di tubazioni in polietilene..... pag. 220

F. Giacobbe, C. Sampietri, G. Sironi

API 579:2016. Confronto con le edizioni precedenti..... pag. 231

L. Ricciardi, A. Tonti, A. Ferraro, M. Pirozzi, L. Campanile, R. Sorci

Impiego di tecniche di Additive Manufacturing per la realizzazione di attrezzature a pressione..... pag. 239

A. Strafella, A. Coglitore, E. Salernitano, F. Bezzi, P. Fabbri, A. Tonti

Analisi delle proprietà ad alta temperatura dell'acciaio T91, in aria e in piombo liquido..... pag. 249

Sessione Impianti 1

E. Latona, M. Lisi, O. Borgia, E. Cherici

Metodologie avanzate per la valutazione dello stato di efficienza e conservazione delle tubazioni di impianto..... pag. 259

V. Prete, L. Vela, G.F. Russo

Impianto termico con corrosione accelerata: cause e interventi attuati per la riduzione dei fenomeni corrosivi..... pag. 265

M. Giacobbo

Implementazione di un sistema strumentato di limitazione della temperatura SIL2 in IV categoria PED in un impianto di cogenerazione a vapore..... pag. 275

G. Sferruzza, G. Argento, F. Daneri, M. Esposito, M. Godono

Gestione delle attrezzature e/o insiemi a pressione (camere iperbariche) a servizio delle TBM (tunnel boring machine). Esperienza operativa di un prolungato intervento di manutenzione straordinaria..... pag. 286

A. Bizioli, M. Musesti

Conduzione dei generatori di vapore..... pag. 298

M. Demichela, G. Baldissoni, C. Leva, P. Agnello

Ottimizzazione delle strategie manutentive delle apparecchiature datate mediante l'applicazione dell'analisi decisionale dinamica integrata..... pag. 305

F. Giacobbe, G. Tortorici, G. Zuccarello

Processi previsionali attraverso analisi probabilistiche di tipo deterministico e stocastico..... pag. 312

Sessione Conformità

G. Battista, A. De Cristofaro, F. Viola, E. Montone

Criticità operative nella produzione di siloveicoli..... pag. 320

E. Becherini, M. Gatto, N. Bravi, M. Franchi, L. Bini, D. Calamari

Studio sulle emissioni di gas e polveri pericolosi per la sicurezza dei lavoratori in ambiente cartario..... pag. 330

A. Fortuni, L. Di Donato, L. Tomassini, A. Ferraro, E. Bemporad, E. Carducci

Attrezzature con parti a pressione che presentano anche rischi trattati da altre direttive di prodotto..... pag. 339

S. Anastasi, E. Carducci, L. Monica

Tra direttiva PED e direttiva macchine: i confini..... pag. 352

A. Fortuni, F. Giacobbe, L. Pugliese, F. Buti, C. Pierdominici, S. Mariani

Organismo notificato per la direttiva PED. Analisi dei dati..... pag. 364

M. Larice, I. Mazzevoli, A. Pallano, F. Zichichi

Criteri tecnici seguiti nella procedura di valutazione della conformità alla PED di attrezzature fabbricate secondo il regolamento nazionale previgente e oggetto di interventi di modifica..... pag. 372

G. Baldissoni, M. Demichela

Proposta metodologica per la valutazione dei rischi per gli assiemi PED. Esplicitazione del fattore umano..... pag. 384

Sessione Diagnostica

P. Addonizio, G. M. Calabrese, M. Madonna, G. Oliviero, A. Visciano

Controllo ultrasonoro con tecnica A-scan/B-scan con carrello magnetico sulle lamiere di un serbatoio di stoccaggio di prodotti petroliferi: dimostrazione pratica su un serbatoio ubicato in un'industria operante nel settore petrolchimico..... pag. 393

N. Testoni, C. Aguzzi, F. Zonzini, L. De Marchi, G. Augugliaro, T.S. Cinotti, A. Marzani

Reti di monitoraggio "leggere" basate su un nodo sensore multifunzione..... pag. 401

L. De Marchi, N. Testoni, M.M. Malatesta, G. Augugliaro

Processing innovativo per la localizzazione delle sorgenti di Emissioni Acustiche..... pag. 411

A. Chiappa, F. Giorgetti, M. Messina, G. Augugliaro, M.E. Biancolini

Confronto di modelli numerici per lo studio della propagazione dei segnali EA..... pag. 421

M. Messina, V. Cozzani, M. Demichela, P. Agnello

Modellazione di serbatoi atmosferici soggetti ad invecchiamento..... pag. 432

N. Altamura, A. Nuzzo, D. Manca, C. Policastro, C. Barbarossa

Emissione Acustica: soluzione altamente tecnologica ad impatto zero..... pag. 438

C. Mennuti, M.E. Biancolini, G.C. Cardarilli, L. De Marchi, L. Di Nunzio, R. Fazzolari, A. Marzani, N. Testoni

Nodi sensore per il monitoraggio dell'integrità strutturale di attrezzature di lavoro mediante il metodo di Emissione Acustica..... pag. 448

Sessione Seveso

M. Di Nardo, M. Madonna, M. Clericuzio, L.C. Santillo

Modelli di resilienza e analisi del rischio: valutazione incidente rilevante..... pag. 457

S. Campana, R. Iovene, A. Lombardi

Limiti e condizioni per l'impiego dello standard API 581 "Risk Based Inspection Methodology" nelle analisi di rischio dei Rapporti di Sicurezza di cui al d.lgs. 105/2015..... pag. 467

R. Balistreri, I. Mazzei, G. Sferruzza

La gestione dei reattori chimici in stabilimenti a rischio di incidente rilevante..... pag. 476

S.M. Ansaldo, A. Pirone, M. R. Vallerotonda C. Delle Site, P. Agnello

Come i risultati delle ispezioni possono migliorare la prevenzione degli incidenti chimici..... pag. 490

R. Marrazzo, F. Vazzana

Attività di controllo nel settore del GPL e GNL: risultanze delle analisi condotte sulle istruttorie tecniche e sulle ispezioni SGS per alcuni stabilimenti a rischio di incidente rilevante..... pag. 501

A. Busseni, L. Baldioli

Il sistema di gestione della sicurezza e l'utilizzo della root cause analysis applicati ad un evento incidentale..... pag. 511

F. Delli Quadri

Analisi delle criticità gestionali all'origine di incidenti rilevanti recentemente occorsi in Italia – casi di sovrappressione in ambienti totalmente confinati..... pag. 519

Sessione Gestione in sicurezza

A. Muratore, V. Nastasi, F. Di Rocco

Metodo ad indici per la valutazione dei rischi in fase di esercizio delle attrezzature e/o
insiemi a pressione..... pag. 533

M. G. Marchesiello, C. Zonato, M. Albertazzi, M. Pirozzi, C. Console

La gestione di attività del S.N.P.A. che possono richiedere l'accesso in ambienti confinati o
sospetti di inquinamento..... pag. 543

F. Di Rocco, F. Panin, E. Artenio, A. Rinaldini, D. Carli, R. Frighetto, M. Marangoni

Fenomeno di incollaggio nell'intervento delle valvole di sicurezza, approfondimento nel
caso del GPL..... pag. 552

M. Di Nardo, G. Formato, L. C. Santillo

La manutenzione nell'industria 4.0: assistenza ed implementazione..... pag. 562

C. Gremita, G. Lodroni, R. Spairani, L. Di Donato, E. D'Alessandri

Procedura di ispezione e verifica di impianti ed attrezzature in ambienti sospetti di
inquinamento o confinati..... pag. 572

A. Tonti, L. Ricciardi, F. Panin, V. Toigo, S. Dal Bello, L. Campanile

La sicurezza durante le operazioni di avviamento del Neutral Beam Test Facility..... pag. 583

M.E. Biancolini, M. G. Gnoni, A. Marzani, M. F. Milazzo, R. Setola, S. Anastasi, C. Mennuti, P. Bragatto

Gestione integrata della sicurezza negli stabilimenti industriali ad alta affidabilità con la
piattaforma SmartBench..... pag. 593

Workshop Invecchiamento

G.A. Zuccarello, A. Lambertini

Analisi dell'invecchiamento delle attrezzature e degli impianti negli Stabilimenti "Seveso": la
valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione nell'attività istruttoria di
valutazione dei Rapporti di Sicurezza negli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna..... pag. 603

D. Sallustio, C. Fossati, S. Larghi

Approccio metodologico di estensione della vita di un GVR oltre quella di progetto..... pag. 615

M.F. Milazzo, S.M. Ansaldi, P.A. Bragatto, T. Di Condina, F.M. Zanzotto

Monitoraggio e gestione dei meccanismi di deterioramento di attrezzature in pressione
attraverso un approccio ontologico..... pag. 625

R. Balistreri, A.F. Magri

Invecchiamento delle attrezzature a pressione negli impianti RIR: applicazione della norma
UNI 11706:2018..... pag. 635

A. Di Bello, V. Galasso, A. Mele, A. Sibilano

Applicazione del metodo di valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di
gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature all'impianto Steam Cracker P1CR dello
stabilimento Versalis di Brindisi..... pag. 642

P.A. Bragatto, C. Delle Site, A. Pirone, M.R. Vallerotonda

Lo standard UNI – EN 16991:2018 e la gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti
Seveso..... pag. 652

F. Vazzana, G. Capponi, G. Battistella

L'invecchiamento degli impianti e la gestione dell'integrità meccanica: prime risultanze delle attività ispettive svolte in stabilimenti Seveso e possibili opportunità di miglioramento.. pag. 664

S. Anastasi, V. Elia, L. Monica, M.G. Gnoni, S. Parisi

Proposta per una piattaforma smart iot-based per la gestione delle attrezzature a pressione pag. 671

Sessione Analisi dei rischi

R. Lauri, B. Grospietro, B. Pietrangeli

Esempio di classificazione di aree con atmosfere potenzialmente esplosive generate dall'evaporazione di pozze di biocombustibili: un caso studio..... pag. 678

C. De Toro, M. Gaita, E. Urciuoli, J. Pardi, B. Mauro, A. Cotumaccio

Rischio di esplosione in presenza di batterie al litio in un ciclo di trattamento e recupero batterie al piombo..... pag. 688

A. Barberio

Vantaggi della (nuova) norma IEC/EN 60079-10-1 e ausili per la sua applicazione..... pag. 697

S. Carra, G. Vignali, L. Monica

Trasporto su gomma di serbatoi per liquidi pericolosi: rischi associati al moto del fluido, normative, soluzioni tecniche..... pag. 706

F. Di Tosto, E. Pichini, E. Ferrari, N. Palumbo, G. Bagordo, A. Cicaterri

Miglioramento della sicurezza degli apparecchi a pressione dotati di portelle con sistemi di chiusura realizzati con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera ed omologati dall'Ispeel secondo la legislazione antecedente al d.lgs. 93/2000..... pag. 715

A. Tonti, F. Di Tosto, E. Ferrari, N. Palumbo, G. Bagordo, F. Massaro

Apparecchi a pressione dotati di portelle con sistemi di chiusura realizzati con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera - indicazioni tecniche per il miglioramento della sicurezza e per l'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi..... pag. 726

G. Vignali, R. Melloni, L. Di Donato, D. Gattamelata

Applicazione delle direttive ATEX per la valutazione del rischio esplosione in una officina farmaceutica..... pag. 737

F. P. Nigri, V. De Lisio, C. Delle Site, R. Iovene

Vincoli di sicurezza derivanti dall'applicazione delle norme IEC 61508 e IEC 61511: applicazione dell'analisi SIL ai sistemi di sicurezza di un impianto di processo..... pag. 748

G. De Gennaro, F.P. Nigri, A. Nuzzo, E. Bruni, F. Leone

Analisi SIL di un blocco di sicurezza di un generatore di vapore alimentato con combustibile solido non polverizzato..... pag. 760

Sessione Impianti 2

M. Oss, R. Longo, L. Battello

Valutazione della vita residua di due generatori di vapore di età superiore a 45 anni..... pag. 772

G. Battista, C. Piccolo, I. Campitelli, D. Salzano, C. Ziccardi, S. Sabatino

Attrezzature a pressione a servizio di impianti di depurazione..... pag. 782

V. Nastasi, G. Sferruzza, A. Muratore, F. Campanella, M. Mattozzi

Gestione delle attrezzature e/o insiemi a pressione incorporati nelle apparecchiature a risonanza magnetica con magneti superconduttori..... pag. 791

P. Castellano, C. Piccolo, G. Gorrino, G. Aversa, L. Artaz, R. Pecce, C. Demarchi Gli apparecchi a pressione nelle centrali idroelettriche.....	pag. 803
R. D'Eliseo, D. Cerrone, R. Modestino, M. del Gaudio Criticità operative nella gestione delle procedure di carico di serbatoi per lo stoccaggio ed infustaggio di acido formico. Analisi dei fattori di rischio di incidente rilevante per sovrappressione.....	pag. 813
A. Piccinocchi, F. Simoncini, M. Beghini, C. Santus La sicurezza del cilindro monolucido in acciaio nelle cartiere: procedura per la valutazione della resistenza a fatica.....	pag. 821
E. Becherini, S. Milani, M. Mencacci, N. Bravi, A. Dalmonte, E. Franchi Valutazione dell'integrità strutturale in esercizio dei cilindri monolucidi da cartiera.....	pag. 830
F. Boella, R. Acerboni, A. De Palma, P. Morucchio, E. Pichini, G.A. Zuccarello Conduzione dei generatori di vapore in presenza continua del conduttore, con l'ausilio di sistemi informatici mobili di controllo a distanza.....	pag. 841

Sessione Poster

F. Badolato, R. Longo, M. Oss Esperienze di applicazione del capitolo R.3.F della raccolta R relativo ai generatori di calore modulari.....	pag. 849
G. Gorrino, V. Prete, A. Urso Analisi di gestione del funzionamento di un serbatoio criogenico contenente CO2 liquida con temperatura di targa -40/+50 °C ai fini del non superamento dei limiti di temperatura fissati in costruzione.....	pag. 858
A. Mura, F. Gambato, F. Verzotto Gestione moderna e integrata delle attività di RBI nel campo dell'Asset Integrity.....	pag. 866
P. Addonizio, M. Madonna, G. Russo, P. Fontana, R.A. Falco, D. Russo Giunti critici su apparecchi a pressione.....	pag. 874
F. Di Rocco, V. Nastasi, A. Iseppi, D. Di Fonzo, M. Carcereri, A. Muratore Gestione in sicurezza dei depositi di fitofarmaci rientranti nel d.lgs. 105/15.....	pag. 881
C. Piccolo, D. Del Gaizo, R. Di Leo, G. Selvestrini, M.M. La Veglia Analisi di casi di esplosioni anomale in impianti antincendio a pressione con bombole di gas estinguente inerte. Criticità nella progettazione e nella manutenzione.....	pag. 891
M. Pagliuca, C. Tola, R. Luciano, M. del Gaudio La Valutazione del Rischio ATEX conseguente all'utilizzo dell'etanolo nel ciclo di produzione dell'acido ialuronico. L'esperienza operativa della Altergon Srl di Morra De Sanctis (AV).....	pag. 901
C. De Toro, E. Spagnuolo, M. Mauro, M. M. La Veglia, P. Pireneo Criticità nel sistema di sicurezza a servizio di un serbatoio di GPL.....	pag. 910
A. Rotondaro, A. F. Cosentini Analisi statistica sui difetti rilevati nelle installazioni di piccoli serbatoi Gpl ad uso domestico ed industriale.....	pag. 916
R. Vasile, T. Guidi Rivestimento di apparecchiature in acciaio con resine per aumentarne la resistenza alla corrosione.....	pag. 927

M. De Musso, A. De Musso Studio del sistema di sicurezza, secondo il d.m. 329/04, in un impianto di cogenerazione con caldaia a recupero fumi installata in batteria ad un generatore di vapore esistente.....	pag. 934
T. Scalici, G. Gurnari, N. Palumbo, N. Rizzo Fondamenti teorici delle formule principali della Raccolta R e considerazioni su alcuni casi particolari.....	pag. 944
P. Castellano, G. Battista, O. Di Donato, P. Belardi, R. Charbonnier La variabile "pressione" nel processo di produzione della birra.....	pag. 961
F. R. Filograsso, F. Ioppolo, B. Palombo, M. Godono La sicurezza nell'ambito delle attività subacquee professionali.....	pag. 968
D. Sallustio, F. Sciommarella Esposizione di un caso pratico sulla gestione in sicurezza degli accessi di operatori all'interno di un GVR.....	pag. 973
A. Nuzzo, G. de Gennaro, F. P. Nigri Sicurezza, conduzione e gestione delle macchine frigorifere.....	pag. 984
P. Napolitano, E. Ferrari Innovazioni impiantistiche: la cogenerazione e la trigenerazione nel settore rurale.....	pag. 995
A. Bruzzone, M. Pirozzi, F. di Palo, A. Di Filippo, F. Cassandra Le innovazioni derivanti dalla quarta rivoluzione industriale 4.0 applicabili nelle operazioni di ispezione e di ausilio alla manutenzione.....	pag.1004
F. Massarini, S. Mazzoni Gestione della taratura delle valvole di sicurezza per mezzo della tecnologia RFID.....	pag.1017
D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini Impiego delle tubazioni in polietilene ad alta densità (PEAD) nel settore delle attrezzature a pressione.....	pag.1023
R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, P. Morucchio, A. Falla, M. Cantone Danni sulla bulloneria e sulle flange durante la manutenzione dei giunti con interposta guarnizione. Una rondella e miglorie sui dadi esagonali per prevenirli.....	pag.1034
O. Borgia, M. Guerrieri Il progetto PELM: una piattaforma SmartBench.....	pag.1043
F. Taurasi, G. Vaccaro Vantaggi di una corretta manutenzione dei generatori di vapore.....	pag.1052
F. Taurasi Il processo di sicurezza comportamentale applicato alla sorveglianza dei generatori di vapore.....	pag.1060
G. Calvano, S. Vacquer, L. Rossero, C. Botta, M. Ferro Verifica quarantacinquennale su generatore di vapore installato presso lo stabilimento FCA di Verrone (Biella).....	pag.1066

Case history: life Cycle Assessment di un forno dell'unità Steam Reforming della raffineria Eni SpA di Taranto

E. Di Ponzio¹, V. Galasso¹, A. Mele¹, N. Altamura², A. Scialpi³, V. Camodeca³

¹ Inail - Uot di Taranto

² Inail - Uot di Bari

³ Raffineria di Taranto Eni SpA Refining & Marketing

Sommario

Scopo della presente memoria è la definizione di un approccio innovativo di valutazione dello stato di conservazione di recipienti eserciti in regime di scorrimento viscoso, attraverso l'integrazione dei risultati di più indagini ispettive.

L'apparecchiatura, oggetto della presente memoria, è il forno di Reforming Catalitico, F-4401, facente parte dell'Unità di produzione Idrogeno della Raffineria di Taranto.

I tubi che costituiscono la zona radiante, esposti ad una temperatura superiore a quella di scorrimento viscoso, sono progettati a creep per una vita utile di 100.000 h.

Le indagini ispettive impiegate, così come definite dalla vigente Normativa Tecnica, hanno evidenziato delle limitazioni nel calcolo della vita residua, fondamentale per determinare l'affidabilità e la sicurezza del forno.

Tali limitazioni, dovute principalmente alla particolarità dei materiali impiegati per la costruzione dei tubi, si sono evidenziate in occasione delle recenti ispezioni, che hanno condotto l'Utilizzatore a valutare l'impiego di tecniche ispettive innovative, in grado di rilevare persino i primi stadi di evoluzione del creep.

L'analisi congiunta dei risultati scaturiti dalle indagini, distruttive e non, classiche ed evolutive, associata alla storia operativa del forno, sono gli elementi fondamentali per procedere ad una valutazione di Integrità dell'attrezzatura - Life Cycle Assessment.

Questo nuovo approccio ha consentito di valutare con maggior accuratezza la vita residua dei componenti ed ha permesso di ridefinire i piani di manutenzione previsti dalla Politica di Manutenzione. Inoltre, è stata introdotta l'implementazione di Integrity Operating Windows, IOW (API RP 584), per consentire il monitoraggio del forno durante la normale operatività.

1. Introduzione

La valutazione dello stato di conservazione di attrezzature a pressione aventi membrane esercite in regime di scorrimento viscoso mediante tecniche ispettive non distruttive costituisce un elemento fondamentale per stimarne la vita residua e l'idoneità all'ulteriore esercibilità in condizioni di sicurezza.

In occasione delle recenti indagini ispettive condotte sul forno di steam - reforming Catalitico F-4401 facente parte dell'Unità di produzione Idrogeno della Raffineria di Taranto, sono state impiegate per la prima volta tecniche ispettive innovative per investigare l'evoluzione dei fenomeni legati al *creep* sui tubi porta-catalizzatore, eserciti, durante il normale funzionamento, ad una temperatura superiore a quella di scorrimento viscoso.

Grazie all'analisi congiunta dei risultati scaturiti dalle indagini, distruttive e non, tradizionali ed evolutive, associata alla storia operativa del forno, è stato possibile procedere ad una valutazione di Integrità globale dell'attrezzatura che tiene conto anche del contributo di altre forme di degrado strettamente legate allo scorrimento viscoso, quali: infragilimento da fase sigma, ossidazione, decarburizzazione, ecc.

Questo innovativo approccio di valutazione viene denominato *Life Cycle Assessment*.

La valutazione più accurata della vita residua dei componenti soggetti a scorrimento viscoso e ad altri meccanismi di degrado dipendenti dalla temperatura di esercizio, ha permesso di

ridefinire i piani ispettivi - manutentivi previsti dalla Politica di Manutenzione vigente per applicazioni di forni di Steam Reforming.

2. Descrizione Impianto

2.1 Impianto oggetto di studio

L'impianto di idrogeno – U4400 della Raffineria di Taranto è preposto alla produzione di idrogeno ad elevata purezza per alimentare la rete comune a servizio delle altre Unità utilizzatrici. Tale impianto può essere alimentato con gas naturale o con GPL, oppure una miscela dei due. E' suddiviso in quattro sezioni principali: desolforazione, reforming, conversione CO e separazione dell'H₂ [1].

Lo schema della sezione di reforming dell'impianto è riportato in Figura 1.

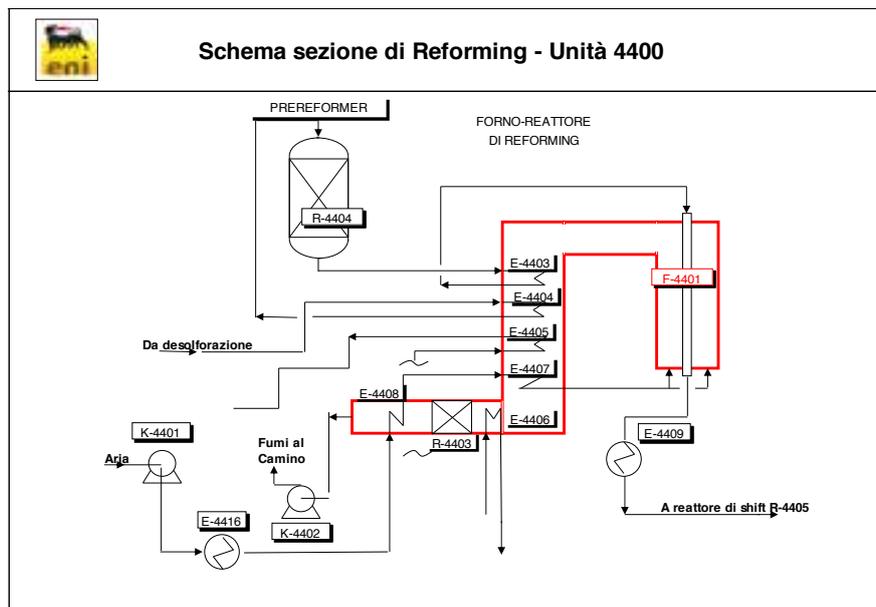


Figura 1. Schema sezione di reforming Impianto produzione idrogeno – Unità 4400

Nella sezione di Reforming, l'alimentazione idrocarburica è convertita a gas di sintesi, una miscela formata principalmente da idrogeno (H₂), anidride carbonica (CO₂) e monossido di carbonio (CO), oltre ad una piccola quantità di metano residuo (CH₄). Il gas di sintesi, in uscita dal prereformer, va in alimentazione del forno di steam reforming F-4401, dove ha luogo principalmente la reazione di reforming del metano. Il gas di processo, privo di composti solforati, entra nei tubi catalitici dall'alto, attraverso il collettore di distribuzione, a una temperatura di 635 °C. Una volta uscito dal basso, ad una temperatura di circa 915°C, viene raffreddato attraverso scambiatori di calore sino a 190 °C, e poi viene inviato al reattore di conversione della CO. Viceversa, i fumi prodotti nella camera di combustione, entrano nella sezione convettiva dove il loro calore sensibile è utilizzato per il preriscaldamento dell'alimentazione al forno e la produzione di vapore ad alta pressione.

2.2 Item oggetto di studio

L'item oggetto delle presenti memorie è il forno di Steam Reforming a tubi catalitici F-4401, appartenente all'unità di produzione Idrogeno della Raffineria di Taranto, U-4400. L'apparecchiatura in oggetto è in grado di garantire il trasferimento del calore necessario alla reazione di reforming del metano e di contenere il catalizzatore attraverso i tubi "catalitici".

Il forno è costituito da una sezione radiante ed una sezione convettiva: la sezione radiante presenta una sola cella, suddivisa in 5 sezioni all' interno della quale sono ubicati 160 tubi verticali disposti su un'unica fila (figura 2). I tubi sono realizzati in acciaio Paralloy H39WM (25/35 Cr/Ni No0.4% C): lega austenitica al Cromo – Nichel, impiegata tipicamente per servizi, cosiddetti, "heavy duty" passes of pyrolysis cracker furnace coils. In tali applicazioni si raggiungono temperature di pelle intorno ai 1135°C. La composizione chimica del materiale con cui sono realizzati i "tubi catalitici" è riportata in tabella 1.

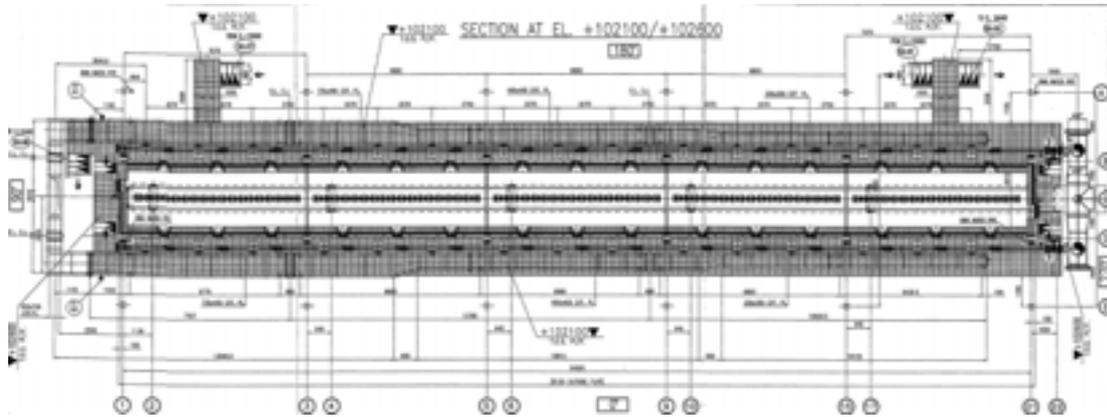


Figura 2. Assieme radiante forno F-4401

Composizione Paralloy H39WM					
C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb
0.4	1	1.5	35	25	0.7-1.5

Tabella 1. Composizione chimica Paralloy H39WM (TotalMateria)

I dati geometrici ed operativi dei tubi catalitici sono riportati in tabella 2. Le caratteristiche costruttive e progettuali, definite secondo i criteri previsti dall' API RP 530 (*Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries*), garantirebbero una vita operativa di 100.000 ore alle condizioni di progetto.

CARATTERISTICHE TUBI		CONDIZIONI DI PROGETTO	
Diametro esterno (O.D.)	105 mm	Design Tube wall temperature	986 °C
Spessore (MSW)	13 mm	Design pressure	32.85 barg
Diametro interno (I.D.)	79 mm	Maximum tube wall temperature	971 °C
Altezza	13000 mm		

Tabella 2. Caratteristiche dei tubi e condizioni di progetto F-4401

Tuttavia, è bene sottolineare come la vita utile dei componenti eserciti a creep dipenda da numerosi fattori legati anche all' operatività del forno. Infatti, è noto che, per queste particolari applicazioni e per materiali analoghi a quello preso in esame, è sufficiente un incremento della temperatura di esercizio di alcune decine di gradi per accelerare marcatamente il deterioramento metallurgico dei tubi, riducendone drasticamente la vita attesa.

Le variabili di processo, come anche quelle legate all' operatività del forno, possono influire notevolmente sul profilo termico dei tubi porta-catalizzatore, tanto da favorire, in alcuni casi, l' insorgere di aumenti localizzati di temperatura, definiti "hot bands".

Altrettanto la disposizione dei bruciatori, così come la distribuzione della fiamma, giocano un ruolo fondamentale nella vita utile dei componenti eserciti a scorrimento viscoso. Nel caso specifico, la disposizione dei 180 bruciatori è del tipo side-fired, ovvero installati sui 2 lati della sezione radiante, frontalmente ai tubi.

Al fine di garantire una distribuzione omogenea del calore, i bruciatori sono disposti su sei file orizzontali, a varie altezze, frontalmente ai tubi. Inoltre, il size e quindi, la potenzialità dei bruciatori, varia a seconda della quota: risultano avere potenzialità maggiori quelli appartenenti alla prima fila, in prossimità dell'ingresso del gas; via via la potenzialità degli altri bruciatori si riduce al minimo in corrispondenza della fila posizionata a ridosso dell'uscita gas, prima del "cold collector".

In aggiunta, la "storia termica" che caratterizza l'item in oggetto (tabella 3) è uno dei fattori fondamentali di cui tener conto nella valutazione della vita residua dei suoi componenti.

In particolare, le fermate ed i riavviamenti a caldo costituiscono dei momenti critici in cui le sollecitazioni termiche e meccaniche raggiungono valori elevati ed i materiali, con cui sono realizzati i tubi, ne tengono "memoria" durante tutto il periodo successivo di esercizio.

Di seguito è riportata la tabella con gli eventi principali che hanno caratterizzato il ciclo di vita del forno dalla "messa in servizio" ad oggi.

Anno	Evento	Descrizione
2010	Installazione	Messa in servizio forno F-4401
2012	Upset – Hot start	Sostituzione n.ro 22 tubi
2014	Ispezione	Nessuna criticità riscontrata
Mar. – Apr. 2017	Upset	Rottura n.ro 2 tubi per surriscaldamento a medio termine
Apr. 2017	Ispezione	<i>Life Cycle Assessment</i> – Sostituzione n.ro 78 tubi a scopo precauzionale
Giu. 2018	Ispezione	Sostituzione n.ro 4 tubi a scopo precauzionale

Tabella 3. Storia operativa F-4401

3. Danneggiamento da Scorrimento Viscoso e Tecniche Ispettive Tradizionali e Innovative

Lo scorrimento viscoso è la deformazione di un materiale sottoposto a sforzo costante che si verifica nei materiali mantenuti per lunghi periodi ad alta temperatura.

Lo scorrimento viscoso si manifesta al di sopra della temperatura di scorrimento (T_s), coincidente indicativamente con la temperatura di ricristallizzazione e pari, in prima approssimazione, alla metà della temperatura di fusione.

Si possono distinguere, come noto, tre fasi principali quando il processo avviene a $T > T_s$ e sollecitazione costante:

- **primo stadio** (creep primario): all'applicazione del carico si ha uno stato transitorio, deformazione elasto-plastica, che aumenta con velocità decrescente favorita dalla mobilità delle dislocazioni più favorevoli (creep logaritmico);
- **secondo stadio** (creep secondario): si stabilisce un equilibrio tra l'incrudimento e la ricristallizzazione: la deformazione prosegue a velocità quasi costante e bassa relativamente a quella presente nella fase successiva;
- **terzo stadio** (creep terziario): la deformazione aumenta rapidamente, arrivando velocemente alla rottura, a causa delle microcricche appuntite e dei microvuoti tondeggianti (nei punti di incontro di tre cristalli) e soprattutto dello scorrimento diffusivo dei giunti dei grani (cioè i grani si allungano per diffusione di atomi nella direzione della trazione e di vacanze nella direzione normale).

Per quanto riguarda i tubi porta-catalizzatori dei forni di steam-reforming, studi e sperimentazioni svolte già nei primi anni '80 confermano che il creep, per questa articolare applicazione, ha origine con la formazione di microvuoti approssimativamente al centro dello

spessore del tubo, a circa 1/3 del diametro interno, e successivamente progrediscono unendosi e formando micro cricche [3]. Con l'avanzare del danneggiamento le micro cricche evolvono in macro cricche che si dispongono in direzione radiale rispetto al tubo, raggiungendo prima il diametro interno e poi successivamente quello esterno, fino alla rottura definitiva del tubo stesso (figura 3).

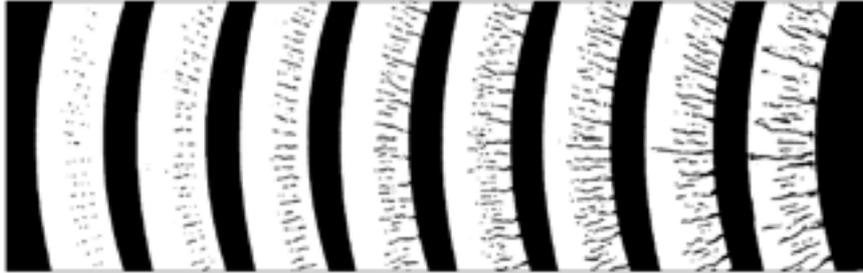


Figura 3 - Evoluzione del danneggiamento da creep sul tubo (da sinistra a destra)

L'evoluzione delle cricche è accompagnata da un costante incremento del diametro interno e di quello esterno del tubo, con una riduzione apparente dello spessore del tubo stesso e con dei rigonfiamenti localizzati.

Per quanto concerne l'apparecchiatura in oggetto, la Raffineria Eni SpA di Taranto, ha adottato, a partire dalla messa in servizio fino ai recenti episodi che hanno segnato il suo ciclo di vita, i criteri di determinazione della vita residua dei componenti eserciti in regime di scorrimento viscoso definiti dalla Procedura Tecnica ISPEL, emessa con Circ. 48/2003, quali tecnica ad ultrasuoni a trasparenza, rilievo dimensionale dei diametri e repliche metallografiche

Tuttavia, data la criticità del servizio svolto e la particolarità dei materiali con cui sono realizzati i tubi porta-catalizzatori, dopo aver constatato alcune limitazioni nella valutazione della vita residua dei componenti se presi in esame gli esiti delle indagini ispettive tradizionali, l'utilizzatore ha ritenuto opportuno eseguire un'analisi congiunta di valutazione di integrità, con cui ha integrato, per la prima volta, gli esiti di tecniche ispettive innovative a quelli delle tecniche tradizionali.

Lo studio che, integrando gli esiti ispettivi di ciascuna tecnica con le evidenze operative del forno durante i precedenti cicli di marcia, ha contribuito a determinare in maniera più accurata la vita residua dei componenti del forno F4401, viene così definito: *Life Cycle Assessment*. Nel paragrafo successivo sono stati riportati vantaggi e svantaggi di ciascuna tecnica ispettiva applicata all'apparecchiatura presa in esame.

3.1 Tecniche ispettive tradizionali

- **Ispezione Visiva (VT)**

I controlli visivi vengono generalmente utilizzati per rilevare specifiche caratteristiche superficiali e/o dimensionali quali allineamenti, forme e dimensioni dei componenti. Nel controllo non distruttivo con esame visivo (VT) l'interpretazione e la valutazione dei risultati, viene effettuata oggettivamente dall'operatore in base a specifici parametri di accettabilità della particolare difettologia del componente in esame.

Il piano di controllo del forno F-4401, prevede l'esame visivo delle tubazioni su tutte le aree accessibili, in particolar modo quelle in prossimità della platea: zona ritenuta più critica in quanto risultano più elevate le temperature di pelle dei tubi, rispetto alle restanti sezioni.

- **Tecnica ad Ultrasuoni a Trasparenza**

La tecnica si basa sull'attenuazione della trasmissione di ultrasuoni in presenza di cricche e vuoti generati dal creep. Il dispositivo per la prova, monta due sonde UT, una emittente e una ricevente, accoppiate alla parete del tubo: l'attenuazione dell'energia degli ultrasuoni

emessi viene misurata e poi messa in relazione alla presenza di cricche e macro vuoti, secondo differenti classi di danneggiamento, che vanno dalla massima trasparenza e, quindi nessun danneggiamento, alla minima trasparenza e, quindi, in condizione di danneggiamento evoluto. Tali risultati sono fortemente influenzati dallo stato della superficie dei tubi, dall'esperienza dell'operatore, dalla calibrazione e dal corretto accoppiamento delle sonde con il tubo.

La tecnica UT è stata implementata nella Raffineria di Taranto per il forno F-4401 già dal 2012. Tuttavia, in occasione dell'ultima applicazione, marzo 2017, tale tecnica, da sola, ha mostrato delle evidenti limitazioni nell'individuare i primi stadi di danneggiamento da scorrimento viscoso [5], soprattutto se non correlata agli esiti ispettivi di altre tecniche di controllo e/o ad esami distruttivi su campioni.

- **Rilievo dimensionale dei diametri (DM)**

Data la modalità di propagazione del fenomeno di danneggiamento da creep, una tecnica utilizzata per rilevarne la presenza consiste nell'effettuare la misura del diametro esterno (O.D.) del tubo mediante calibro. Per tali rilievi, occorre considerare che ciascuna lega ha un proprio range di variazione ammissibile del diametro esterno, oltre il quale il materiale risulta essere oramai compromesso da fenomeni di danneggiamento per creep.

Impiegata manualmente, tale tecnica veniva eseguita sui tubi per i quali l'indagine con ultrasuoni in trasparenza aveva dato evidenze, al fine di validare gli esiti di quest'ultima. Inoltre i rilievi erano localizzati solo in corrispondenza delle aree ritenute più critiche, ossia nelle sezioni poco prima dell'attraversamento della platea del forno.

- **Repliche metallografiche (ST)**

Tale tecnica consiste nell'analisi della struttura metallografica superficiale esterna del tubo, con lo scopo di individuare dei segni di surriscaldamento che hanno causato delle modifiche a livello microstrutturale. La tecnica, seppur con i suoi limiti, risulta attendibile in particolar modo per quei materiali che presentano una struttura cristallina ben definita. Soprattutto, se applicata su saldature, riesce a fornire indicazioni alquanto precise sull'evoluzione di fenomeni di danneggiamento da creep: in tale ottica, risulta importante il confronto tra le strutture cristalline individuate nelle aree costituenti ZF (zona fusa), MB (metallo base) e ZTA (zona termicamente alterata).

Per il Forno F4401, l'applicazione di tale tecnica risulta valida per indagare eventuali aree interessate da "flame impingement" che potrebbero aver subito un creep accelerato. Altrettanto ha senso applicare tale tipologia di controllo sulle saldature di giunzione tra le barre che costituiscono ciascun tubo porta-catalizzatore. Tuttavia, tali posizioni di controllo non sarebbero rappresentative del fenomeno da creep in quanto posizionate in punti ove le temperature di pelle non sono eccessivamente elevate.

D'altro canto le repliche, data la struttura cristallina dendritica dei tubi catalitici dovuta ai processi di fabbricazione per colata centrifuga e data la sola accessibilità al controllo sulle superfici esterne dei tubi, risultano poco efficaci per definire gli stadi di evoluzione del creep su materiale base.

Tuttavia, l'esecuzione delle repliche metallografiche, associate agli esiti delle analisi microstrutturali, permettono di valutare la presenza di danneggiamenti dovuti ad altre forme di degrado causate dall'esposizione ad elevata temperatura. Infatti, le repliche risultano essere tuttora la principale tecnica non distruttiva in grado di valutare cambiamenti microstrutturali indotti da fenomeni di infragilimento, decarburizzazione o carburazione.

3.2 Tecniche ispettive innovative

- **Tecnica a Correnti Indotte (ET)**

Il metodo delle correnti indotte si basa sull'induzione di un campo magnetico e sul conseguente rilevamento delle correnti indotte. A seconda della quantità e dell'estensione

dei microvuoti e delle cricche (cracks), le correnti indotte varieranno, dando indicazione della presenza di danneggiamento da creep. Con la possibilità di eseguirla sia dall'esterno che dall'interno del tubo, mediante un crawler pneumatico, la tecnica riesce a cogliere anche i primi stadi di danneggiamento da creep, specialmente se impiegata dall'interno.

Nel forno F-4401, tale tecnica è stata implementata dall'esterno mediante un crawler con capacità di penetrazione fino a 25 mm, che ha permesso di cogliere danneggiamenti anche oltre 1/3 della profondità a partire dalla superficie di scansione [6]. La presenza di cricche è espressa in percentuale rispetto allo spessore del tubo stesso.

- **Rilievo dimensionale dei diametri a scansione automatizzata**

Il limite della tecnica a correnti indotte, ovvero l'impossibilità di rilevare variazioni della geometria dei tubi, è stato superato con l'applicazione di tecniche in grado di individuare automaticamente eventuali variazioni del diametro interno (I.D.) ed esterno (O.D.) dei tubi porta-catalizzatore. L'innovazione di tale tecnica consiste nell'aver automatizzato, mediante l'utilizzo di strumentazione tecnologicamente avanzata, le misurazioni dei diametri interni/esterni dei tubi "catalitici" per tutta la loro lunghezza. Le scansioni automatiche, rispetto ai tradizionali rilievi manuali eseguiti con calibro, garantiscono:

- Maggior precisione
- Migliore riproducibilità
- Riduzione dell'errore associato alla misura
- Estensione al 100% dei rilievi

Nel caso del forno F-4401, sono state applicate entrambe le misurazioni, impiegando tecniche basate su tecnologie differenti.

Per il rilievo del diametro esterno (O.D.), è stata impiegata la tecnica LEO-SCAN (Laser Eddy current Outside scanning) che prevede l'utilizzo di un crawler automatico sul quale sono installati dei sensori laser posizionati a 90°C tra di loro (figura 4a). Il suddetto controllo, applicato contemporaneamente con quello a correnti indotte con cui è possibile validare e/o confrontare le risultanze, rappresenta un valido strumento per individuare in maniera accurata possibili danneggiamenti esterni da creep.

Per quanto concerne la misura del diametro interno (I.D) dei tubi "catalitici" del forno F-4401, è stata applicata la tecnica della **profilometria laser**, denominata LOTIS (Laser Optic Tube Inspection) [7]. La sonda (figura 4b) proietta un fascio laser sulla superficie interna del tubo, la cui luce viene rilevata da un fotosensore, in grado di restituire la misura di più diametri interni in tutte le sezioni dei tubi.

Lo sforzo da creep è strettamente correlato alla variazione percentuale tra il diametro massimo misurato e quello minimo su ciascun tubo espressa con la seguente formula (1):

$$I.D. \text{ growth} = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{min}} * 100 \quad (1)$$

Pertanto, tanto più accurata è la misura della variazione del diametro interno tanto più sarà attendibile la valutazione dello stato di integrità di ciascun tubo.

Uno dei principali vantaggi della tecnologia laser è quella di eseguire una scansione veloce, precisa e affidabile dei diametri dei tubi a 360°, per tutta la loro lunghezza, fin sotto la platea del forno. La precisione e l'affidabilità della misura aumenta se la profilometria è eseguita dall'interno, poiché il diametro interno mostra una variazione percentuale maggiore rispetto a quello esterno ed è lavorato di macchina al momento della produzione. L'unico svantaggio risiede nel fatto che l'indagine dall'interno può essere eseguita solo in occasione della sostituzione del catalizzatore [3].

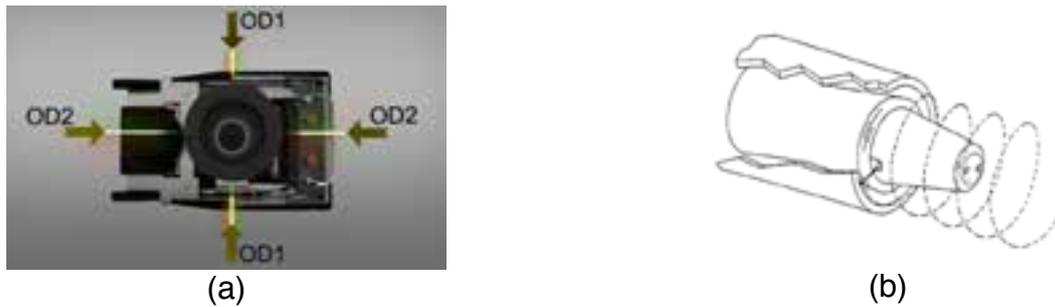


Figura 4. (a) Misura del diametro esterno [6]; (b) Sonda per profilometria Laser [7]

4. Altri meccanismi di danneggiamento, principali tecniche di monitoraggio & controllo ed effetti sulla resistenza a creep

E' noto dalla letteratura come i componenti di un forno di Steam reforming, oltre ad essere soggetti a scorrimento viscoso, siano interessati da altre forme di degrado dipendenti dalla temperatura di esercizio e strettamente correlate al precedente fenomeno. L'attivazione di uno dei precedenti meccanismi di danneggiamento, comporterebbe una drastica riduzione della vita residua dei componenti eserciti a creep. Infatti, fenomeni di infragilimento e carburazione/decarburizzazione provocano una variazione della struttura metallografica del materiale che si manifesta con la perdita della resistenza meccanica ad alta temperatura. Di seguito vengono riportati i principali meccanismi di danneggiamento potenzialmente presenti sui tubi porta catalizzatore e le relative tecniche di controllo e monitoraggio:

- **Infragilimento da fase sigma:** per membrane realizzate in acciaio inossidabile, se esposte ad una temperatura compresa tra i 540°C e 950°C, è possibile la formazione di una fase sigma che a sua volta provoca una drastica riduzione della tenacità.

Le principali azioni di prevenzione/mitigazione sono:

- evitare gli sforzi dovuti alle fasi di avviamento/arresto;
- limitare al minimo il contenuto di ferrite nelle giunzioni saldate
- eseguire, ove possibile, un trattamento termico di ricottura oltre i 1000°C.

Le tecniche di monitoraggio in grado di rilevare gli effetti di simile danneggiamento sono:

- metallografie e prove d'urto (tecniche distruttive)
- repliche (tecnica non distruttiva)
- **Shock termici:** danneggiamenti indotti da shock termico si possono realizzare allorché dilatazioni o contrazioni impedito indotte da raffreddamenti bruschi e localizzati comportano l'insorgere di sensibili tensioni su componenti eserciti ad alta temperatura; in taluni casi, le tensioni "termiche" risultanti possono superare anche il valore del carico di snervamento del materiale.

Tali problematiche si possono riscontrare sui tubi porta catalizzatore del forno F4401, in occasione di "upset" che comportino locali raffreddamenti.

Le principali tecniche di monitoraggio sono:

- Esame visivo;
- Ultrasuoni difettoscopici;
- Liquidi penetranti in zone ad elevato fattore di concentrazione degli sforzi.
- **Carburazione:** l'esposizione di una lega, quale quella con cui sono realizzati i tubi portacatalizzatore, ad un ambiente ad elevata temperatura in cui si ha formazione di coke o vi è presenza di CO o CO₂, provoca un fenomeno di carburazione che si manifesta con riduzione della duttilità ad alta temperatura ed aumento generale delle durezza.

Gli effetti di un simile danneggiamento possono essere rilevati mediante:

- Esami metallografici o repliche
- Prove di durezza
- Eddy current
- **Decarburizzazione:** consiste nella perdita di resistenza dovuta alla rimozione di carbonio e carburi dalla matrice dell'acciaio. Si presenta durante l'esposizione alle alte temperature o al fuoco, o in ambiente di gas a temperatura elevata. Le uniche tecniche in grado di rilevare gli effetti della decarburizzazione sono:
 - Repliche
 - Esame metallografico
 - Misure di durezza

5. Life Cycle Assessment

Definite le tecniche ispettive impiegate per investigare la presenza di difetti riconducibili a creep e valutati gli aspetti legati ad esso che ciascuna indagine è in grado di cogliere, è possibile affermare che per poter valutare in maniera accurata l'integrità dell'attrezzatura occorre supportare i modelli teorici statistici per il calcolo della vita residua dei componenti con un'analisi congiunta delle risultanze ottenute.

La stima della vita residua dei tubi di steam reforming risulta un compito alquanto complesso che in ogni caso porta a conclusioni probabilistiche e non deterministiche, poiché molti aspetti e dati di funzionamento non possono essere determinati con assoluta certezza.

Pertanto, concorrono nella valutazione della vita residua dei componenti eserciti a creep anche numerosi fattori legati alla conduzione dell'impianto, quali, ad esempio:

- **Formazione di Hot Bands** causate da:
 - Perdita di attività del catalizzatore;
 - Disuniformità nella distribuzione del catalizzatore;
 - Problematiche di processo;
 - Disomogeneità nella distribuzione del flusso di calore;
- **Cicli termici**
- **Influenza bruciatori**

Inoltre, al fine di controllare l'insorgenza dei fenomeni di creep, si rende necessario il monitoraggio mirato di altri parametri operativi di cui condividerne i risultati con il licenziatario del processo/catalizzatore:

- Composizione e portata del gas all'ingresso/uscita reattori;
- Analisi delle rese in funzione della composizione del gas, della portata di vapore, dello slip di metano;
- Esotermia di reazione in funzione della conversione;
- Pressione e perdite di carico;
- Storico eventuali fermate programmate e non.

Altrettanto, concorrono nell'analisi di valutazione globale di vita residua anche gli effetti di altre potenziali forme di degrado a cui possono essere soggetti i tubi porta-catalizzatore, quali:

- Infragilimento
- Shock termici
- Carburazione/decarburizzazione.

Quelli sopra descritti hanno rappresentato i dati fondamentali per l'analisi, denominata "Life Cycle Assessment", svolta per il forno F4401 in occasione della recente fermata manutentiva di giugno 2017.

5.1 Risultati analisi

• Tecnica ad Ultrasuoni a Trasparenza

Dai controlli effettuati nel marzo 2017 su 160 tubi del forno F4401 è emerso che la condizione di questi fosse ritenuta accettabile per un ulteriore ciclo di marcia.

Su un totale di 160 tubi, 93 risultavano di classe 2, ovvero con lieve danneggiamento, mentre i restanti risultavano in classe 1.

• LOTIS (Laser Optic Tube Inspection)

Dalle indagini effettuate a maggio 2017 è emerso che le maggiori variazioni di diametro interno sono localizzate in corrispondenza della parte inferiore del tubo (figura 5a). I tubi più critici presentavano le seguenti caratteristiche:

- *I.D. growth* $\geq 5\%$: 14 tubi
- $2.4\% \leq \textit{I.D. growth} \leq 5\%$: 64 tubi

• LEO-SCAN (Laser Eddy current Outside Scanning)

I controlli effettuati a maggio 2017 hanno anch'essi evidenziato delle aree più critiche, per le quali sono state rilevate alte concentrazioni di micro vuoti (cracks) e maggiore espansione dei tubi (O.D. expansion). L' area risultata critica è la stessa di quella individuata dal LOTIS (figura 5b). I tubi considerati critici sono stati quelli rientranti in una delle tre condizioni:

- *Cracks* $\geq 35\%$: 5 tubi
- *O.D. expansion* $\geq 3.5\%$: 1 tubo (appartenente ai 5 tubi del p.to precedente)
- *Cracks* $\geq 30\%$ & *small O.D. expansion*: 8 tubi

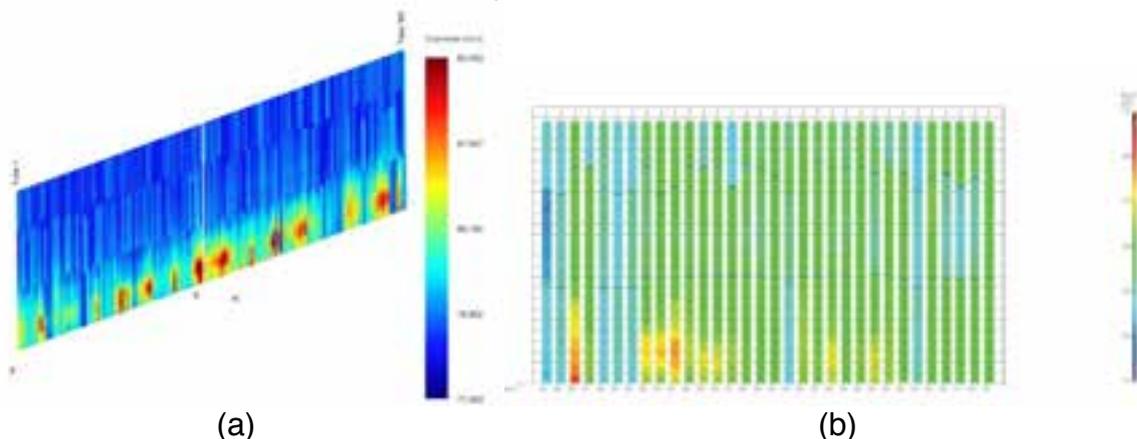


Figura 5. Distribuzione dei valori dei diametri dei tubi del forno F-4401; (a) LOTIS (b) LEO-SCAN;

5.2 Analisi congiunta

Generalmente a valle dei controlli non distruttivi viene effettuata una classificazione dei tubi in relazione alla probabilità che hanno di raggiungere il successivo periodo di marcia previsto:

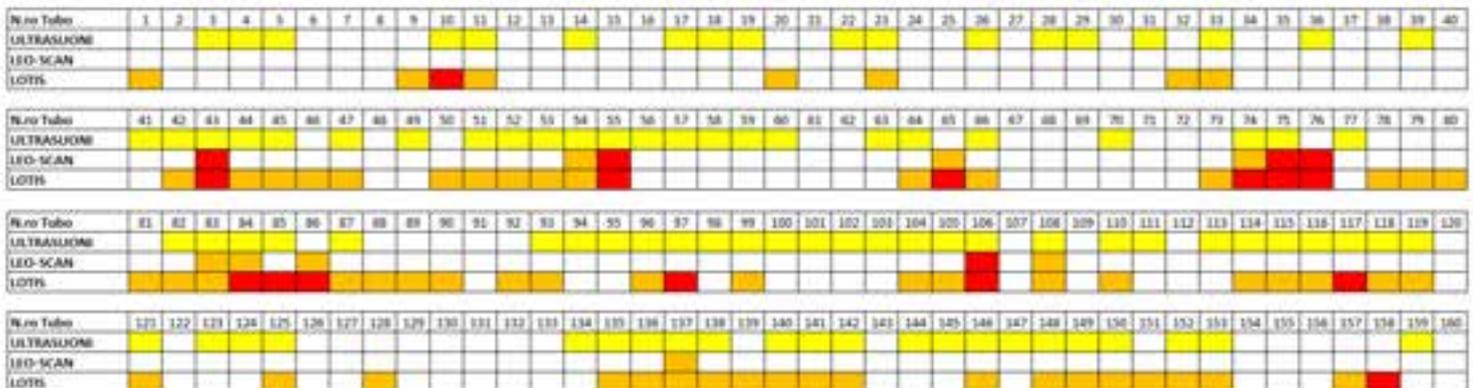
- tubi ad elevata vita residua;
- tubi a ridotta vita residua, tale da non permettere l' ulteriore esercibilità;
- tubi che hanno una vita residua media, tale da richiedere ulteriori approfondimenti ed analisi per decidere se mantenerli o meno in servizio.

Per i tubi che ricadono nella terza categoria è possibile scegliere tra due alternative: quella più conservativa che comporta la sostituzione, oppure quella di approfondire l'analisi dello stato di danneggiamento con tecniche di tipo Fitness For Service o con analisi distruttive su campioni prelevati da tubi sostituiti.

Per il forno oggetto delle presenti memorie, l'analisi congiunta degli esiti di ciascuna tecnica ispettiva ha permesso di valutare la vita residua di ogni tubo catalitico e, quindi, di autorizzarne l'impiego per alcuni, mentre la sostituzione per altri. In particolare, sono stati individuati:

- n.ro 88 tubi ad elevata vita residua;
- n.ro 14 a ridotta vita residua, per i quali si consigliava la sostituzione immediata;
- n.ro 62 tubi la cui integrità richiedeva degli studi approfonditi per la valutazione della vita residua.

Tuttavia, la Raffineria, in occasione a valle degli esiti del *Life Cycle Assessment*, ha ritenuto opportuno procedere con la soluzione più conservativa, ossia la sostituzione anche dei 62



tubi per i quali erano richiesti ulteriori prove per accettabilità. La figura 6 illustra il confronto dei risultati delle indagini ispettive eseguite su ciascun tubo.

Azione prevista in base agli esiti dei controlli	
	Nessuna
	Eeguire monitoraggio alla prossima fermata
	Prevedere Assesment Level 2 (esami distruttivi e Fitness For Service): eseguita sostituzione in via precauzionale
	Prevedere sostituzione

Figura 6. Confronto esiti controlli non distruttivi e legenda

Dall'analisi congiunta sono scaturite le seguenti considerazioni:

- la tecnica LOTIS ha individuato il maggiore numero di tubi ritenuti "critici";
- i tubi ritenuti "critici" con LEO-SCAN costituiscono un sottoinsieme di quelli individuati dal LOTIS;
- I risultati emersi dall'indagine con ultrasuoni a trasparenza, non sono allineati a quelli ottenuti con le precedenti 2 tecniche ispettive.

Date le modalità di evoluzione del fenomeno di creep, è possibile affermare che la tecnica LOTIS risulta la più accurata nell'individuazione dei primi stadi di evoluzione del creep. La tecnica LEO-SCAN è un ulteriore strumento attendibile per valutare la presenza di vuoti e micro cricche. Non solo, costituisce uno strumento di convalida per le risultanze scaturite dalla tecnica del LOTIS. Mentre la tecnica ad ultrasuoni fornisce dati poco attendibili se in presenza di lievi danneggiamenti associabili ai primi stadi evolutivi del creep e soprattutto se, non correttamente applicata.

A convalida dei controlli effettuati, sono state condotte ulteriori analisi distruttive per misurare, tramite analisi metallurgica, la bontà degli esiti delle tecniche ispettive. Le prove distruttive eseguite su degli spezzoni prelevati da un tubo sostituito, oltre a confermare gli esiti delle indagini non distruttive, hanno confermato la presenza di uno stato avanzato di danneggiamento da creep riconducibile ad un surriscaldamento nel medio termine. Tuttavia, solo per la tecnica ad ultrasuoni a trasparenza non è stata trovata correlazione tra gli esiti del controllo e lo stadio progredito di danneggiamento rilevato.

6. Conclusioni

La valutazione dello stato di conservazione di attrezzature a pressione aventi membrature esercite in regime di scorrimento viscoso mediante tecniche ispettive non distruttive costituisce un dato fondamentale per il calcolo della vita residua e l' idoneità all'ulteriore esercizio in condizioni di sicurezza.

Presso l'impianto di produzione di idrogeno U4400 della Raffineria di Taranto, è presente il forno di Steam Reforming, denominato F-4401, la cui zona radiante è costituita da tubi porta-catalizzatore. Gli stessi, esposti ad una temperatura superiore a quella di scorrimento viscoso, sono progettati a creep per una vita utile di 100.000 h. Per questa particolare applicazione, la vita residua dei componenti eserciti a creep dipende da numerosi fattori, quali problemi dovuti al malfunzionamento dei bruciatori, numero di fermate d'emergenza e/o programmate, stress termici e condizioni anomale di esercizio. È possibile pertanto che una certa percentuale di tali membrature, per condizioni non prevedibili in fase di progettazione, possa di fatto presentare criticità in fase di verifica di stabilità anche prima delle 100.000 ore.

Per poter stimare la vita residua di tali componenti sono state impiegate nel recente passato tecniche tradizionali che, tuttavia, hanno presentato alcune limitazioni nel valutare in maniera compiuta lo stato di integrità dei tubi.

Al fine di meglio investigare possibili danneggiamenti da creep di tali tubi porta-catalizzatore, si è reso necessario l'impiego di tecniche ispettive innovative:

- **correnti indotte:** per l'individuazione dei micro vuoti e micro cricche
- **tecnologia laser** (LEO SCAN e LOTIS): per la misura del diametro interno ed esterno.

I risultati ottenuti da ciascuna tecnica sono stati tra loro confrontati e presi in esame per la definizione di un criterio unico per stabilire la vita residua di ciascun componente e pertanto, l'ulteriore esercibilità nei successivi cicli operativi.

Grazie a tale analisi, convalidata dai risultati ottenuti dagli esami metallografici distruttivi e supportata dalle informazioni recepite riguardanti la conduzione del processo, è stato possibile procedere ad una valutazione di Integrità dell'attrezzatura – *Life Cycle Assessment*. Tale approccio, del tutto innovativo, ha consentito di valutare con maggior accuratezza la vita residua dei componenti ed ha permesso di ridefinire i piani di manutenzione previsti dalla Politica di Manutenzione in vigore in Raffineria per la suddetta tipologia di forni.

Inoltre, data la forte influenza dei parametri operativi sulla valutazione della vita residua dei componenti eserciti a creep, sono in fase di implementazione le Integrity Operating Windows previste dallo studio IOW (API RP 584), al fine monitorare il forno anche durante la normale operatività e, quindi, valutarne l'integrità.

7. Bibliografia

- [1] Techint, ENI SpA. Manuale Operativo Impianto Produzione Idrogeno HMU UNIT 4400
- [2] Gruppo Istituto Italiano della saldatura. Indagini di laboratorio su n°4 campioni prelevati dal tubo n°107 della radiante del forno F4401 dell'unità Steam Reforming, eni S.p.A, 2017
- [3] Gerard B. Hawkins, Reformer Tube Metallurgy: Design Consideration; Failure Mechanisms; Inspection methods.
- [4] Brian Shannon. Reformer Tube Inspection using a Multiple technique Approach for Condition Assessment, *Corrosion*. 2005; paper No. 05427
- [5] Donegani Anticorrosione, Controllo UT Tubi catalizzatore forno reforming F 4401 impianto Idrogeno, 2017

- [6] MP Magnetische Pruefanlagen GmbH, Inspection Finding of reformer Tube Inspection & Components Involving, 2017. Inspection Report No. 5100/17/031
- [7] Quest Integrity, LOTIS Examination and Level 1 Assessment of Aged Reformer Tubes in Unit 4400, Hydrogen Production Plant F-4401 Eni Raffineria di Taranto, 2017
- [8] E. Rosati, A. Cambi, G. Gabetta, M. Poldi. Valutazione del Danneggiamento da Creep e Stima Vita residua Nei Tubi Catalitici di Steam Reforming, ENI SpA, 2017
- [9] Normativa Tecnica interna NT0905_LG_IPS Manuale di Ispezioni e collaudi, INDLOG/CM n.40-09
- [10] G. Merckling, M. Jago. Scorrimento viscoso: termine di esercibilità di componenti sollecitati a caldo. *La metallurgia italiana*. 9/2004
- [11] Haldor Topsoe A/S, Metallurgical examination of reformer tubes from ENI Refinery, Taranto, Italy.

Stima probabilistica del rischio di rottura di componenti in pressione soggetti a creep e monitoraggio continuo delle condizioni

F. Di Maio¹, S. M. Hoseyni¹, E. Zio²

¹ Energy Department - Politecnico di Milano

² Fondation Electricité de France (EDF)

Sommario

In questo articolo viene presentato un approccio per la stima adattativa della probabilità di rottura di componenti in pressione soggetti a creep sottoposti a monitoraggio continuo delle loro condizioni.

L'approccio consiste nello sviluppo di 1) un modello stocastico (basato sui dati) del degrado per scorrimento viscoso (creep) di una generica attrezzatura pressurizzata, di dato materiale e geometria con pressione operativa, temperatura e tempo prescritti, 2) una tecnica per stimare i tempi di ispezione in modo adattativo, basata sulla valutazione eseguita dal modello in 1) e coadiuvata da misure non distruttive raccolte sull'attrezzatura pressurizzata dal sistema di monitoraggio. Vengono presentati i risultati preliminari dell'applicazione della parte 1) dell'approccio a un caso studio di letteratura, in previsione di una applicazione ad una vera attrezzatura pressurizzata di un impianto di raffineria del metodo nella sua interezza.

1. Introduzione

L'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (Inail) ha sviluppato una serie di raccomandazioni e specifiche per definire i tempi e gli intervalli delle ispezioni (ad esempio, Intervalli di Ricontrollo (IR)), in cui date misure devono essere effettuate su posizioni precise (definite dal Parametro di Estensione Controllo (PEC)) di apparecchiature pressurizzate che possono subire fenomeni di degrado tali da provocare creep.

Come mostrato in Figura 1, una volta valutata l'attrezzatura da sottoporre a creep (basandosi sulla specifica tecnica UNI / TS 11325 "Attrezzature a pressione - Messa in servizio e uso di attrezzature a pressione e assemblaggi", che consiste in una serie di specifiche e norme elaborate secondo alle indicazioni dell'articolo 3 del decreto del Ministero delle attività produttive 1° dicembre 2004, n.395 "Regolamento per la messa in servizio e l'uso di attrezzature a pressione come definito nell'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93"), la raccolta di alcune misure da Test Non Distruttivi (Non-Destructive Tests, NDT) in base alla posizione e alle estensioni definite dal PEC dell'attrezzatura, consente una valutazione adattativa dell'IR, aggiornata nel tempo alle effettive condizioni dell'apparecchiatura.

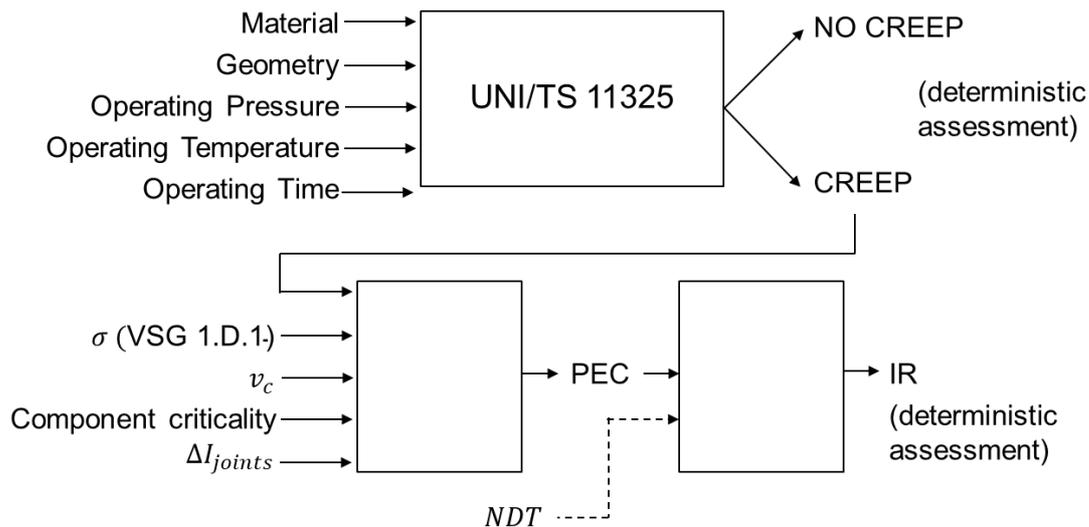


Figura 1. La procedura per la definizione dell'IR (come in [1])

In questo contesto, Inail e Politecnico di Milano hanno avviato una collaborazione nell'ambito del progetto europeo SAF€RA "Sensor development, intelligent data logging, mining and analysis, model updating and statistical methods to predict the performance of aging infrastructures". L'obiettivo della collaborazione è lo sviluppo di un approccio per la valutazione delle condizioni di degrado dell'apparecchiatura e la valutazione adattiva dell'IR, tenendo in considerazione il comportamento stocastico di invecchiamento del componente, come mostrato nella Figura 2.

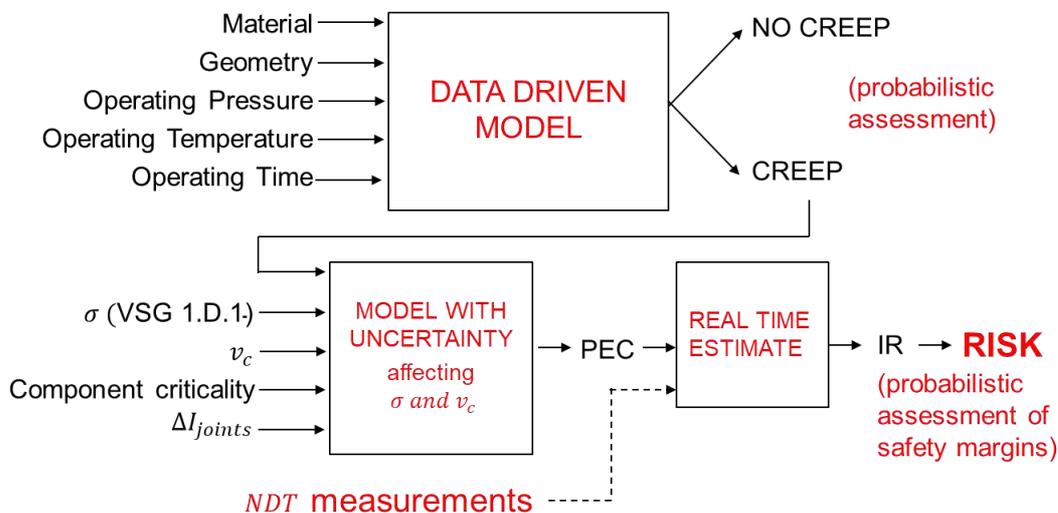


Figura 2. Approccio alla valutazione adattativa dell'IR

La Sezione 2 descrive l'approccio, che viene poi esemplificato con riferimento ad un caso studio di letteratura, come descritto in Sezione 3. La Sezione 4 presenta le conclusioni del lavoro e le prospettive future.

2. L'approccio alla stima adattativa dell'IR

L'approccio proposto consiste nello sviluppo di:

1) un modello stocastico (basato sui dati) del degrado per scorrimento viscoso di una generica attrezzatura pressurizzata, di dato materiale e geometria con pressione operativa, temperatura e tempo prescritti.

Per lo sviluppo di tale modello si procede come segue:

- a) Revisione della letteratura relativa alla descrizione degli approcci modellistici della fisica del fenomeno del creep in attrezzature pressurizzate;
- b) Ricerca di database esistenti, in cui siano presenti i dati sperimentali e di campo relativi alla valutazione della deformazione in apparecchiature pressurizzate.
- c) Sviluppo di un modello di simulazione del creep, per generare scenari da utilizzare per addestrare il modello stocastico basato sui dati.

2) un modello che stima in tempo reale l'IR, basato sul modello in 1) e misure non distruttive raccolte da sensori posizionati sull'apparecchiatura pressurizzata.

Per lo sviluppo di tale modello si procede come segue:

- a) Analisi e sviluppo di approcci di modellazione che consentano il trattamento dell'incertezza dell'output del modello in 1) per definire, con confidenza, il PEC dell'attrezzatura;
- b) Analisi e sviluppo di approcci bayesiani di stima sequenziale di IR, disponendo delle misure non distruttive prelevate dall'attrezzatura sensorizzata e continuamente monitorata.

Risultato atteso dall'applicazione dell'approccio è la valutazione probabilistica dell'insorgere del creep, per l'adeguamento della stima dell'IR alle specifiche condizioni componente monitorato. Questo consentirebbe una gestione del rischio di rottura ed una efficiente pianificazione delle attività di manutenzione.

3. Risultati preliminari dell'applicazione dell'approccio ad un caso studio di letteratura

L'approccio descritto in Sezione 2 viene qui esemplificato con riferimento ad una attrezzatura pressurizzata di un impianto nucleare (un generatore di vapore di un Prototype Fast Breeder Reactor (PFBR) [2]), le cui caratteristiche operative (range di pressione e temperatura, e tipo di materiale) sono riportate in Tabella 1.

Pressione di progetto	550-1150 barg
Temperatura di progetto	653 °C
Materiale	9Cr-1Mo-V-Nb (Plate) ASME SA-387/SA-387M Grade 91

Tabella 1. Caratteristiche di un generatore di vapore di un PFBR [2]

Con riferimento all'approccio descritto nella Sezione 2:

- a) È stata condotta una ricerca di letteratura che ha evidenziato che esistono diversi modelli fisici per descrivere il fenomeno del creep in apparecchiature pressurizzate. I modelli più comunemente usati sono Larson-Miller [3], Manson-Haferd [4] e Monkman-Grant [5]. Tuttavia, il modello Larson-Miller è efficace solo per

deformazioni a bassa temperatura, il modello Manson-Haferd [6], nonostante descriva accuratamente il fenomeno ad alta temperatura, non è un modello ancora validato e verificato [6], e il modello Monkman-Grant [5] sottostima gli sforzi a cui si verifica il fenomeno [7]. Recentemente, è stato proposto il modello Wilshire che, attraverso la normalizzazione dello stress viscoso (Σ) rispetto alla resistenza a trazione (R_m) alla temperatura specificata (T) [5], mostra un ottimo accordo teorico-sperimentale per un ampio numero di metalli puri e leghe (bainitici, ferritici e diversi acciai martensitici) ed è pertanto usato come modello base per determinare la temperatura di scorrimento viscoso per lo standard europeo EN-13445 [8], a cui fa riferimento la specifica tecnica UNI / TS 11325 utilizzata, appunto, da INAIL.

- b) È stato utilizzato il database [9] contenente dati raccolti in esperimenti per lo studio del comportamento di materiali con caratteristiche descritte in Tabella 2 e relativi ad apparecchiature in pressione di impianti nucleari che operano nelle condizioni descritte in Tabella 1. I dati messi a disposizione in [9] sono mostrati in Figura 3, in cui il diverso comportamento in termini di Σ/R_m del materiale in Tabella 2 è mostrato al variare di tempo t e temperatura T di lavoro (secondo la relazione $t \cdot \exp(-Q/RT)$, con Q e R costanti [5]).

Tensione di snervamento	300-4700 Mpa
Temperatura di progetto	500-700 °C
Materiale	9Cr-1Mo-V-Nb (Plate) ASME SA-387/SA-387M Grade 91

Tabella 2. Caratteristiche del materiale i cui risultati degli esperimenti in [9] sono rappresentati in Figura 3.

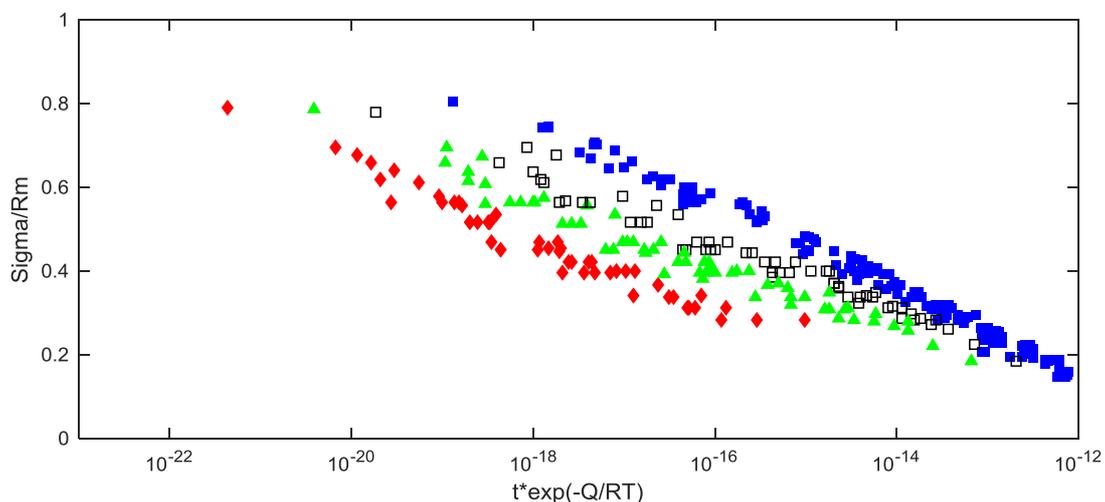


Figura 3. Dati disponibili sul materiale di cui in Tabella 2 [9] (in quadrati blu le rotture, in quadrati bianchi 1% della deformazione, in triangoli verdi 0.5% della deformazione e in rombi rossi 0.2% della deformazione)

- c) È stato sviluppato un modello di regressione basato sul modello di Wilshire utilizzando i dati di Figura 3. Come mostrato in Figura 4, il modello di regressione (Equazione 1), consente di interpolare i dati [9].

$$\Sigma/R_m = \exp(-k \cdot (t \cdot \exp(-Q/RT))^u) \quad (1)$$

In Tabella 3 sono mostrati i valori nominali, massimi e minimi che i parametri k e u assumono per garantire che i modelli sviluppati per rottura 1%, 0.5% e 0.2% della deformazione garantiscano il minore errore di interpolazione (linea continua) e un intervallo di confidenza del 95% (linea tratteggiata superiore e inferiore), rispettivamente.

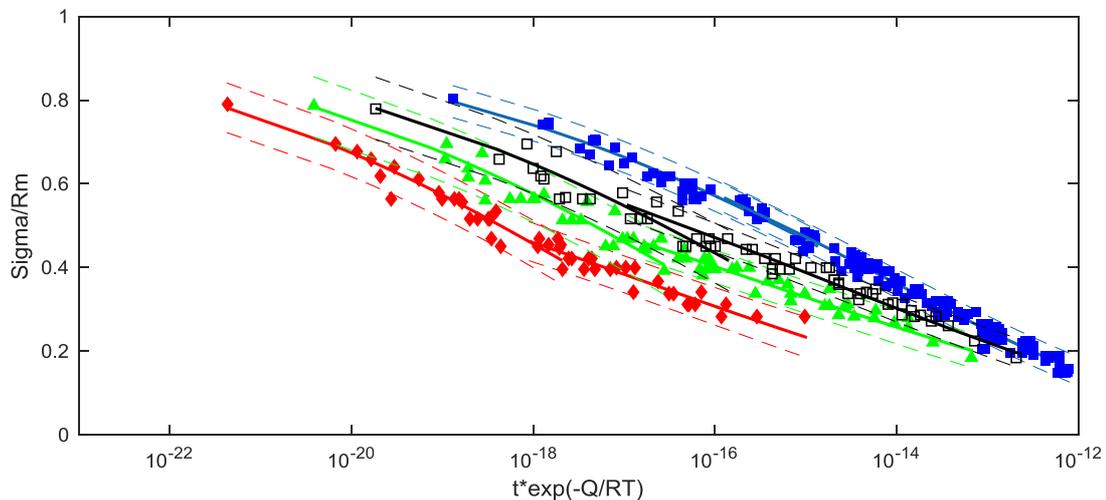


Figura 4. Interpolazione dei dati disponibili sul materiale di cui a Tabella 2, utilizzando i parametri elencati in Tabella 2 per il modello in Equazione 1 (in quadrati blu le rotture, in quadrati bianchi 1% della deformazione, in triangoli verdi 0.5% della deformazione e in rombi rossi 0.2% della deformazione).

Modello	$\text{Sigma/Rm} > 0.45$		$\text{Sigma/Rm} \leq 0.45$	
	$k (k_{\min}, k_{\max})$	$u (u_{\min}, u_{\max})$	$k (k_{\min}, k_{\max})$	$u (u_{\min}, u_{\max})$
Rottura	82.77 (54.76, 110.8)	0.135 (0.126, 0.144)	75.62 (61.65, 89.58)	0.133 (0.127, 0.139)
1.0%	150.8 (19.47, 282.2)	0.141 (0.118, 0.163)	31.33 (21.58, 41.08)	0.101 (0.091, 0.110)
0.5%	247 (22.5, 471.5)	0.147 (0.124, 0.169)	22.2 (15.48, 28.92)	0.086 (0.078, 0.095)
0.2%	382.4 (56.7, 708)	0.149 (0.129, 0.169)	33.3 (14.07, 52.54)	0.090 (0.075, 0.105)

Tabella 3. Valore nominale, minimo e massimo dei parametri k e u del modello di Wilshire, quando utilizzato per interpolare i dati di Figura 3.

Il risultato consente di valutare la probabilità che un contenitore in pressione che opera per un tempo t ad una temperatura T sottoposto a un preciso Sigma/Rm subisca una deformazione (1%, 0.5% o 0.2%) o rottura.

A titolo di esempio, in Figura 5 vengono riportati i soli dati di rottura e di deformazione 1% e l'intervallo di confidenza del 95% per i valori di Sigma/Rm che porterebbero il contenitore a rottura per scorrimento viscoso o a deformazione 1%, per fissato valore di $t \cdot \exp(-Q/RT)$, indicati IC1% ICR, rispettivamente. Assumendo che le due distribuzioni sottese a IC1% e ICR siano Gaussiane (ovvero la densità di probabilità $f(\text{Sigma/Rm} | \text{deformazione 1\%}) \sim N(\mu_{1\%}, \sigma_{1\%})$ e $f(\text{Sigma/Rm} | \text{rottura}) \sim N(\mu_R, \sigma_R)$), è possibile calcolare la probabilità di rottura $P(\text{rottura} | \text{Sigma/Rm})$ e la probabilità di deformazione 1% $P(\text{deformazione 1\%} | \text{Sigma/Rm})$.

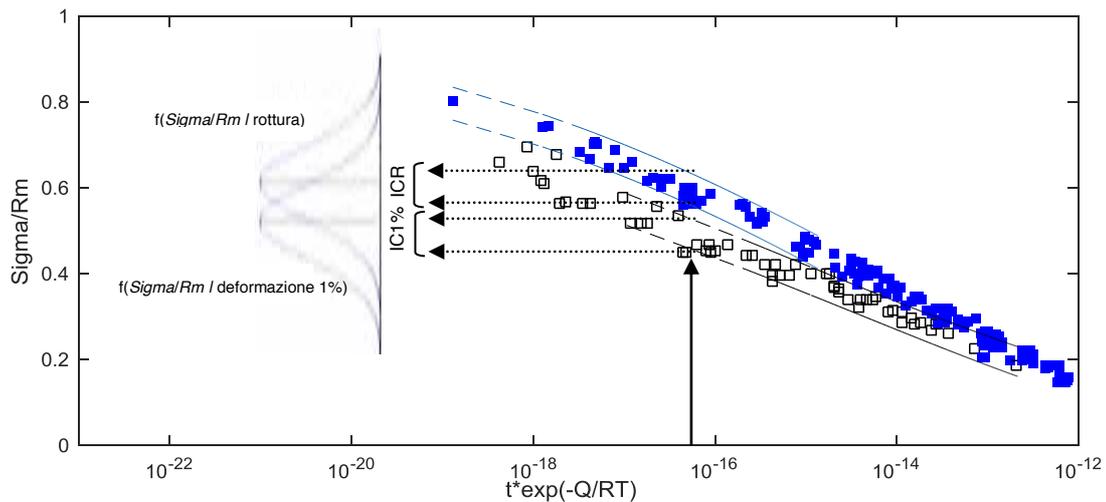


Figura 5. Intervalli di confidenza e densità di probabilità di Σ/R_m per deformazione 1% e rottura a fissata $t^* \exp(-Q/RT)$.

L'informazione probabilistica $P(\text{rottura} | \Sigma/R_m)$ e $P(\text{deformazione } 1\% | \Sigma/R_m)$ diventano importanti per una efficace gestione del rischio di rottura, attraverso una efficiente pianificazione delle attività di manutenzione, poiché il modello che stima l'IR (parte 2 della procedura) sulla base di tali probabilità, consentirebbe di definire con confidenza il PEC dell'apparecchiatura in analisi.

4. Conclusioni

In questo articolo è stato introdotto un approccio per la stima adattativa della probabilità di rottura per creep di apparecchiature in pressione sottoposte a monitoraggio continuo delle loro condizioni. L'approccio consiste nello sviluppo di 1) un modello stocastico (basato sui dati) del degrado per scorrimento viscoso di una generica apparecchiatura pressurizzata, di dato materiale e geometria con pressione operativa, temperatura e tempo prescritti, 2) una tecnica per stimare i tempi di ispezione in modo adattativo, basata sulla valutazione eseguita dal modello in 1) e coadiuvata da misure non distruttive raccolte sull'attrezzatura pressurizzata dal sistema di monitoraggio. Sono stati presentati i risultati preliminari dell'applicazione della parte 1) dell'approccio a un caso studio di letteratura riguardante un contenitore in pressione di un impianto nucleare, in previsione di una futura applicazione ad un caso industriale reale relativo ad una attrezzatura pressurizzata di un impianto di raffinazione (Sarpom SAP a San Martino di Trecate - NO), i cui dettagli sono riportati nella Tabella 3 e nei riferimenti [10-11].

Codice attrezzatura	R-303 N
Pressione di progetto	38 barg
Temperatura di progetto	343 °C
Materiale	A 387 Gr.11 Cl. 2

Tabella 3. Dati dell'impianto di raffinazione Sarpom SAP a San Martino di Trecate

In conclusione, è possibile affermare che l'approccio presentato per la valutazione delle condizioni di degrado dell'apparecchiatura e la valutazione adattiva dell'IR, tenendo in considerazione il comportamento stocastico di invecchiamento del componente, ha la potenzialità di consentire una efficace gestione del rischio di rottura, attraverso una

efficiente pianificazione delle attività di manutenzione (ovvero la definizione, con confidenza di IR e PEC).

5. Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata da INAIL - Grant 3158/2017 – 3rd Call SAF€RA.

6. Bibliografia

- [1] E. Artenio, C. Delle Site, P. Quaresima, “Il ruolo delle PND nella valutazione di vita consumata di attrezzature in pressione soggette a scorrimento viscoso”, AIPnD - PnD Congresso 2011 Oct 26-28, Florence, Italy.
- [2] D.P. Rao Palaparti, Isaac Samuel, B.K.Choudhary, M.D.Mathew, Creep Properties of Grade 91 Steel Steam Generator Tube at 923K, Procedia Engineering, Volume 55, 2013, Pages 70-77.
- [3] F.R. Larson, J. Miller, 1952. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans. ASME, 74, pp.765-775.
- [4] S. S. Manson, A. M. Haferd, 1968. Time-temperature parameters for creep-rupture analysis. Metals Park, OH, ASME.
- [5]. F.C. Monkman, N.J. Grant, 1956. Proc. ASM, 56, p. 593
- [6]. R. K. Penny and D.L. Marriott, 1995. Design for creep- 2th edition. London: Chapman
- [7]. E. Pink, 1994. Physical significance and reliability of Larson–Miller and Manson–Haferd parameters. Materials science and technology, 10(4), pp.340-346.
& Hall, ISBN 0 412 59040 9.
- [8] S. Holmström, 2016. Defining a negligible creep temperature curve for Gr. 91 steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 146, pp.198-202.
- [9] NIMS Atlas of creep deformation property. No. D-1, Creep deformation properties of 9Cr1MoVNb steel for boiler and heat exchangers, 2007.
- [10] SARPOM Spa, Technical Report 866/03-2013.
- [11] SARPOM Spa, Technical Report 723/03-2016.

Metallografia non distruttiva innovativa per la previsione della vita residua di materiali metallici

A. Salvo¹, G. Merckling¹

¹ RTM Breda Srl

Sommario

Per la valutazione di acciai resistenti allo scorrimento viscoso di ultima generazione, si propone una metodologia di replicazione allo stesso tempo morfologica ed estrattiva che permette di studiare l'evoluzione microstrutturale con una tecnica non distruttiva innovativa applicabile in campo. Il metodo è un'estensione del metodo normato ASTM E1216/16 combinato con l'idea della replica estrattiva su supporto metallico per esami metallurgici di Eli Bear Roth (1949).

Con questa procedura verrà riprodotto un calco "perfetto" della microstruttura del materiale, come una replica morfologica, e simultaneamente verranno estratte particelle fino a diametri di 10-15 nm. La replica viene eseguita utilizzando un supporto metallico morbido applicato a pressione controllata sulla superficie da esaminare, preventivamente lucidata e sottoposta ad attacco selettivo per l'isolamento delle particelle. Il supporto metallico deve essere scelto in modo da avere composizione chimica diversa dalle particelle previste per gli esami analitici in laboratorio.

Questa "metalloreplica" permette quindi lo studio della microstruttura e della situazione delle particelle nanometriche utilizzando un normale SEM a sorgente di tungsteno fino ad ingrandimenti vicini al fondo scala strumentale di 500000x e l'analisi della composizione chimica delle particelle estratte, mediante microsonda EDX. Con tecniche di analisi d'immagine è possibile misurare le particelle estratte, i grani e i sottograni ricalcati fedelmente dalla metalloreplica che risolve la struttura fino alla nanoscala. Ulteriore vantaggio è la disponibilità di un'area di ca. Ø20 mm per l'analisi.

La presente memoria mostrerà il funzionamento del metodo e alcuni esempi di risultati ottenuti su acciai al 9/12%Cr esposti a creep.

1. Introduzione

L'acciaio e più in generale le leghe metalliche subiscono evoluzione microstrutturale in esercizio per effetto della concomitante azione di: TEMPO, TEMPERATURA, SFORZO.

Al contrario degli acciai basso legati, gli acciai della famiglia dei martensitici al 9-12%Cr non presentano la formazione e graduale evoluzione di cavità da creep fino a rottura, la cavitazione prodotta a causa del creep si manifesta solo poco prima della rottura. Di conseguenza, su componenti prodotti con tali acciai, il controllo con repliche morfologiche o cavitazionali tradizionali non aiuta a determinare lo stato di danneggiamento attuale del componente esercito.

Un acciaio del tipo grado 91 subisce in regime di creep i seguenti fenomeni potenzialmente correlabili con il danno da esercizio [1]:

- a) Graduata ingrossamento ed evoluzione dei precipitati
 - Ingrossamento e migrazione ai bordi dei grani dei carburi tipo $M_{23}C_6$ $(Fe, Cr, Mo)_{23}C_6$
 - Sviluppo ed ingrossamento delle fasi di LAVES $(Fe, Cr)_2Mo$
 - Ingrossamento e perdita di coerenza con la matrice dei carburi MX $(Nb, V)(C, N)$, NbN, VN

- b) Le sub strutture della matrice tenderanno ad uniformarsi e arrotondarsi e aumentare di diametro

Per l'in-service-inspection di questi acciai, nasce l'idea di sviluppare una nuova tipologia di replica che risulti al contempo morfologica ed estrattiva ed analizzabile ad elevato ingrandimento con il microscopio elettronico a scansione, in grado di permettere lo studio dell'evoluzione dei precipitati e della submicrostruttura durante l'esercizio.

2. Metodo

Sulla base del principio dell'estrazione del particolato con il metodo del tape lift per analisi al microscopio elettronico secondo ASTM E1216/16 [2], esteso però anche alle particelle nanometriche, in associazione all'idea del calco morfologico su matrice metallica come ipotizzata da Eli Baer Roth [3], è stata sviluppata la "metalloreplica". Per la preparazione di una metalloreplica viene selezionato un metallo a bassa durezza, elevata duttilità (es: oro, piombo, rame, indio, stagno), e soprattutto con composizione chimica semplice (metallo puro) e diversa da quella delle particelle da esaminare. Il metallo così scelto è poi opportunamente preparato in modo da diventare un supporto piano, lucido ed esente da contaminazioni.

La zona d'esame del componente da indagare, ca 50 x 50 mm, deve essere lucidata e indi essere sottoposta ad attacco chimico come per una replica morfologica tradizionale. Il supporto metallico lucido è applicato con una pressione controllata sulla zona d'esame della durata di 2-3 secondi mediante un apparecchio portatile (Figura 1) il cui componente essenziale è un piccolo pistone pneumatico. Il campione così prodotto può essere analizzato al microscopio elettronico a scansione corredato con EDX ed eventuali altre tecniche analitiche.

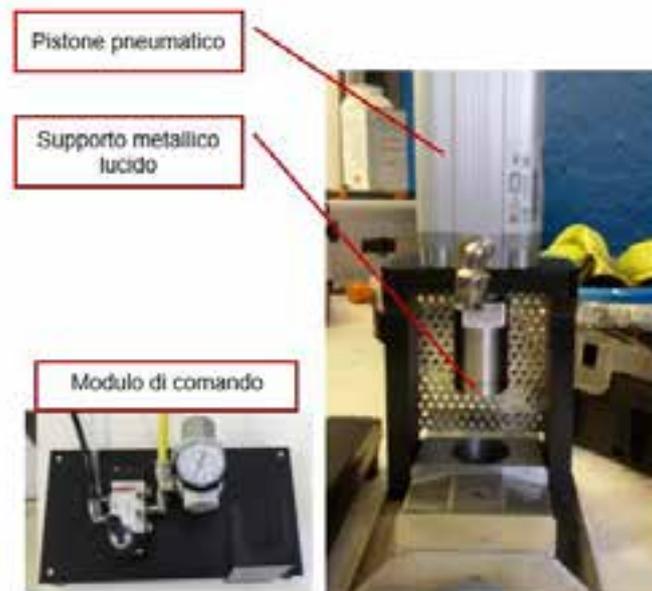


Figura 1. Preparazione della metalloreplica [4]

Per ciascun materiale da esaminare deve essere definito il corretto tempo d'attacco per scavare la matrice esaltando la morfologia della microstruttura e per lasciare libere le particelle per l'estrazione. La pressione di applicazione deve essere mantenuta tra 6 e 7 bar come dimostrano alcuni test sintetizzati in Tavola 1.

A pressioni inferiori infatti non vengono cancellate le morfologie del metallo utilizzato come supporto per la replica, immagine a destra, mentre a pressioni superiori ai valori indicati si

potrebbero verificare locali fenomeni di saldatura con il substrato della zona d'esame, immagine a sinistra.

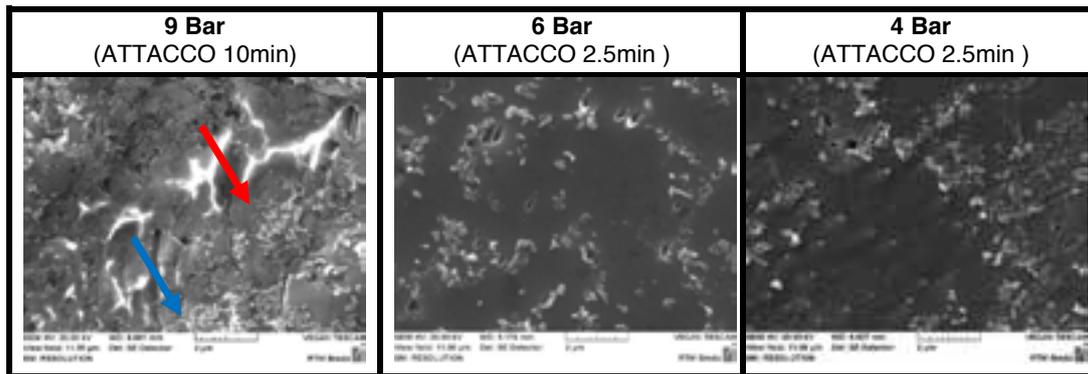


Tavola 1. Effetti della pressione di prova

3. La metalloreplica a confronto con la replica estrattiva tradizionale

Confrontando una replica estrattiva tradizionale in resina o acetato con una metalloreplica al microscopio elettronico a scansione,

Figura 2 si rileva quanto segue:

- la metalloreplica esegue un calco morfologico perfetto fino alla nanoscala mentre la replica estrattiva tradizionale in acetato o resina non mostra dettagli morfologici e topografici ad elevato ingrandimento.
- La replica estrattiva tradizionale in acetato o resina a causa della scarsa conducibilità non permette la nitida osservazione al SEM a sorgente di tungsteno, le particelle più piccole non sono sempre visibili singolarmente con buona definizione dei contrasti. La replica estrattiva tradizionale è analizzabile al TEM previa dissoluzione dell'acetato o resina, isolando le particelle su supporto per TEM, perdendone la posizione reciproca originale.
- La metalloreplica può essere analizzata al SEM con sorgente a tungsteno fino a 500000x permettendo di osservare nitidamente ed analizzare con EDX le singole particelle fino a grandezze di 10-15 nm senza interferenze con la matrice metallica selezionata o necessità di metallizzazione del campione.

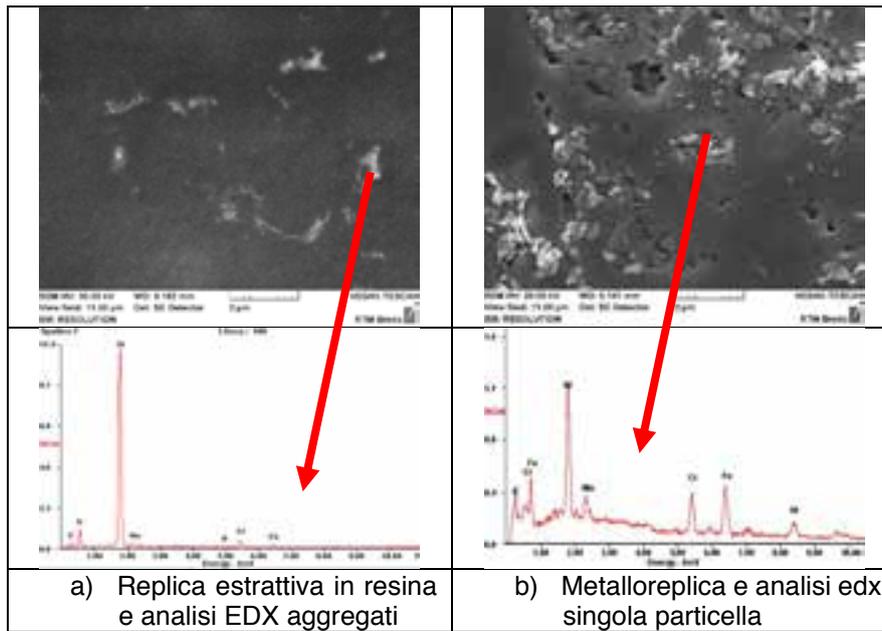


Figura 2. Confronto di una replica estrattiva in resina con una metalloreplica al microscopio elettronico a scansione

4. Metodi di caratterizzazione della metalloreplica e primi risultati di valutazione di esercizio: esempio di campioni in grado 92

Nei paragrafi che seguono si riportano i primi risultati comparativi dello studio di metallorepliche effettuate su campioni in differenti condizioni di esercizio. Sono riportati i risultati di tutte le tecniche di caratterizzazione eseguite, prendendo come esempio i campioni di grado 92 riportati nella seguente tabella.

Materiale	Nome campione	Sforzo (MPa)	Temperatura (°C)	Tempo a rottura / interruzione (h)	Fine prova
Grado 92	X0	50	600	>30000	Interruzione
	B01	50	600	>30000	Interruzione + rottura
		87	640	12000	

Tabella 1. Condizioni di test dei campioni degli esempi riportati nei paragrafi seguenti.

4.1 Caratterizzazione della microstruttura

Tavola 2 e Tavola 3 riportano il collage di 6 immagini adiacenti, acquisite al microscopio elettronico a due differenti ingrandimenti dei campioni X0 e B01 a confronto.

Le tavole mostrano che sono state estratti i precipitati di tutte le dimensioni e che questi sono singolarmente visibili e analizzabili nel dettaglio grazie all'elevata risoluzione possibile con il metodo utilizzato; si possono quindi osservare distintamente particelle fino a 10-20nm. I precipitati vengono estratti ma mantengono la loro posizione reciproca originale. Si osserva quindi l'originale allineamento dei precipitati che definiscono i bordi di grano e i precipitati all'interno del grano stesso. In aggiunta è visibile un calco morfologico della topografia dell'acciaio del componente, dopo attacco metallografico.

In aggiunta sono visibili anche i buchi lasciati dai precipitati non estratti, che sono un calco in negativo dei precipitati di un piano sottostante, messi in rilievo dall'attacco chimico ma ancora adesi al metallo e non estraibili. La metalloreplica si conferma quindi come calco morfologico ed estrattivo di tutto il volume di acciaio totalmente o parzialmente aggredito dall'attacco metallografico.

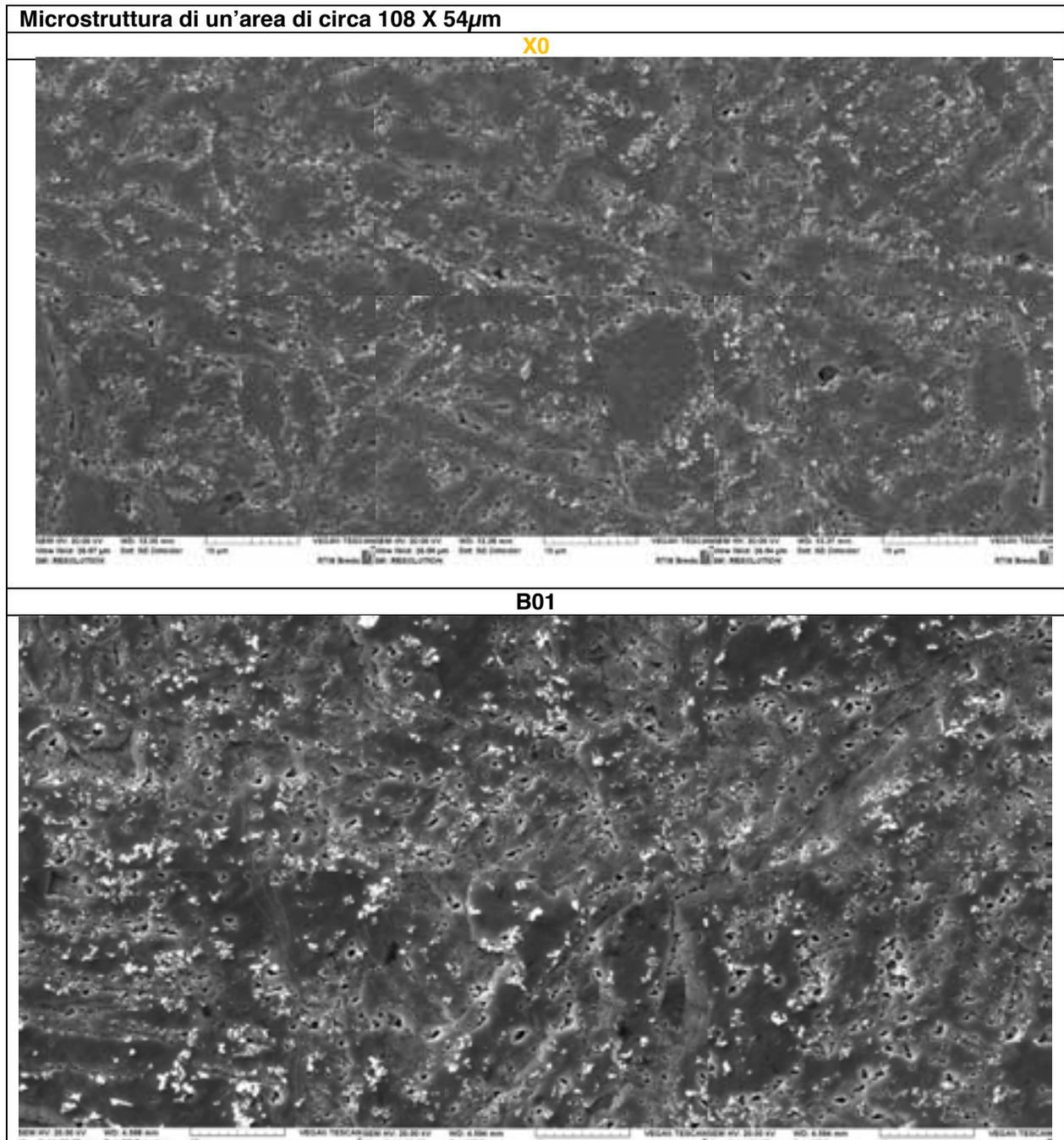


Tavola 2. Microstrutture a confronto di P92 in differenti condizioni di esposizione

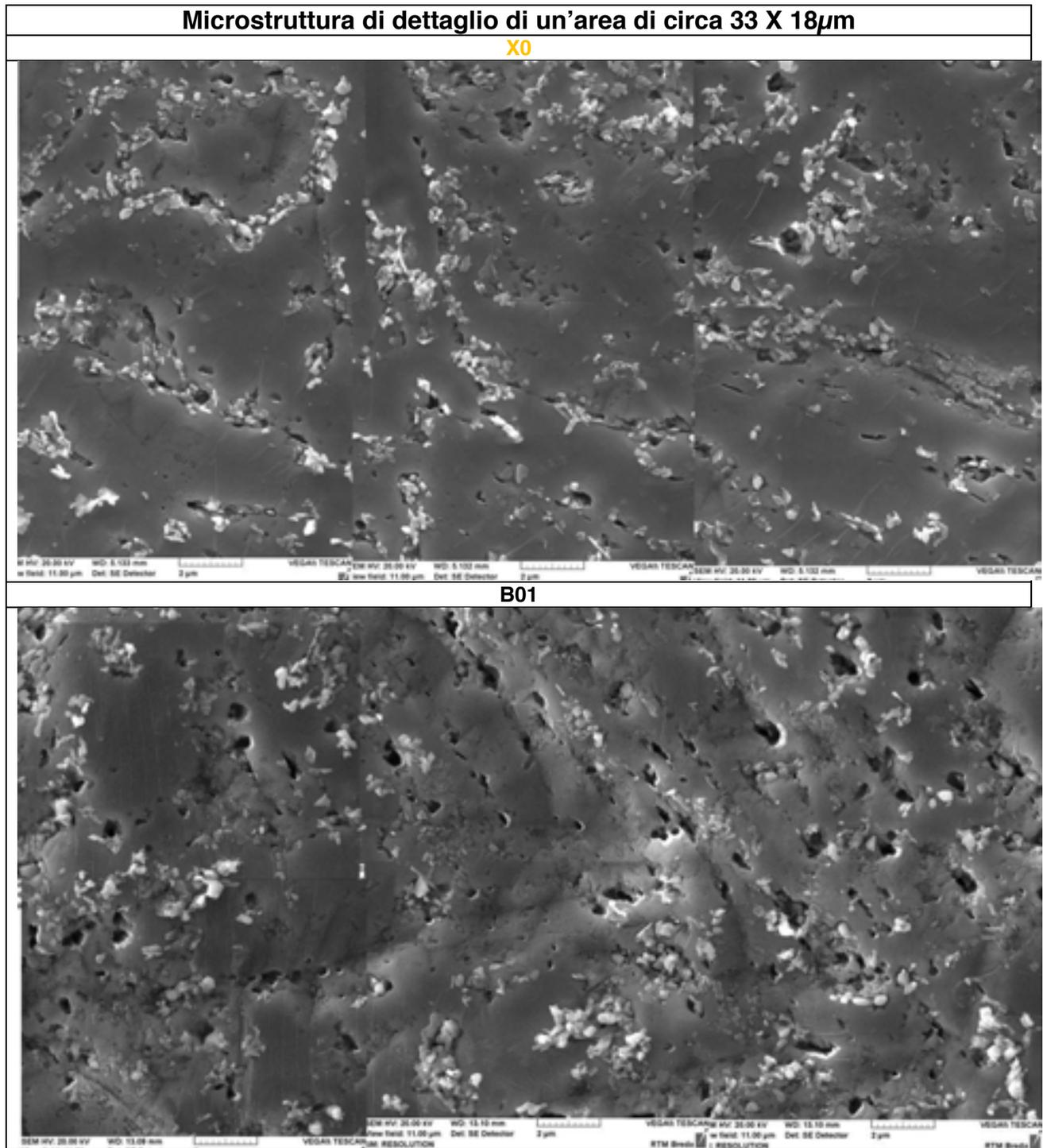


Tavola 3. Microstrutture a confronto di P92 in differenti condizioni di esposizione, dettaglio della precedente.

4.2 Misura dei sottograni

Osservando la topografia e la posizione di particelle nelle tavole microstrutturali è possibile definire un reticolo di grani e sotto grani della microstruttura martensitica del metallo originale. Con tecniche di analisi d'immagine è possibile eseguire una caratterizzazione morfologica e dimensionale dei sottograni.

Le immagini mostrano la ricostruzione dei reticoli dei due campioni di P92 dell'esempio discusso nel presente lavoro, X0 e B01.

La tabella e i grafici mostrano i risultati dei parametri misurati con analisi d'immagine: diametro (μm), area (μm^2), feret (μm), aspect ratio (0-1), lato equivalente(μm).

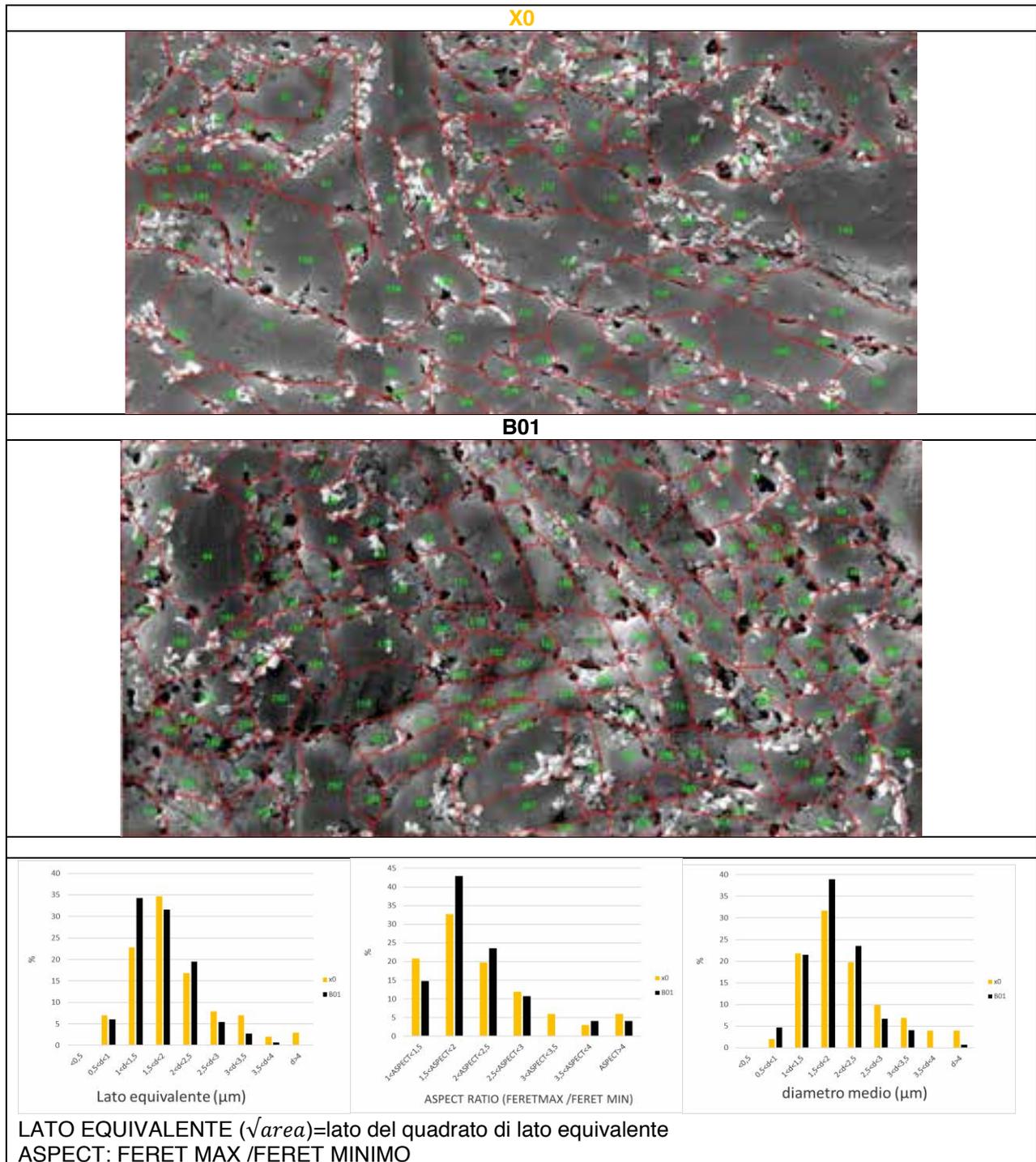


Tavola 4. Definizione dei reticoli e misure dei sotto grani su tavole microstrutturali

Dal confronto tra i campioni si può osservare che l'aumento della sollecitazione dovuto alla seconda prova di creep determina sul materiale iniziale X0 una diminuzione della dimensione dei sottograni, le classi con dimensioni relativamente più grossolane scompaiono e aumenta la % dei grani delle classi medio fini $<2,5\mu\text{m}$. Questo risultato non è in contrasto con l'affermazione che i sottograni crescano con l'aumentare della durata di esposizione a creep [5], perché le due condizioni esaminate si riferiscono sì a due durate diverse ma anche a sforzi diversi susseguenti. Infatti la dimensione media dei sottograni è minore se lo sforzo è più elevato [5]. Nel presente caso, esponendo la struttura a sottograni grossolani creatasi dopo 30000h a 50MPa a 87MPa, la deformazione ha ridotto i sottograni per essere "stazionaria" alla nuova sollecitazione.

4.3 Misura delle particelle

Scegliendo un ingrandimento opportuno in cui le particelle sono visibili distintamente e in numero statisticamente significativo è possibile sulle immagini isolare le singole particelle ed eseguirne un'analisi dimensionale mediante tecniche di analisi d'immagine, v. esempio in Tavola 5. Dall'analisi dei risultati si osserva che il creep determina l'ingrossamento delle particelle con l'evidente scomparsa della classe dimensionale più fine $d < 50\text{nm}$ e conseguente aumento delle frazioni più grossolane, aumenta infatti la percentuale delle classi tra 200 e 250nm, tra 300 e 350nm e $>$ di 400nm.

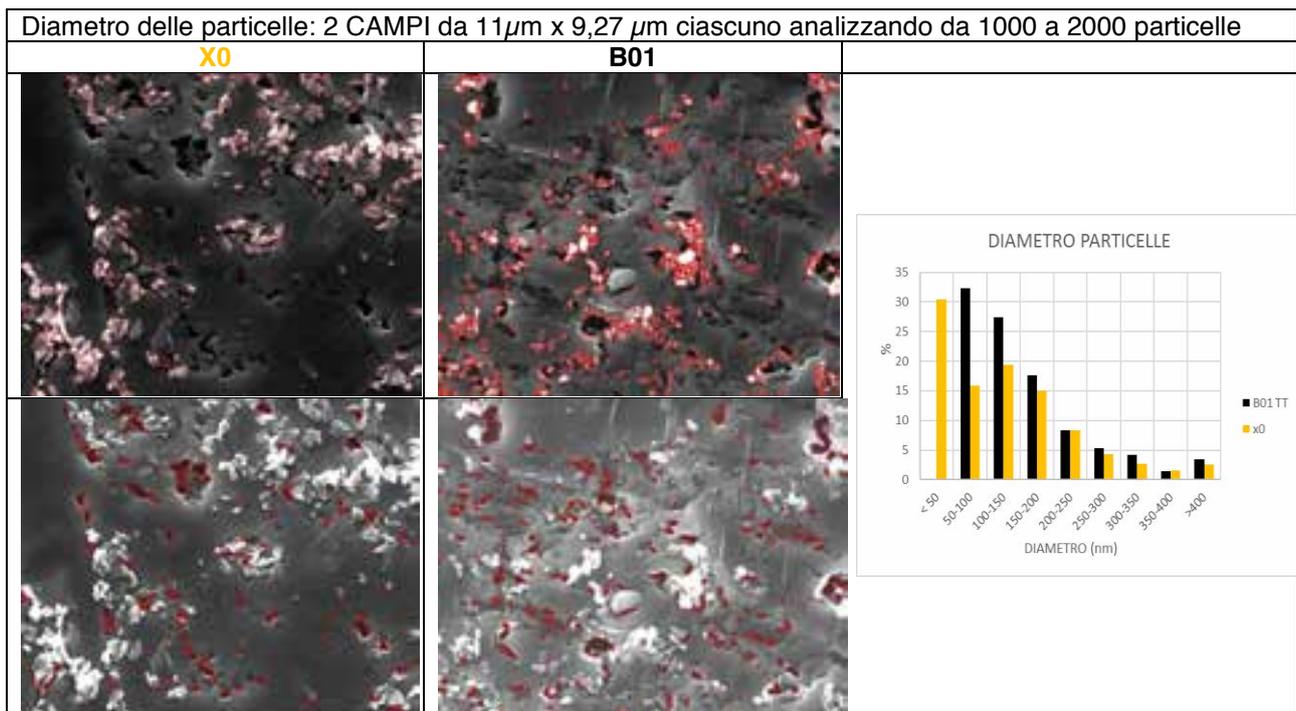


Tavola 5. Misura dei diametri delle particelle in differenti condizioni di esposizione.

4.4 Analisi della composizione chimica media delle particelle estratte

Le metallorepliche eseguite con il metodo soprariportato isolano e separano le particelle dalla matrice originale, posizionandole su una nuova matrice metallica chimicamente diversa dalla composizione delle particelle stesse. Grazie all'elevata conducibilità elettrica del campione così prodotto, è possibile identificare in modo univoco la composizione chimica di dettaglio, anche delle particelle più piccole 10-20nm, mediante microanalisi EDX, senza influenza della matrice circostante, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**



Tavola 6. Analisi EDX di particelle nanometriche estratte con la metalloreplica.

Analizzando intere aree della metalloreplica tramite WDS si ottiene l'analisi chimica media di tutte le particelle presenti nel campionamento senza distinzione di classi dimensionali. Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati risultati di queste analisi confrontando i campioni X0 e B01.

Le analisi chimiche in WDS sono state eseguite previa standardizzazione e calibrazione su elementi metallici puri elemento per elemento. In tabella sono riportati i risultati medi di 15 zone del campione di $20\mu\text{m}$ ciascuna che quindi rappresentano l'intera campionatura. La tecnica analitica ha la capacità di rilevare fino a di 100ppm dell'elemento in esame.

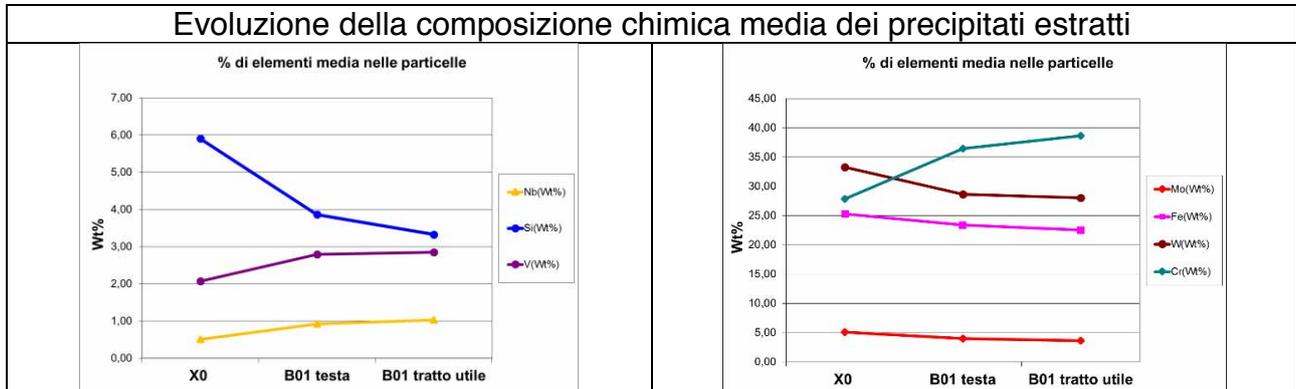


Tavola 7. Evoluzione della composizione chimica media dei precipitati estratti, analisi WDS su P92.

Dall'esame dei dati della Tavola 7 si può concludere che l'incremento di temperatura e sollecitazione della prova che ha portato a rottura determina una variazione della composizione chimica media delle particelle. Si rileva infatti un aumento di niobio [Nb], cromo [Cr] e vanadio [V] e una diminuzione del silicio [Si], tungsteno [W], ferro [Fe] e molibdeno [Mo].

Queste variazioni sono legate alla concomitante azione di due fattori al variare delle condizioni di esposizione:

- variazioni delle abbondanze relative delle particelle che si evolvono come illustrato sopra
- cambiamenti delle composizioni chimiche delle particelle stesse per differente distribuzione degli elementi tra particelle e matrice.

5. Sintesi degli effetti dell'esposizione a creep su campioni di P92 identificati con l'utilizzo della metalloreplica.

A seguito delle caratterizzazioni delle repliche eseguite su differenti condizioni di prova è possibile concludere quanto segue:

- 1) L'aumentata sollecitazione comporta una diminuzione del diametro e del lato equivalente dei grani e sotto grani; inoltre aumenta la percentuale dei grani delle classi medio fini $d < 2,5\mu\text{m}$, contrastando l'effetto dell'ingrossamento prodotto dalla temperatura.
- 2) L'incremento di temperatura e sollecitazione determina un ingrossamento delle particelle. Tende a scomparire/diminuire la classe dimensionale più fine $< 50\text{nm}$ aumenta la percentuale di particelle nelle classi grossolane a partire dai 200nm .
- 3) Si rileva un cambiamento della composizione chimica media delle particelle legato sia all'evoluzione dimensionale delle particelle come da punto 2) sia ad un'evoluzione della distribuzione degli elementi tra matrice e particella in differenti condizioni di sollecitazione e temperatura.
- 4) L'analisi statistica di tanti stati di esposizione permetterà di definire i valori indice più critici dell'evoluzione del danno da creep per lo studio della vita residua dei componenti in acciaio tipo grado 91 e 92.
- 5) Il semplice utilizzo in campo della metalloreplica permetterà così di valutare lo stadio evolutivo e di supportare la stima della vita residua i componenti in esercizio prodotti in acciaio al 9-12%Cr soggetti a creep.

6. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del bando istituito dal Decreto 20 giugno 2013 a valere sul Fondo per la crescita sostenibile, per la realizzazione del progetto di ricerca e sviluppo concernente «Ricerca e sviluppo di un nuova tecnica per la previsione del comportamento meccanico e l'ulteriore esercibilità di materiali metallici da applicare in campo industriale tramite previsione microstrutturale», identificativo 130, CUP: B78C15000150008.

7. Bibliografia

- [1] R. Chen, Microstructural Degradation during High Temperature creep of Mod.9Cr-1Mo Steel and Its Application to Life Assessment, in Tohoku University, 2011.
- [2] A. E1216, Standard Practice for Sampling for Particulate Contamination by Tape Lift, 2016.
- [3] E. B. Roth, Indium Replica for Metallurgical Examination, U.S. Atomic Energy Commission, Technical Information Branch, 1949.
- [4] A. Staffolani, D. Benini, A. Corsi, A. Salvo, G. Merckling, Ricerca e sviluppo di un nuova tecnica per la previsione del comportamento meccanico e l'ulteriore esercibilità di materiali metallici da applicare in campo industriale tramite previsione microstrutturale, progetto di ricerca finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del bando istituito dal Decreto 20 giugno 2013, identificativo 130, CUP: B78C15000150008, 2017.
- [5] L. Casiraghi, G. Merckling, Ipotesi di correlazione quantitativa di risultati microstrutturali con la durata di esposizione per acciai al 9%Cr, SAFAP, 2018.

Effetti della modellazione del creep primario e secondario sulla vita residua dei componenti a pressione calcolata secondo API 579-1

L. Scano¹, L. Esposito²

¹ Studio Scano Associato

² Università degli Studi di Napoli

1. Sommario

La scelta dell'equazione costitutiva da utilizzare nell'analisi a creep di dettaglio di componenti in pressione è fondamentale ai fini di una corretta stima della loro vita residua. Analisi Level 3 secondo lo standard API 579-1 richiedono infatti esplicitamente che il campo di sforzo, nel tempo, sia calcolato sulla base di una analisi FEM inelastica atta a contemplare il comportamento del materiale in regime di creep. A tal fine, è prassi comune utilizzare la legge di potenza di Norton per la modellazione del solo creep secondario, considerando virtualmente ininfluenza sia il regime primario che quello diffusivo nel basso campo di sforzo. Nel presente studio tale ipotesi semplificativa è stata verificata, per un case-study, confrontando i risultati dell'analisi, in termini di vita residua, con quelli forniti da approcci di maggior dettaglio atti a considerare sia il regime di creep primario che il contributo della diffusione a quello secondario. La vita residua a creep secondo API 579-1 e utilizzando metodiche tipo ductility-exhaustion è stata determinata per una coppia di componenti del collettore principale di un generatore di vapore a recupero fabbricato in ASTM A335 P22, considerando i diversi legami costitutivi e valutandone i diversi impatti sul tempo a rottura. Quest'ultimo è stato determinato utilizzando sia la teoria di Larson-Miller che la formulazione API 579-1 del metodo Omega.

2. Nomenclatura

A	Coefficiente di creep secondario secondo power-law	Pedici:
B	Coefficiente di creep secondario secondo legge di Garofolo	· _i Passo temporale
C	Costante di Larson Miller	· _{PL/HS} Formulazioni PL e HS
D	Danno da creep	
HF	Funzione di hardening	
K	Coefficienti del materiale per il creep primario	
L	Vita residua a creep (h)	
LMP	Parametro di Larson Miller	
n	Esponente di creep secondario	
P ₁	Funzione volume di attivazione per il creep primario	
P ₂	Funzione di decadimento per il creep primario	
Q	Energia di attivazione (kJ/mol)	
R	Costante dei gas (8.314 J/molK)	
S _e	Stress effettivo inclusivo di triassialità (ksi)	
S _s	Norma della terna principale di sforzo (ksi)	
T	Temperatura di esercizio (°C, °F)	
T*	Temperatura assoluta (K)	
t	Tempo in esercizio (h)	
ε _f	Duttilità a creep	
ε _c	Deformazione plastica indotta dal creep	
ε _s	Deformazione plastica indotta dal creep secondario	
ε̇ _c	Minimo strain rate secondario (1/h)	
ε̇ _{c0}	Minimo strain rate secondario al termine del primario (1/h)	
ε̇ _{ps}	Minimo strain rate primario e secondario (1/h)	
ε̇ _s	Minimo strain rate Omega (1/h)	
σ	Stress (generico, MPa)	
Ω _μ	Parametro Omega	

3. Introduzione

I componenti a pressione eserciti a temperature omologhe superiori a 0.4-0.5 sono soggetti al meccanismo di danno noto come “scorrimento viscoso” o “creep” [1][2]. Tale fenomeno è insidioso e estremamente complesso e la valutazione del danno ad esso associato può essere molto impegnativa per gli analisti operanti nell’ambito dell’integrità strutturale e delle valutazioni Fitness-For-Service.

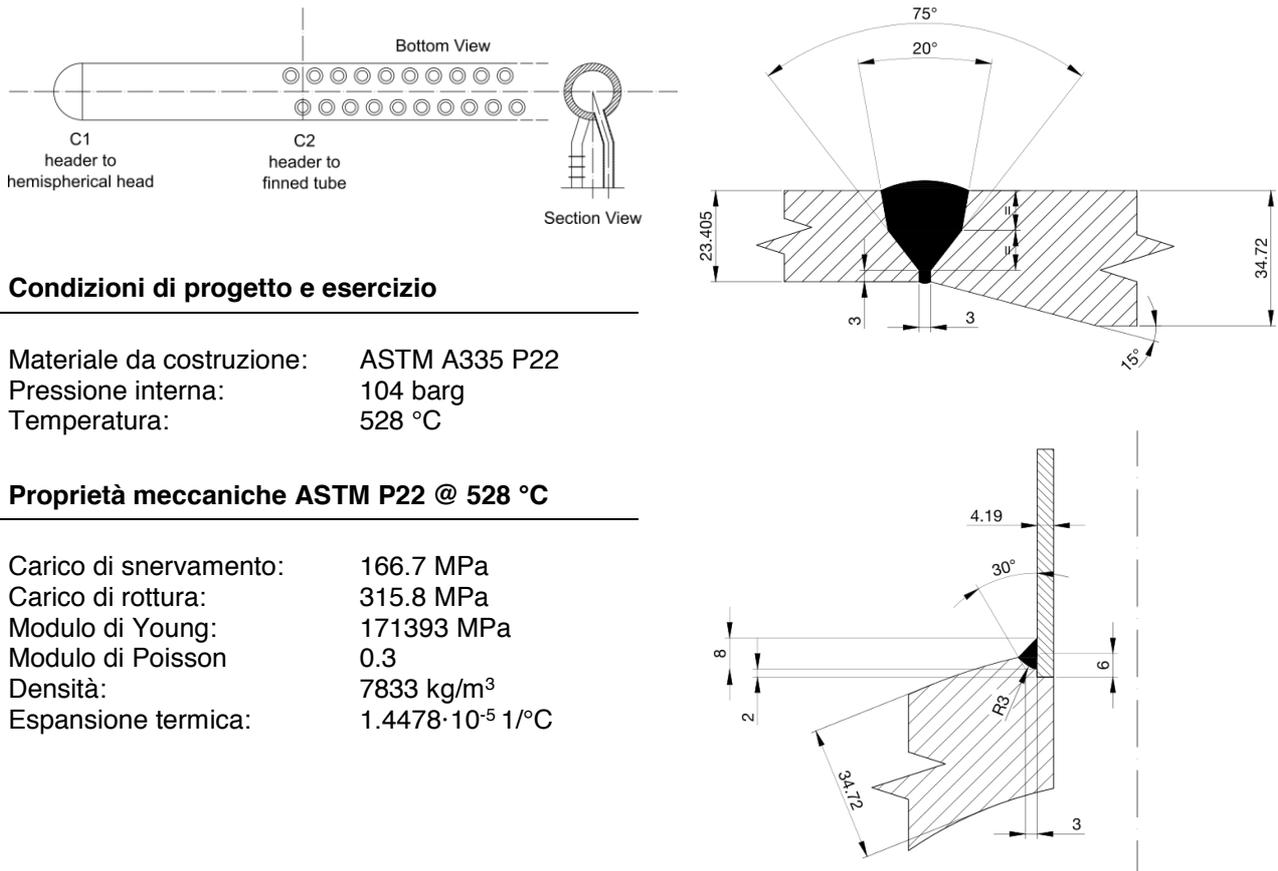
Il creep è un processo termicamente attivato che induce un progressivo e irreversibile accumulo di deformazione plastica nei componenti meccanici fabbricati con materiali metallici (acciai e loro leghe) e sottoposti a un regime di sforzo a alta temperatura. La descrizione classica del fenomeno prevede lo sviluppo di tre fasi temporali distinte: la prima, detta creep primario, è caratterizzata dagli effetti di hardening indotti dall’impilamento delle dislocazioni all’interno del reticolo cristallino metallico. Tale fase giunge rapidamente a conclusione a causa dell’innescarsi dei meccanismi di softening termico (“recovery” e “recrystallization”) che inducono un regime di strain-rate costante noto come creep secondario o “steady-state”. Nel caso delle applicazioni a pressione, i componenti trascorrono la maggior parte della propria vita a creep proprio in tale fase. Quando il danneggiamento appare manifesto con la comparsa di vuoti, micro/macro-cricche e infragilimento del materiale, si parla di creep terziario, caratterizzato da elevati strain-rate che portano rapidamente a rottura il componente [3].

Dal punto di vista microstrutturale sono due i meccanismi responsabili dello scorrimento attivi in regime di creep: il primo, ad attivazione termica, è la diffusione, caratterizzata dalla formazione e dalla migrazione di vacanze all’interno del reticolo cristallino; il secondo, che caratterizza macroscopicamente la deformazione plastica, è il moto delle dislocazioni favorito dalla diffusione (“dislocation glide+climb”). I due meccanismi hanno intervalli di attivazione differenti descritti dalle note mappe di Ashby [4]: a bassi sforzi la diffusione è dominante, ad alta e bassa temperatura (Coble e Nabarro-Herring creep); a sforzi medio-alti, invece, il creep è guidato dai processi dislocativi descritti fenomenologicamente, per il regime secondario, dalla famosa legge di potenza di Norton-Bailey [5][6].

La vita residua a creep di componenti in pressione è tipicamente valutata tramite analisi di integrità e/o Fitness-For-Service in accordo a diversi codici, come la norma italiana UNI/TS 11325-4 [7] o lo standard americano API 579-1 [8]. Essa viene calcolata, noti i dati a rottura del materiale, attraverso metodiche tipo Larson-Miller Parameter (LMP) o Omega Method, in funzione dello stato di sforzo nel componente. L’andamento nel tempo di quest’ultimo è dunque cruciale ai fini del calcolo e viene di norma determinato attraverso analisi FEM inelastiche nel tempo (ad esempio API 579-1 Sezione 10 Level 3 assessment), inclusive della legge di creep del materiale (legame costitutivo). Storicamente, la determinazione di tale legge è stata limitata al solo caso del creep secondario in regime di creep “dislocation-controlled” (sforzi medio-alti), utilizzando la power-law di Norton, di immediata e semplice applicabilità, e virtualmente trascurando tanto gli effetti del creep primario che quelli indotti dal regime diffusivo (“diffusion-controlled”). Nel presente lavoro tale ipotesi semplificativa è stata valutata per un case-study (dettagli saldati di un collettore HRSG in acciaio basso-legato tipo ASTM A335 P22). Il ruolo della diffusione è stato valutato calcolando la vita residua a creep secondo il metodo stress-based dell’API 579-1 e due approcci strain-based (Monkman-Grant e tipo “ductility exhaustion”). In tale analisi è stato considerato il contributo del solo creep secondario, includendo, o meno, il range diffusivo e confrontando i risultati ottenuti. Successivamente è stato incluso anche il contributo del creep primario, calcolando i tempi a rottura attraverso il codice API 579-1 e utilizzando tanto il metodo LMP che quello Omega.

4. Case-study e leggi di creep del materiale

L'analisi è stata diretta a due componenti saldati, indicati con C1 e C2, facenti parte del collettore principale DN250 di un generatore di vapore a recupero HRSG fabbricato in acciaio basso-legato tipo ASTM A335 P22 e già oggetto di studio da parte di uno degli autori [9][10]. C1 è la saldatura di composizione tra il collettore e il fondo emisferico, mentre C2 è quella relativa al tronchetto del fascio alettato DN50. I dati di progetto e esercizio dei componenti sono indicati in Figura 1.



Condizioni di progetto e esercizio

Materiale da costruzione: ASTM A335 P22
 Pressione interna: 104 barg
 Temperatura: 528 °C

Proprietà meccaniche ASTM P22 @ 528 °C

Carico di snervamento: 166.7 MPa
 Carico di rottura: 315.8 MPa
 Modulo di Young: 171393 MPa
 Modulo di Poisson: 0.3
 Densità: 7833 kg/m³
 Espansione termica: 1.4478 · 10⁻⁵ 1/°C

Figura 1. Componenti saldati oggetto di valutazione: schemi costruttivi e dati di progetto

I dati a creep del materiale per regime secondario sono stati ottenuti tramite il database pubblico NIMS [11] e sono stati interpolati tramite power-law di Norton in modo da ottenere le curve costitutive caratteristiche alle varie temperature (Figura 2):

$$\dot{\epsilon}_s = A_{PL} \cdot e^{-\frac{Q}{RT^*}} \cdot \sigma^{n_{PL}} \tag{1}$$

Regime di creep	Diffusion-controlled	Dislocation-controlled
A _{PL}	4.17 · 10 ⁴	7.20 · 10 ⁶
Q	249	535
n _{PL}	2.14	10.70

Tabella 1. costanti della legge di Norton per il creep secondario nel P22

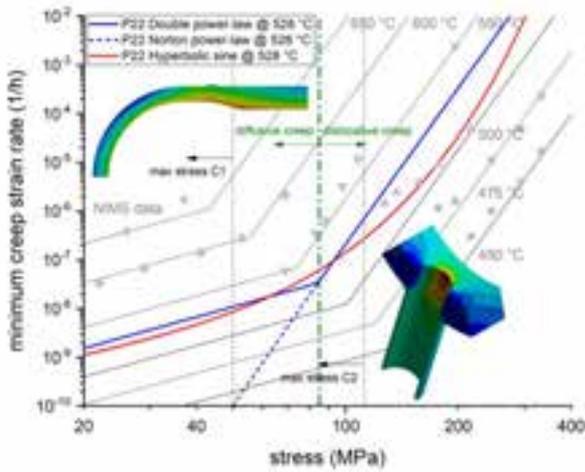


Figura 2. Curve di creep per l'acciaio basso-legato ASTM A335 P22 (NIMS data)

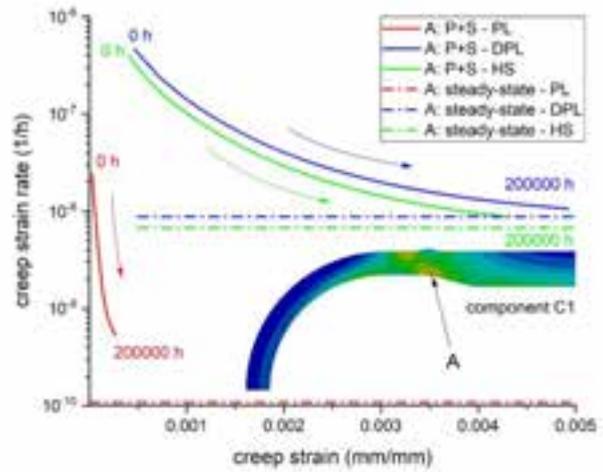


Figura 3. Modellazione del creep primario tramite funzione saturante (componente C1)

Le power-law a 528 °C sono state quindi calcolate per estrapolazione, ottenendo i coefficienti di Norton riportati in Tabella 1 per i regimi diffusivo e dislocativo (spezzata blu di Figura 2); essi risultano in linea con i valori riportati in letteratura per il grado 22 [12]. I dati ottenuti alla temperatura di esercizio sono stati infine nuovamente interpolati tramite legge seno-iperbolico di Garofolo (curva rossa di Figura 2):

$$\dot{\epsilon}_s = A_{HS} \cdot (\sinh(B \cdot \sigma))^{n_{HS}} \tag{2}$$

dove $A_{HS} = 1.66 \cdot 10^{-9}$, $B = 3.56$ e $n_{HS} = 1.55$.

Il creep primario è stato invece modellato in maniera indiretta, non essendo disponibili dati sperimentali completi all'interno del database NIMS. A differenza del regime secondario, caratterizzato da lunghi tempi di esposizione, il creep primario ha tipicamente durata estremamente ridotta ed è governato dagli effetti di hardening dati dallo sbilanciamento tra l'accumulo di dislocazioni e i processi di softening. Questo effetto macroscopico è stato rappresentato attraverso una funzione saturante HF (Figura 3):

$$HF(\sigma, \epsilon_c, T^*) = \exp\left(\frac{P_1 \cdot \sigma \cdot e^{-\frac{\epsilon_c}{P_2}}}{RT^*}\right) \tag{3}$$

$$P_1 = \frac{K_a}{1 + e^{K_b(\sigma - K_c)}} \quad P_2 = \frac{1 + e^{K_e(\sigma - K_f)}}{K_d} \tag{4}$$

K_a	K_b	K_c	K_d	K_e	K_f
2000	0.0221	30.9	1700	0.01715	28

Tabella 2. costanti della funzione di hardening HF

I valori delle costanti K che definiscono le funzioni del volume di attivazione (P_1) e di decadimento (P_2) sono stati determinati sulla base di dati sperimentali disponibili in

letteratura [13][14] scalando parzialmente i dati del primario identificati per il grado 91 da uno degli autori [15].

Le leggi di creep inclusive del primario sono di conseguenza determinabili pesando le Equazioni (1) e (2) con la funzione saturante HF (Figura 3):

$$\dot{\varepsilon}_{ps} = HF \cdot A_{PL} \cdot e^{-\frac{Q}{RT^*}} \cdot \sigma^{n_{PL}} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ps} = HF \cdot A_{HS} \cdot (\sinh(B \cdot \sigma))^{n_{HS}} \quad (6)$$

Ai fini del presente lavoro, sono state prese in esame tre equazioni costitutive per il creep secondario: la classica power-law di Norton (PL) inclusiva del solo contributo dislocativo (linea tratteggiata blu in Figura 2), una doppia power-law (DPL) comprendente anche il regime diffusivo (linea spezzata blu in Figura 2) e la legge di Garofolo (HS, curva rossa in Figura 2). Il contributo del primario è stato quindi introdotto attraverso la funzione HF.

5. Vita residua e danno da creep

Il danno da creep è stato calcolato utilizzando in prima battuta le metodologie stress-based riportate alla Sezione 10 del codice API 579-1, ovvero l'approccio basato sul parametro di Larson-Miller (LMP) e il metodo Omega. In entrambi i casi, il danno è definibile come sommatoria delle time-fraction della vita residua L_i ad ogni intervallo temporale:

$$D = \sum_i \frac{t_i}{L_i} \quad (7)$$

Il metodo di Larson-Miller prevede che L sia funzione di LMP, calcolato come polinomiale dello stress effettivo S_e , inclusivo degli effetti di triassialità, attraverso i dati sperimentali a rottura riportati dalla norma:

$$L = 10^{\left(\frac{1000 \cdot LMP(S_e)}{T+460}\right) - C} \quad (8)$$

Il metodo Omega postula invece che il creep primario sia trascurabile, che il secondario sia inesistente e che tutta la vita del componente sia trascorsa in una fase di terziario avente uno strain-rate accelerato secondo la relazione [8][16]:

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \dot{\varepsilon}_{c0} \cdot e^{\Omega_m \varepsilon_c} = \frac{\dot{\varepsilon}_{c0}}{1 - \Omega_m \cdot \dot{\varepsilon}_{c0} t} \quad (9)$$

Dove $\dot{\varepsilon}_{c0}$ è lo strain-rate iniziale al termine del creep primario, calcolabile su base polinomiale dello stress equivalente in funzione dei dati sperimentali a rottura forniti dal codice. Il parametro Ω_m include invece gli effetti di triassialità e definisce l'evoluzione dello strain-rate nel tempo. Il tempo a rottura secondo metodo Omega risulta:

$$L = \frac{1}{\Omega_m \cdot \dot{\varepsilon}_{c0}} \quad (10)$$

Si rimanda alla Sezione 10 dello standard API 579-1 per la definizione esaustiva di tutte le equazioni costituenti il framework teorico tanto dell'approccio di Larson-Miller che del metodo Omega, la cui presentazione di dettaglio esula dalle finalità della presente memoria.

Il danno da creep è stato valutato anche tramite due approcci strain-based utilizzando la teoria di Monkman-Grant e un criterio tipo “ductility-exhaustion”. Per acciai 2¼Cr1Mo, Viswanathan [17] riporta una relazione di Monkman-Grant tipo:

$$\dot{\varepsilon}_s \cdot L = 4.4 \pm 1.2 \quad (11)$$

che permette di calcolare direttamente il danno D in funzione dello strain-rate attraverso l'Equazione (7). Infine, nota la duttilità del materiale ε_f , reperibile da database NIMS, valutata alla temperatura di esercizio e pesata da un fattore di triassialità [18], è stato definito un parametro di danno basato sulla seguente strain-fraction (“ductility-exhaustion”):

$$D = \sum_i \frac{\varepsilon_{s,i}}{\varepsilon_{f,i}} \quad (12)$$

6. Modelli e analisi FEM

Le analisi a creep, di tipo inelastico nel dominio del tempo, sono state condotte attraverso modelli FEM utilizzando il software commerciale ANSYS Mechanical. Sono state realizzate delle custom user-subroutines che hanno permesso di introdurre nell'analisi i modelli di creep precedentemente descritti e di calcolare tutti i parametri, incluso il danno D , ad ogni passo di integrazione. Il componente C1 è stato modellato con elementi assialsimmetrici mentre C2 con sezioni solide (Figura 4).

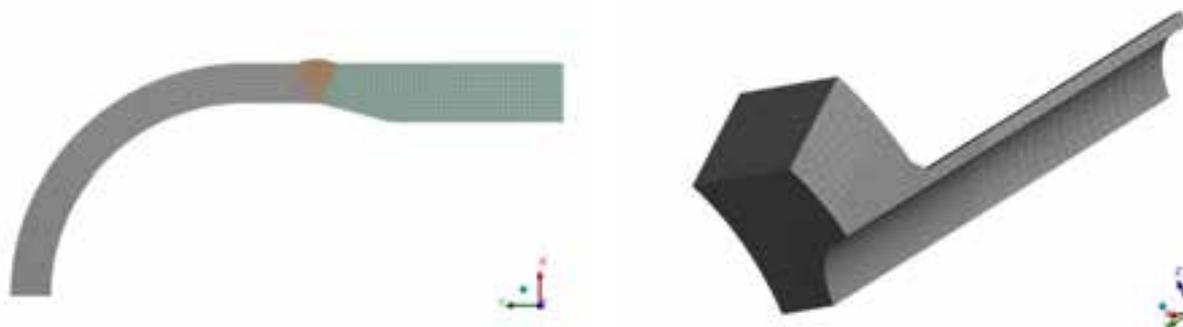


Figura 4. Modelli FEM utilizzati nell'analisi a creep (componente C1 a sinistra e C2 a destra).

La prima analisi è stata volta a valutare il ruolo della modellazione del regime diffusivo ai fini del danno complessivo da creep. In tale fase è stato considerato esclusivamente il creep secondario nelle tre formulazioni descritte (Norton PL, doppia power-law DPL e Garofolo HS). La Figura 5 presenta l'andamento del danno da creep secondo API 579-1/LMP nei due componenti per le tre leggi di creep. Il componente C1 è caratterizzato da un campo di sforzo completamente compreso nel dominio del creep diffusivo (Figura 2); utilizzare un'equazione costitutiva basata sul moto delle dislocazioni porta pertanto a sottostimare lo strain-rate e quindi l'accumulo di deformazione plastica nel componente (Figura 2, linea tratteggiata blu). Tuttavia, se nel componente è presente un intaglio dotato di un forte gradiente di sforzo, la maggiore deformazione plastica condurrà ad un significativo incremento del rilassamento degli sforzi a creep, che si traduce in un danneggiamento inferiore se questo è calcolato su base stress-based come previsto dall'API 579-1. Lontano dagli intagli, dove è attiva la redistribuzione degli sforzi indotta dal creep secondo le note leggi di Bailey [6], il danno invece andrà ad aumentare parallelamente all'accumularsi della

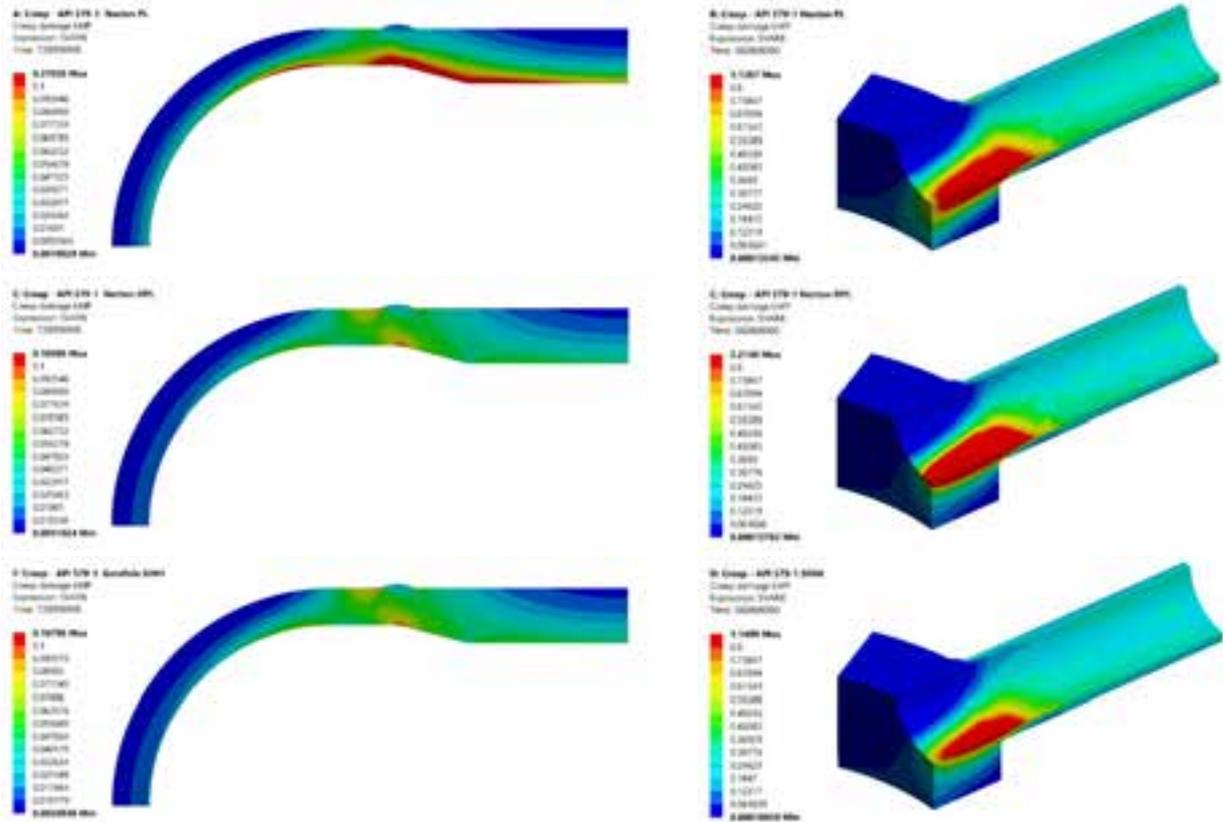


Figura 5. Danno da creep API 579-1/LMP nei componenti C1 e C2 per le tre formulazioni del secondario; dall'alto in basso: PL, DPL, HS.

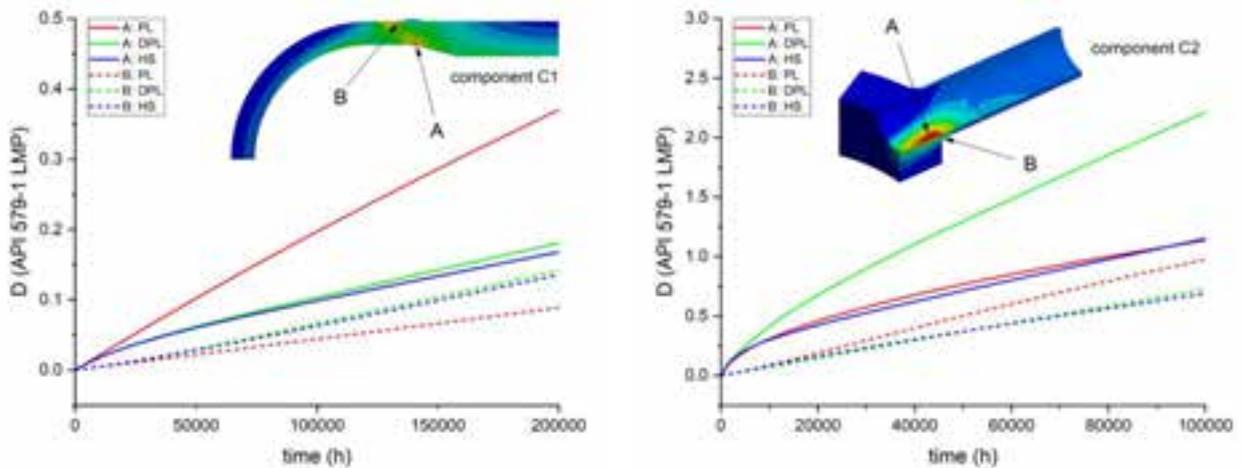


Figura 6. Danno da creep API 579-1/LMP nei componenti C1 e C2 in punti caratteristici.

deformazione plastica. Questo effetto è evidente alla Figura 6: in C1 il punto A (radice della saldatura) è un intaglio geometrico ed è sede del massimo sforzo al tempo 0, il punto B è invece posto alla superficie esterna del collegamento soggetta a redistribuzione degli sforzi in regime di creep. Si nota immediatamente come il danno valutato tramite legge di Norton sia dominante in A rispetto a B (+100% a 200000 ore). In C2 la concentrazione principale è posta al piede della saldatura sul tronchetto (punto B), mentre lo sforzo massimo al tempo 0 si ha alla superficie interna del foro (punto A). Anche in questo caso il danno predetto dalla legge di Norton è superiore in prossimità dell'intaglio (+35% a 100000 ore).

Se il danno è valutato con un approccio strain-based, in ogni punto, l'utilizzo della power-law di Norton è non conservativo a causa del maggior accumulo di deformazione plastica nel range diffusivo. Anche se lo sforzo al tempo 0 pertiene al campo dominato dal moto delle dislocazioni, lo stesso rilassamento è in grado di condurre il sistema verso tale intervallo. A titolo di esempio, in Figura 7 è riportato il rapporto tra il danno, valutato tramite relazione di Monkman-Grant e tramite il criterio tipo ductility exhaustion, con la legge di Norton (PL) e con la doppia power-law (DPL). Si osserva che tale rapporto è praticamente sempre inferiore a 1.

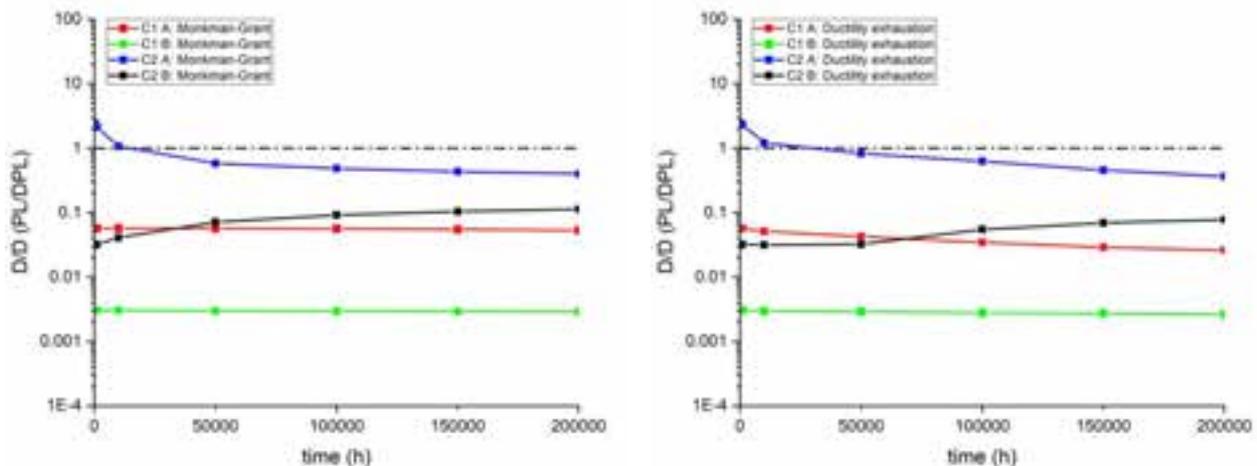


Figura 7. Rapporto tra il danno da creep su base strain-based secondo Norton (PL) e la doppia power-law (DPL).

In una seconda fase dell'analisi è stato valutato il ruolo del creep primario, confrontando i danneggiamenti anche con quelli previsti dal metodo Omega, che esplicitamente non lo considera. L'approccio è stato analogo al precedente, con l'introduzione della funzione di hardening HF nelle tre leggi di creep. La Figura 8 presenta l'andamento del danno da creep secondo API 579-1/LMP nei componenti C1 e C2 con l'introduzione del primario. Un confronto con la Figura 5 permette di verificare come esso tenda a incrementare lo stato di danno in tutti i punti se il secondario è modellato in modo da includere le componenti diffuse (DPL, HS). Se invece esso è incluso tramite legge di Norton il comportamento è opposto in tutti i punti caratterizzati da marcato rilassamento delle tensioni (C1A, C2A/B). La Figura 9 rappresenta tale andamento per i punti scelti a livello dei componenti C1 e C2. Il danno da creep valutato tramite metodo Omega è invece risultato sempre inferiore a quello determinato tramite la teoria di Larson-Miller, per tutte le formulazioni del creep secondario e anche a seguito dell'inclusione di quello primario. Tale evidenza è in linea con quanto riportato da Prager nella prima formulazione del metodo [16]. A titolo di esempio la Figura 10 presenta il rapporto tra il danno secondo Omega e quello secondo LMP per i punti scelti del componente C1.

7. Conclusioni

La valutazione della vita residua a creep di componenti in pressione è un processo critico per l'analisi di integrità e Fitness-For-Service nell'ambito delle alte temperature.

Le metodiche di calcolo implementate in standard come l'API 579-1 dipendono pesantemente dalla modellazione delle leggi di creep e risulta prassi comune utilizzare la semplice legge di Norton, tipica del range "dislocation-controlled", trascurando allo stesso tempo il contributo del creep primario.

Nella presente memoria tale approccio è stato valutato per un case-study e per l'acciaio basso-legato ASTM A335 P22. Tramite analisi FEM inelastica è stato calcolato il danno da creep secondo API 579-1 (metodiche Larson-Miller e Omega) e secondo due approcci strain-based (Monkman-Grant e tipo "ductility exhaustion"), introducendo il creep primario e tre leggi di creep secondario: la classica power-law di Norton (PL, solo regime dislocativo), una doppia power-law (DPL, diffusivo e dislocativo) e la legge seno-iperbolico di Garofolo (HS, diffusivo e dislocativo).

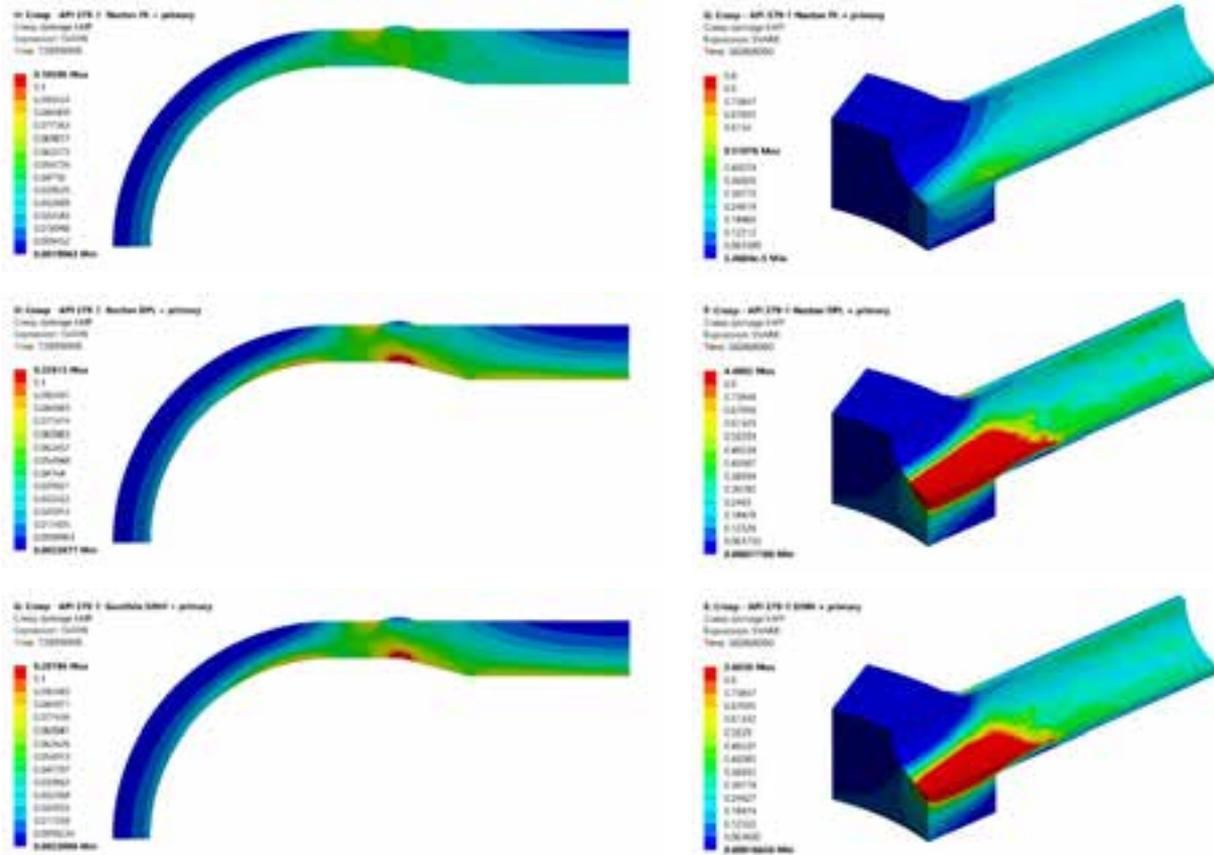


Figura 8. Danno da creep API 579-1/LMP nei componenti C1 e C2 per le tre formulazioni del primario+secondario; dall'alto in basso: PL, DPL, HS.

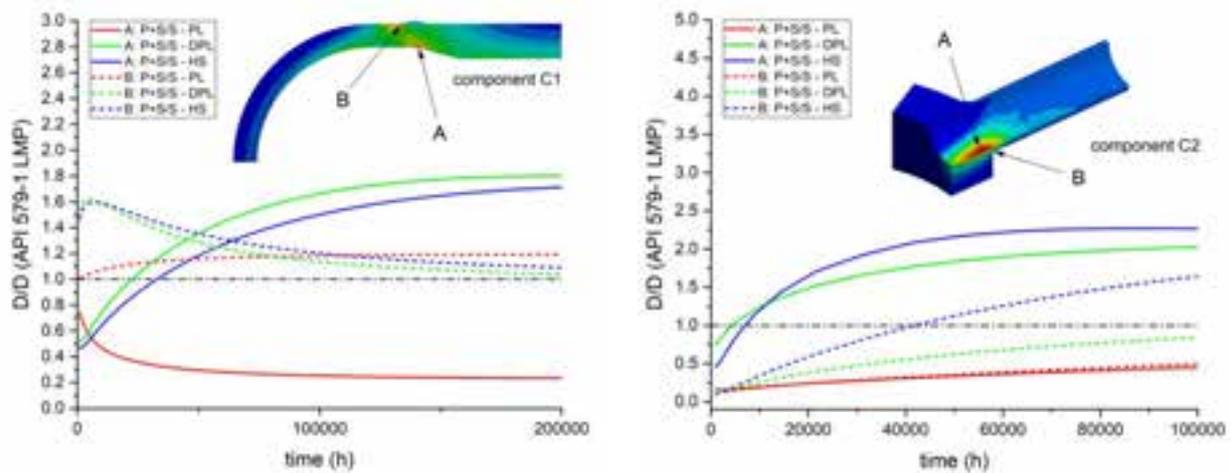


Figura 9. Rapporto tra il danno da creep valutato secondo API 579-1/LMP con inclusione, o meno, del creep primario ai punti scelti dei componenti C1 e C2.

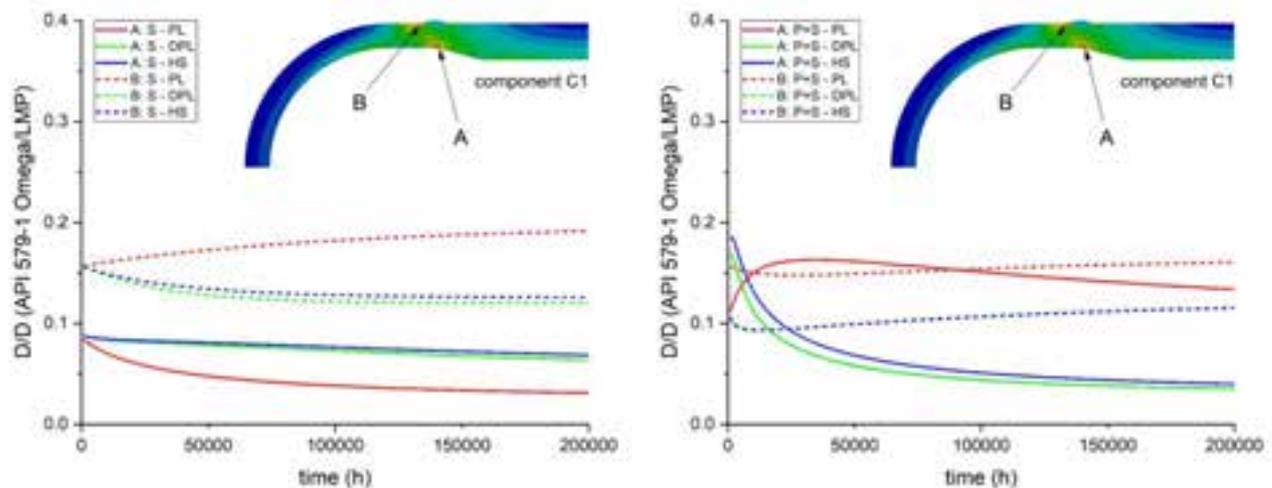


Figura 10. Rapporto tra il danno da creep secondo metodo Omega e LMP nel componente C1 per le tre formulazioni di creep secondario.

Il confronto dei risultati ottenuti ha messo in evidenza come la modellazione del creep secondario tramite legge di Norton sia non conservativa nel range di sforzo dominato dai fenomeni diffusivi, con l'eccezione dei punti di intaglio qualora il danno sia valutato su base stress-based (API 579-1). In tal caso infatti, il rilassamento delle tensioni è favorito dall'accumulo di deformazione plastica e il danno associato risulta conseguentemente inferiore. L'inserimento del creep primario, inoltre, porta ad un aumento consistente del danno secondo API 579-1 in tutti i casi in cui il secondario sia modellato includendo gli effetti della diffusione. Nel caso si utilizzi la semplice legge di Norton, l'effetto del primario è invece opposto ma esclusivamente ai punti caratterizzati da rilevante rilassamento delle tensioni. Infine, il danno da creep su base Omega è risultato sempre inferiore a quello calcolato secondo LMP, indipendentemente dalla modellazione del creep primario e secondario.

8. Bibliografia

[1] Abe, F., Kern, T. U., Viswanathan R., "Creep-Resistant Steels", Woodhead Publishing, Cambridge (UK), 2012

- [2] Kassner, M. E., "Fundamentals of Creep in Metals and Alloys", Butterworth Heinemann, Waltham (MA - USA), 2015
- [3] Esposito L., Bonora, N., "Time-independent Formulation for Creep Damage Modeling in Metals Based on Void and Crack Evolution", *Material Science and Engineering: A*, 510-511, (C), pp. 207-213, 2009
- [4] Ashby, M. F., "A First Report on Deformation Mechanism Maps", *Acta Met.*, 20, pp. 887-895, 1972
- [5] Norton, F. H., "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw-Hill, New York, 1929
- [6] Bailey, R.W., "Creep of Steel Under Simple and Compound Stress", *Engineering*, 121, pp. 265, 1930
- [7] UNI, "UNI/TS 11325-4 - Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 4: Metodi operativi per la valutazione di integrità di attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso applicabili nell'ambito della procedura di valutazione di cui alla UNI/TS 11325-2", Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2013
- [8] ASME, "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2016
- [9] Grisolia O., Scano L., "HRSG Header Creep-Assessment Through a Procedure for the Italian Code Application and Comparison with the American Standard", PVP2015-45988, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 19-23, 2015, Boston, MA, 2015
- [10] Grisolia O., Scano L., "HRSG Header Welds Creep-Assessment Through a Procedure for the Italian Code Application and Comparison with the American Standard", PVP2016-63252, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 17-21, 2016, Vancouver, Canada, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2016
- [11] NIMS Testing Division, "Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of 2.25Cr-1Mo Steel for Boiler and Heat Exchanger Seamless Tubes (STBA 24)", 3B, National Research Institute for Metals, 1986
- [12] Viswanathan R., "Damage Mechanics and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International, Metals Park (OH - USA), pp. 65, 2006
- [13] Grisolia, O., "Assessment of Weld Reduction Factors Through Experimental Reference Curves", *Engineering Fracture Mechanics*, 77, pp. 2971-2991, Elsevier, 2010
- [14] Roy, N., Bagui, S., Sahu, J. K., Ray, A. K., "Creep Characterization and Damage Assessment of Long Term Service Exposed P-22 Grade of Steel", *Materials Science and Engineering: A*, 5, pp. 802-810, 2013
- [15] Esposito, L., Bonora, N., Dichiario, S., "Modeling of Multiaxial Stress Effects on the Creep Resistance of High Chromium Steel", PVP2013-97275, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 14-18, 2013, Paris, France, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2013
- [16] Prager M., "Omega Method - An Engineering Approach to Life Assessment", *Journal of Pressure Vessel Technology*, 122, pp. 273-280, ASME, New York, 2000
- [17] Viswanathan R., "Strength and Ductility of 2¼Cr1Mo Steels in Creep", *Met. Tech.*, June 1974, pp. 284-293, 1974
- [18] Scano L., Esposito, E., "Effects of Secondary Creep Formulation on API 579 Residual Life Evaluation", PVP2017-65512, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 16-20, 2017, Waikoloa, HI, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2017

Rilevazione di indicazioni planari nelle placature di reattori in acciaio debolmente legato al Cr Mo eserciti ad alta temperatura e ad alta pressione di idrogeno e indicazioni operative per le metodologie di controllo

N. Terlizzi¹, F. Bresciani², P. Nardoni³

¹ ATB Riva Calzoni

² Istituto Italiano della saldatura

³ I & T Nardoni Institute

Sommario

La criticità dell'eventuale formazione di cricche nella placatura in acciaio inossidabile (weld overlay) della superficie interna di reattori in servizio di idrogeno, che potrebbero causare problemi alla stabilità dell'apparecchio in pressione, impone un'accurata indagine nel rivestimento e altrettanta cura nella riparazione.

E' stata affinata una metodologia di rilevazione orientata ad esaminare zone ben note dove è più probabile la suscettibilità all'attacco.

La valutazione dei difetti e l'analisi delle cause come pure la messa a punto delle metodologie di riparazione sono stati oggetto di tre interventi effettuati nel biennio 2016/2018 su sei reattori in esercizio da vent'anni.

Per la taratura del sistema di controllo mediante ultrasuoni è stato costruito un blocco di calibrazione in scala reale nel quale sono stati riprodotti i difetti campione per dimensionamento e localizzazione. Lo studio delle modalità di rilevazione e la valutazione dei difetti tipo durante la campagna di ispezione della placatura è stato completato affinando l'indagine con l'ausilio del software CIVA per studiare e ottimizzare i percorsi di indagine dei fasci ultrasonori.

1. Introduzione

I reattori destinati alla raffinazione operano ad elevate pressioni di esercizio e temperature critiche che sollecitano in misura significativa i componenti degli apparecchi in acciai basso legati con cui sono realizzati.

Il processo di cracking avviene con elevata pressione parziale di idrogeno. La presenza di questo elemento, diffondendosi all'interno del materiale è causa di elevate sovrasollecitazioni durante i transitori termici a causa della variabilità della sua solubilità nel materiale base in funzione della temperatura e ciò può risultare pericoloso per l'esercizio dei reattori. La presenza di queste sovrasollecitazioni unitamente ai picchi di stress dovuti alle aperture delle connessioni di processo porta ad uno stato di sollecitazione nel materiale base che in alcuni casi può superare il valore limite sostenibile.

La scelta dei materiali in fase progettuale ed adeguate indicazioni per la conduzione in esercizio sono state studiate al fine di contenerne gli effetti. Per questo scopo sono stati condotti studi per valutare l'infragilimento da idrogeno del materiale base ed esperienze di disbonding della nastatura che non sono parte però della presente memoria e per il cui approfondimento si rimanda all'ampia letteratura disponibile.

Nel presente lavoro ci siamo focalizzati sulle modalità di rilevazione dei difetti affioranti nella placatura o immediatamente presenti al di sotto della stessa. Ai fini della nostra indagine è risultata particolarmente importante la finitura superficiale delle saldature molate a raso per rendere più efficaci le tecniche di controllo non distruttivo sia in fase di fabbricazione che in fase di esercizio. Infatti una superficie perfettamente liscia consente di effettuare

controlli in modo più accurato e analogamente la finitura superficiale della nastratura dei bocchelli è sicuramente un elemento di primaria importanza per consentire il controllo con ultrasuoni sia dal lato interno del reattore sia dal lato esterno delle connessioni.

2. Individuazione delle aree critiche

Il limitato tempo solitamente disponibile per i controlli durante la fermata dell'impianto spinge alla necessità di concentrarsi nell'esame delle aree più esposte all'insorgere di questi difetti.

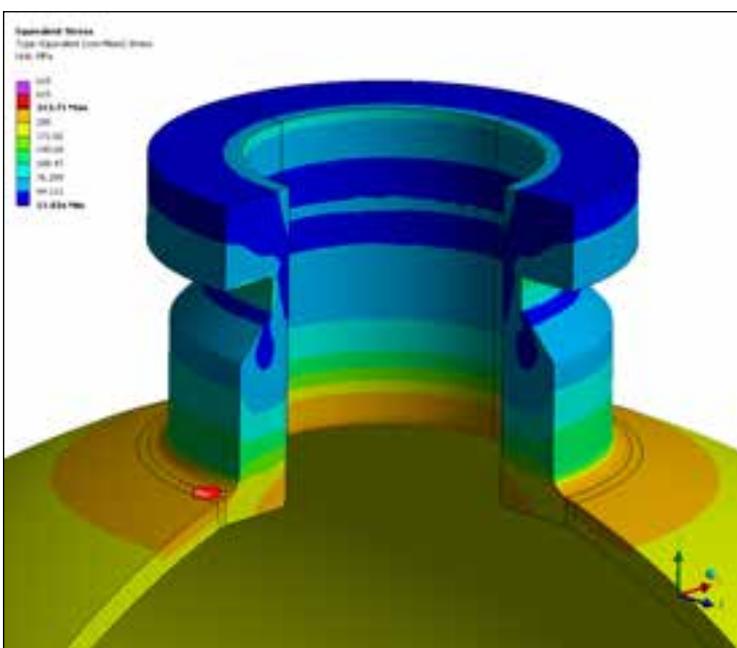
Si è riconosciuto che queste indicazioni appaiono principalmente all'interno dei bocchelli, nella zona di intersezione del bocchello con il fasciame. Si veda figura 2.1. In corrispondenza del raccordo dove è più alto il picco di sollecitazione.



Figura 2.1

Si è riconosciuto che queste indicazioni appaiono principalmente nelle zone dove più alto è il picco di sollecitazione e in particolare in corrispondenza del raccordo tra superficie interna dei bocchelli e superficie interna del fasciame ed in corrispondenza del raccordo dell'anello di supporto della griglia. Si vedano ad esempio la figure 2.2 e 2.3 in cui è indicata rispettivamente la sollecitazione equivalente (Von Mises) in un passo d'uomo saldato a un fondo emisferico ed in un bocchello di "quench" saldato al mantello cilindrico e la figura 2.4 relativa al raccordo dell'anello di supporto della griglia del catalizzatore.

La sollecitazione equivalente dovuta ai carichi meccanici e termici è in queste zone particolarmente elevata e di conseguenza queste aree sono quelle più esposte alla possibile formazione di cricche.



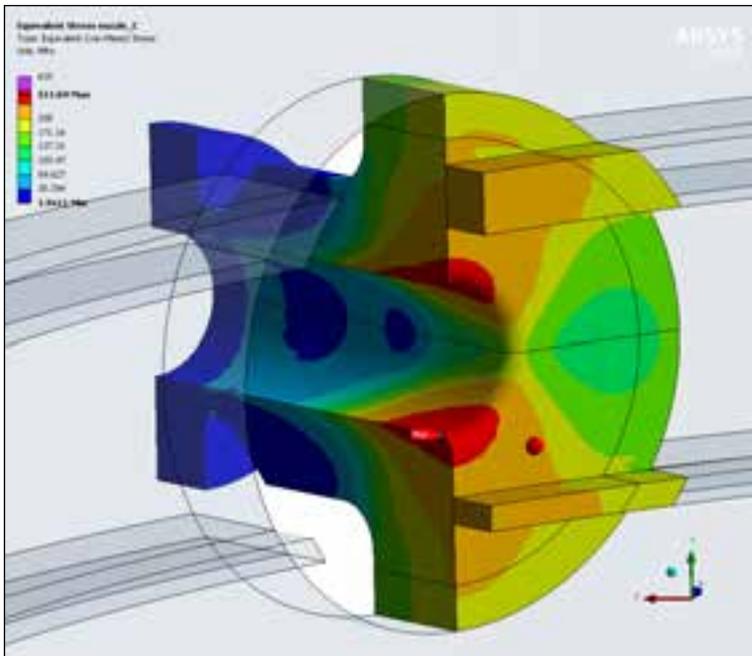
Pressione di prog. 13.02 MPa

Temperatura di prog. 450 °C

Materiale Cr-Mo-V (SA 336 F22V)

Figura 2.2 Sollecitazione equivalente -

Bocchello superiore (Passo d'uomo)



Materiale Cr-Mo-V (SA 542 Tp D Cl 4a)
 Pressione di progetto 19.72 MPa
 Temperatura di progetto 460 °C

Figura 2.3 Sollecitazione equivalente - Bocchello di Quench

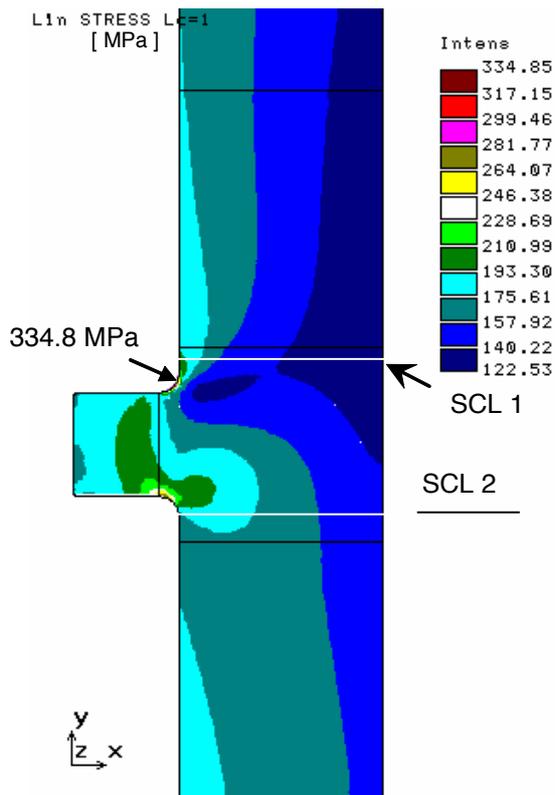


Figura 2.4 Intensità della sollecitazione dovuta al carico meccanico sull'anello di supporto griglia

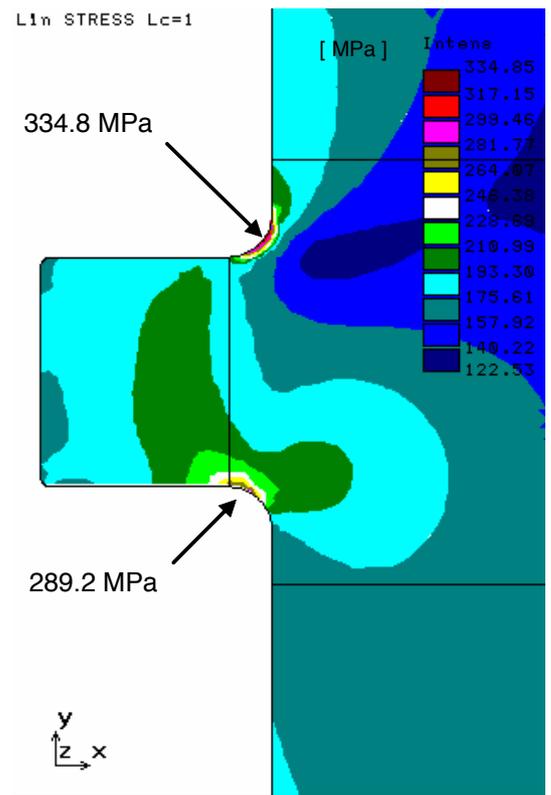


Figura 2.4 Particolare

3. Selezione dei controlli maggiormente idonei per queste aree

Durante l'ispezione interna oltre al controllo visivo Il primo esame che viene condotto è il controllo con liquidi penetranti che permette di individuare la presenza di cricche

affioranti. Attraverso l'indagine ultrasonora si procede poi a valutare la profondità del difetto o l'eventuale presenza sotto placcatura.

Ci si è posti quindi la domanda se fosse possibile rilevare attraverso un controllo mirato effettuato dall'esterno del reattore la presenza di indicazioni allo stato iniziale. Il vantaggio rappresentato da questa possibilità è indubbio in quanto rende possibile il controllo al termine del periodo di raffreddamento del reattore dopo la rimozione locale del materiale isolante esterno. Inoltre il dimensionamento delle cricche consente di valutare il tipo di interventi più opportuni, quali la decisione di riparare o meno il materiale base. La risposta a tale quesito è stata affidata alla realizzazione di un bocchello simulacro con difetti campioni e all'analisi per mezzo del Software CIVA per lo studio del percorso dei fasci ultrasonori.

4. Costruzione di un bocchello simulacro con inserimento di intagli campione

L'intervento di controllo si è svolto in tre fasi distinte nel corso delle quali si sono esaminati 6 reattori di due unità di hydrocracking. Al fine di valutare le rilevazioni dell'esame ultrasonoro in presenza di indicazioni lineari è stato costruito un bocchello simulacro nel quale sono stati introdotti intagli in corrispondenza della posizione dei difetti riscontrati nel corso della prima campagna di controlli di due apparecchiature. Attraverso il bocchello simulacro (si veda fig.4.1) nel quale sono stati inseriti due intagli ortogonali tra loro nel diametro interno del bocchello adiacenti al raggio di raccordo e due intagli sempre ortogonali tra loro nella zona del codolo adiacente al raccordo.

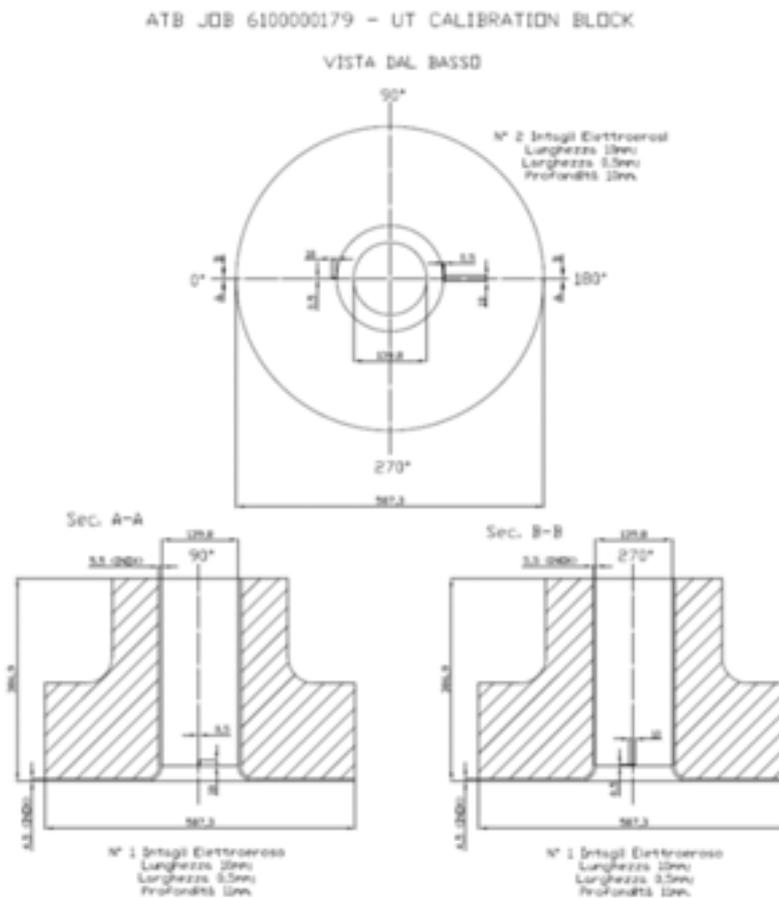
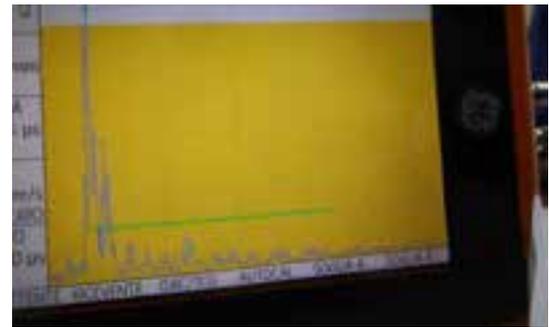




Figura 4.1



A-scan of EDM notch

Figura 4.2 Intaglio longitudinale rispetto all'asse del bocchello e relativa visualizzazione dell'eco rilevato con creep wave

Si è ritenuto inoltre utile ottimizzare la rilevazione delle cricche sotto placcatura utilizzando il software CIVA al fine di orientare l'indagine per la ricerca delle indicazioni di difetti nel modo più efficace. Si è deciso di avvalersi di questa simulazione del controllo ultrasonoro svolta dall'Istituto Italiano della Saldatura.

5. **La simulazione del controllo ultrasonoro mediante software CIVA**

Il mercato industriale sente, oggi più che mai, il bisogno di sviluppare progetti rispondenti a condizioni di esercizio differenti e più severe rispetto al passato.

Le esigenze progettuali includono quindi l'effettuazione di molteplici prove e analisi su campioni e simulacri rappresentativi dei prodotti finali.

La simulazione con software dedicato, inserita opportunamente nelle fasi produttive industriali, si presta alle fasi di valutazione dell'adeguatezza dei sistemi di verifiche d'integrità strutturale degli Apparecchi in pressione, sia durante la fase di costruzione che nelle successive verifiche in servizio.

Infatti, la simulazione mediante software dedicati consente di ridurre gli oneri dovuti alle prove di studio di messa a punto delle tecniche di controllo non distruttivo inserite nelle fasi produttive in quanto consente di:

- ridurre il numero di prototipi;
- effettuare un numero elevato di verifiche, anche in numero maggiore rispetto a quello che è fattibile in pratica, variando molteplici parametri di controllo.

La simulazione numerica consiste nel determinare la risposta calcolata secondo algoritmi teorici o sperimentali consolidati che abbiano esito certo.

In informatica, si definisce "Computer-aided engineering" (in italiano "ingegneria assistita dal computer"; abbreviazione con l'acronimo CAE) per indicare le applicazioni software che agevolano la risoluzione di problemi tecnologici tramite il calcolo numerico.

La simulazione numerica è intesa come quell'insieme di tecniche numeriche che nelle diverse applicazioni permette di simulare il comportamento di componenti, strutture, sistemi complessi nelle rispettive condizioni operative nell'ambiente virtuale del calcolatore.

Lo scopo principale della simulazione di un controllo ultrasonoro è pertanto la previsione di quale sarà la risposta ultrasonora ottenibile mediante un sistema strumentale, in funzione delle caratteristiche del componente da provare, avente determinate caratteristiche fisiche e dimensionali, etc., prima di procedere alla costruzione di prototipi fisici ("prototipazione virtuale") e all'acquisizione di una determinata attrezzatura strumentale cnd.

L'avanzato stato di sviluppo dei modelli matematici disponibili per simulare la realtà fisica, abbinato alla potenza di calcolo sempre crescente dei computer e alla sempre maggiore produttività e facilità d'uso dei software di simulazione rendono oggi estremamente accurato e versatile il risultato che si può ottenere dalla simulazione.

Pertanto oggi risulta interessante e vantaggioso il ricorso alle tecniche di simulazione software.

Attualmente l'applicazione software più completa ed affidabile nei risultati, adottabile nell'ambito dei cnd, è rappresentata da CIVA ®.

I principali vantaggi derivanti dall'uso del software CIVA ® sono di varia natura:

- Riduzione dei tempi di messa a punto di un sistema di controllo non distruttivo;
- Supporto all'innovazione di un sistema di controllo non distruttivo esistente;
- Miglioramento dell'affidabilità di un sistema strumentale cnd e della qualità dei prodotti;
- Consolidamento del know-how aziendale;
- Mitigazione del rischio di failure, reclami, richiami;
- Certificazione virtuale dei progetti / prodotti.

L'utilizzo del programma di calcolo si compone di tre fasi:

- Inserimento nel computer di un modello matematico del sistema fisico da studiare composto dal particolare da provare e delle sonde (data-entry);
- Calcolo numerico sul modello (solving);
- Visualizzazione ed analisi dei risultati (post-processing o visualization).

Il programma dispone di un'interfaccia utente grafica che agevola l'utente ad operare nel seguente modo:

- Lancia l'applicazione.
- Crea un nuovo modello oppure carica un modello precedente (aprendo un file esistente).
- Modifica il modello cambiandone la forma o i parametri fisici.
- Con l'apposito comando, lancia l'elaborazione del modello. A seconda del tipo di elaborazione e della complessità del modello, tale elaborazione può richiedere anche alcune ore.
- Visualizza sullo schermo i risultati, sotto forma di tabelle numeriche, di diagrammi grafici, o entrambi.
- Se non è soddisfatto dei risultati, modifica il modello e rilancia il calcolo.
- Quando è soddisfatto dei risultati, acquisisce definitivamente i risultati.

La fase di inserimento del modello matematico, trattandosi spesso di un modello avente una geometria complessa, viene effettuata con tecniche simili a quelle dei sistemi CAD. Il programma CIVA ® include una funzionalità di CAD o può acquisire i dati da un software di disegno esterno.

Il modello CAD può essere di tipo 2D o 3D.

Il programma permette di specificare i parametri fisici sui materiali che si intende usare per il componente da controllare e per le sonde da utilizzare, o selezionare i parametri fisici da

un database interno predisposto.

Il programma include due funzioni principali:

- simulazione della propagazione degli ultrasuoni;
- simulazione dell'interazione con il pezzo in esame e i riflettori in esso contenuti.

L'utente della simulazione può tenere conto delle variabili possibili nel processo d'ispezione (pulse echo, tandem o TOFD), relativamente alle sonde (convenzionali, Phased Arrays), al componente da ispezionare e alle discontinuità ipotizzate.

La Figura 5.1 a -c propone alcune rappresentazioni grafiche fornite dal software CIVA®.

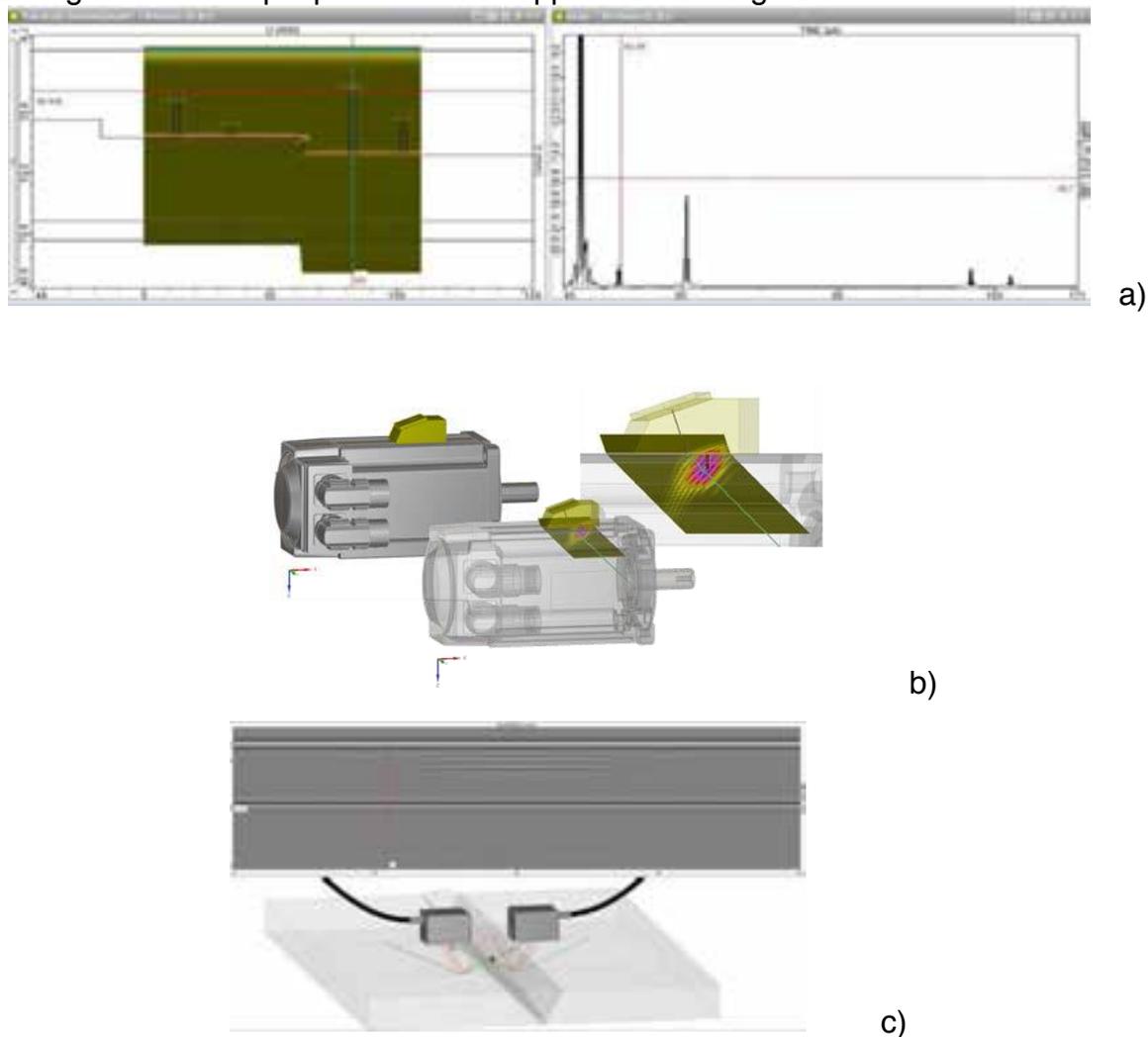


Figura 5.1

L'interfaccia grafica permette all'utente di definire svariati parametri geometrici del componente da esaminare, riguardo a definizioni predefinite, quali la forma generica (piatta, cilindrica, conica, sferica) o particolare (saldatura, bocchello, paletta di turbina). Inoltre, il modello di un componente complesso può essere definito mediante CAD, 2D o 3D. Con CIVA®, il componente può essere omogeneo o eterogeneo, solido, assemblato, costituito da solidi differenti.

6. L'esperienza condotta da IIS SERVICE e ATB RIVA CALZONI

Nel seguito si riportano alcune informazioni riguardo alle attività condotte da IIS SERVICE S.r.l. insieme a ATB RIVA CALZONI.

Uno degli esempi delle simulazioni condotte riguarda la verifica di un simulacro che rappresenta un bocchello al relativo mantello di un reattore di desolfurazione di grosso spessore, nella quale sono stati posizionati alcuni riflettori artificiali.

Lo scopo della simulazione era relativa alla messa a punto di una tecnica di controllo ultrasonoro di un componente reale contenente cricche indotte dall'esercizio nella zona di congiunzione mantello/bocchello, posizionate nel materiale base al di sotto del placcato interno e orientate radialmente rispetto all'asse longitudinale del bocchello.

Il modello sul quale sono state compiute le prove è costituito da un settore di mantello, di spessore 179 mm, sul quale è attaccato un bocchello di tipo auto-rinforzato, avente diametro esterno 330,8 mm, diametro interno di 150,8 e spessore 90 mm (Figura 6.1).

Secondo definizioni preliminari, il modello è stato concepito assumendo parametri fisici di propagazione dell'energia ultrasonora tipici per un acciaio basso-legato al cromo molibdeno, quindi pari a 3.230 m/s per l'onda trasversale e pari a 5900 m/s per l'onda longitudinale.



Figura 6.1

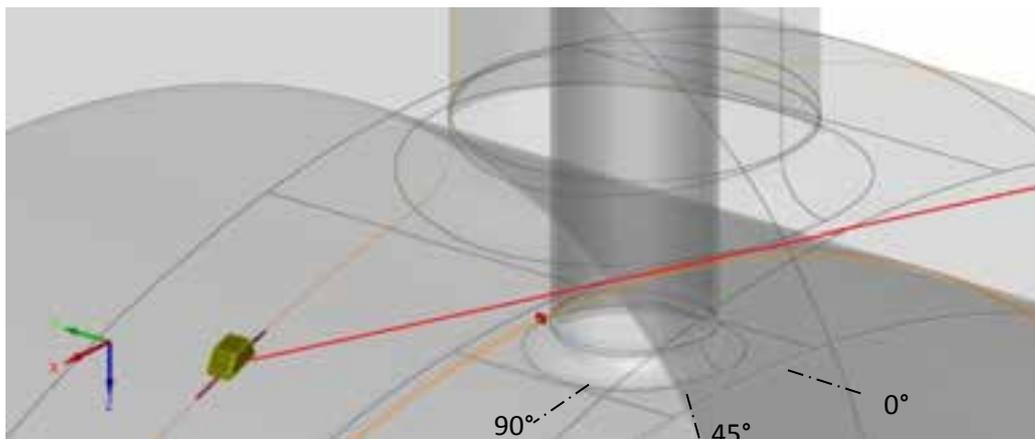


Figura 6.2

Per considerare la presenza della placcatura interna, si è modellato un deposito in acciaio austenitico, riportato mediante saldatura sulla superficie interna della connessione del mantello (4,5 mm) e su quella interna della connessione (5,5 mm).

Per rappresentare le incrinature di esercizio, nel modello proposto sono stati riprodotti riflettori planari aventi caratteristiche fisiche riferibili ad intagli ottenuti mediante elettroerosione.

Le dimensioni, altezza x lunghezza, di tali intagli, sono pari a 3 x 10 mm.

Gli stessi sono stati posti nel materiale base, subito al di sotto del placcato, quindi al limite dell'interfaccia con la placcatura.

Per compatibilità con una ipotetica situazione reale, i suddetti riflettori sono stati estesi nel senso dello spessore, aumentandone la loro altezza, fino alla superficie del placcato (affioranti).

I riflettori, ortogonali rispetto alla superficie interna, sono stati posizionati in

corrispondenza della parete cilindrica del bocchello, della parete del mantello e al centro della zona di intersezione del bocchello con il mantello.

Tali intagli sono stati orientati con la loro massima dimensione parallela all'asse del mantello (0°), ortogonale all'asse del mantello (90°) e secondo orientamenti intermedi.

Il modello del simulacro utilizzato, in cui è compreso uno dei riflettori considerati, giacente sulla superficie interna del mantello in posizione parallela all'asse longitudinale del mantello, è rappresentato nella Figura 6.2.

Tenute presenti le modalità d'esame normalmente applicate in situ, l'esame ultrasonoro studiato è stato riferito ad una tecnica pulse-echo con impiego di trasduttori angolati a singolo cristallo, non focalizzati, accoppiati alla parete esterna del mantello tramite interposizione di fluido accoppiante acustico.

Per valutare la risposta ottenibile, i trasduttori sono stati posizionati orientando il fascio ultrasonoro in direzione ortogonale, per quanto possibile, rispetto alla superficie principale dei riflettori.

Le particolari caratteristiche acustiche del materiale di placcatura, come ad esempio l'impedenza acustica nelle varie direzioni spaziali, dipendono dalle modificazioni strutturali derivanti dal processo di saldatura utilizzato per depositare il materiale di placcatura. Inoltre, il grado di irregolarità del profilo superficiale del placcato, legato anch'esso al processo di deposito utilizzato, comporta, a seconda dei casi, un certo grado di attenuazione dell'energia ultrasonora e pertanto influisce sull'entità della risposta ottenibile.

Tenuto conto delle incertezze dovute a quanto anzidetto relativamente alla sezione austenitica, per la simulazione si è tenuto conto della sola porzione degli intagli artificiali posta nella sezione di materiale base (limitata alle dimensioni 3x10 mm) e si è trascurata la parte dei riflettori compresa nella sezione di placcatura.

La computazione è stata quindi condotta tenendo conto delle conversioni d'onda derivanti dall'interazione dell'onda ultrasonora con il contorno dei riflettori ed escludendo l'interazione con le superfici interne del bocchello e del mantello.

L'impostazione di computazione adottata ha portato ad una valutazione conservativa della risposta ultrasonora dovuta ai riflettori campione presenti nel simulacro, ma ha permesso comunque il confronto delle ampiezze d'eco dei segnali ultrasonori ottenibili a seconda della posizione degli intagli artificiali, delle sonde impiegate e della variazione riguardo agli altri parametri d'esame. Sulla scorta dell'analisi teorica sviluppata IIS con il software CIVA si è proceduto ad effettuare il controllo in campo affidato agli specialisti della IT Nardoni che ci illustreranno la metodologia e i risultati dei controlli effettuati.

8. Dimensionamento e localizzazione dei difetti – Topografia delle fessurazioni

I difetti sono posizionati nella zona del raccordo. Le cricche si generano all'interfaccia materiale base/placcatura, propagandosi successivamente nella placcatura e nel materiale base.

La direzione delle cricche è radiale e possono essere affioranti e non affioranti sulla placcatura specialmente nella fase iniziale.

Su alcuni bocchelli l'origine è sul raccordo propagandosi poi sia sulla canna del bocchello che sul codolo, in altri le cricche erano a 30÷40 mm dal raccordo verso la virola.

9. Indagine con ultrasuoni / trasduttori

L'indagine ultrasonora viene effettuata dal lato della placcatura utilizzando trasduttori con fasci angolati ad onde longitudinali e sonde tipo creeping wave per rilevare difetti affioranti e sub-superficiali.

Nella Fig 9.2 è schematizzata una sonda tipo creeping e relativi fasci emessi.
Nella Fig.9.3 è rappresentata una sonda a fasci angolati con relativa focalizzazione.

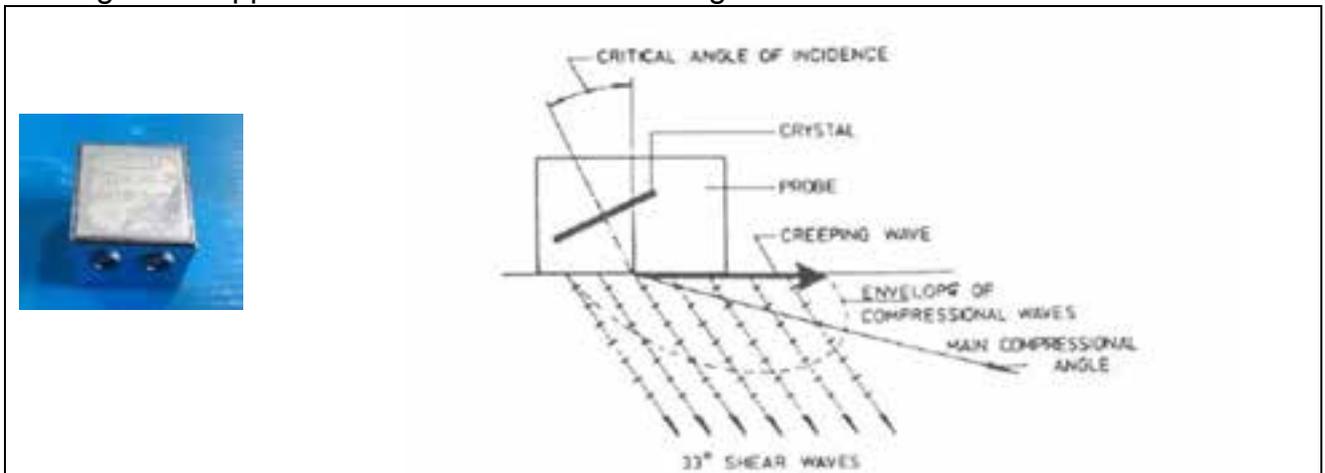


Figura 9.2 Sonda tipo creeping wave e schema dei 3 tipi di onde che si generano nel materiale

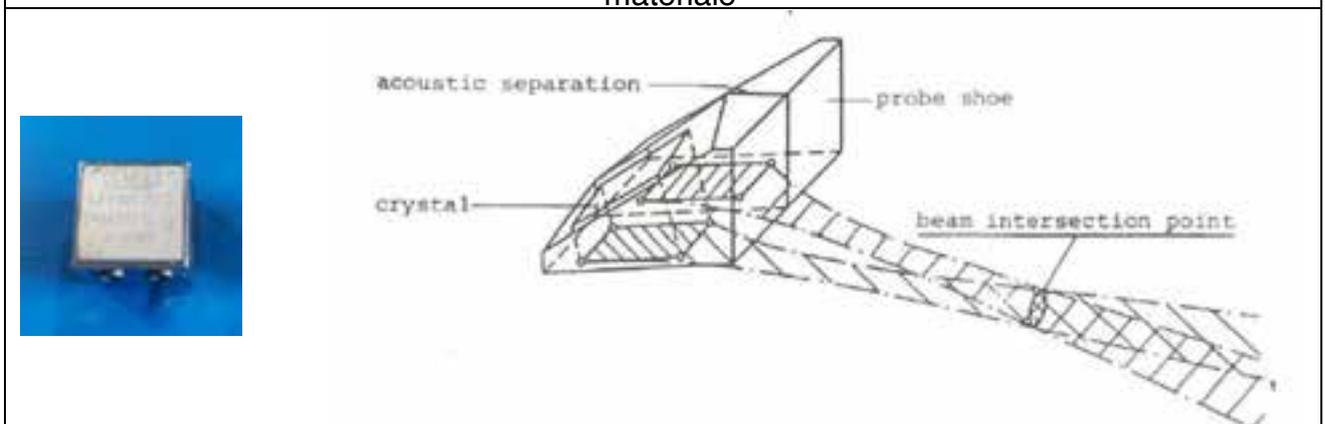


Figura 9.3 Sonda a onde longitudinali inclinate e schema della geometria dei fasci per creare la zona focale

10. Calibrazione

10.1 Calibrazione asse tempi

La calibrazione asse tempi deve essere effettuata sul blocco IIW-V3 o equivalente.
Per le creeping wave la calibrazione asse tempi deve essere effettuata utilizzando l'intaglio affiorante del blocco IIW-V3

10.2 Calibrazione della sensibilità

La calibrazione della sensibilità deve essere effettuata sul blocco di calibrazione costruito con le stesse caratteristiche del componente da esaminare: materiale base e spessore placcatura



Intaglio per la calibrazione delle creeping

Il blocco di calibrazione (Fig.10.1) deve presentare i seguenti difetti artificiali:

- N° 1 intaglio nella placcatura
- N° 1 intaglio nel materiale base nella zona di interfaccia placcatura/materiale base
- N° 2 fori Φ 2mm (SDH) a 5 mm e 10 mm di profondità.

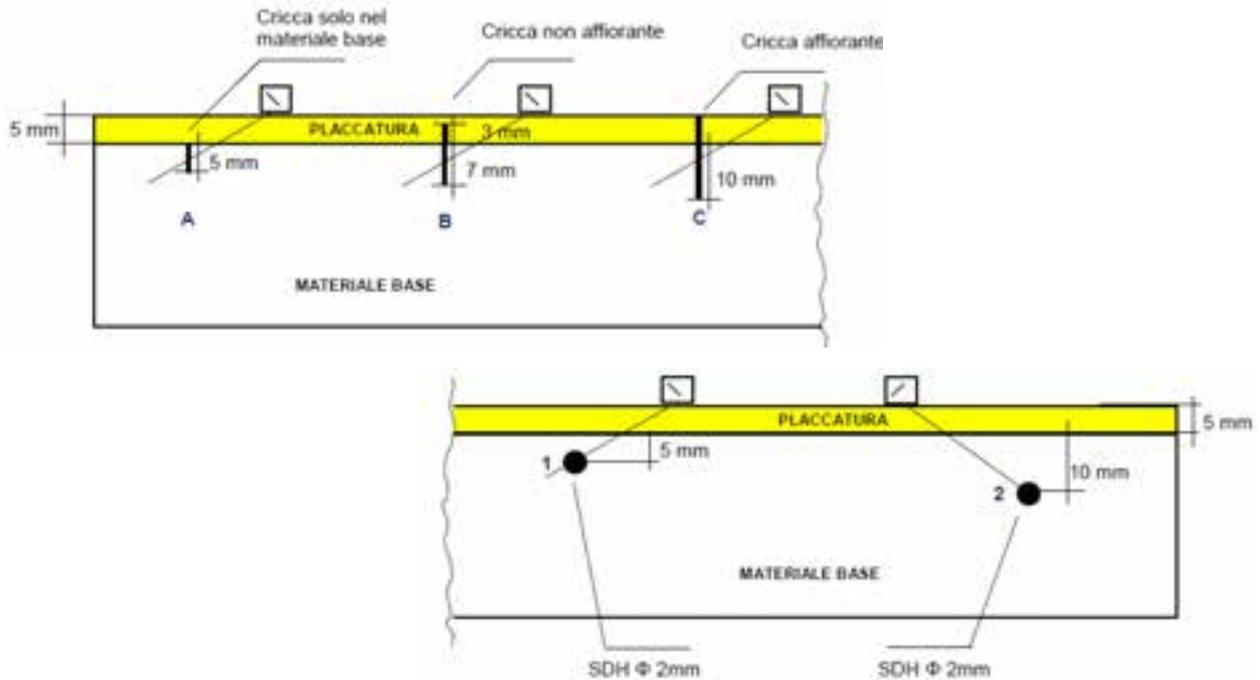


Figura 10.1 Blocco di calibrazione per la base tempi IIW-V3 e blocco di calibrazione per la sensibilità



11. Localizzazione delle cricche



Figura 11.1 Bocchello 12B nella fase del controllo con liquidi penetranti; rilevate cricche a profondità stimata con ultrasuoni di 5 mm dall'interfaccia.

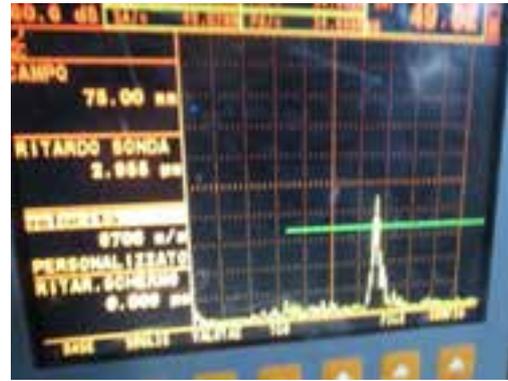
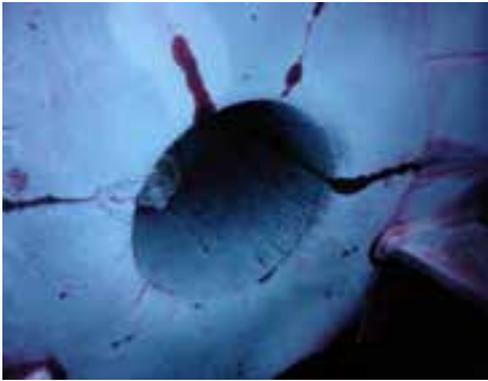


Figura 11.2 Bocchello 12C - Particolare delle cricche radiali affioranti sulla superficie della placcatura a un profondità stimata con ultrasuoni di 5 mm dall'interfaccia



Figura 11.3 Bocchello 12C - Particolare della zona di riparazione delle cricche dopo lo scavo con mola per la loro eliminazione; in genere la parte più profonda si localizzava nella zona del raccordo e area adiacente.

Nozzles	PT	Indication	Length	Distance from internal radius
12 A	Not conforming	-n.3 cracks	35/30/20	35/35/35
12 B	Not conforming	-n.3 cracks	20/10/10	40/40/40
12 C	Not conforming	-n.3 cracks	30/100	0

Tabella 1. Indicazioni rilevate con indagine con liquidi penetranti

Nozzles	UT	Indication	Length	Distance from internal radius	Depth
12 A	Not conforming	-n.3 cracks	35/30/20	35/35/35	3÷5 mm
12 B	Not conforming	-n.3 cracks	20	40	3÷5 mm
12 C	Not conforming	-n.3 cracks	30/100	0	3÷5 mm

Tabella 2. Indicazioni rilevate con indagine ultrasonora

12. Conclusioni

L'esperienza acquisita porta a ritenere che i controlli ultrasonori vadano eseguiti sia dal lato esterno che dal lato interno per determinare la profondità delle cricche per poi decidere come procedere alla loro rimozione/riparazione. La possibilità di esaminare da entrambi i lati consente di caratterizzare meglio la localizzazione e le dimensioni delle cricche, pertanto entrambi i controlli sono da considerarsi necessari. Il dimensionamento dei difetti risulta però più affidabile quando effettuato dal lato interno.

I ristretti tempi disponibili durante le fermate degli impianti suggeriscono l'opportunità di predisporre simulacri dei componenti in esame sui quali possano esercitarsi gli operatori ultrasonisti ad individuare le indicazioni campione localizzate nelle posizioni e giaciture più ricorrenti. Attraverso il software CIVA[®] è possibile prevedere le migliori posizioni di indagine e le migliori sonde per la ricerca delle eventuali indicazioni presenti.

13. Bibliografia

- [1] Berzolla, Nardoni – “Research and development of an advance ultrasonic technique in the examination of austenitic steel welds in heavy thickness pressure vessels”. 37° Fall Conference ASNT, 3-6/10/1977, Detroit
- [2] Y. S. Park, N.G. Kwag, Shin Hanjung, G. Nardoni - “New experience in the ultrasonic examination for stainless steel welds of heavy wall pressure vessel”. 15th World Conference on Nondestructive Testing, 15-21/10/2000, Rome
- [3] R. Sharpe - “Basic research in austenitic steel welds”
- [4] Krautkramer - “Ultrasonic Testing of Materials”
- [5] K.Smit, P.F. Ivens – “Hydrogen in Thick-Walled, High-Temperature Hydrogen Reactors during Service and during Shutdown” – WRC Bulletin 534

Ipotesi di correlazione quantitativa di risultati microstrutturali con la durata di esposizione per acciai al 9%Cr

L. Casiraghi¹, G. Merckling¹

¹ RTM Breda Srl

Sommario

Gli acciai “martensitici” al 9%Cr utilizzati ampiamente su impianti soggetti a creep e dotati di ottime caratteristiche resistenziali contro questo tipo di danneggiamento, sono sfortunatamente non più valutabili per la controverifica sperimentale del danno da creep realmente conseguito in esercizio con i classici metodi di Neubauer basati sull’accumulo e sulla crescita di cavità intergranulari. Infatti, su questi acciai, la “cavitazione” da creep avviene molto più tardi, vicino alla rottura del materiale e comunque non produce una quantità importante di pori, caratteristica che rende il conteggio delle cavità difficile.

Sembrano offrirsi due possibili alternative

- a) Lo studio dell’evoluzione dei precipitati necessita l’esame di una replica estrattiva al TEM o di una “metalloreplica”: Il cambiamento dei precipitati è infatti sicuramente connesso con la storia termica (Ostwald Ripening), ma non è completamente accertato come venga accelerato dalla deformazione plastica e come quindi sia collegato al danno ingegneristico da creep.
- b) La deformazione plastica da creep sviluppa, almeno per durate lunghe, microstrutture a sottograni, la cui evoluzione è sicuramente connessa con il danno da creep stesso. Studi di questo tipo richiedono però comunque un esame al TEM su campione metallico prelevato dal componente o al SEM su metalloreplica.

La proposta presentazione mostrerà alcuni esempi di correlazioni tra submicrostruttura e durata attesa per un campione in acciaio P91 esposto a prova di creep e ne discuterà vantaggi e limiti per l’applicazione pratica.

1 Introduzione

Il presente lavoro propone un’ipotesi di correlazione tra i parametri microstrutturali e l’esposizione a creep per l’acciaio grado 91, con l’obiettivo della stima del danno cumulato e della vita residua di componenti a pressione.

È ormai assodato che l’uso delle tradizionali repliche morfologiche/cavitazionali, analizzate con metodi tipo Neubauer, non è adatto alla valutazione del danno da creep negli acciai ad alto cromo quali il grado 91: la “cavitazione” da creep avviene molto più tardi, vicino alla rottura del materiale e comunque non produce una quantità importante di pori, caratteristica che rende il conteggio delle cavità difficile.

2 Metodo basato sull’analisi delle particelle

Gran parte degli sforzi nell’identificare un metodo sperimentale per la determinazione della frazione di vita consumata, descritti nella letteratura scientifica, passano dall’analisi delle particelle ($M_{23}C_6$, MX, Laves) e dalla correlazione con il tempo di esposizione con o senza carico con il loro numero, dimensione, composizione chimica.

L’assunzione alla base è che l’esposizione a caldo produca crescita del diametro e coalescenza delle particelle, in modo tanto più rapido tanto più è elevata la temperatura d’esposizione.

Infatti la forza motrice del processo di invecchiamento è la tendenza a portarsi in equilibrio termodinamico e a minimizzare l'energia interna attraverso la diffusione allo stato solido: la velocità di diffusione è espressa tramite il coefficiente di diffusione D per il quale si applica

$$D = D_0 \exp \left[\frac{-Q}{RT} \right] \quad (1)$$

dove D_0 è una costante, Q è l'energia di attivazione per il processo di diffusione osservato (quale atomo in quale matrice e seguendo quel percorso), R è la costante universale dei gas e T la temperatura in K.

In sintesi, i processi diffusionali fanno sì che al passare del tempo

- I) le fasi MX diventeranno più grosse e perderanno coerenza con la matrice; al raggiungimento di dimensioni che dipendono dalla temperatura e dal dettaglio chimico, le particelle più grosse di MX faranno da embrioni per la fase Z;
- II) le fasi $M_{23}C_6$ tenderanno a spostarsi sui bordi grano e ad ingrossare. Col tempo formeranno anche carburi M_6C ;
- III) con molta inerzia si formeranno le fasi costituite da soli elementi pesanti di Laves;
- IV) le sub strutture ex aghiforme della martensite rinvenuta tenderanno ad uniformarsi e a diventare tonde.

A questo punto si deve assumere che la presenza di un carico meccanico comporti un'accelerazione dei fenomeni sopra elencati e l'evoluzione di sottograni, in seguito alla nascita e al movimento di dislocazioni.

2.1 Valutazione della vita residua: Principi

A causa della complessa interazione tra diffusione e temperatura, popolazione di particelle già presente e effetto del carico, al momento non esiste nessuna teoria chiusa che permetta di correlare queste grandezze con il tempo di esposizione e le caratteristiche momentanee delle particelle. È quindi necessario affidarsi a misure sperimentali e correlazioni empiriche per ottenere delle possibili valutazioni dello stato momentaneo e delle previsioni.

Il problema essenziale di questo approccio sta nell'ottenere i dati per la costruzione della linea di riferimento, che richiedono prove rappresentative di creep a rottura e interrotte e analisi tipicamente TEM per la determinazione della popolazione delle particelle.

Di fatto dalla letteratura sono disponibili pochissimi punti e naturalmente non sono né alla stessa temperatura né allo stesso sforzo né alla stessa durata. Inoltre i dati in letteratura hanno diversi problemi all'utilizzo:

- molti studi riportati in letteratura si basano su trattamenti termici eseguiti su campioni di materiale, che non considerano quindi l'effetto del carico applicato ma solo quello della temperatura. Dati di questo tipo sono poco utili al presente scopo anche se tecnicamente molto interessanti.
- Altri studi si basano su esposizioni a creep a diverse temperature e diversi carichi in modo da simulare il comportamento in esercizio del materiale.
- All'interno di questa categoria alcune prove sono state interrotte prima della rottura per studiare l'evoluzione del materiale, altri studi sono stati condotti su provini che hanno raggiunto la rottura. Anche queste prove hanno un utilizzo limitato nell'applicazione attuale.

Per questi motivi deve essere formulato da subito un modello complesso che determini la correlazione tra tempo a rottura t_u , temperatura T , sforzo σ e parametri delle particelle (diametro $D = 2r$ e distanza interparticellare l_0 e frazione di volume f).

L'approccio teoricamente più immediato sarebbe la correlazione tra l'equazione di Monkman Grant

$$\dot{\epsilon}_{med} = \frac{A(T, \sigma)}{t_u} \quad (2)$$

l'equazione di Norton modificata da Dorn:

$$\dot{\epsilon}_{med} = C \left(\frac{\sigma - \sigma_i}{G(T)} \right)^n \exp \left[\frac{-Q}{RT} \right] \quad (3)$$

l'equazione di Orowan

$$\sigma_i = \alpha \frac{G(T) b}{l_0} \ln \left[\frac{D}{2b} \right] \quad (4)$$

l'equazione di crescita delle particelle (derivata dall'Ostwald Ripening)

$$D = \sqrt[3]{K_d(T, \sigma) (t - t_0) + D(t = t_0)^3} \quad (5)$$

e la correlazione tra diametro particelle $D = 2r$ e distanza tra particelle l_0 tramite la frazione di volume, valida per particelle ipotizzate tonde

$$f_{tondo} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{(l_0 + 2r)^2 2r} \quad (6)$$

Questo approccio richiede però la conoscenza di parecchie costanti con le loro eventuali dipendenze da temperatura T e carico σ , dei parametri cristallografici (b), del modulo di taglio $G(T)$, ma soprattutto dei valori di partenza, nel momento di rilevamento e alla rottura del diametro e della distanza interparticellare (o della frazione di volume).

Soprattutto questi valori non sono determinabili neanche in prima approssimazione da repliche estrattive.

Avendo a disposizione una serie di valori da letteratura che danno indicazioni su alcuni parametri di particelle e condizioni e risultati di prove di creep, si possono ricercare approcci più empirici e intuitivi, ma "adeguabili" tramite costanti da ottimizzare ai dati sperimentali.

Sembra infatti credibile assumere che

- 1) a condizioni fissate di sollecitazione e temperatura, il diametro della particella N cresca solo in funzione del tempo e della dimensione iniziale $D = D(t)_{\sigma, T=const}$
- 2) l'effetto della particella a pari carico e tempo è tanto più importante, quanto è grande la particella ed è elevata la temperatura, quindi è definibile un "diametro corretto per la temperatura"

$$PD = (T) (20 + \log[D])/100 \quad (7)$$

- 3) il cambiamento del diametro di fatto comporta un cambiamento della velocità di deformazione a creep (quindi una “accelerazione”). L’accelerazione media è stimabile dalla velocità di deformazione minima e dal tempo corrente $\dot{\epsilon}$

$$\dot{\epsilon} = \frac{A\sigma^n}{t}, \quad (8)$$

da cui deriva il parametro

$$PS = \log[\dot{\epsilon}] = n \log[\sigma] - A \log[t] \quad (9)$$

- 4) devono essere conosciuti o determinati sperimentalmente i valori di A e di n(T)

La contrapposizione quindi di PS e PD fornisce un diagramma che correla le 4 grandezze di maggior interesse.

Se dai dati sperimentali determinati su provette rotte a creep si riportano, per ogni provetta, PD(D_u a rottura) e PS($t=t_u$) si ottiene una retta (anche se con notevole dispersione a causa delle diverse colate, tecnologie sperimentali e microstrutture iniziali diverse) che delimita il campo al di sopra del quale si incorre in rottura.

$$PS(t = t_u) = C_b - C_m PD(D = D_u) \quad (10)$$

Se quindi per una situazione “in corso” è possibile determinare il punto PD(D), PS(t) e una legge di crescita per D(t) a condizioni T e σ costanti, si possono iterativamente determinare il tempo e la dimensione della particella tali per cui il punto (PS;PD) si sposti sulla retta. Il tempo per cui questo avviene è la previsione del tempo a rottura del componente.

Esempio: per un dato componente è noto che:

- La temperatura è $T=590^\circ\text{C}$,
- Il carico unitario σ
- A $t=1\text{h}$, il diametro delle particelle era $D=D_0$, a $t=50\text{kh}$ era $D=D_1 > D_0$ e a $t=100\text{kh}$ era $D=D_2 > D_1$.

Il punto 0 in Figura 1 indica la condizione iniziale del materiale a $t=1\text{h}$, lontana dalla riga di stabilità determinata per combinazioni PS, PD dalle misure su provette rotte a creep.

Il punto 1 è relativo a $t=50\text{kh}$ e particella cresciuta a $D=D_1 > D_0$: la deformazione accelera, ma l’aiuto dato dal diametro decresce, con il risultato che il punto si sposta a destra.

Idem per il punto 2 per $t=100\text{kh}$ e $D=D_2 > D_1 > D_0$. Nel punto R, determinato iterativamente $t=t_u=120\text{kh}$ con $D=D_3$ estrapolato per $t=t_u$ dalla sequenza dei diametri misurati.

Il tempo totale d’esercizio è $t=t_u$; ammettendo che si stesse determinando la vita residua nel punto 2, la vita residua $t_{VR}=t_u-t_2=20\text{ kh}$.

Nota importante: PS non è l’accelerazione della deformazione nella curva di creep, ma l’accelerazione della velocità di deformazione minima.

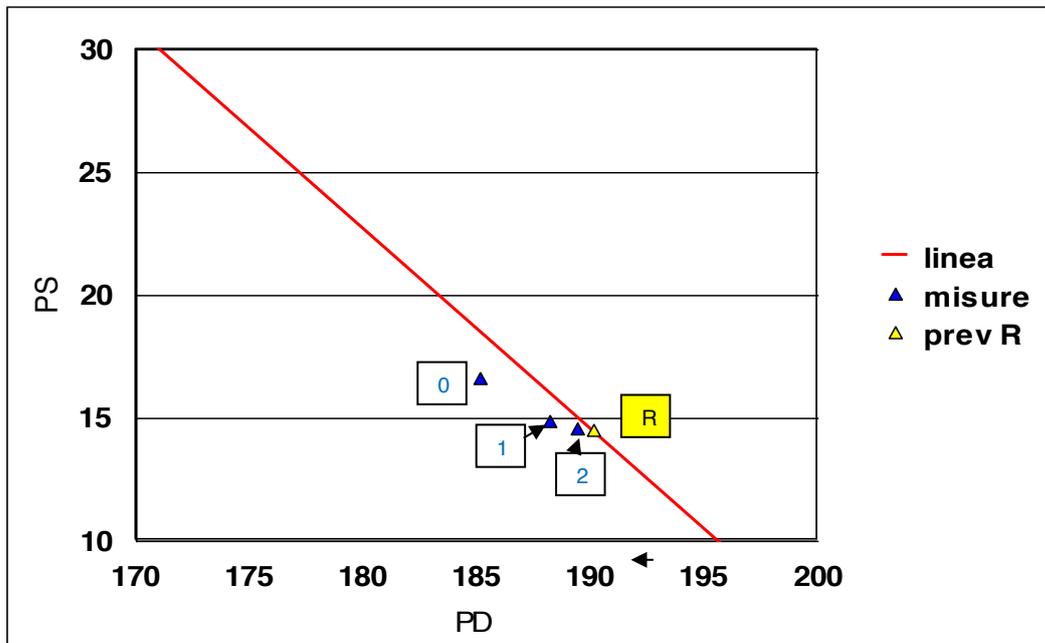


Figura 1. Esempio d'uso diagramma PS-PD con dati fittizi

2.2 Valutazione della vita residua: applicazione a un caso ipotetico basato su condizioni reali

Il metodo sopra descritto è stato applicato alla valutazione di un caso ipotetico basato su condizioni reali; l'ispezione è stata svolta durante un periodo di fermata programmato, eseguendo repliche estrattive in alcune posizioni significative dei componenti più rilevanti ai fini della sicurezza.

Per il confronto è stato utilizzato l'approccio PS-PD come descritto al capitolo precedente, per il quale, oltre ai dati per il diametro medio delle particelle MX, $M_{23}C_6$, Laves e Zeta per ogni posizione, sono stati utilizzati i parametri di esercizio nominale

- Temperatura di esercizio;
- Sforzo;
- Durata di esercizio.

La "linea di stabilità" riportata è stata stimata in base ai dati disponibili da varie fonti che includevano provini rotti e provini a prova interrotta: l'analisi di questi dati [1] mostra in modo netto che al di sopra di tale linea i provini raggiungono rottura, mentre al di sotto si trovano invece i provini la cui prova è stata interrotta.

Questo permette di stimare mediante opportune considerazioni la vita residua delle varie posizioni degli impianti basandosi sulla microstruttura del materiale (diametro delle particelle¹) e le condizioni di esercizio alla posizione di prelievo nell'impianto.

Ciascuna posizione è stata esaminata considerando singolarmente l'effetto di ciascuna particella, ottenendo i grafici in Figura 2 e Figura 3. In base alle distanze tra i punti sperimentali e le rispettive linee di stabilità si ottengono valori di vita residua diversi a seconda del tipo di particelle considerate. Il risultato più conservativo è ottenuto per le particelle MX, che indicano una vita residua di circa 170000h.

¹ Si precisa che per le fasi Z i dati a disposizione sono estremamente scarsi, e quindi la linea di stabilità è particolarmente poco confermata.

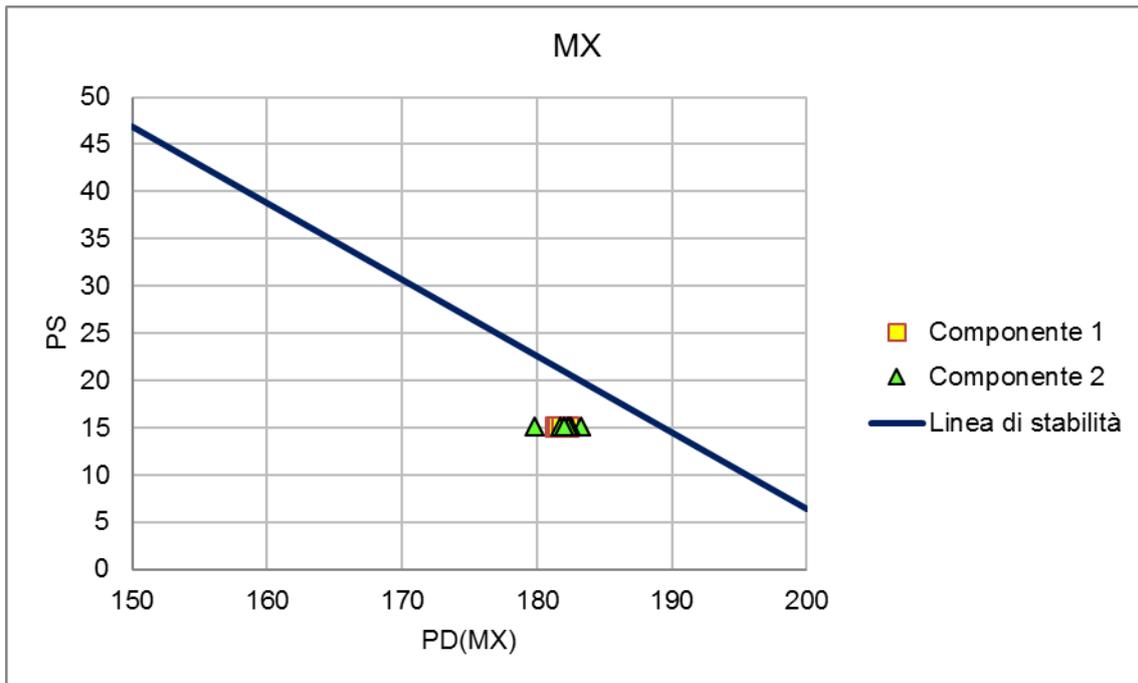


Figura 2. Grafico parametro accelerazione-diametro per particelle MX

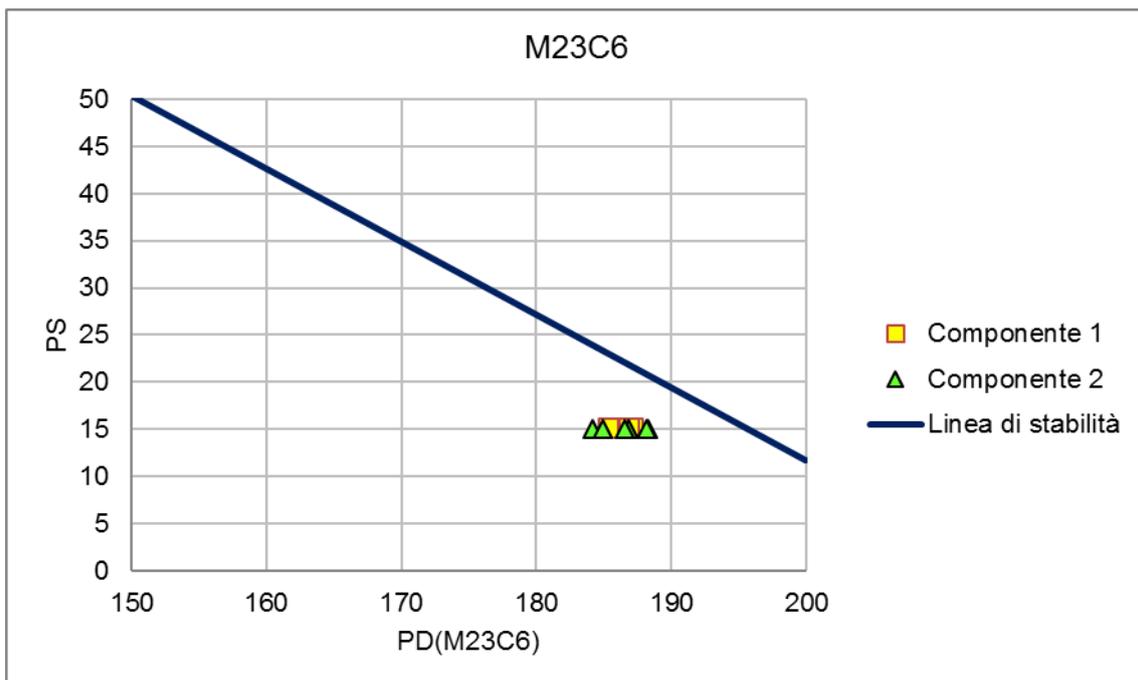


Figura 3. Grafico parametro accelerazione-diametro per particelle $M_{23}C_6$

3 Metodo alternativo e analisi del sottograno

Una delle possibili limitazioni del metodo basato sull'analisi delle particelle è che presuppone che la dimensione delle particelle continui a crescere e la rottura avvenga quando viene superata una certa dimensione critica, non considerando la possibilità che la crescita di particelle o fasi raggiunga un valore massimo o asintotico prima che sopraggiunga la rottura. Ad esempio Magnusson [2] osserva il raggiungimento, per la fase di Laves, di un valore asintotico dipendente dalle condizioni di esercizio.

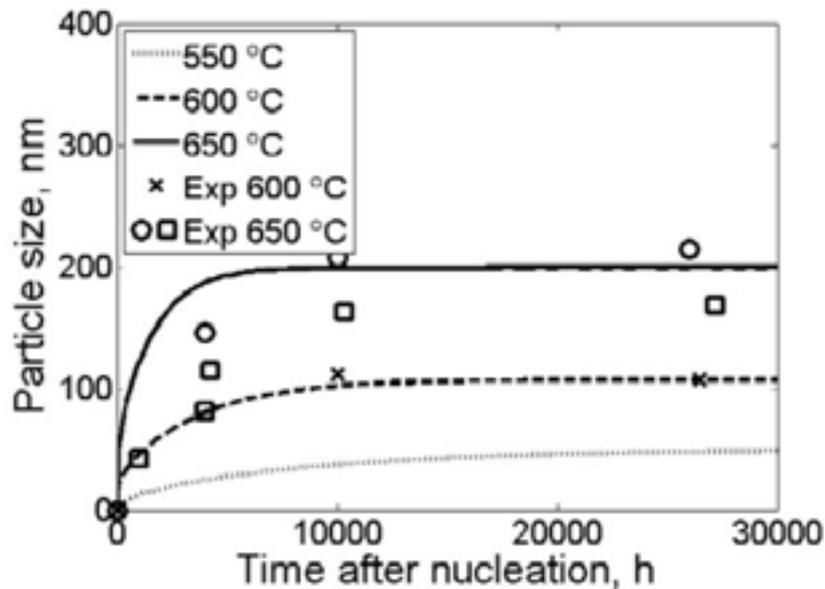


Figura 4. Crescita asintotica della fase di Laves [2]

Sembra invece consolidato che la deformazione a creep per acciai martensitici consista sicuramente in una evoluzione della submicrostruttura da una organizzazione a celle relativamente piccole allungate verso una struttura a celle maggiori e equiassiche.

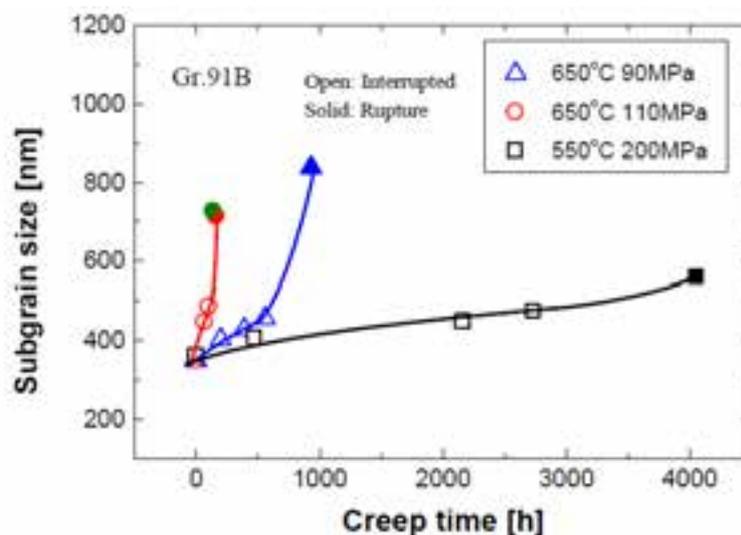


Figura 5. Evoluzione della submicrostruttura all'origine e dopo creep [3]

Essendo invece la dimensione del sottograno sempre crescente con la deformazione (e quindi col tempo di esercizio), è stato elaborato un metodo basato ancora sulle equazioni (2), (3) e (4), che compara lo sforzo interno σ_i (b = Vettore di Burgers, λ = dimensione caratteristica del sottograno attuale e λ_0 = diametro iniziale del sottograno)²

² Nel caso presente $\lambda_0 < \lambda$, e quindi σ_i decresce se λ aumenta. La letteratura scientifica al momento discute se questa formulazione è corretta (che quindi l'ingrandimento dei sottograni allenti σ_i e sia quindi un effetto di addolcimento e non di incrudimento) o meno. Per l'algoritmo qui discusso, che non ha pretese di predire il comportamento dell'acciaio investigato, la questione è posta rilevante dato che l'equazione 11 potrebbe venir usata un'equazione del tipo Hall-Petch.

$$\sigma_i = \alpha G(T) b \left[\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right] \quad (11)$$

con una quantità J la cui espressione è derivata dall'equazione della velocità minima (t = tempo, C costante, n = esponente di Norton)

$$J = \sigma - \left(\frac{C}{t} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{-Q}{kT}\right)} \right)^{\frac{1}{n}} * 1 \text{MPa} \quad (12)$$

I dati disponibili da prove interne sono stati integrati da dati di letteratura pubblicati da Chen [3], Sonderegger [4] e Aghajani [5] sul degrado microstrutturale in esercizio del grado 91.

Il diagramma seguente mostra σ_i in funzione di J dove per i dati a rottura disponibili si forma una specie di argine superiore, oltre il quale è avvenuta rottura (punti circondati dai quadretti). I punti ricavati "durante l'interruzione della prova" tendono progressivamente ad avvicinarsi a questo argine superiore e – pur con le cautele del caso – sembra possibile immaginare delle linee a "percentuale di vita spesa costante", parallele all'argine, ma in avvicinamento all'aumentare della frazione di vita spesa.

Il diagramma in Figura 6 mostra tutti i dati sperimentali utilizzati, divisi per fonte e con evidenziati i punti corrispondenti a rottura. In Figura 7 sono tracciate, sugli stessi dati, le linee corrispondenti ad alcuni valori significativi della frazione di vita consumata.

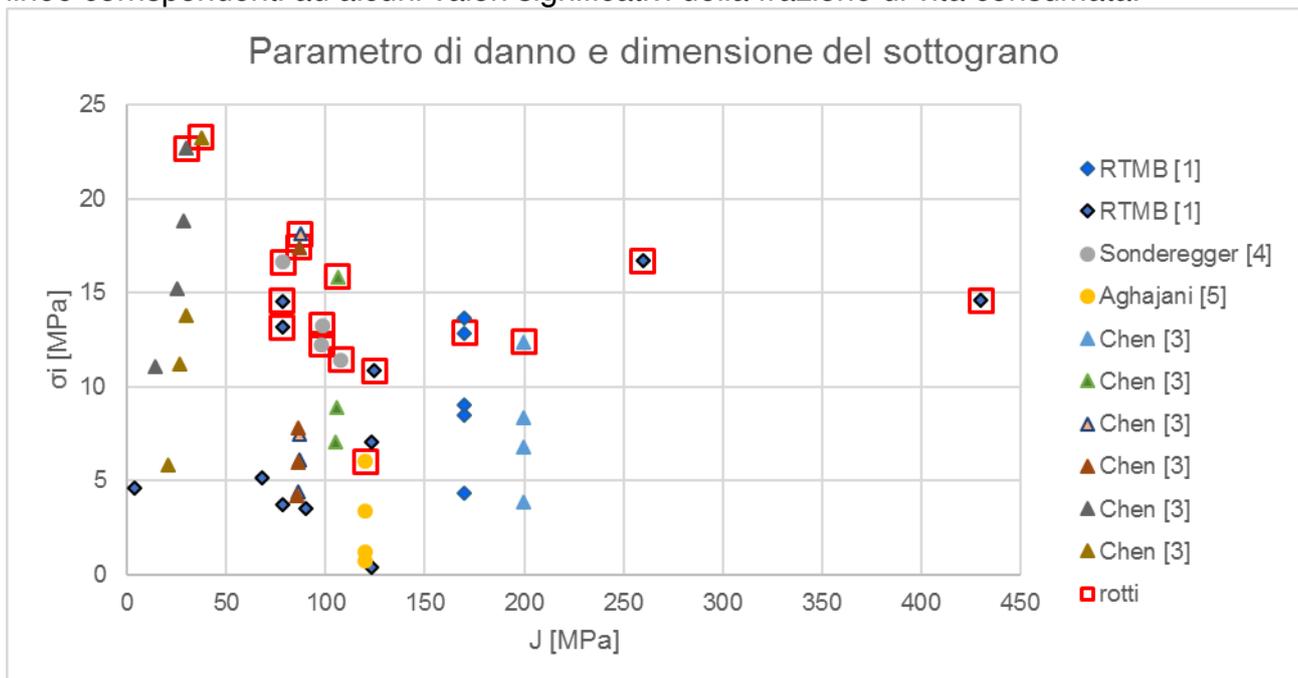


Figura 6. Diagramma di valutazione dello stato di danneggiamento basato sulla dimensione del sottograno

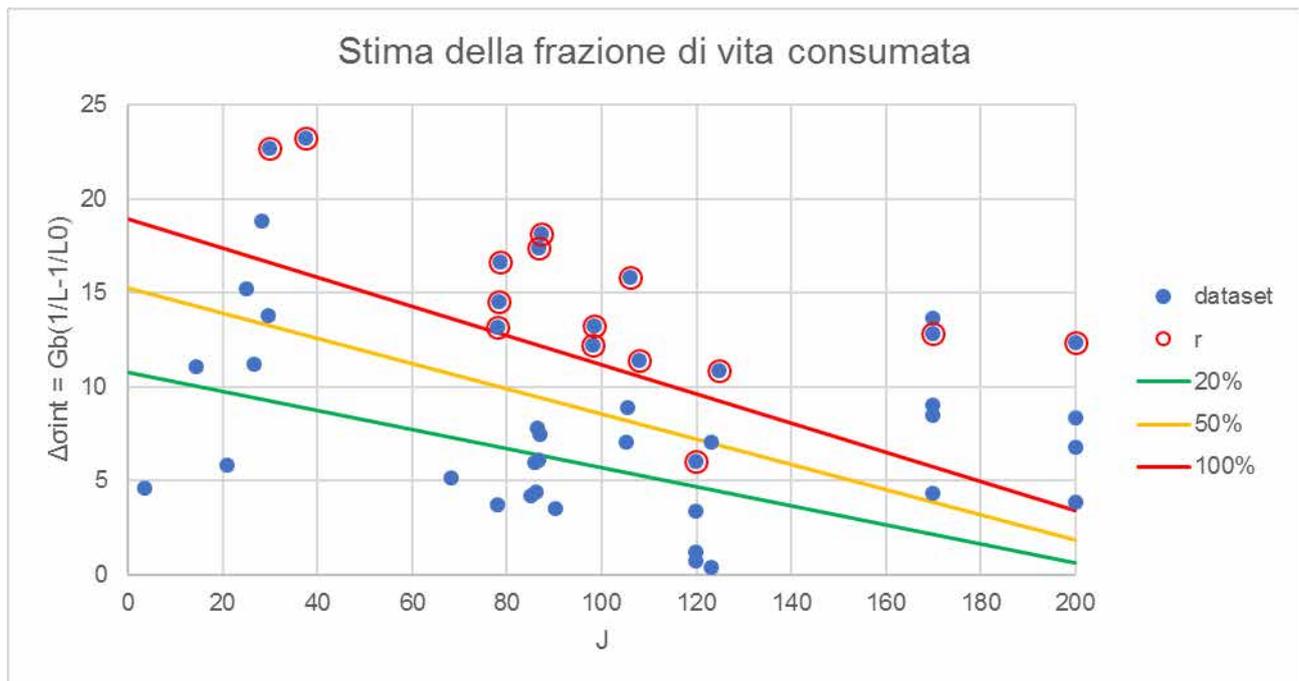


Figura 7. Diagramma di valutazione dello stato di danneggiamento basato sulla dimensione del sottograno

4 Considerazioni conclusive

La presente memoria presenta due possibili approcci per correlare misure submicroscopiche, realizzabili solo per replica estrattiva e con analisi al microscopio elettronico a trasmissione oppure per metalloreplica con analisi al microscopio a scansione convenzionale, tramite i parametri macroscopici di esercizio con il “danno da creep”.

Se anche al momento l’approccio basato sull’analisi delle particelle è largamente favorito dalla letteratura scientifica, resta il dubbio su quanto realmente incida il creep e conseguentemente il danno da esso provocato sull’evoluzione dei precipitati, rispetto all’invecchiamento termico puramente dettato da tempo e temperatura.

Viceversa l’evoluzione dei sottograni, a prescindere se fattore di incrudimento o di addolcimento, è parte importante se non preponderante del danno da creep e sarebbe quindi la misura ottimale da perseguire, soprattutto e anche perché la metalloreplica è in grado di determinarne la dimensione su un campione relativamente ampio.

Evidentemente soltanto l’aggiunta di molti altri dati sperimentali, sia da laboratorio sia, possibilmente, dal campo, potranno portare ad una preferenza di uno dei due metodi e non si esclude che affinamenti teorici possano semplificarne l’applicabilità in futuro.

5 Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell’ambito del bando istituito dal Decreto 20 giugno 2013 a valere sul Fondo per la crescita sostenibile, per la realizzazione del progetto di ricerca e sviluppo concernente «Ricerca e sviluppo di una nuova tecnica per la previsione del comportamento meccanico e l’ulteriore esercitabilità di materiali metallici da applicare in campo industriale tramite previsione microstrutturale», identificativo 130, CUP: B78C15000150008.

6 Bibliografia

- [1] RTM Breda, «Dati interni».
- [2] H. Magnusson, *Creep modelling of particle strengthened steels*, Stockholm, 2007.
- [3] R. Chen, *Microstructural Degradation during High Temperature creep of Mod.9Cr-1Mo Steel and Its Application to Life Assessment*, Tohoku University, 2011.
- [4] B. Sonderegger, S. Mitsche e A. Cerjak, «Microstructural Analysis on a Creep Resistant Martensitic 9-12% Cr Steel Using the EBSD Method,» in *Materials for Advanced Power Engineering 2006*, Liegi, 2006.
- [5] A. Aghajani, C. Somsen e G. Eggeler, «On the effect of long-term creep on the microstructure of a 12% chromium tempered martensite ferritic steel,» *Acta Materialia*, n. 57, p. 5093–5106, 2009.
- [6] M. Yoshino , Y. Mishima , Y. Toda, H. Kushima, K. Sawada e K. Kimura , «Influence of Normalizing Heat Treatment on Precipitation Behavior in Modified 9Cr-1Mo Steel,» in *ECCC Creep Conference 2005*, London, 2005.
- [7] Tonti, Augugliaro, Ramires, Alleva, Di Gianfrancesco, Lega, Matera e Tassa, «Microstructure atlas of ASME Grade 91 and lifeassessment tools,» in *ECCC Conference 2014*, Roma, 2014.
- [8] C. Panait , W. Bendick, Fuchsmann e Gourgues-Lore, «Study of the microstructure of the Grade 91 steel after more than 100,000h of creep exposure at 600°C,» *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, n. 87, pp. 326-335, 2010.
- [9] L. Cipolla, «Conversion of MX Nitrides to Modified Z-Phase in 9-12%Cr Ferritic Steels,» Technical University of Denmark, 2010.

Centrale Termoelettrica di Gissi (CH). Riparazione della tubazione HP OTC COOLER delle Unità 1 e 2

R. Iovene¹, R. Vasile¹, M. Di Giacomo², M. Chendi²

¹ Inail - Uot di Pescara

² A2A gencogas SpA

Sommario

Oggetto del presente lavoro è lo studio dell'attività di riparazione, svolta all'interno della Centrale Termoelettrica a ciclo combinato di Gissi (CH), riguardante le tubazioni di vapore ad alta pressione delle due unità gemelle che compongono l'impianto, denominate UP1 e UP 2, che collegano l'uscita dagli scambiatori aria-acqua (HP OTC COOLER) con i circuiti dei generatori di vapore. La riparazione si è resa necessaria essendo presenti sulle tubazioni in questione delle saldature tra acciai di tipo dissimile, che sono state causa della formazione di cricche, in corrispondenza delle zone di saldatura, in centrali similari. Il collegamento tra le due tubazioni è stato quindi ripristinato utilizzando delle flange in materiale omogeneo saldate alle estremità delle due tubazioni sopraccitate.

1. Introduzione

La Centrale Termoelettrica di Gissi ha un funzionamento a ciclo combinato ed è composta da due sezioni gemelle denominate Unità 1 (UP1) e Unità 2 (UP2), alimentate a gas naturale, per una potenza elettrica complessiva di circa 840 MW. Nella realizzazione di impianti di tali dimensioni e complessità tecnologica si pone spesso la problematica di accoppiare materiali aventi caratteristiche differenti, specifiche del campo di impiego. Pertanto sorgono complicazioni circa la saldabilità o meno di alcuni acciai dissimili e la possibilità di optare per la realizzazione di unioni saldate o flangiate. Nel caso in esame, il problema è sorto nell'esecuzione del collegamento tra la tubazione del circuito del generatore di vapore, in acciaio al carbonio legato per alte temperature SA 335 P91, e la tubazione in uscita dallo scambiatore aria-acqua (HP OTC COOLER), realizzata con un acciaio inossidabile austenitico SA 312 TP321H. Poiché i due acciai in questione presentano problemi di saldabilità, in fase di costruzione dell'impianto, come per centrali similari, si è scelto di interporre tra le due tubazioni, due spezzoni di tubo da 150 mm ciascuno, costituiti da acciai inconel (leghe austenitiche base nichel-cromo), realizzando di fatto delle saldature tra materiali dissimili, ma più affini tra di loro, e nello specifico tra acciaio SA 335 P91 e acciaio SA 446 Gr.1 N06625 (lato generatore) e acciaio SA 312 TP321H e acciaio SA 407 N08810 (lato scambiatore). La saldatura realizzata tra l'acciaio SA 335 P91 e l'acciaio SA 446 Gr.1 N06625 ha comunque nel tempo messo in evidenza dei difetti, le cui cause sono da attribuire alla migrazione del carbonio, per esercizio ad alte temperature, e inoltre alle diverse strutture cristalline dei due materiali, che si formano nell'interfaccia della ZTA.

2. Stabilità strutturale dei giunti di saldatura tra acciai dissimili

Giunti metallici tra acciai dissimili resistenti al creep sono comunemente richiesti nei grandi impianti di produzione vapore. Tali giunti vengono realizzati con saldature eterogenee soggette a range di temperatura da 500 a 680°C, pressione fino a 250 MPa e a condizioni di lavoro corrosive. Comunemente gli acciai utilizzati, elencati in ordine di aumento della temperatura di servizio, sono i seguenti: acciaio al carbonio/1CrMo(V) /2.25CrMo/9CrMoV/12CrMoV/ acciaio austenitico [1].

Questi giunti di saldatura costituiscono i punti più deboli dell'impianto. In generale, quando vi sono saldature dissimili e si è in presenza di elevate temperature di esercizio, i guasti possono comparire in breve tempo, proprio a causa dell'instabilità strutturale dei giunti. La ragione principale di tale instabilità è da ricercarsi nella ridistribuzione del carbonio e, sembra, anche dell'azoto, che avviene all'interno degli acciai costituenti il giunto, già durante il trattamento termico post-saldatura e in particolare durante l'esercizio. La ridistribuzione del carbonio causa la decarburazione da un lato della saldatura (zona di esaurimento del carbonio) e la carburazione dell'altro lato (zona carburo), con conseguenti modifiche delle strutture degli acciai coinvolti, che comportano il degrado della proprietà meccaniche dei giunti di saldatura. E' stato dimostrato [1] che la zona carburo influenza fortemente la temperatura di transizione duttile-fragile, mentre la zona di carbonio esaurita determina un comportamento di rottura viscoso. Gli studi sperimentali [1], condotti sulla stabilità strutturale di due tipi di saldatura tra acciai 15128 (14CrMoV 2-6-3) / P91 (X10CrMoVNb 91) e acciai SK3STC (12CrMo 10-10) / P91 (X10CrMoVNb 91), hanno accertato che il carbonio e l'azoto si erano diffusi dagli acciai bassoalegati all'acciaio al cromo ad alta lega P91 (diffusione in salita). Gli acciai a basso contenuto di lega 15128 e SK3STC erano quindi decarburizzati, mentre l'acciaio P91 era stato carburizzato. Inoltre, analisi dettagliate condotte sulle microstrutture, focalizzate sulle aree decarburate per gli acciai bassoalegati e sull'area carburata dell'acciaio P91, effettuate a una temperatura di 625°C, hanno dimostrato che una maggiore concentrazione di carbonio nella zona carburata dell'acciaio P91 ha portato a ulteriori precipitazioni di carburo (Fig. 1). Pertanto, al fine di ottenere una maggiore stabilità dei giunti di saldatura tra acciai dissimili, è auspicabile unire acciai che hanno maggiore attività di carbonio con acciai che formano carburi più stabili; questo riduce l'attività del carbonio su un lato della saldatura e ritarda il tasso di decarburazione nella sezione critica del giunto.

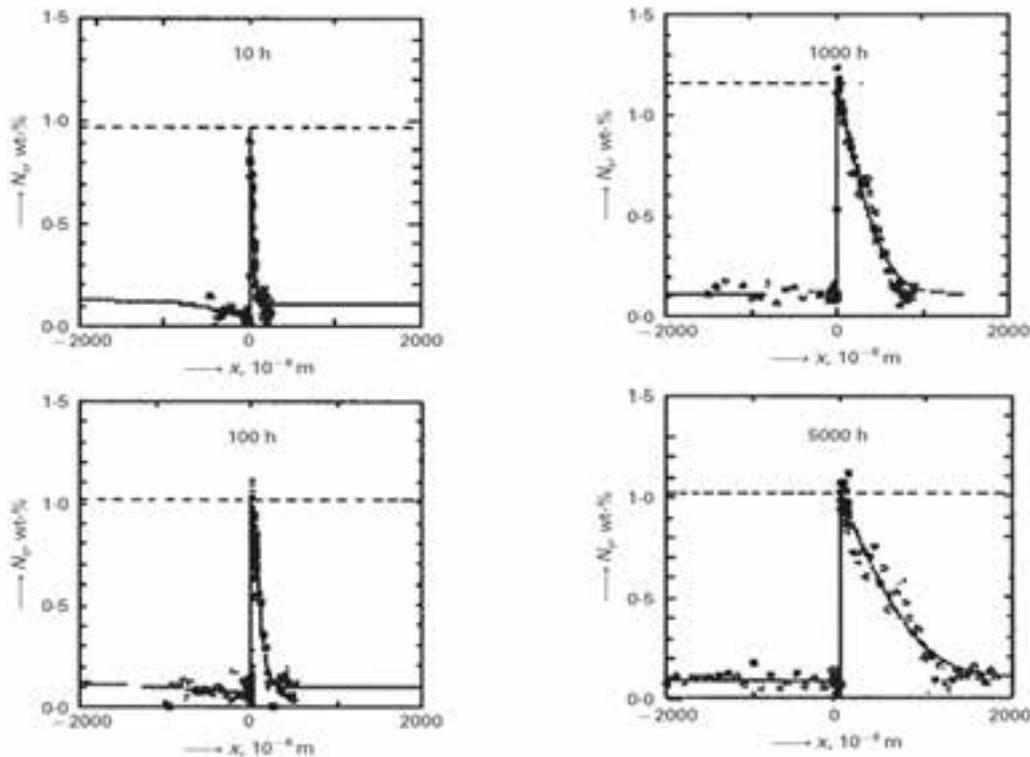


Figura 1. Ridistribuzione del carbonio nel giunto di saldatura 15128/P91 dopo ricottura per varie volte a 625° [1]

Ulteriori ricerche scientifiche [2], pubblicate su *Welding International*, sono state condotte per studiare le ragioni dell'incidenza del cracking e della bassa duttilità nella zona interessata dal calore nella saldatura, in giunti di materiali dissimili tra acciai al carbonio e acciai con lega austenitica, mediante l'esecuzione di test per la determinazione delle proprietà meccaniche, di test di piegatura, di misure di durezza e di esami macro e microscopici. Queste indagini hanno mostrato una bassa duttilità delle giunture saldate dovuta alla formazione di porosità di restringimento del materiale fuso (Fig. 2 e Fig. 3). Inoltre, è stato osservato che anche l'applicazione di trattamenti termici, al fine di migliorare la duttilità grazie all'azione di parziale dissoluzione dello spesso strato di carburi situato sui bordi del grano, è risultata del tutto inutile. L'unico trattamento termico a seguito del quale sono stati osservati miglioramenti in termini di duttilità e resistenza al creep, è l'hyperquenching in acqua dalla temperatura di circa 1100-1150°C, poiché si ottiene la dissoluzione dei carburi e delle fasi intermetalliche; per contro l'uso di tale metodo di trattamento è limitato nella pratica dalle dimensioni delle parti da trattare.

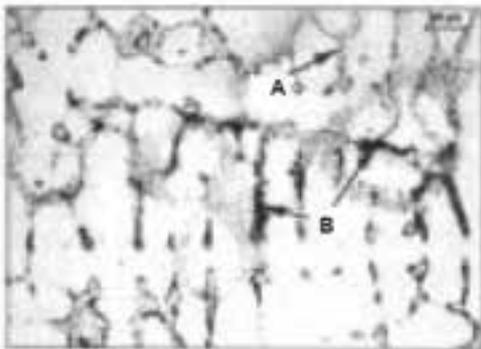


Figura 2. Giunto tra acciaio al carbonio e acciaio con lega austenitica - Struttura del materiale fuso. Carburi di cromo eutettici (A) e porosità di restringimento (B) [2]

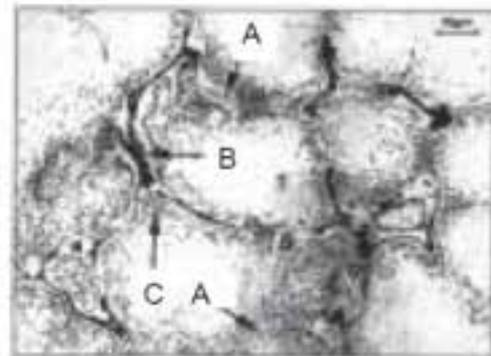


Figura 3. Giunto tra acciaio al carbonio e acciaio con lega austenitica - Struttura del materiale fuso. Carburi eutettici (A), carburi secondari (C) e porosità di restringimento (B) sono visibili sui bordi dei grani [2]

3. Progettazione della Riparazione

Il progetto di riparazione della tubazione di collegamento tra lo scambiatore HP OTC COOLER ed il circuito in uscita dal generatore di vapore della Centrale Termoelettrica di Gissi (CH), è nato dall'esigenza di eliminare le saldature tra acciai eterogenei, presenti su tali tubazioni. Infatti, in seguito a problematiche dovute a rotture su impianti simili e sulle medesime tubazioni, la ditta costruttrice dell'impianto provvedeva a divulgare un bollettino informativo [5] in cui si indicava che *“a causa di una perdita di vapore nella saldatura posta sulla tubazione dell'uscita vapore HP OTC, è stata messa fuori servizio l'unità interessata. Successivamente i test non distruttivi condotti hanno rivelato una crepa nella saldatura tra il materiale Inconel 625 e l'acciaio P91. Un controllo preventivo sull'unità adiacente ha rivelato indicazioni di crack nella stessa posizione”* e pertanto si raccomandava di:

- *“Ispezionare la saldatura interessata con cadenza di almeno ogni 6'000 -7'000 EOH;*
- *Limitare l'accesso del personale nelle vicinanze dell'OTC durante il funzionamento alla luce del rischio di perdite di vapore;*
- *Ridurre al minimo la permanenza nella sala della turbina ed eseguire solo i lavori essenziali;*
- *Una perdita di vapore può spesso essere rilevata da un insolito rumore penetrante nelle vicinanze dell'OTC. In caso di un tale rumore o qualsiasi altro segno di perdita*

di vapore, si consiglia di mettere immediatamente fuori servizio l'unità e di evacuare la sala delle turbine."

Il gestore della centrale termoelettrica, vista l'importanza e la severità delle raccomandazioni della ditta costruttrice, ed al fine di evitare di incorrere nelle medesime problematiche sorte in impianti simili, ha scelto di redigere un progetto avente come scopo l'eliminazione delle saldature tra acciai dissimili. L'intervento è stato considerato come una modifica di lieve entità, poiché non vi sono state variazioni riguardanti i parametri di funzionamento e le caratteristiche impiantistiche, e pertanto il progetto è stato presentato all'esame dell'INAIL – U.O.T. di Pescara, come riparazione. La proposta di riparazione consiste nell'eliminazione delle 3 saldature eterogenee presenti sulle tubazioni in oggetto e nella loro sostituzione con coppie di flange, in materiale simile a quello delle tubazioni da collegare, al fine di realizzare esclusivamente saldature omogenee (Fig. 4). Il progetto della riparazione è il medesimo per entrambe le unità gemelle costituenti l'impianto e denominate UP1 e UP2.

Dati di progetto: Tubazione: HP OTC COOLER – Circuiti generatore di vapore

Diametro esterno: 116,4 mm (4") - Spessore: 17,12 mm (XXS)

Materiale: SA 335 P91 - SA 312 TP321H

Condizioni di progetto:

Pressione di progetto: 193 barg - Temperatura di progetto: 585°C

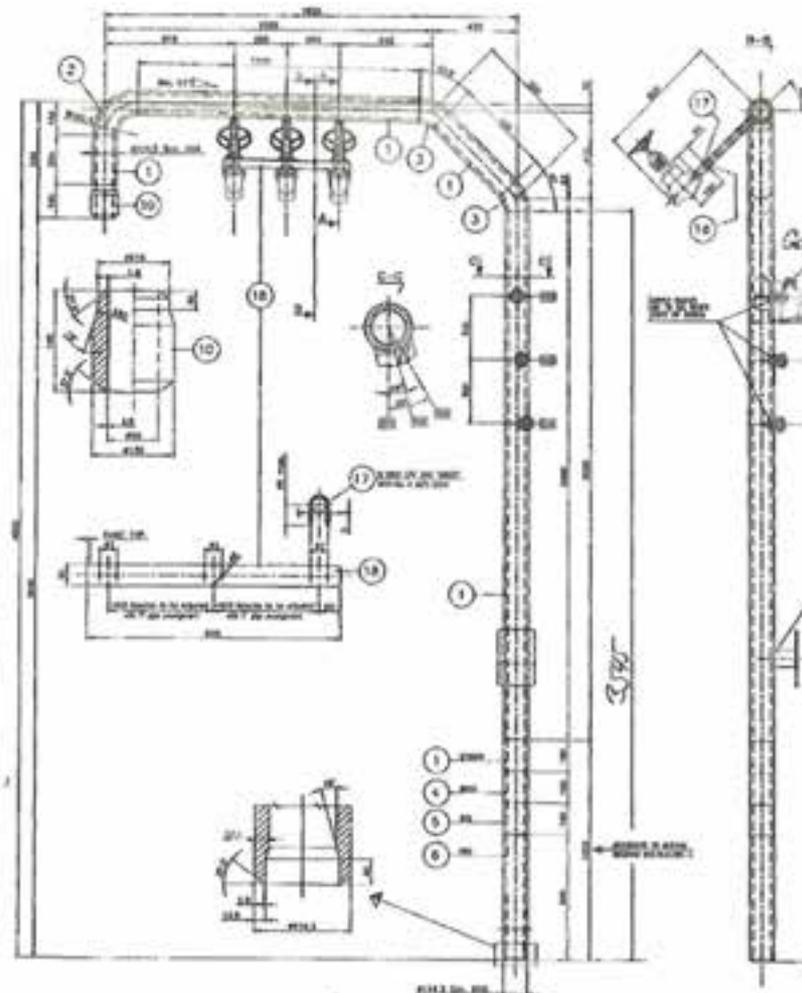


Figura 4. Progetto di Riparazione Centrale di Gissi - Estratto del dis. n° 7737-01-P1-01

Il progetto prevede innanzitutto l'asportazione, mediante taglio meccanico a freddo, dei due tronchetti in acciaio inconel e le relative 3 saldature dissimili, successivamente la saldatura delle nuove flange e nello specifico, sulla tubazione del generatore in acciaio SA 335 P91, la saldatura di una flangia in acciaio ANSI WN RJ A 182 Gr.P91 serie 2500 con codolo a saldare di testa da 4" Sch XXS e, sulla tubazione dello scambiatore in acciaio SA 312 TP321H, la saldatura di una flangia ANSI WN RJ ASTM A182 F321H serie 2500 con codolo a saldare di testa da 4" Sch XXS. Inoltre il progetto prevede di utilizzare quale guarnizione tra le flange un ring joint ovale R38 in acciaio inossidabile AISI 316. Le flange sono successivamente unite mediante n.ro 8 tiranti e relativi dadi in acciaio, idonei per l'utilizzo ad alte temperature, al Cr Mo ASTM A193 B16. Per ogni tirante la coppia di serraggio prevista è di 1500 Nm. L'installazione della coppia di flange non comporta carichi aggiuntivi sulle tubazioni, poiché supportata da appositi tiranti e da supporti a molla a carico variabile.

Le saldature attese dal progetto sono quindi esclusivamente saldature di testa tra materiali simili, realizzate adottando procedure e personale qualificati ed utilizzando materiali di consumo omologhi a quelli utilizzati in fase di costruzione dell'impianto. Il progetto prescrive attività di saldatura eseguite con procedimento TIG e SMAW ad elettrodo rivestito e l'adozione di procedure di saldatura conformi alla UNI EN ISO 15614-1 [6], simili alle procedure utilizzate in sede di costruzione.

Per l'acciaio SA 335 P91, relativo alla tubazione del generatore, è prescritto il mantenimento di una temperatura di preriscaldamento di 200°C e di una temperatura di interpass di 300°C. Inoltre, al termine delle operazioni di saldatura, è prevista la realizzazione di un trattamento di rinvenimento-distensione con temperatura di stasi, tempo di permanenza, gradienti di salita e di discesa, omologhi e coerenti a quelli utilizzati in fase di costruzione.

Infine il progetto dispone, a raffreddamento ultimato e dopo la necessaria preparazione delle superfici, l'esecuzione di una campagna di controlli non distruttivi quali:

- Controllo visivo;
- Controllo con liquidi penetranti a contrasto di colore;
- Controllo ultrasonoro difettoscopico;
- Controllo delle durezza (esclusivamente sul lato acciaio SA 335 P91).

Il progetto stabilisce inoltre che i lavori di riparazione siano eseguiti in conformità alla norma UNI EN ISO 9606-1:2013 [7] per la qualifica dei saldatori, UNI EN ISO 9712:2012 [8] per la qualifica del personale addetto ai controlli non distruttivi.

4. Esecuzione della riparazione

Le attività di riparazione hanno interessato entrambe le unità gemelle UP1 e UP2. La riparazione, per ogni unità, ha quindi comportato il taglio della porzione di tubazione con le 3 saldature dissimili e la saldatura delle due nuove flange, previa preparazione dei cianfrini, la prima in acciaio A182 Gr. F91 sulla tubazione esistente in acciaio SA335 P91 con saldatura omogenea sigla SA1 e la seconda in acciaio A182 F321H su tubazione in acciaio A312 TP321H con saldatura omogenea sigla SA2, il tutto come si evince dalla tabella di saldatura (Fig. 5) e dal Dis. n° 7737-01-P1-01 "modificato" (Fig. 6).

Per l'esecuzione delle saldature sono state adottate specifiche procedure qualificate e conformi alla norma UNI EN ISO 15614-1 [8] ed in particolare la procedura WPS 111-08-A per le saldature SA2 e la procedura WPS 111-16-A per le saldature SA1, entrambe simili alle WPS utilizzate all'atto della costruzione (n°14/07 e n°23/08).

Edipower Gestione termoelettrica Unità Servizi Specializzati - Servizio		Dis. N°	Roll. N°	<input type="checkbox"/> OFFICINA <input checked="" type="checkbox"/> CANTIERE		TABELLA DI SALDATURA HP OTC COOLER										
N° Saldatura	Disegno preparaz. ammessa	Parti da saldare		Sigla del materiale		Dimensioni				Tipo e posizione della saldatura	WPS N°	Controllo		Trattamento Termico		
		A	B	A	B	A		B				Tipo	%	°C	Durata	Gradiente
SA1	7737-01-P1-01	Tubo	Flangia	A356 P91	A 192 Gr.P91	114.3	17.12	114.3	17.12	141 + 111	111-08-A	VT PT UT	100 100 100	750 + 770	3 h	50°C/h max.
SA2	7737-01-P1-01	Tubo	Flangia	SA 312 TP321H	A 192 P321H	114.3	17.12	114.3	17.12	141 + 111	111-08-A	VT PT UT	100 100 100	/	/	/

Figura 5. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Tabella di saldatura

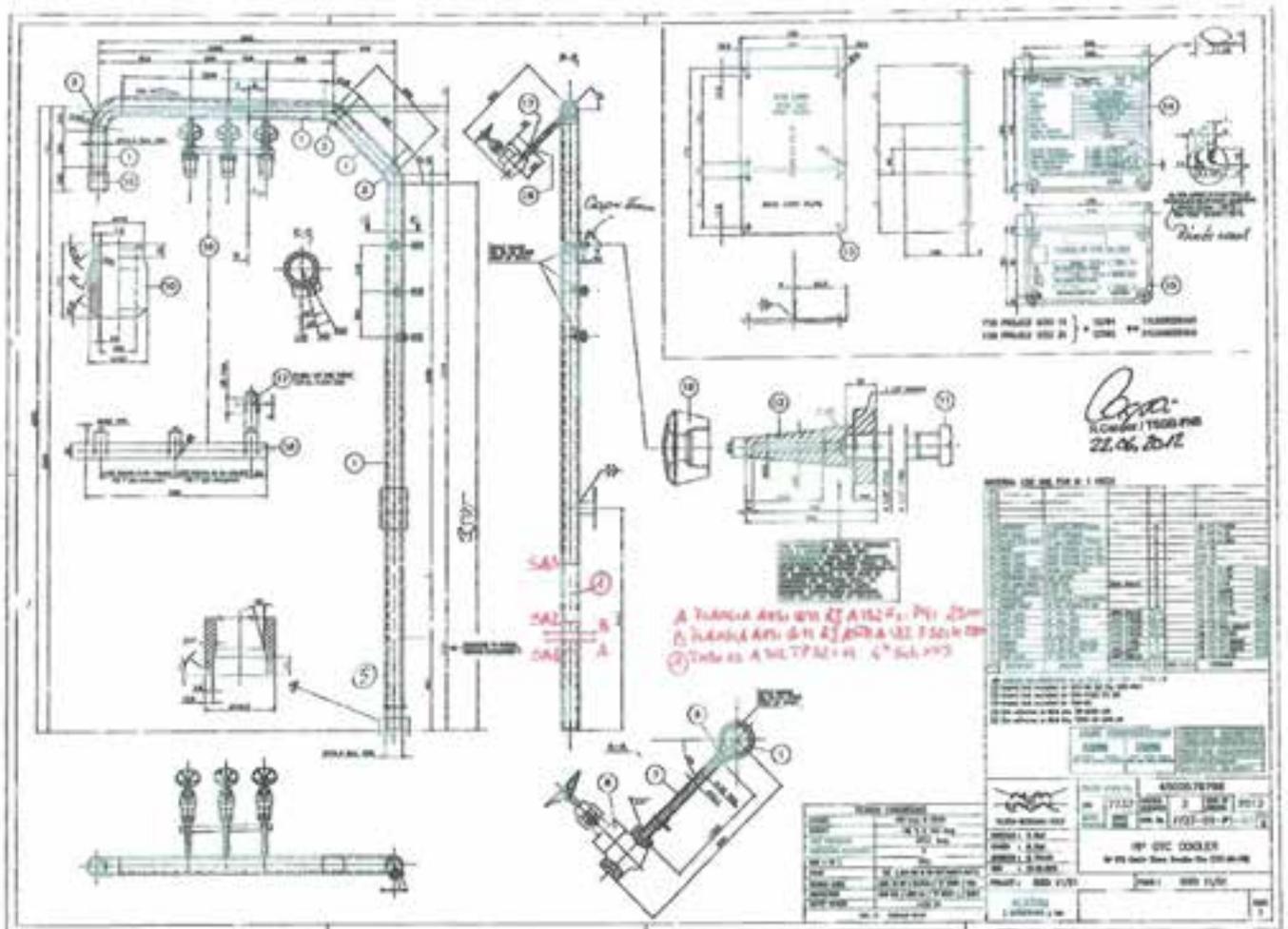


Figura 6. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Estratto del dis. n° 7737-01-P1-01 "modificato"

Sulla saldatura omogenea SA1, al termine delle operazioni di saldatura è stato eseguito il trattamento di rinvenimento-distensione con temperatura di stasi a $750^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ e tempo di permanenza pari a 2 ore (Fig. 7):

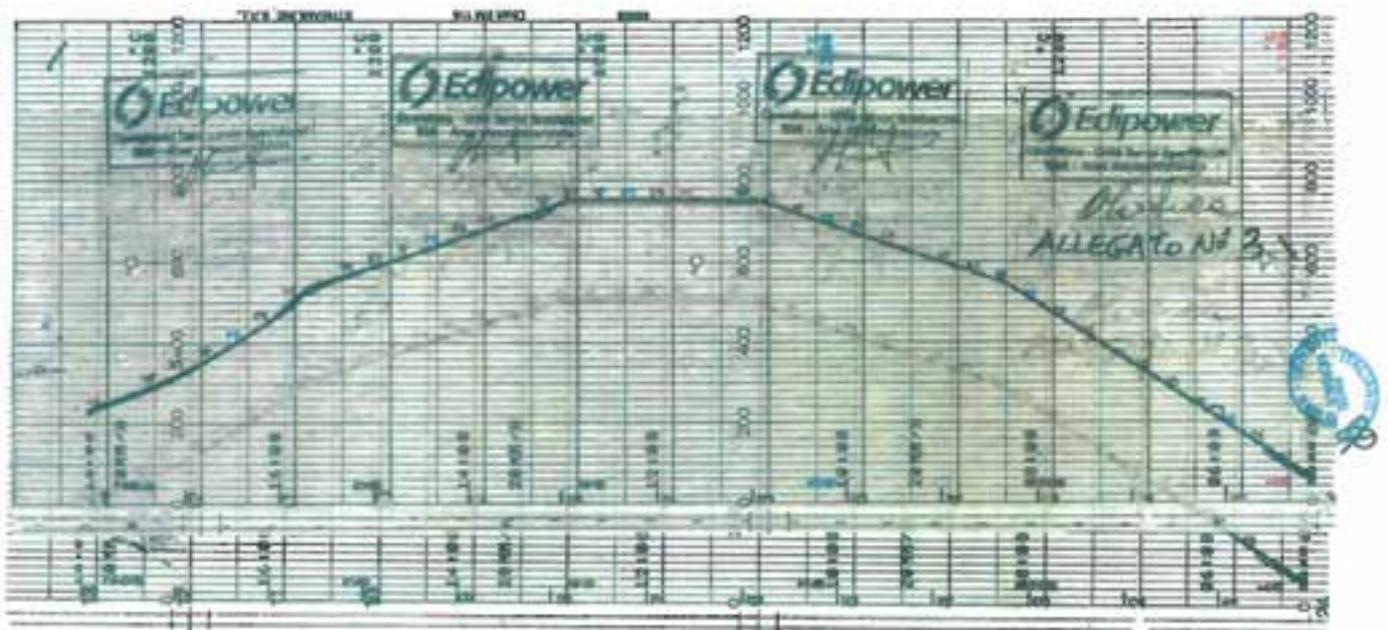


Figura 7. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Tracciato originale del trattamento di rinvenimento-distensione

Infine sulle saldature sono stati eseguiti, con esito positivo, una serie di controlli non distruttivi e nello specifico controllo visivo VT, controllo con liquidi penetranti PT, controllo ultrasonoro difettoscopico UT e controllo delle durezza.



Figura 8. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Preparazione dei cianfrini



Figura 9. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Saldature SA1, SA2 e SA3



Figura 10. Rapporto Riparazione Centrale di Gissi - Saldature SA1, SA2 e SA3

5. Conclusioni

La realizzazione di saldature tra acciai dissimili può essere motivo della formazione di difetti (cricche) nell'area oggetto di saldatura, a causa di fenomeni di diffusione del carbonio dalle strutture martensitiche alle strutture austenitiche e della differente struttura cristallina che si trova nell'interfaccia della ZTA, tra il materiale d'apporto e il materiale di base, come dimostrato anche dall'esperienza in campo di rotture avvenute su saldature dissimili in centrali termoelettriche a ciclo combinato. Al fine di evitare le problematiche connesse alla realizzazione delle suddette saldature, presso la Centrale Termoelettrica di Gissi (CH) si è scelto di sostituire le stesse con delle unioni flangiate, realizzate con flange saldate con saldature omogenee e collegate tra loro a mezzo tiranti. Il progetto del lavoro è stato approvato come riparazione dall'Inail Uot di Pescara e, al termine dell'esecuzione, le nuove saldature omogenee sono state sottoposte a prove non distruttive, che hanno confermato la buona riuscita delle opere.

6. Bibliografia

- [1] R. Foret, B. Million, M. Svoboda and K. Strànsky. Structural stability of dissimilar weld joints of steel P91. IoM Communications Ltd, anno 2001;
- [2] E. Tasak, M. Stankiewicz, R. Gierlicki and K. Ziewiec. Properties of joints welded in dissimilar materials, Welding International, anno 2003;
- [3] J. Shield, C. Kovach. Linee Guida Pratiche per la lavorazione di acciaio inossidabili austenitici ad Elevate prestazioni. IMOA, anno 2014;
- [4] G. Daurelio. Giunti Dissimili, di Testa e a Sovrapposizione, tra differenti Acciai al C, Acciai Inossidabili e Leghe, saldati a Laser. Istituto Italiano della Saldatura. Anno 2011;
- [5] Alstom Ltd, D. Kempter, Bollettino informativo CIB20121017, 17 ottobre 2012;
- [6] UNI EN ISO 15614-1:2012;
- [7] UNI EN ISO 9606-1:2013;
- [8] UNI EN ISO 9712:2012.

Aspetti Tecnici afferenti le riparazioni di Generatori di Vapore Semifissi eseguite secondo il d.m. 329/04

N. Altamura¹, G. de Gennaro¹, V. Galasso², A. De Sandre¹

¹ Inail - Uot di Bari

² Inail - Uot di Taranto

1. Introduzione

Nell'era dell'industria 4.0 ancora molto rilievo oggi occupa il ruolo dell'uso del vapore. Sia per la realizzazione di scambi termici o sia per la forza che il fluido può sprigionare, il vapore è al momento ancora il sistema più utilizzato per i diversi vantaggi legati alla sua molteplicità ed economicità d'uso in tutti i settori dell'industria non solo italiana.

I Generatori di vapore semifissi (GdV), grazie alla loro flessibilità d'uso sono sicuramente gli apparecchi più presenti all'interno sia della piccola che della grande industria e inevitabilmente il loro esercizio comporta quelle disfunzioni che potranno essere affrontate solo con interventi di riparazione e/o di sostituzione di membrane ed accessori.

E' pertanto importante approfondire l'argomento "riparazione" che, oltre ad aver visto notevoli aggiornamenti normativi, non nasconde anche notevoli progressi tecnici legati proprio ai principi dell'industria 4.0.

In generale, la riparazione di un apparecchio in pressione è un'operazione che racchiude criticità riscontrate sia in fase di progettazione, sia in fabbricazione e infine anche in fase di esercizio.

Fortunatamente non sempre le criticità si presentano contemporaneamente ma se quelle di esercizio possono presentarsi statisticamente isolate, quelle legate alla progettazione e fabbricazione si presentano solitamente insieme.

Nel d.m. 329/04 l'argomento riparazione in assenza di modifiche sostanziali è trattato specificamente nell'articolo 14.

Dopo l'introduzione della Direttiva 97/23/CE, sostituita dalla Direttiva 2014/68/UE, al fine di eseguire una corretta riparazione risulta fondamentale quanto contenuto nelle Istruzioni Operative fornite dal fabbricante; se queste risultano carenti soprattutto in termini dei rischi residui, sarà facile che gli interventi riparativi potranno generare a loro volta altre criticità che a volte possono portare al totale decadimento delle funzioni dell'apparecchio fino al suo blocco.

Paradossalmente, invece, gli apparecchi ed i Generatori di Vapore che sono corredati di libretto Ispesl o Ancc, costruiti sicuramente prima del 29/05/2002, propongono più informazioni finalizzate alla manutenzione e riparazione. Un esempio di tali informazioni sono la denominazione specifica dei materiali e loro caratteristiche fisiche-chimiche e meccaniche; gli spessori nominali degli stessi; i materiali di apporto delle saldature; i trattamenti eseguiti sia in fase di formatura che in fase di assemblaggio; i trattamenti eseguiti per proteggerli dalla corrosione; ecc.

Pertanto, in questo studio si confrontano esempi di riparazioni di generatori di vapore semifissi ricadenti nelle due tipologie (marcati e non marcati CE), esplicitando gli aspetti tecnici affiorati durante le esperienze lavorative degli autori, confrontando metodi e tecnologie di intervento nel pieno rispetto della normativa vigente afferente.

2. Aspetti generali sulle anomalie frequenti

L'applicazione del d.m. 329/04, art. 14 ha permesso al gruppo di autori una registrazione delle anomalie delle membrane dei GdV, intendendo per anomalie tutti quei difetti aventi

cause interne e/o esterne all'apparecchio, sia dovute alla progettazione/fabbricazione e sia dovute all'esercizio.

Le anomalie più frequenti possono essere ordinate in funzione delle percentuali di intervento:

- ✓ Cricche sulle saldature (45%);
- ✓ Corrosioni di varia natura (25%);
- ✓ Sottospessori (15%);
- ✓ Deformazioni Permanenti (10%);
- ✓ Cricche sui materiali (5%)

L'analisi tecnica di tali anomalie ha dato responsi sull'origine delle stesse e contemporaneamente ha indicato la strada da seguire per l'ulteriore esercizio dei GdV riparati.

Raramente la riparazione è risultata necessaria nel periodo compreso dalla messa in servizio alla prima verifica periodica (2 anni) ma quando ciò è accaduto, l'attenzione sia del riparatore e sia del soggetto preposto alla verifica di riparazione è stata rivolta principalmente verso l'esercizio.

Quando le anomalie sono state eliminate attraverso una riparazione o sostituzione di una membratura del GdV il lavoro svolto è stato ampiamente agevolato dalla disponibilità di tutti i dati necessari ad eseguire l'operazione. Infatti la possibilità di conoscere alcune notizie principali, come:

- ✚ I materiali utilizzati per tutte le membrature e loro caratteristiche fisiche-chimiche e meccaniche;
- ✚ Le tipologie dei giunti saldati;
- ✚ Le tipologie dei giunti mandrinati;
- ✚ Le precise dimensioni e configurazioni di tutte le membrature;
- ✚ Le precise prestazioni e caratteristiche tecniche di tutti gli accessori in pressione;
- ✚ Le indicazioni sulle corrosioni calcolate;
- ✚ Le indicazioni sul tipo di combustibile (portata, pressione di ingresso, quantità di comburente, ecc.);
- ✚ Le portate massime/minime di ingresso dell'acqua e di uscita del vapore;
- ✚ Le caratteristiche limite dei fumi interni e di uscita dal camino;
- ✚ Le potenzialità alle varie condizioni di carico;
- ✚ Le indicazioni sulla marcia e tipologie arresto (secco/umido).

Rende l'attività di riparazione più congrua e ricca di consapevolezza sia nei confronti dell'intervento stesso e sia nei confronti del futuro esercizio.

Molti di questi dati sono disponibili solo sui vecchi libretti matricolari dell'Ancc o dell'Ispesl in quanto obbligatori ai fini del vecchio sistema di omologazione in sede di costruzione.

Difficoltà si sono riscontrate per gli interventi sui GdV costruiti dal 29.05.2002, data di entrata in vigore in maniera cogente della Direttiva 97/23/CE attraverso il d.lgs. 96 del 25.02.2000. Come ribadito dalla Direttiva 2014/68/UE i documenti a corredo delle attrezzature o insiemi PED sono sostanzialmente la Dichiarazione di Conformità e il Manuale delle Istruzioni Operative.

In quasi la totalità dei documenti visionati in questi anni di applicazione della Direttiva PED, solo la richiesta specifica dei disegni aggiornati dal costruttore originario ha permesso una corretta valutazione dell'intervento ripartivo, mentre in alcuni casi si è potuto intervenire solo con indagini aggiuntive o con il sistema di comparazione con apparecchi uguali ma costruiti prima del 29.05.2002.

E' quindi sorta subito la necessità di creare un archivio di tipologie di apparecchi che avesse una duplice finalità:

- ❖ Gestione degli interventi;
- ❖ Gestione delle caratteristiche progettuali.

La prima ha raggruppato le anomalie ed ha la finalità di indirizzare l'utilizzatore e il soggetto verificatore verso la scelta, a volte difficile, fra riparazione o modifica; poi nell'ambito della modifica capire se sarà minore o, al contrario del tipo sostanziale tale da pregiudicare la vecchia certificazione/omologazione e iniziare a parlare di nuova certificazione.

La seconda finalità è più complessa perché racchiude soluzioni progettuali che non sono più afferenti all'unico codice di calcolo ammesso fino all'entrata in vigore della Direttiva PED (raccolta VGR dell'IspeSI), ma che si ispirano anche a codici di calcolo internazionali e alle norme tecniche armonizzate alla Direttiva PED, nonché a semplici piani sperimentali di progettazione specifica.

In questo scenario di intervento moltissima attenzione hanno ottenuto i materiali fabbricati in paesi extracomunitari, in quanto per essi non sempre è stata facile l'assimilazione ai materiali ammessi dalla Direttiva PED per le alte temperature. Infatti basterebbe solo pensare che una sostituzione di una membratura con un materiale simile, ma non uguale, all'originale, potrebbe comportare grandi ragionamenti sull'eventualità di ricertificare PED l'intero GdV (modifica sostanziale).

Un altro aspetto non secondario emerso è stato quello delle verifiche di collaudo post-intervento come la Prova Idraulica.

Diciamo subito che, paradossalmente, quando si è trattato di ricertificare in PED i GdV, calcoli permettendo, non ci sono stati problemi sulle procedure da seguire per le verifiche di certificazione in quanto la Direttiva 2014/68/UE è molto chiara, insieme alle norme armonizzate afferenti.

Quando invece si è trattato di pure riparazioni o sostituzioni, non sempre gli orientamenti sono stati convergenti sulle pressioni di prova da applicare, a causa di alcune divergenze fra le norme di legge e la disciplina dell'esercizio (vedi r.d. n. 824/1927; d.m. 21.05.1974; circolari Ancc e IspeSI) e la norma tecnica o il codice di calcolo originariamente applicato dal progettista in applicazione della Direttiva PED.

3. Le Indagini Preliminari propedeutiche all'analisi di dettaglio

Attualmente si hanno a disposizione diverse tecniche di analisi di dettaglio da applicare però solo dopo un'attenta indagine preliminare di screening o di tipo generale, altrimenti i costi dell'intervento possono rendere l'operazione poco conveniente.

Premettendo che le verifiche obbligatorie imposte sia dal d.lgs. 81/08 e s.m.i. e dal d.m. 329/04 devono essere accompagnate dai controlli programmati dall'utilizzatore in ossequio all'articolo 71 del d.lgs. 81/08, diventano importanti le intersezioni delle risultanze di tali verifiche e controlli e quindi l'effettiva loro registrazione.

E in quest'ottica, se pur nel rispetto delle norme tecniche e di legge che possono dilatare i tempi di assenza dai luoghi di installazione e di esercizio, e delle indicazioni prescritte dal fabbricante del GdV che si pone il ruolo fondamentale del conduttore. Quest'ultimo non risulta più essere una "necessità" atta al funzionamento del GdV ma si aggiunge in maniera preponderante alla catena della sicurezza dell'esercizio del GdV, registrando tutte quelle deviazioni, anche minime, che eludono i dispositivi digitali ed elettromeccanici posti a guardia dell'apparecchio e fornendo quindi notizie importanti afferenti le tecniche di indagine.

Un esempio tipico di deviazioni di funzionamento in esercizio di un GdV è legato alle portate e pressioni di utilizzo. Sappiamo che la maggioranza degli impianti di vapore al momento non sono sofisticati, e in assenza di dialogo tra gli operatori delle utilities e dei conduttori tali deviazioni non sarebbero registrabili; in tale contesto si studierebbero a ritroso le cause delle deviazioni, partendo dalle stesse utilities, passando per gli accessori destinati alla riduzione delle pressioni e regolazione delle portate, sistemi per il recupero delle condense, per finire con tubazioni ed accessori in pressione e di sicurezza montate

lungo il trasporto di vapore. Se tutte queste verifiche danno esito negativo, per esclusione risulta evidente che le ragioni delle deviazioni saranno da imputare allo stesso GdV.

In sede di verifiche di riqualificazione periodica imposta dal d.m. 329/04 le notizie di tali deviazioni saranno interpretate per integrare i controlli di routine con altri più specifici, secondo lo spirito dello stesso d.m.

Tecnicamente il primo elemento esaminato è l'età del GdV.

Per età del GdV si intende il tempo di esercizio che vede come momento iniziale quello della data di verifica di messa in servizio o del vecchio primo impianto. Ovviamente tale data andrebbe sempre rapportata con quella del vecchio libretto matricolare o della dichiarazione di conformità per capire se l'apparecchio è entrato in esercizio in un tempo ragionevolmente congruo dalla data di fabbricazione o commercializzazione.

In questo tipo di indagine è risultata netta la divaricazione tra i GdV con libretto Ancc o Ispesl e quelli costruiti e commercializzati in ossequio alla Direttiva PED. Mentre per i primi le date su menzionate risultavano al 98% vicine, con massimi di 18-20 mesi, per i secondi, soprattutto dopo l'entrata in vigore del d.m. 329/04, il 35% ha presentato periodi superiori ai 3 anni, con punte anche di 10 anni, cioè pari addirittura al periodo necessario per effettuare una verifica di integrità.

E' chiaro che i "vuoti" di eventuali esercizi non regolari dal punto di vista legale, o riposi forzati dei GdV non debitamente segnalati, possono fortemente influenzare anche il giudizio del soggetto verificatore in sede di riparazione.

In tale contesto, come anticipato sopra, diventano fondamentali le notizie fornite dai conduttori e dagli stessi utilizzatori, che assumono le connotazioni di vere e proprie dichiarazioni ufficiali da prendere in considerazione direttamente negli atti del progetto di riparazione.

Tale fase preliminare di indagine risulta fondamentale per stabilire il rapporto fra lo stato di conservazione/degrado e il periodo di funzionamento, e contestualmente ipotizzare il 45° anno di età così come indicato nella circolare Ancc n. prot. 7367 del 21.08.1957, per effettuare la revisione della pressione di bollo.

Infatti, soprattutto dall'entrata in vigore del d.m. 329/04, questo secondo dato potrebbe diventare "interpretabile" proprio per quanto detto sopra. Tuttavia si precisa che proprio la circolare Ancc citata è attualmente in fase di revisione da parte degli organi competenti richiamati nel d.m. 329/04 art. 3.

La procedura di indagine preliminare dopo una prima fase generale si concentra sulle conoscenze delle notizie dei seguenti elementi:

- ✓ bruciatore e sistema di combustione;
- ✓ sistemi di alimento acqua e spurgo fanghi;
- ✓ sistemi di trattamento acqua di alimento;
- ✓ impianto elettrico;
- ✓ impianto di distribuzione vapore;
- ✓ ambiente di installazione.

4. Bruciatori

Quando si è presentata l'eventualità o la necessità di cambiare il tipo di combustibile non sempre l'utilizzatore ha comunicato tempestivamente gli organi preposti al controllo e verifiche periodiche.

Ciò è accaduto per diverse ragioni ma risulta netta la diversità di approccio tra l'utilizzatore di tipo privato e l'utilizzatore afferente le aziende pubbliche (es. ospedali).

La scelta è sostanzialmente mossa da motivi economici legati al risparmio energetico da un lato e da motivi legali relativi alla sfera del rispetto delle norme per la protezione ambientale in continua evoluzione dall'altro lato.

Ma nel complesso non sempre tali scelte, ricche di buoni propositi, producono un vantaggio vero. Infatti il passaggio da un combustibile liquido ad uno gassoso (tipico per il 90% delle trasformazioni) comporta in primis un nuova modalità di distribuzione del calore. Un combustibile liquido sicuramente necessita di un bruciatore più complesso in quanto si dovrà prima polverizzarlo o atomizzarlo in minutissime goccioline, producendo delle fiamme (di lunghezza a volte notevole) diverse da quelle generate dall'utilizzo del gas metano. Infatti la combustione del gas è più semplice per l'evidente capacità di miscelarsi con l'aria e questo produce delle temperature sia della fiamma che dei fumi sicuramente più alte rispetto a quelle prodotte dal combustibile liquido. Spesso queste alte temperature di fiamma, magari con gruppi di combustione a gas non premiscelati, producono fiamme corte, intense e poco luminose, concentrando i 1500°C-1800°C in prossimità della corona di attacco bruciatore/piastra tubiera, con il risultato di trasmettere elevati gradienti termici tali da criccare prima la corona stessa e poi la saldatura di attacco (Figg. 1-2). La soluzione è evidentemente la perfetta regolazione della fiamma senza ridurre i rendimenti della caldaia e quindi non sfruttare le reali potenzialità dell'apparecchio, ma non di facile attuazione. (Es. la regolazione potrà avvenire in diversi modi, anche con l'utilizzo di refrattari di rivestimento che potrebbero abbattere il carico termico eccessivo).



Figura 1. Attacco Focolare-Piastra tubiera



Figura 2. Dettaglio delle cricche rilevate sulla corona attacco bruciatore

5. Sistemi di alimento acqua e spurgo fanghi

Spesso è stato necessario cambiare le pompe di alimentazione o la sostituzione del secondo mezzo di alimentazione esistente (ma sempre alimentato da energia diversa da quella del primo mezzo).

Ciò che interessa al fine di continuare a parlare di riparazione o sostituzione sono le prestazioni progettuali che i nuovi componenti potranno garantire.

Per le pompe di alimentazione non dovrebbe risultare difficile mantenere le portate e le pressioni (altezze) di ingresso nella caldaia, mentre gli spurghi sono sempre più spesso

controllati da un dispositivo della verifica costante della salinità dell'acqua di caldaia che permette la conseguente apertura/chiusura automatica della valvola di spurgo.

Differenti approcci si sono dovuti applicare per le caldaie PED in funzione dei componenti/membrature incluse nella certificazione secondo la Direttiva 2014/68/UE, e se queste includevano o meno i mezzi di alimentazione.

Per gli insiemi PED comprendenti i mezzi di alimentazione (non sempre legittimamente realizzati in aderenza del r.d. n. 824/1927), ovviamente si è tenuto conto di quanto indicato dal fabbricante in quanto il complesso caldaia-bruciatore-pompe alimento è stato valutato con una congrua analisi dei rischi a monte della progettazione, e successivamente un Organismo Notificato ha valutato la piena conformità alla Direttiva. In sede di esercizio vige tuttora il d.p.r. 5 Settembre 1966 n. 1288 afferente i mezzi di alimentazione dei GdV con potenzialità specifica superiore a 20 Kg per metro quadro per ora.

Il confronto tecnico fra le prescrizioni del fabbricante del GdV e quanto indicato all'articolo 13 del suddetto d.p.r. n. 1288 comunque va eseguito al fine di conoscere le criticità che si potrebbero generare qualora la portata di progetto risulti inferiore a quella del DPR.

Quando invece negli insiemi PED dei GdV non sono comprese le pompe, allora l'approccio del soggetto verificatore risulterà identico a quello dei GdV costruiti e omologati secondo le norme di legge antecedenti all'entrata in vigore della Direttiva 97/23/CE. In questo caso l'applicazione del DPR n. 1288 risulta l'unico riferimento di legge anche per GdV che non superano la potenzialità specifica di 20 Kg per metro quadro per ora.

Il guasto delle pompe di alimentazione è comunque un indicatore di indagine importante per diversi elementi del GdV come la qualità dell'acqua di alimento, malfunzionamento della valvola di non ritorno, la posizione del serbatoio di pescaggio, le vibrazioni trasmesse dal/al GdV mentre è in esercizio, l'impianto elettrico del sistema intero, ecc.

Da ultimo, ma non meno importante, si è riscontrato che per gli apparecchi/insiemi PED, spesso corredati di potenti PLC, soprattutto adibiti alla produzione di vapore destinato a utilities come presse, magli, macchine per stampaggio, le pompe hanno subito delle sollecitazioni notevoli tali da essere cambiate dopo pochissimi anni di lavoro. In questo caso la bassa prevalenza delle pompe, ovviamente di poco superiore alla massima pressione di esercizio dei GdV ha causato difficoltà a "spingere" acqua all'interno di un corpo cilindrico sottoposto sempre a forti pressioni; ciò si è riversato spesso sui giunti di trasmissione fra la parte elettrica (motore) e quella idraulica con disallineamenti e/o rotture dei cuscinetti. Tali esperienze hanno dimostrato come a parità di pressioni e portate di vapore massime erogate dai GdV, molta importanza riveste l'impianto di destinazione e quindi dare atto di come ancora oggi il d.p.r. n. 1288 risulta attuale.

Lo spurgo dei fanghi automatico ha invece prodotto notevoli vantaggi sulla qualità del vapore prodotto e sullo stato di conservazione generale della caldaia. Tutto dipende dalla salinità dell'acqua in caldaia che superati certi valori facilmente settabili permettono l'automatico ricambio di acqua ma, soprattutto si potrà registrare la frequenza di apertura/chiusura e conoscere ulteriori anomalie in corso. Tutti questi dati potranno essere trasmessi in remoto presso la sede del conduttore, anche non continuo, che dovrà interpretare gli stessi per apportare le dovute correzioni sull'esercizio.

Al contrario un controllo manuale o temporizzato dello spurgo dei fanghi non permette un'azione attiva al fine della conservazione del buon stato del GdV, ma semplicemente l'applicazione di una procedura che a volte potrebbe addirittura rivelarsi dannosa, anche quando la presenza del conduttore risulta continua.

Infatti, quando l'automazione non è stata prevista dal fabbricante, molti utilizzatori l'hanno richiesta in concomitanza dell'applicazione della UNI-EN 11325-3, di cui al momento esiste la revisione del 2016 in attesa di essere pubblicata, ma ufficialmente, ai fini di legge è valida ancora la versione del 2010.

In tale norma si indicano gli adempimenti per l'utilizzo non continuo del conduttore con obbligo di presenza ogni 24/72 h, con evidente certificazione del GdV secondo la Direttiva 2014/68/UE.

Nelle seguenti figure 3-4 e 5 si evidenziano le videate gestibili dal PLC per la verifica costante della salinit  della acqua attraverso la conducibilit  della stessa.



Figura 3. Dettaglio videata Sinottico Caldaia gestito da apposito PLC

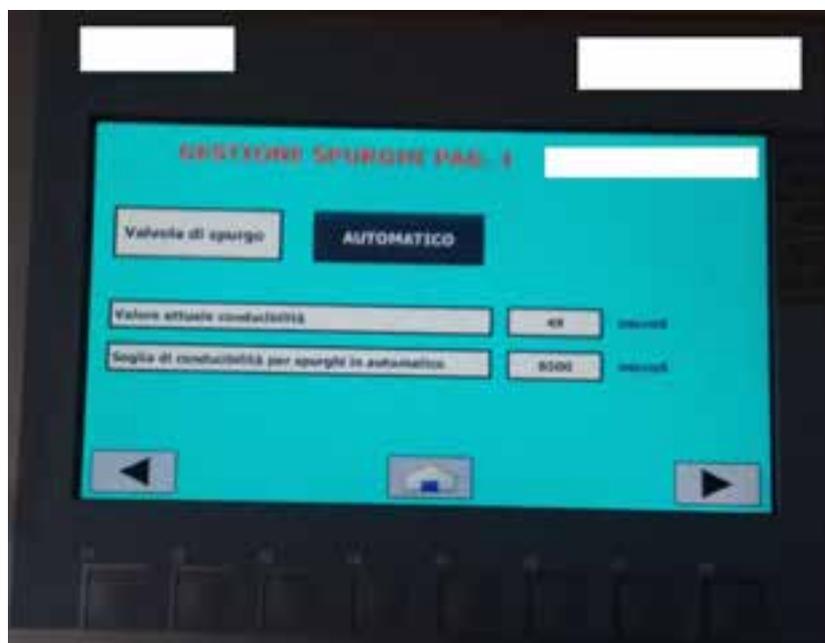


Figura 4. Dettaglio videata Gestione Spurghi

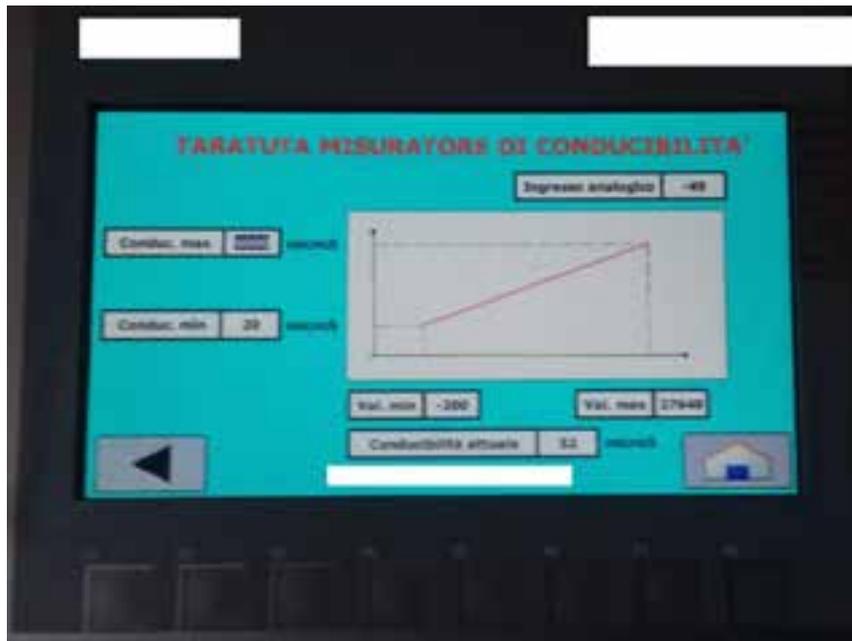


Figura 5. Dettaglio videata taratura del conduttivimetro

6. Sistemi di trattamento acqua di alimento

Solitamente sono i primi sistemi ad essere attenzionati in occasione di un intervento ripartivo o di semplice sostituzione per un GdV.

In teoria tutto dovrebbe essere controllato attraverso esami chimici-fisici sia dell'acqua di alimento e registrato in appositi registri ma sull'interpretazione dei dati raccolti non sempre viene riposta la giusta attenzione e le conseguenze si ripercuotono ovviamente su tutte le membrane del GdV.

Tra tutti i danni che si possono derubricare quelli maggiori e immediati si possono notare sui tubi di scambio che nella migliore delle ipotesi hanno permesso "solo" l'abbassamento del rendimento della caldaia. A riprova di quanto detto a volte non serve neanche visionare i tubi stessi in quanto all'esterno ci sono gli indicatori di livello e le connessioni per il campionamento che possono dare una primissima indicazione sulla qualità dell'acqua in ingresso.

Un esempio è quello della Figura 6 in cui già la vista degli indicatori di livello non lascia presagire un buon sistema di trattamento delle acque di alimento. Infatti ammesso che quest'ultime siano trattate bene, la capacità che potrebbe avere una caldaia, anche esercita male, di comportare una tale corrosione imputabile ad altre cause è statisticamente difficile da riscontrare.



Figura 6. Dettaglio Indicatori di livello sottoposti a corrosione



Figura 7. Dettaglio Indicatori di livello sottoposti a corrosione

Inoltre, così come si evince nella Figura 7 gli accoppiamenti dei materiali non hanno certamente rallentato i fenomeni corrosivi in quanto l'unione rame-acciaio al carbonio comportano dei differenziali elettrochimici relativamente elevati.

Le incrostazioni depositatesi sulla superficie esterna dei tubi del fascio tubiero producono grossi innalzamenti delle temperature che a volte possono superare quelle di progetto, portando tali membrature a essere sottoposte involontariamente al fenomeno dello scorrimento viscoso. In tale situazione si avranno principalmente:

- ✓ Dilatazioni incontrollate che spingono i tubi contro le piastre tubiere con presenza di cricche sulla saldatura di giunzione con il fasciame del corpo cilindrico (vedere figura 8);
- ✓ Indebolimento per softening delle resistenze meccaniche della parte sottoposta a scorrimento viscoso;
- ✓ Accelerazioni delle corrosioni a causa dell'aumento delle temperature e dello stress meccanico;
- ✓ Abbassamento del rendimento della caldaia per mancato scambio termico causato dal materiale "refrattario" depositatosi sull'esterno dei tubi;
- ✓ Continui interventi di tutti gli accessori di regolazione e limitazione con conseguente invecchiamento precoce della loro funzionalità (es. Indicatori di livello come in Figura 9).



Figura 8. Cricca su giunzione saldata piastra tubiera-fasciame corpo cilindrico riscontrata con prova idraulica



Figura 9. La sostituzione delle connessioni del gruppo indicatori di livello risulta essere un intervento di riparazione statisticamente rilevante

Solitamente l'intervento di riparazione coinvolge sia i tubi del fascio tubiero e sia alcune connessioni esterne, ma per rendere nuovamente omogenea la superficie di scambio termico si è spesso intervenuto con un lavaggio chimico che, oltre ad eliminare le incrostazioni più pericolose, ha permesso il rilievo di altre anomalie interne altrimenti assolutamente invisibili (cricche otturate dalle stesse incrostazioni che le hanno causate). Tuttavia, questa operazione va comunque effettuata con la massima cautela al fine di evitare depositi acidi consistenti capaci di accelerare fenomeni corrosivi già in atto, pertanto il lavaggio chimico dovrà essere seguito da un'attenta pulizia del componente chimico utilizzato.

Nella Figura 10 si evidenziano le tubazioni di scambio posizionate nella parte superiore del Corpo Cilindrico quasi in corrispondenza del massimo livello raggiungibile dal pelo dell'acqua. Un particolare che nella figura non potrà sfuggire è la presenza delle incrostazioni anche sulle squadrette di rinforzo fra la piastra tubiera e il corpo cilindrico. Un tale segnale indica che l'evaporazione è avvenuta in maniera tumultuosa e la ragione maggiormente responsabile di ciò è la forte presenza di sali e sostanze organiche all'interno dell'acqua di alimento, con formazione di melma e schiume, nonché di presenza oli galleggianti sulla superficie del pelo libero.

Il vapore prelevato dalla valvola di presa trascinerà goccioline di acqua e il pelo libero dell'acqua di caldaia sarà in continuo movimento tale da rendere difficile l'effettiva valutazione del livello.

E' quindi prevedibile che il vapore prelevato partirà con una qualità scadente che si ripercuoterà sull'efficacia degli impianti di destinazione.



Figura 10. Tubi superiori al focolare fortemente incrostati



Figura 11. Tubi superiori al focolare dopo il lavaggio chimico

7. Impianto elettrico

Spesso trascurato nelle verifiche obbligatorie l'impianto elettrico ha ultimamente rivestito un ruolo quasi primario in quanto la gestione delle sicurezze è lentamente diventata elettronica, grazie all'utilizzo di semplici PLC, facilmente installabili, con predilezione della logica fail-safe e della ridondanza.

Questo però non dovrà distrarre l'attenzione verso alcuni fenomeni corrosivi che si sono presentati su GdV e che avevano connotazioni di corrosioni destinate da passaggi di correnti vaganti.

Infatti non bisognerà dimenticare che l'acqua all'interno del corpo cilindrico può essere vista come una grande elettrolita che agisce fra elettrodi di cui uno è sicuramente il corpo cilindrico del GdV, mentre l'altro potrà intendersi anche con una connessione o accessorio realizzato con un materiale più nobile elettrochimicamente.

Evidentemente con l'utilizzo di molti accessori che trasmettono dati attraverso sistemi di cablaggio al PLC, si potrebbero verificare presenze di correnti elettriche all'interno dell'intero sistema che potrebbero accelerare i fenomeni corrosivi. Tuttavia, ancora oggi, si tende a imputare il motore elettrico della pompa come vero responsabile delle cosiddette correnti vaganti e quindi della corrosione rapida di alcune membrane.

In queste condizioni anche l'esecuzione di un buon impianto di messa a terra non produce effetti risolutivi, anzi a volte potrebbe veicolare correnti esterne disperse da altre utilities. E' quindi parso opportuno, in presenza di situazioni particolarmente difficili, collegare degli anodi sacrificali alla stessa stregua di quanto accade per i serbatoi contenenti GPL.

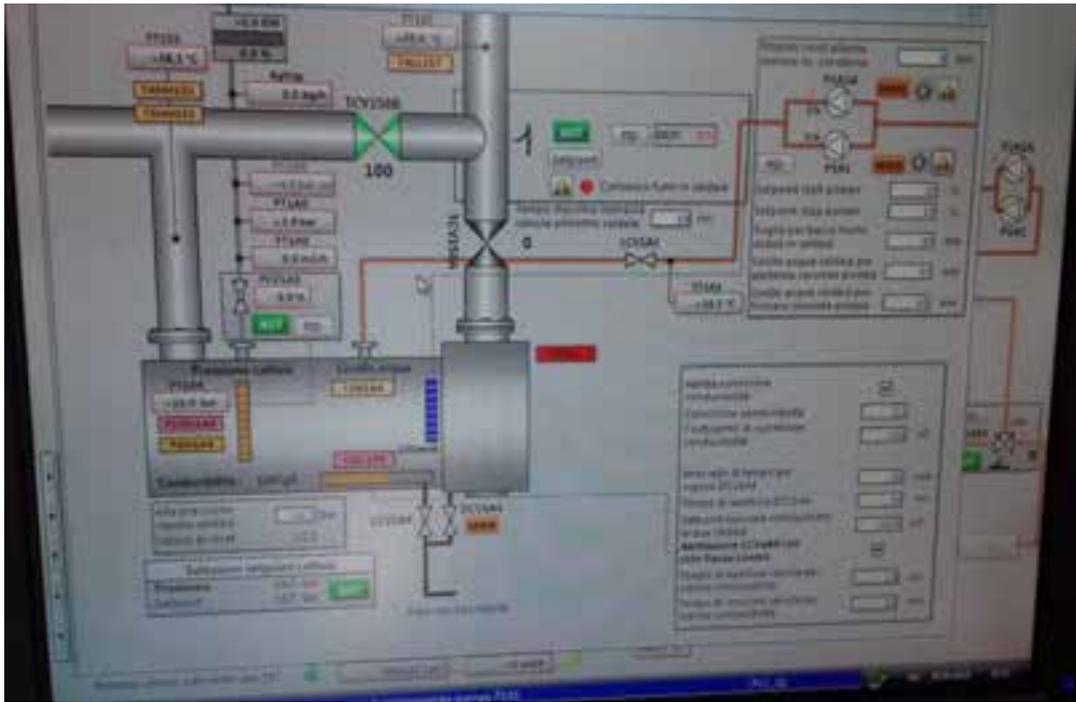


Figura 12. Schema di un generatore a recupero di fumi prodotti da un generatore di corrente a combustione

In alcuni casi, fortunatamente sporadici, si è dovuto realizzare un intervento di questo tipo per GdV a recupero di fumi provenienti da motori a combustione destinati a generare correnti. Probabilmente la non felice posizione dei due apparecchi e le forti dispersioni di correnti hanno prodotto corrosioni rapide su GdV di nuova costruzione, rallentate dall'utilizzo di anodi sacrificali.

8. Impianto distribuzione vapore

Solitamente non fa parte dei controlli da eseguire durante le verifiche periodiche di riqualificazione, ma conoscere il modo in cui il vapore sarà utilizzato dopo essere stato prodotto in caldaia e, soprattutto conoscere lo stato di conservazione di tali percorsi e delle utilities permette anche di conoscere le eventuali anomalie della caldaia.

In tale contesto può essere utile studiare i seguenti elementi:

- ✓ Stato delle valvole di presa;
- ✓ Collettori ricevitori;
- ✓ Stato delle tubazioni;
- ✓ Conformazione geometrica delle tubazioni;
- ✓ Conformazione geometrica dei percorsi delle tubazioni;
- ✓ Presenza di scaricatori di condense;
- ✓ Presenze e tipologie di gruppi di riduzione;
- ✓ Pressioni di utilizzo;
- ✓ Processo e macchine di utilizzo;
- ✓ Eventuale riutilizzo o riciclo del vapore condensato.

Ciascun elemento elencato costituisce una porta per l'ingresso di variabili che possono turbare il buon funzionamento di un singolo GdV. Statisticamente, per i GdV che riutilizzano vapore condensato, l'acqua di ritorno è risultata sempre ricca di impurità di vario genere, ma non da meno sono risultati gli inquinamenti prodotti dal vapore da parte di scambiatori di calore che hanno avuto dei cedimenti fra il lato mantello e il lato tubi in cui

circolava il prodotto da processare a pressioni elevate, o “affaticamenti” causati da ostruzioni varie sui gruppi di riduzione o sugli scaricatori di condensa.

Come visto nel paragrafo 5, anche la richiesta di grandi pressioni, vicine alle pressioni di progettazione PS, può comportare a lungo termine effetti dannosi sugli accessori (pompe di alimento).

9. Ambiente di installazione

Ancora oggi è in vigore il d.m. 22 Aprile 1935 dettante norme sui locali per i generatori di vapore e collocazione degli accessori.

Solitamente il contesto dei locali destinati esclusivamente ai GdV non è isolato e quindi anche se tutte le prescrizioni del d.m. 22 Aprile 1935 dovessero essere rispettate è risultato sempre un bene conoscere le attività dei luoghi circostanti e le eventuali intersezioni con l'attività della caldaia (vibrazioni, passaggio di altri impianti con altri fluidi, sistemi di produzione di corrente elettrica, ecc.) che possono nascondere insidie da valutare. Gli esempi classici sono le intersezioni con i precorsi impiantistici del gas o liquido combustibile, dello scarico dei fanghi (fognini) e dell'acqua di alimentazione.

Quando però i GdV non sono inseriti in ambienti chiusi o comunque secondo le regole del citato d.m. 22 Aprile 1935, si è spesso assistito alla presenza di pesanti corrosioni localizzate del fasciame del corpo cilindrico con conseguenze di non poco conto sullo spessore e giunzioni permanenti dello stesso. In tali situazioni la verifica di riparazione la si è fatta precedere sempre da un'attenta verifica spessimetrica del fasciame, iniziata sempre nell'intorno della connessione o zona corrosa, al fine di evitare di concentrarsi sull'elemento criccato e poco sull'insieme in generale.

Molto può fare un adeguato rivestimento che però lascia inevitabilmente scoperte le connessioni, libere di deteriorarsi all'aria e alle intemperie (Figg. 13-14-15), pertanto risulta estremamente necessario in tali contesti provvedere alla realizzazione almeno di semplici tettoie di protezione in accordo ai percorsi degli impianti afferenti di presa vapore, acqua di alimentazione, combustibile o fluido riscaldante, ecc.



Figura 13. Connessione presa vapore scoperta



Figura 14. Connessioni scoperte di rivestimento o protezioni per inserimento sonde indicazione livelli e pressioni



Figura 15. Connessioni presa d'acqua riparata con inserimento di nuovo bocchello flangiato e ripristino delle superfici del fasciame locale parzialmente corrosivo

In tali contesti industriali è importante studiare l'atmosfera potenzialmente presente ma anche la semplice esposizione del GdV dal punto di vista dell'orientamento; chiaramente un GdV posto all'esterno in posizione di massima ventosità su una zona costiera ha molte più probabilità di subire corrosione, rispetto al suo apparecchio gemello posizionato nella parte opposta della stessa azienda.

10. Conclusioni

Gli elementi di indagine esaminati sono quelli che con l'esperienza fatta ci permettono di risalire alle cause delle anomalie riscontrate su un GdV; solitamente sono spesso oggetto del documento di Relazione Tecnica che solitamente si inserisce in sede di messa in servizio di un GdV. Il problema principalmente riscontrato è che tale documento spesso non risulta realizzato con la contestualizzazione del caso, ma semplicemente riportando quanto già scritto dal fabbricante del GdV. Tale approccio, come si è desunto dall'esperienza, non ha aiutato gli stessi utilizzatori che si sono ritrovati anche dopo pochissimi anni dalla messa in servizio a dover eseguire riparazioni importanti.

Inoltre, nell'ambito della Relazione Tecnica richiamata nel d.m. 329/04, art. 6, spesso si ritrova il documento di Analisi dei Rischi preparato dal fabbricante che, ovviamente non potrà conoscere tutti i dettagli del luogo di installazione, ma al massimo agire con una serie di prescrizioni, in parte richiamate dalle norme di legge, in parte richiamate dalle norme tecniche volontarie ed in parte costruite dallo stesso fabbricante. Ma ciò non è sufficiente; è l'utilizzatore che conosce il suo contesto ambientale e produttivo e a dover personalizzare l'analisi dei rischi, tant'è che non a caso il d.lgs. 81/08 fa obbligo di preparare il Documento di Valutazione dei Rischi, anche in funzione di quanto prescritto negli artt. 70 e 71 dello stesso d.lgs. 81/08.

Ma se da un lato la documentazione della messa in servizio può presentare le suddette criticità, non da meno possono risultare i documenti a corredo della domanda di riparazione in ossequio all'articolo 14 del d.m. 329/04.

Spesso le relazioni tecniche si concentrano giustamente del solo contesto in cui la riparazione sarà eseguita, attraverso calcoli, disegni, certificazioni di materiali, ecc.; ma raramente si raggiunge la finalità precisa di conoscere le cause e i fenomeni di degrado che hanno portato la presenza dell'anomalia, e in questo, come visto sopra, notevoli differenze si potranno avere tra stessi apparecchi commercializzati prima e dopo l'entrata in vigore della Direttiva PED. Di conseguenza, questo compito involontariamente si riversa sul soggetto verificatore, solitamente spinto dall'utilizzatore che a sua volta è mosso, legittimamente, da interessi e valutazioni economiche, ma i risultati di tali approfondimenti non sempre potranno essere riportati all'interno dei verbali di verifica delle riparazioni se non sotto forma di note, raccomandazioni o al massimo prescrizioni.

Raramente risulta affrontato l'aspetto manutentivo in quanto si tende a "esonere" l'attività di esercizio dalle cause delle anomalie e ricondurre le stese sempre sui "difetti originari". Indubbiamente tali difetti potranno esistere ma la loro esaltazione potrà avvenire solo dopo un esame di apparecchi uguali in modo da evidenziare una rilevanza statistica, grazie proprio alla gestione degli archivi sopra menzionati.

Tuttavia, oltre ai problemi legati alla carenza documentale, un'altra conclusione sembra degna di essere menzionata e riguarda la preparazione dei conduttori. Come sappiamo quest'ultimi sono abilitati attraverso un percorso dettato dal d.m. 1° Marzo 1974 tarato sulla tecnologia e il quadro normativo dell'epoca. A parere degli autori risulta urgente una riforma di tale percorso alla luce sia delle grandi e notevoli innovazioni tecnologiche che vedono il dilagare della filosofia digitale, e sia , soprattutto delle rivoluzioni normative di carattere comunitario con le ripercussioni sulla normativa nazionale (es.: conoscenza dei dati di una Dichiarazione di Conformità e differenza con il vecchio libretto matricolare), che non possono lasciare solo all'utilizzatore l'obbligo di formazione ed informazione.

11. Bibliografia

[1] d.m. 329/04

[2] d.m. 21.05.1974

[3] d.m. 01.04.1974

[4] UNI-EN 11325-3 ed. 2016

[5] "La Conduzione dei generatori di vapore". Fernando Pierini- Ancc

[6] "Generatori di Vapore". Donatello Annaratore. Tamburini editore

[7] "Saldatura per Fusione". Istituto italiano della saldatura. Hoepli

[8] "Meccanica della Frattura". Adelina Borruto. Hoepli

[9] "Incidenti ed Avarie. Linee guida per la valutazione di incidenti ed avarie attraverso la metodologia della meccanica della frattura". Università degli studi di Firenze- Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali. Proff. Ingg. Sergio Reale e Piergiorgio Malesani.

[10] "Codice PIVG". Ispesl. Istituto Poligrafico e zecca dello Stato.

Revamping Caldaia Hera Pozzilli (IS) per far fronte a fenomeni di corrosione e ridurre al minimo le fermate straordinarie, tecniche adottate e certificazione PED

F. Bonori¹, M. Cevasco¹, L. Bagnoli¹

¹ Ruths SpA

Sommario

Negli impianti di trattamento rifiuti la caldaia costituisce un elemento critico in quanto è l'elemento maggiormente soggetto a fenomeni di sporcamento e a fenomeni di corrosione e, allo stesso tempo, è anche l'elemento in cui le fermate per interventi straordinari hanno durata maggiore e richiedono molto spesso la presenza di un Ente Certificatore per il controllo delle parti in pressione.

Nel presente articolo verrà presentato il revamping della caldaia Hera di Pozzilli, a pochi chilometri da Roma, eseguito per far fronte sia a esigenze di riduzione dei costi di manutenzione, sia a esigenze di mercato e di massimizzazione della redditività dell'impianto.

In questo impianto è stata eseguita una nuova immatricolazione dello stesso visto che, seppur sono rimaste inalterate alcune caratteristiche fondamentali quali la producibilità, la pressione e la temperatura massima di esercizio nonché la logica della catena di sicurezza, le geometrie dell'impianto sono state variate.

1. Introduzione

Il continuo sviluppo dell'industria e la crescente richiesta di energia, sommata all'aumento della produzione dei rifiuti, ha portato negli ultimi anni la tendenza ad aumentare la pressione e la temperatura del vapore surriscaldato in modo da massimizzare la produzione di energia e rendere questi impianti economicamente sempre più redditizi. Questa tendenza porta ad un aggravio di quelle che sono le condizioni della caldaia che, se progettata senza le dovute attenzioni, può andare incontro a fenomeni seri di corrosione in breve tempo.

L'impianto oggetto della presentazione è uno dei pochi in Italia in grado di smaltire il cosiddetto Combustibile Solido Secondario (CSS), derivato dal trattamento di rifiuti urbani ed assimilati.

Il CSS è costituito da alcuni materiali organici, riciclabili come PET o PE, legna, materiali non riciclabili, in particolare plastica a base di cloro, carta, tessuti, plastica, alluminio o plastica, fogli di alluminio, imballaggi "multimateriali", non clorurati, gomme sintetiche, resine e fibre sintetiche

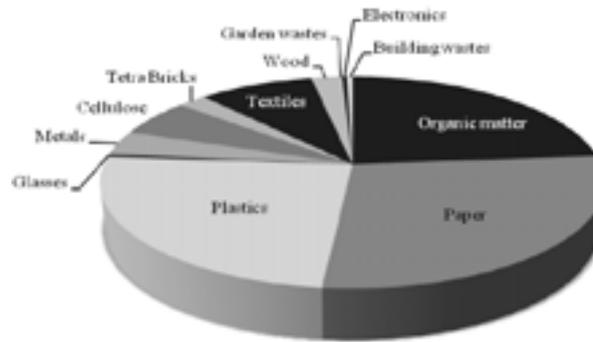


Figura 1. Composizione dell'RDF. [1]

<i>Categories</i>	<i>Percentage (%)</i>	<i>Caloric Value (J/g)</i>
Organic matter	23.71 ± 7.84	14,905.0 ± 57.1
Paper	27.91 ± 4.73	14,739.9 ± 2654.7
Plastics	24.50 ± 4.25	
HDPE	0.99 ± 0.73	45,670.4 ± 443.6
PET	1.87 ± 0.85	22,995.0 ± 16.1
LDPE	10.93 ± 3.29	41,269.5 ± 3,043.3
Mix	10.62 ± 3.41	41,203.8 ± 2,820.9
PVC	0.08 ± 0.19	
Glass	0.48 ± 0.45	
Ferrous metals	3.10 ± 1.99	
Non ferrous metals	0.61 ± 0.51	
Cellulose	5.76 ± 2.33	45 552.0 ± 84.6
Tetrabricks	2.16 ± 1.77	23 557.1 ± 154.5
Textiles	8.65 ± 3.76	21 298.2 ± 5 226.0
Wood	2.18 ± 1.37	18 825.0 ± 20.3
Rubber	0.03 ± 0.10	
Batteries	0.00 ± 0.00	
Garden wastes	0.14 ± 0.37	
Electronics	0.34 ± 0.50	
Building wastes	0.48 ± 0.45	

Tabella 1. Peso percentuale e valore calorico del "Refuse Derived Fuel mix". [1]

Generalmente, i fumi derivati dal processo di combustione del CSS sono particolarmente corrosivi, a causa dell'elevato contenuto di cloro e di altre sostanze ossidanti, e questo

implica la necessità di attenzionare con ancora una maggiore attenzione il profilo termico del percorso fumi, ai fini di minimizzarne gli effetti.

L'impianto di Pozzilli è entrato in funzione nel 2007 ed è destinato alla produzione di 61 t/h di vapore a 400°C e 60 barg, il vapore alimenta una turbina per la produzione di energia elettrica. Nella figura sotto riportata è illustrato uno schema della caldaia in oggetto.

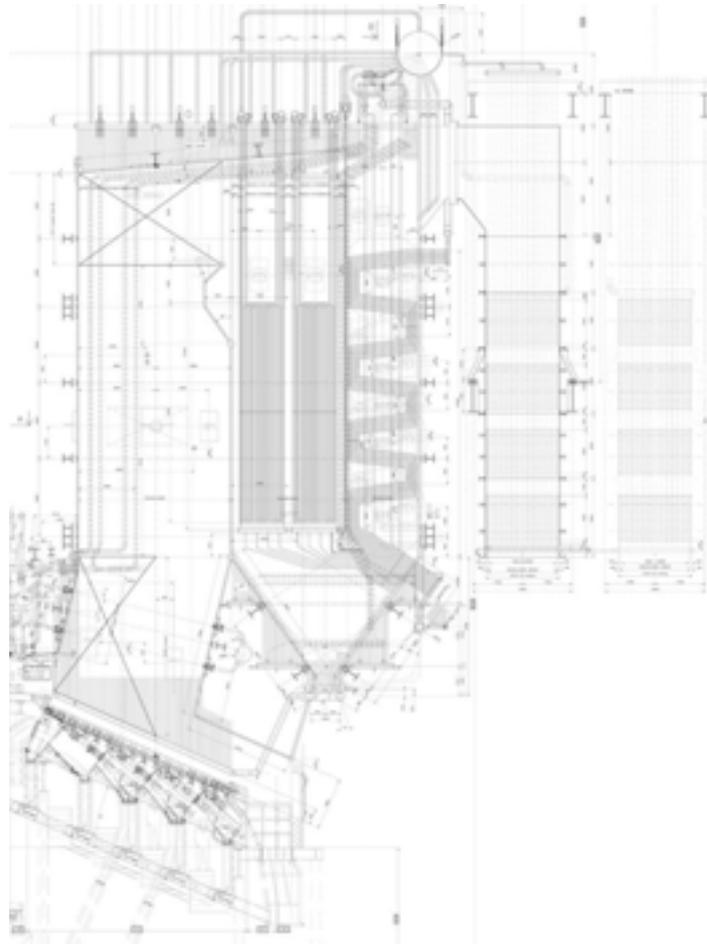


Figura 2. Caldaia di Pozzilli prima dell'intervento di revamping

La caldaia originariamente era a sviluppo verticale, costituita da 5 percorsi fumi: il primo senza alcun banco scambiatore, il secondo con surriscaldatori di alta e bassa temperatura, il terzo con un vaporizzatore a bandiera mentre il quarto e quinto con banchi economizzatori.

La caldaia ha sin da subito mostrato evidenti problemi di corrosione dei surriscaldatori dovuti alle elevate concentrazioni di composti clorurati, tipici dei prodotti di combustione del CSS, ed ad un profilo termico sfavorevole, in quanto i fumi ad alta temperatura incontravano subito le superfici dei surriscaldatori, i quali presentano le più alte temperature di pelle del tubo. Questi fenomeni si traducevano in una vita media dei surriscaldatori inferiore all'anno. Per ovviare alla continua sostituzione dei surriscaldatori in così breve tempo era stato deciso di sostituire gli stessi con altri rivestiti in Inconel 625®, ma, nonostante questa modifica, la durata di vita di questi non ha mostrato evidenti benefici, consentendo l'avvicendamento ogni due anni.

2. Soluzioni termodinamicamente semplici a problemi comuni

Sporcamenti superiori al previsto e fenomeni di corrosione evidenti sono i principali problemi che si riscontrano in questo tipo di impianti. Tali fenomeni portano a indisponibilità impreviste dell'impianto con tempi lunghi di fermata, che si trasformano in elevati costi di manutenzione straordinaria e mancato guadagno.

Il tipico approccio, da parte dei gestori, al fine di risolvere i problemi di sporcamento, è spesso quello di installare sistemi di pulizia aggiuntivi, come i soffiatori di fuliggine, che si dimostrano molto aggressivi, aggravando i consumi di vapore dell'impianto e aumentando i problemi di corrosione.

Per quanto riguarda i problemi di corrosione, si ricorre solitamente alla sostituzione delle parti interessate con elementi rivestiti in Inconel 625®, con un cospicuo aumento dei costi. Il nostro approccio è stato quello di modificare il profilo termico della caldaia in modo da ridurre le temperature dei fumi in ingresso ai banchi di scambio, per limitare la possibilità che le ceneri ancora fuse possano depositarsi e causare sporcamenti fuori controllo nonché quello di bilanciare in modo corretto le temperature fumi con le temperature di pelle dei tubi, in tal modo i fenomeni di corrosione risultano naturalmente ridotti.

3. Il caso studio

L'intervento effettuato da Ruths SpA ha avuto come obiettivo la trasformazione della convettiva della caldaia esistente da una zona a sviluppo verticale a una zona a sviluppo orizzontale.

Le modifiche apportate alla caldaia sono mostrate nella figura seguente.

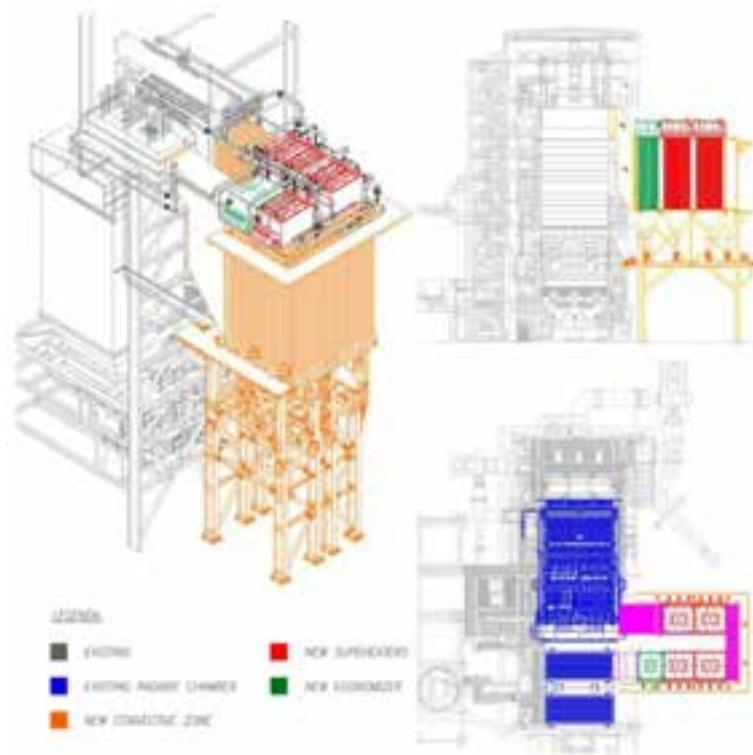


Figura 3. Caldaia Pozzilli dopo revamping

Come si può vedere, sono stati eliminati i surriscaldatori dal secondo percorso fumi e il vaporizzatore dal terzo canale, in modo da creare tre percorsi radianti completamente vuoti che permettano di abbassare la temperatura in ingresso ai banchi di scambio e di depolverare i fumi.

Nella zona superiore del terzo giro fumi è stata chiusa l'apertura esistente per il passaggio alla zona degli economizzatori ed è stata praticata lateralmente un'apertura di sezione rettangolare. Da essa i fumi passano in un quarto canale vuoto a pareti membranate, provvisto di parete deviatrice di flusso, e si immettono nella nuova zona convettiva, dove sono stati installati quattro nuovi surriscaldatori e un nuovo economizzatore. A valle del nuovo economizzatore i fumi sono reimmessi nella zona degli economizzatori esistenti attraverso una condotta e una nuova apertura laterale. In pianta la nuova zona convettiva ha un andamento a ferro di cavallo. Questa nuova disposizione dei surriscaldatori permette di migliorare il profilo termico della caldaia, facendo in modo che i fumi entrino nella zona convettiva a temperature più basse, riducendo drasticamente i fenomeni di corrosione. Inoltre il sistema di pulizia adottato per i nuovi componenti è un sistema a martelli.

Particolare attenzione è stata prestata allo studio fluidodinamico dei fumi, in modo da assicurarsi che questi entrassero e si distribuissero il più uniformemente possibile nelle nuove unità di scambio; si è anche reso necessario minimizzare le perdite di carico lato fumi, in quanto la specifica imponeva valori di garanzia molto bassi, dovuti al fatto che non era prevista la sostituzione dell'estrattore esistente.

Questo tipo di approccio è totalmente rivoluzionario per casi di "major revamping" di caldaie esistenti, in quanto estende la possibilità a tutte le caldaie a sviluppo verticale di essere trasformate in caldaie a sviluppo orizzontale con i noti vantaggi che questo comporta: minori sporcamenti, caldaie meno soggette a fenomeni di corrosione e di conseguenza minori costi di manutenzione e maggiore disponibilità annuale dell'impianto.

4. Principali problematiche evidenziate

La tipologia del sistema di pulizia adottato a Pozzilli era il seguente: tutti i banchi di scambio (compresi vaporizzatori, surriscaldatori ed economizzatori) erano puliti da martelli, disposti sulla loro cima movimentati da motori elettrici mentre la camera radiante e quella convettiva non erano soggette ad alcun tipo di pulizia.

Per ovviare a questa carenza sono state eseguite esplosioni controllate, sia nella camera radiante che in quella convettiva, prima del revamping. Il nostro intervento ha ridotto l'uso del sistema di pulizia ausiliario, anche se non l'ha completamente eliminato. È importante notare che le parti più interessate dai depositi significativi di ceneri sono i condotti di ingresso e di uscita della zona convettiva, a causa della loro geometria, della riduzione del passaggio di sezione e dell'elevata volatilità delle ceneri volanti.

5. Approccio certificativo

Dalla descrizione effettuata si evince quanto l'intervento di revamping, seppur mantenendo gli stessi dati di targa, quali la producibilità, la pressione e la temperatura massima di esercizio nonché la logica della catena di sicurezza, abbia subito una notevole variazione, per tale motivo si è ritenuto decisivo effettuare una nuova immatricolazione della caldaia, richiedendo inoltre l'insieme caldaia.

Siccome che parte della caldaia esistente è rimasta tale, si è provveduto ad effettuare una campagna di controlli spessimetrici e volumetrici ponendo particolare attenzione alle zone più critiche dell'impianto, per quanto riguarda il corpo cilindrico, per esempio, sono stati eseguiti i controlli volumetrici sugli incroci di saldatura del fasciame a cui si sono aggiunti controlli spessimetrici a spot. Dopo aver eseguito i controlli su tutti i componenti esistenti, facenti parte del vecchio impianto, si è proceduto a verificare che gli spessori rilevati garantissero ancora la stabilità dell'impianto.

Al termine di questa attività e, dopo le due prove idrauliche, una eseguita sulla parte nuova del generatore di vapore e una successiva su l'intero l'impianto, è stata effettuata la prova

a caldo verificando il corretto funzionamento dei principali sistemi di sicurezza e controllo, considerando la catena di sicurezza del termovalorizzatore. A seguito di tutte queste attività, si dovrà procedere all'invio del dipartimento INAIL competente di tutta la documentazione pertinente, al fine di effettuare la denuncia di messa servizio/immatricolazione dell'insieme del generatore di vapore Ruths, in base al Decreto Ministeriale 329 del 01/12/2004, articolo 5.

Bibliografia

[1] Montejo, C.; Martin R.; Costa C.; Marquez M.: Energy Recovery of Reject Fraction of Municipal Solid Waste Resulting from the Mechanical-Biological Treatment Plants. In: Editor Klemes J.J.; Lam H.L.; Varbanov P.S.; Chemical engineering transactions Volume 21, 2010, pagg. 751-756.

Temporanee Riparazioni delle membrature a pressione. Sviluppi sull'impiego dei materiali compositi

A. Falla¹, A. Blanco¹, C. Percolla²

¹ VED Vetroresina Engineering Development Srl

² Inail - Uot di Catania

1. Sommario

L'impiego dei compositi nella temporanea riparazione di membrature a pressione continua a rivelarsi un metodo sempre più richiesto e i risultati conseguiti e, forse, da conseguire continuano a fornire migliori informazioni per consolidare la validità stessa del tipo di riparazione.

Il limite principale è rappresentato dalla temperatura di parete della membratura, sia di applicazione che di esercizio. I produttori di resine e delle fibre danno ben precise indicazioni sulle procedure di applicazione e sui parametri geometrici e meccanici da rispettare, dando garanzie sulla durata della riparazione che di norma è di anni.

D'altro canto nel campo delle attrezzature a pressione e delle temporanee riparazioni in particolare, non sempre vi è necessità di pretendere durate così lunghe.

Il presente studio, le osservazioni fatte e i risultati conseguiti ci inducono a continuare il percorso iniziato avendo cura di ben valutare gli scenari conseguenti ad un risultato più limitato nel tempo.

Man mano si consolideranno i risultati si avranno sempre più elementi per pronunciarsi sulla durata degli interventi di riparazione futuri.

La massima temperatura di parete per l'applicazione del composito a cui ad oggi si è operato è di 130 °C. Per arrivare a ciò sono state messe in atto delle tecniche di applicazione dove il fattore umano è fondamentale. In particolare è necessario essere veloci nell'applicazione del primo strato di composito, quello immediatamente a contatto con la membratura metallica. Si è inoltre lavorato tanto sulla preparazione superficiale delle membrature ricorrendo ad aero-pulitrici che oltre a potersi impiegare in ambienti a rischio incendio permettessero di ottenere profili di ancoraggio di livello superiore.

Dal punto di vista normativo si è fatto riferimento al d.lgs. 22/06/2012 n°83 art.36 punto 5 e a quanto in esso richiamato. Le norme tecniche osservate sono la ISO/24817, *Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Composite repairs for pipework - Qualification and design, installation, testing and inspection* e l'ASME PCC-2, *Repair of Pressure Equipment and Piping*.

2. La legislazione per le temporanee riparazioni

L'utilizzatore di una qualsiasi attrezzatura o insieme a pressione, nel corso della normale attività gestionale, ha l'obbligo di garantire il perfetto stato di conservazione dell'impianto nel suo complesso e quindi di ogni componente dello stesso. Di conseguenza dovrà predisporre un piano di manutenzione ordinario e straordinario con cui accertare e confermare o meno lo stato di integrità delle attrezzature in esercizio; nei casi in cui non è possibile confermare il buono stato d'integrità dell'attrezzatura, l'utilizzatore deve predisporre una attività di "riparazione" tale da poter ripristinare le condizioni di sicurezza originarie dell'attrezzatura e/o dell'insieme. Il legislatore ha previsto tali azioni, tant'è che nel decreto legislativo del 1 dicembre 2004 n°329, all'Art.14 specifica cosa si intende per riparazione di una attrezzatura a pressione e come bisogna agire nel caso in cui si dovesse ritenere necessario intervenire. Nello specifico l'Art.14 del d.lgs 329/04 recita " la

riparazione consiste nella sostituzione di parte di un'attrezzatura a pressione oppure nella riparazione con o senza saldatura, senza variazione alcuna del progetto originario".

L'utilizzatore, nel caso in cui ritiene necessario intervenire con una attività di riparazione su una singola attrezzatura o più parti di un impianto a pressione, deve porre fuori servizio l'impianto o parti di esso; il porre fuori servizio un impianto a pressione in molti casi comporta una serie di azioni che possono richiedere un impegno temporale notevole con fasi in cui il livello di rischio potrebbe essere elevato.

Il legislatore ha previsto che in certe condizioni l'utilizzatore possa intervenire anche con l'attrezzatura in esercizio; si evidenzia che il legislatore ha autorizzato una azione eccezionale solo per alcuni impianti, nello specifico per *"gli impianti a ciclo continuo, per quelli che rivestono carattere di pubblica utilità o servizio essenziale, in presenza di difetti che possono pregiudicare la continuità di esercizio di un'attrezzatura"*. Per questa tipologia di impianti a giudizio e sotto la responsabilità dell'utilizzatore possono essere effettuati interventi "temporanei di riparazione" finalizzati a mantenere la stabilità strutturale dell'attrezzatura e garantire il contenimento delle eventuali perdite per il tempo di ulteriore esercizio. Questo è quanto previsto dall'Art. 36, comma 5.2 del Decreto Legge del 22 giugno 2012 n.83 con cui si modifica l'Art.57, comma 9, del Decreto Legge del 9 febbraio 2012, n.5, convertito con modificazioni nella legge del 4 aprile 2012, n.35 recante "disposizioni urgenti in materia di semplificazioni e di sviluppo". Lo stesso decreto legge precisa che le temporanee riparazioni sono eseguibili secondo le specifiche tecniche previste nel decreto del 1 dicembre 2004 n.329 o norme tecniche internazionali riconosciute.

Per le Temporanee Riparazioni è disponibile la UNI/TS 11325-5 "Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 5; interventi temporanei sulle attrezzature a pressione" con la quale si forniscono indicazioni operative di base per gli interventi temporanei da effettuare su attrezzature a pressione appartenenti a determinate categorie di impianti sulle quali sono stati rilevati difetti che ne possono pregiudicare il funzionamento. La specifica tecnica precisa - in accordo con il già citato Art. 36 del d.lgs. 22/12 n. 83 - che questa tipologia di riparazione è finalizzata a mantenere la stabilità strutturale dell'attrezzatura per il tempo di ulteriore esercizio fino alla fermata successiva dell'attrezzatura o al limite temporale stabilito nell'analisi dei rischi se inferiore. Tale specifica può trovare applicazione su tubazioni, recipienti, generatori di vapore e generatori acqua surriscaldata.

La tipologia d'intervento di temporanea riparazione, come definita nella specifica tecnica UNI/TS 11325-5, è anche presente a livello internazionale, per esempio API 570, API 579, etc. etc., in cui vengono definite le metodologie applicabili per gli interventi temporanei e/o per l'esercizio temporaneo in presenza di difetti.

3. Norme tecniche internazionali

Le temporanee riparazioni di elementi (tubazioni, serbatoi, Vessel) con materiali compositi nell'ambito dei settori petrolchimico, chimico e produzione di energia sono regolarizzate da degli standard internazionali, come la ISO 24817 *"Riparazione con sistemi compositi per l'industria petrolifera petrolchimica e del gas, qualifica e progetto, installazione test e ispezione"* e la ASME PCC-2.

Le due norme, tra loro molto simili, stabiliscono quali sono le condizioni di applicabilità, le richieste progettuali, come eseguire la progettazione dell'intervento come qualificare i materiali (prove da eseguire sui materiali da utilizzare) come qualificare il personale operativo e quali sono i controlli da eseguire durante le varie fasi, dalla progettazione all'applicazione.

La norme dividono le riparazioni in due grandi famiglie:

- Riparazione di tipo A (interventi su elementi dove non è ancora presente un foro);

- Riparazione di tipo B (interventi su elementi dove è presente un foro o lo spessore residuo sia inferiore ad 1 mm).

Con riferimento alla tipologia delle riparazioni la normativa divide le stesse in tre classi secondo la seguente tabella:

Repair Class	Typical Service	Design Pressure	Design Temperature
Class1	Low specification duties, e.g. static head, drains, cooling medium, sea (service) water.	< 2Mpa	< 40°C
Class 2	Fire water/deluge systems	< 2Mpa	< 100°C
Class 3	Produced water and hydrocarbons, flammable fluid, gas systems Class 3 also covers operating conditions more onerous than described above	Limited to repairs designed in compliance with this International Standard and of a thickness equivalent to < D/12	E' funzione del tipo di riparazione e dei valori di Tg e dell'HDT

Tabella 1. Classi di tipologia d'intervento

La normativa stabilisce quali sono le prove da eseguire sui materiali per definire l'applicabilità degli stessi per le diverse tipologie e per le diverse classi di riparazione.

Quindi le materie prime (resine, tessuti in fibra di vetro e carbonio, top coat, pulitori etc.), devono essere testati secondo le normative di riferimento e qualificati da importanti enti certificatori.

In accordo alla normativa e sulla base dei risultati dei test eseguiti sui materiali, si può elaborare un software o un processo di calcolo per la progettazione meccanica dell'intervento di riparazione.

L'applicazione dei prodotti per la riparazione viene eseguita manualmente con il metodo "Hand lay-up", ed è in genere difficilmente meccanizzabile; pertanto, le norme pongono particolare attenzione alle attività di posa, e di conseguenza alla qualifica del personale addetto alle riparazioni. È previsto infatti che il personale sia qualificato dal produttore dei materiali (Henkel effettua dei corsi con test finale alla presenza degli enti certificatori) e che questa qualifica sia mantenuta nel tempo in funzione del numero degli interventi positivi in esso eseguiti.

La procedura Henkel in conformità a quanto previsto dalle norme è puntuale e precisa; i parametri fondamentali, importanti per la riuscita della riparazione, su cui non viene ammessa deroga alcuna, sono la preparazione superficiale del supporto e la capacità di posa del personale.

La normativa è molto restrittiva e prevede tutta una serie di check list, tra cui una relativa alla ispezione preliminare delle membrature da riparare e un'altra relativa al monitoraggio delle attività di esecuzione dell'intervento, fase per fase, fino ai controlli finali a valle della riparazione ad ulteriore conferma della qualità raggiunta.

4. Perché riparare con i compositi

I materiali compositi negli ultimi decenni sono sempre più presenti nella vita quotidiana di ognuno di noi, in quanto:

- hanno eccellente resistenza alla corrosione;
- sono molto leggeri;
- hanno resistenze meccaniche almeno paragonabili a quelle dei tradizionali materiali da costruzione;
- si prestano ad essere sagomati facilmente senza dover dare o spendere energia per acquisire forme particolari.

Ne consegue che negli anni questi materiali hanno sempre più sostituito quelli tradizionali. Oggi sarebbe impensabile immaginare componenti di automobili in metallo tanto si è abituati a non vederli più da tempo.



Figura 1. Piping in materiale composito

Nel settore petrolifero, della raffinazione e dell'energia, dove la corrosione e la ricerca di materiali alternativi con pesi contenuti è stata da sempre perseguita, questi materiali sono presenti ormai da circa 60 anni, prendendo il posto di tanti altri materiali tradizionali: tubazioni (**Figura 1**), serbatoi, grigliati, profilati (**Figura 2**), supporti di materiale composito sono ormai di uso comune.



Figura 2. Strutture in materiale composito

Negli ultimi 10 anni tali materiali hanno incominciato ad essere utilizzati anche nelle riparazioni e nelle ristrutturazioni (sia in ambito industriale che civile), infatti le caratteristiche di leggerezza, resistenza alla corrosione, alta capacità di resistenza agli sforzi e l'adattabilità a forme anche complesse ed irregolari fanno sì che essi si prestino ad essere impiegati per l'esecuzione di riparazioni in opera.

La riparazione di una pipeline o di un serbatoio effettuata con materiali compositi è progettata in funzione delle caratteristiche della linea o del serbatoio, garantisce l'alta resistenza meccanica (**Figura 3**), non appesantisce la struttura, eventualmente già indebolita da anni di esposizione agli agenti chimici ed atmosferici presenti all'interno di un sito industriale (normalmente ammalorata dalla corrosione). Una membratura riparata con i compositi risulta sempre protetta dall'attacco di eventuale corrosione esterna (**Figura 4**).

Grazie alla lavorabilità, non vi sono limiti dimensionali nell'esecuzione della riparazione. Per effettuare una riparazione con i compositi non serve ricorrere ad attrezzature elettriche o che comunque potrebbero risultare essere pericolose da impiegare in ambienti a rischio incendio e/o esplosione (zone ATEX). L'intervento normalmente è abbastanza veloce e in pochi giorni si può passare dall'analisi del problema alla progettazione dell'intervento e all'esecuzione della riparazione.



Figura 3. Rinforzo strutturale

Tutto ciò porta ad asserire che la riparazione con i compositi è veloce in quanto si passa rapidamente dalla ispezione alla progettazione e quindi all'intervento di riparazione e subito viene ripristinata l'integrità strutturale della membratura permettendo l'esercizio dell'apparecchiatura in condizioni di sicurezza.

Le uniche vere limitazioni di un intervento di riparazione con i materiali compositi, sono:

- la temperatura di parete e di esercizio;
- l'aggressività di taluni fluidi alla resina.



Figura 4. Rinforzo strutturale di una linea interrata

Allo stato attuale la temperatura di esercizio massima ammissibile della membratura riparata è maggiore della temperatura massima ammissibile nella fase di riparazione.

Per quanto riguarda il secondo punto è bene valutare se si sta eseguendo la riparazione per difetti passanti o per difetti che non interessano tutto lo spessore di parete, in quest'ultimo caso, sempre nell'ottica che si sta eseguendo una temporanea riparazione, un'attenta valutazione sulla velocità di corrosione potrebbe portare ad escludere che durante la vita della riparazione il fluido possa venire a contatto con il composito.

5. Cosa chiede il mercato

Gli utilizzatori di impianti industriali chiedono che gli interventi siano veloci, eseguiti in condizioni di sicurezza per gli addetti alla riparazione, che si continui ad esercire l'apparecchiatura senza rischi di qualsiasi natura e tipo, che si eviti lo sversamento di prodotti nell'ambiente, che l'intervento consenta di esercire l'impianto fino alla prima successiva manutenzione programmata.

Il mercato è quindi in continua evoluzione e gli interventi di riparazione riguardano sempre maggiori tipologie di applicazione. Soprattutto si vuole riuscire ad aumentare le temperature massime di applicazione della riparazione nonché la temperatura di esercizio a riparazione avvenuta; chiaramente ci si riferisce sempre alle temperature di parete della membratura. A piccoli aumenti della temperatura si amplia di parecchio il campo di applicazione delle riparazioni possibili da eseguire. Altro aspetto a cui il mercato fa molta attenzione è l'uso di attrezzature che garantiscano la corretta preparazione superficiale ai fini di riuscire ad eseguire un profilo di ancoraggio idoneo, senza arrecare ulteriore danno alla membratura da riparare. Infatti è necessario minimizzare il rischio di peggiorare i difetti a seguito della preparazione della superficie all'applicazione della riparazione. Il campo di applicazione di tali interventi si sposta anche verso la prevenzione; infatti eseguendo dei controlli preventivi si può intervenire prima che nell'elemento compaia una perdita, e agire preventivamente evitando danni economici, a persone, cose ed ambientali. Le attività preventive offrono sempre maggiore garanzia.

6. Stato della ricerca applicata

Le società produttrici di materie prime, continuano la fase di ricerca cercando di spostare verso l'alto i limiti di detti materiali; si evidenzia che dall'inizio di un test all'ottenimento di un risultato validato e certificato trascorrono tempi che vanno da sei mesi a qualche anno. Un parametro fondamentale su cui si sta lavorando è la temperatura di lavoro delle resine. Henkel ha certificato resine fino a 130°C.

Altro parametro, come già detto, sotto osservazione, è la preparazione superficiale; il raggiungimento della qualità di una preparazione superficiale va contestualizzato con le condizioni di impianto in cui spesso si incontrano difficoltà anche di manovra.

Particolare attenzione deve essere prestata al personale operativo che deve essere adeguatamente istruito e deve avere le esperienze necessarie, sia in termini di applicazione dei materiali compositi e soprattutto di lavoro all'interno di siti industriali. Si ribadisce che spesso si opera all'interno di impianti industriali a rischio di incidente rilevante ed in marcia.

Un aspetto importante da considerare è la temperatura di parete durante le fasi di applicazione del rinforzo. Bisogna prestare particolare attenzione quando l'applicazione di detti materiali avviene a temperature superiori a 40°C.

Lo studio eseguito riguarda appunto la posa in opera di rinforzi strutturali a temperature superiori ai 40°C. In tale circostanza, la preparazione superficiale e l'abilità degli operatori componenti la squadra di lavoro, (solitamente da due o tre tecnici in funzione delle condizioni globali), sono fondamentali per la riuscita della riparazione il cui risultato non è immediato ma che si vedrà nel tempo.

Nello studio oggetto del presente lavoro sono stati eseguiti due test. Uno con temperatura di applicazione di poco maggiore di 80°C e un altro con temperatura di applicazione di 130 °C.

Sono stati predisposti due mock-up (**Figura 5**), costituiti da tubo di acciaio al carbonio del DN 8" ciecato alle estremità. Sulla parete del tubo è stato eseguito un foro del diametro di 10 mm nella parte centrale della zona da sottoporre a riparazione simulata.



Figura 5. Predisposizione del provino

- Test di prova a 80 °C

Predisposto il mock-up, con aero-pulitrice è stata eseguita la preparazione superficiale con l'utilizzo di acqua ed inerte.



Figura 6. Verifica della preparazione superficiale

Verificata la giusta rugosità superficiale (**Figura 6**) si è proceduto a portare la temperatura di parte del mock-up ad 80 °C tramite acqua riscaldata che ricircolava al suo interno.



Figura 7. Riscaldamento del provino

Raggiunta la temperatura di prova la stessa è stata mantenuta costante a circa 80°C (**Figura 7**) durante tutta la durata dell'esecuzione del rinforzo. Si sono preparate le bende impregnandole di resina secondo le procedure Henkel e si eseguito il rinforzo strutturale sul mock-up. (**Figura 8 – Figura 9**)



Figura 8. Preparazione delle bende



Figura 9. Esecuzione rinforzo strutturale



Figura 10. Completamento della riparazione mock-up

Terminate le operazioni di rinforzo strutturale (**Figura 10**) il mock-up è stato sottoposto a test idraulico raggiungendo una pressione idrostatica di oltre i 40 bar (**Figura 11**).



Figura 11. Test idraulico

- Test di prova a 130°C

La preparazione del mock-up è stata uguale al caso precedente (**Figura 12**);



Figura 12. Preparazione superficiale

In questo caso però per poter portare la temperatura di parete a 130°C (**Figura 14**) si è fatto uso di resistenze elettriche che hanno riscaldato il provino e mantenuto costante a circa 130°C (**Figura 14**) la temperatura per tutta la durata dell'applicazione del rinforzo.



Figura 13. Riscaldamento del provino Figura 14. Temperatura del provino

Si è proceduto quindi alla attività di rinforzo strutturale. In questo secondo caso l'applicazione del rinforzo si è confermata più complessa rispetto al primo, ed è stata evidente la necessità di sincronizzazione e l'intendimento degli operatori componenti la squadra addetta alla simulazione. Infatti l'alta temperatura porta ad una evidente catalisi veloce della resina, e ad una degassazione importante (**Figura 15**).



Figura 15. Varie fasi dell'esecuzione del rinforzo strutturale



Figura 16. Completamento della riparazione

Anche con queste difficoltà si è riusciti ad eseguire il rinforzo del provino (**Figura 16**). Compilate le operazioni di rinforzo strutturale il mock-up è stato sottoposto a test idraulico alla pressione di 20 bar.

7. Conclusioni

Si conclude la presente trattazione con la convinzione che queste tipologie d'intervento possano risolvere tutta una serie di problematiche degli impianti industriali migliorando sia le condizioni di sicurezza che le condizioni ambientali (**Figura 17**).



Figura 17. Esecuzione di rinforzo strutturale su tubazione ammalorata

Infatti l'esecuzione di un rinforzo strutturale consente di poter intervenire su una membratura in fase preventiva, cioè non appena si viene a conoscenza del decadimento della stessa, sia essa per corrosione esterna o interna, per erosione, o per altri motivi ancora. La membratura può essere riparata riportandola alle condizioni iniziali, evitando la possibilità di innescare perdite e/o situazioni di pericolo, e continuare l'esercizio dell'impianto in sicurezza e senza arrecare danni all'ambiente.



Figura 18. Esecuzione di rinforzi strutturali in presenza di perdite

Nel caso di situazioni particolari con membrature troppo ammalorate con presenze di fuoriuscita di prodotti od anche con temperature elevate, questo intervento può essere comunque di ausilio, in quanto si riesce ad intervenire in tempi rapidi, consentendo il prosieguo dell'esercizio dell'impianto sia pure con aspettative di durata più limitate nel tempo ma tali da permettere il raggiungimento in sicurezza dell'intervento di manutenzione definitivo (**Figura 18**).

È nostra convinzione che nei prossimi anni, riparazioni di questo tipo saranno sempre più richieste da chi esercisce questa tipologia d'impianti, in quanto non sono invasive, sono di veloce esecuzione, non vanno a gravare sulle strutture (talvolta ammalorate tanto quanto la membratura da riparare), si prestano ad essere applicate anche a forme complesse ed estese (**Figura 19**).



Figura 19. Intervento di rinforzo strutturale su una Tee con evidente foro

Se l'intervento viene eseguito in fase preventiva (prima che si verifichi una rottura con conseguente emissione nell'ambiente del prodotto), (Figura 17) lo stesso potrà essere una valida soluzione, per migliorare i rischi ambientali e di sicurezza, in quanto si annullano le possibilità di rottura delle membrane con fuoriuscita di prodotti pericolosi.

Si può affermare con convinzione che la ricerca si concentrerà sul tentativo di aumentare la temperatura di resistenza massima raggiungibile in esercizio, facilitare la posa a temperature sempre più elevate, ricercare al meglio le compatibilità con i diversi fluidi (alle diverse temperature) presenti all'interno degli stabilimenti industriali.

8. Bibliografia

[1] ISO 24817:2017(E) Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Composite repairs for pipework – Qualification and design, installation, testing and inspection

Rinforzi strutturali in materiale composito PRS per apparecchiature in pressione: esperienze in materia di durabilità e monitoraggio nel tempo

L. Comel¹, R. Grassetti¹

¹ GMA Srl

Sommario

Il sistema GMA P.R.S. (Piping Recovering System) è una tecnica che consente il ripristino strutturale di tubazioni in pressione in presenza di sottospessori e corrosioni e prevede la realizzazione di un composito in fibra di carbonio in matrice resinosa, dimensionato in base a calcoli matematici e con l'uso di un software apposito.

Il P.R.S., coperto da un brevetto industriale, viene applicato con successo da G.M.A. da 15 anni ed è stato ritenuto rispondente alle indicazioni contenute della Lettera Circolare ISPESL 821/10. In tal senso è prassi consolidata l'emissione di un fascicolo inerente alla riparazione, redatto in conformità con requisiti della norma UNI-TS 11325-5.

Alla luce delle esigenze produttive degli impianti, quali raffinerie, petrolchimici, centrali di produzione dell'energia, nel rispetto imprescindibile della sicurezza nel loro esercizio, sta divenendo di primario interesse la valutazione della possibilità di estendere la durata ammissibile di tali riparazioni, oltre all'orizzonte temporale di 5 anni (o delle prima fermata impianti utile alla sostituzione della linea).

Nella presentazione verranno analizzate le esperienze di G.M.A. in materia, in riferimento anche alle tematiche relative ai piani di monitoraggio messi in atto ed allo studio dei meccanismi di degrado nel tempo dei sistemi di rinforzo in materiale composito.

1. Introduzione

Il sistema P.R.S., già oggetto di una presentazione al SAFAP 2016 di Milano, nasce dall'esperienza di GMA all'interno di siti a rischio rilevante, quali in particolare raffinerie ed impianti petrolchimici ed è finalizzato a restituire a componenti in pressione soggette a problematiche corrosive la necessaria resistenza strutturale al fine di poterne continuare senza rischi l'esercizio.

Il sistema, applicabile a tubazioni, serbatoi, valvole ecc., anche in presenza di curve, stacchi o altre geometrie complesse, si basa su un algoritmo di calcolo, derivante a sua volta da rigorosi calcoli teorici e sperimentazione in laboratorio su laminati e simulacri di prova.

Fondamentale nel P.R.S. è la sua flessibilità, data dalla possibilità di adattarsi a molteplici casistiche riscontrabili all'interno degli impianti e di essere applicato anche con la componente in esercizio ed in ambienti ATEX.

DIMENSIONAMENTO DI UN RIVESTIMENTO IN FIBRA DI CARBONIO		
DIAMETRO TUBAZIONE	5.0	mm
PRESSIONE INTERNA	1.0	bar
Coefficiente di sicurezza	8	
<hr/>		
SPESSORE RIVESTIMENTO	3.7	mm
NUMERO STRATI DI CARBONIO	3	
TIPO FIBRA	FC160	

Figura 1. Schermata del software di dimensionamento del sistema PRS

2. Il sistema P.R.S.

Il sistema consiste nell'applicazione sulla zona interessata, dopo idonea preparazione superficiale (spazzolatrice ATEX o, se ammesso, sabbiatura) di uno strato di materiale composito, a base di fibre di carbonio (tessuto bilanciato da 400 g/m² con intreccio 0/90°) e resina vinilestere o epossidica a seconda dei requisiti del singolo progetto. L'interposizione di uno strato di materiale di riempimento consente una trasmissione omogenea delle sollecitazioni dalla superficie al composito e l'assorbimento di eventuali differenze di dilatazione termica. L'applicazione, come detto, può essere eseguita su qualsiasi superficie (piana o curva) e di qualunque estensione; lo spessore dello strato e il tipo di composito sono determinati in funzione dei parametri di esercizio del componente dal programma di calcolo che contempla i seguenti casi:

- Rivestimento totale di un tratto di tubazione
- Rivestimento parziale di un tratto di tubazione
- Rivestimento localizzato o totale di una superficie piana

Dopo la polimerizzazione della resina (epossidica o vinilestere), il componente riacquista le caratteristiche meccaniche di progetto conferitogli dal PRS, senza alcuna interruzione del servizio

Il PRS elimina la necessità di ricorrere a tagli o a saldature, eliminando rischi ambientali ed aumentando la sicurezza. Sono anche evitate le possibilità di infragilimenti o cricature del metallo dovuti al processo di saldatura.

I criteri di calcolo, di dimensionamento e di realizzazione della riparazione prendono come riferimento la ASME PCC-2 Article 4.1 "Non-Metallic Composite Repair Systems for Pipelines and PIPework: High Risk Applications."

Per tutti i riferimenti teorici del calcolo e per le modalità di intervento si considerano inoltre i seguenti riferimenti normativi:

- UNI CEN ISO/TS 24817:2011: Industrie del petrolio, della petrolchimica e del gas naturale - Riparazioni di tubazioni per mezzo di materiale composito - Qualifica e progettazione, installazione, collaudo e ispezione
- CNR- DT 202/2005: "Istruzioni per Interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati"
- UNI 11325-5 "Interventi temporanei sulle attrezzature a pressione"
- Il sistema PRS, infine, è stato ritenuto rispondente alle indicazioni contenute della Lettera Circolare ISPESL 821/10 da parte del consiglio Tecnico Attrezzature ed Insiemi a Pressione di INAIL

3. La relazione secondo UNI/TS 11325-5

L'intervento di ripristino strutturale con il sistema P.R.S. è supportato da una raccolta documentale che viene archiviata nel libretto di matricola o nella documentazione a corredo dell'attrezzatura e che comprende:

- 1) identificazione della tubazione, dati di progetto e localizzazione dell'intervento temporaneo;
- 2) dettagli dell'analisi eseguita in conformità a norme di intervento temporaneo e/o di esercizio temporaneo in presenza di difetti;
- 3) analisi del rischio associato all'intervento con l'impianto in marcia;
- 4) analisi del rischio associato alla durata dell'esercizio provvisorio a seguito dell'intervento;
- 5) descrizione dell'intervento:
 - 5 a) metodologia dell'intervento, materiali utilizzati, piano dei controlli e modalità di verifica finale.

- 5 b) qualifiche delle procedure, qualifiche degli operatori e qualifiche degli operatori addetti ai controlli non distruttivi (CND).
- 5 c) piano dei controlli dell'intervento, anche in relazione all'analisi dei rischi e a garanzia dell'integrità dell'intervento temporaneo eseguito,
- 5 d) data certa entro la quale si dovrà procedere alla riparazione definitiva, comunque non superiore alla successiva fermata d'impianto.

Uno degli elementi innovativi della norma rispetto a quanto normalmente svolto nella realizzazione di un comune rivestimento anticorrosivo è insito nella necessità di definire un'analisi del rischio relativo non solo all'intervento, ma anche alle possibili problematiche che possano occorrere nel successivo esercizio.

3.1 Analisi del rischio di esercizio e piani di monitoraggio

Il dimensionamento del sistema di riparazione temporanea viene eseguito tenendo conto in via prudenziale di coefficienti di sicurezza che valutino la possibilità di essere in presenza contemporanea di significative alterazioni sia ai dati di progetto della linea (sovrappressioni ecc.) sia di difettosità nell'applicazione del ciclo di rivestimento (vuoti e/o porosità).

È ovviamente implicito l'obiettivo di conseguire la massima qualità dell'applicazione, compatibilmente con la natura del sistema di riparazione temporanea e con il suo metodo di applicazione, mediante la qualifica degli operatori ed il continuo controllo e monitoraggio delle singole fasi del processo.

A termine del processo di riparazione viene eseguito un collaudo completo della riparazione con le seguenti tecniche:

- Metodo visivo, volto ad assicurare l'assenza di porosità, fibre esposte ed altre problematiche, in particolare nelle zone di eventuali selle, bocchelli ed altri accessori;
- Spessimetrico, con tecnica magnetoinduttiva ed utilizzo di spessimetro digitale e specifiche sonde per alto spessore
- Di durezza, con indentatore Barcol, al fine di verificare la corretta reticolazione della resina.

I suddetti controlli verranno svolti in contraddittorio con la committenza da parte di ispettori qualificati NACE, FROSIO o INAC

Si raccomanda alla committenza, a seguito del completamento dell'intervento, un regolare monitoraggio dello stato visivo del manufatto interessato, con frequenza annuale.

Con cadenza biennale è da prevedere un controllo di durezza (secondo prova ASTM D 2583) con Durometro Barber-Colman. La durezza viene valutata utilizzando l'apposito strumento, effettuando varie misure su aree diverse del PRS.

In particolare il rinforzo non deve presentare alterazioni visibili, quali:

- Rigonfiamenti anche localizzati
- Delaminazioni (distacchi di uno o più strati del laminato)
- Fuoriuscite di fibre dalla matrice resinosa
- Variazioni cromatiche della resina
- Mancata adesione del rivestimento alle sue estremità
- Trafilamenti di fluido da qualsiasi zona della riparazione

Qualora fosse osservata anche solo una delle alterazioni sopra elencate, questa va prontamente segnalata a GMA al fine di poter procedere alle verifiche del caso.

Vanno inoltre prontamente segnalati a GMA danni di ogni tipo procurati da fattori esterni, quali, ad esempio l'impatto di corpi estranei o la caduta di oggetti che possano intaccare localmente il rivestimento.

Devono essere evitate variazioni al processo produttivo che possano portare il manufatto oggetto della riparazione temporanea ad un disallineamento rispetto ai parametri di progetto

riportati nella specifica (temperatura, pressione). Qualora, a seguito di problematiche dell'esercizio, si siano verificati dei picchi termici o di pressione, l'informazione va prontamente riportata a GMA al fine di poter procedere ad un sopralluogo e valutare l'integrità del sistema di riparazione temporanea.

Sono vietate nei pressi della riparazione operazioni a caldo che possano provocarne un riscaldamento locale (saldatura, molatura).

Va infine segnalato l'obbligo per la committenza di mettere in atto la sostituzione della linea/componente interessata dall'intervento di riparazione temporanea in occasione della prossima fermata di impianto, in accordo con le indicazioni della procedura ISPEL per la riparazione temporanea di attrezzature a pressione già in esercizio alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzate fino al 29/5/02 e/o certificate in conformità alla Direttiva 97/23 CE PED Prot. A00-07.

Tipo controllo	Requisiti di accettabilità	Norma di riferimento	Modalità
Grado di sabbiatura	NACE 2 (SA 2,5) o specifica	ISO 8501-1	Confronto visivo con campione
Profilo di sabbiatura (rugosità)	Rz > 40 μm o specifica	ISO 8503-4	Replica tape o strumento a stelo Mitutoyo
Grado di pulizia da polveri	\leq grado 3	ISO 8502-3	Nastro adesivo
Livello di contaminazione da cloruri*		ISO 8502-6	Metodo Bresle
Spessore	v. specifica	ISO 2808	Calibro, micrometro, spessimetro
Durezza		ASTM D 2583	Durometro Barber-Colman
* solo per manufatti già eserciti in acqua marina o salmastra			

Tabella 1. Piano dei controlli per l'applicazione del sistema di riparazione temporanea

4. Studio del degrado nel tempo

4.1 Introduzione

Nel recente passato GMA ha svolto uno studio approfondito in merito ai meccanismi coinvolti nel degrado inerente ai sistemi di riparazione fibrorinforzati. Il progetto ha riguardato una linea avente le seguenti caratteristiche costruttive:

Fluido di processo:	PROPYLENE LIQUIDO
Diametro nominale:	DN 200
Diametro esterno:	219,1 mm
Spessore della tubazione:	5,56 mm - ASA 600
Pressione di progetto:	60 bar
Pressione di esercizio:	40 bar
Materiale della linea:	API 5L grade X42

Tabella 2. Caratteristiche costruttive della linea impiegata per lo studio

Lo studio in oggetto è stato svolto a distanza di 4 anni e mezzo dalla messa in opera della riparazione temporanea, molto vicini quindi al limite massimo previsto di 5 anni, oltre al quale diviene necessaria la sostituzione del manufatto. Obiettivo è valutare quali criticità possano emergere da un eventuale utilizzo su un arco temporale più esteso della riparazione.

4.2 Intervento di riparazione

Per l'intervento di eliminazione perdita dalla linea di propilene si è resa necessaria l'introduzione di una canalizzazione della stessa per consentire la sigillatura della superficie di tubazione circostante senza sovrappressioni di esercizio.

Una volta sigillata la zona e accertato che l'unico punto di uscita del gas propilene fosse la canalizzazione del manicotto da 1/2", si è provveduto al rinforzo strutturale mediante sistema PRS con fibra di carbonio opportunamente dimensionato in funzione della pressioni di esercizio e progetto.

Lo spessore richiesto per assicurare una pressione di esercizio massima pari a 40 bar è di 15 mm per una lunghezza totale di fasciatura pari a 1 m ovvero 4 volte il diametro esterno della tubazione con la difettosità posta in posizione centrale.

Nel dimensionamento dello spessore richiesto per assicurare la pressione di esercizio massima si è utilizzato un coefficiente di sicurezza pari a 6.

È comunque da sottolineare che la stabilità strutturale della linea non è minimamente intaccata nonostante la presenza della perdita, in quanto questa si era sviluppata originariamente corrispondenza della saldatura longitudinale della tubazione al momento della sua fabbricazione per un difetto esecutivo.

La spinta (F) esercitata dal gas propilene in corrispondenza del microforo di circa 0,5mm di diametro è da considerarsi infinitesima data l'entità trascurabile della superficie ($F=PxA$), nonostante l'elevata pressione di esercizio (P).

Di seguito si riportano le fasi di lavoro seguite nella realizzazione della eliminazione perdita e successivo rinforzo secondo il metodo PRS:

- Canalizzazione della perdita in un unico punto mediante l'installazione di un manicotto filettato da 1/2" precedentemente prefabbricato;
- Prima sigillatura della zona della canalizzazione per assicurare quest'ultima come unico punto di uscita del gas propilene di processo mediante l'utilizzo di "metallo molecolare"
- Pulizia delle superficie mediante sabbiatura con graniglia asilicogena a dimensione controllata le per realizzare un adeguato profilo di adesione garantendo un grado di pulizia SA3 e rugosità $R_z > 40\mu\text{m}$;
- Applicazione di uno strato di resina S1 caricata con inerte tixotropizzante in modo da generare una base omogenea e regolare su cui applicare il rivestimento, per evitare fenomeni di scarsa aderenza o formazione di stati di tensioni "parassiti" per discontinuità nella superficie di applicazione. Inoltre questo strato evita che le fibre del composito, sebbene impregnate di resina e in presenza del primer (comunque molto sottile ed insufficiente a dare isolamento dielettrico effettivo) vadano a contatto con il metallo. Essendo il carbonio fortemente catodico rispetto all'acciaio del substrato, si avrebbe il rischio di corrosione galvanica, potenzialmente accentuata dalla limitata estensione delle singole zone di contatto;
- Applicazione, su materiale S1 ancora fresco, di più strati di tessuto di fibra di carbonio impregnati di resina, interposti a strati di fibra di MAT di vetro sino al raggiungimento dello spessore di fasciatura PRS richiesto.

La lunghezza totale del rivestimento di rinforzo in P.R.S. realizzato sulla linea propilene DN200 è pari a circa 1,00 m con uno spessore minimo di 15 mm;

- Ogni 2/3 strati di carbonio, applicazione di una calza di rinforzo con la funzione di garantire la massima aderenza tra gli strati applicati, la compattezza delle fibre, l'espulsione di eventuali bolle d'aria formatesi nella lavorazione e l'eccesso di resina stesa.
- Controlli e collaudi secondo indicazioni di tabella 1



Figura 2. Fasi di lavorazione: in ordine di lettura sigillatura della zona della perdita con stucco epossidico, installazione della canalizzazione



Figura 3. Fasi di lavorazione: in ordine di lettura realizzazione del composito P.R.S., aspetto finale della riparazione

Le successive verifiche ispettive messe in atto a distanza di 4,5 anni sono state fondate sull'esame dei seguenti aspetti:

- Verifica visiva della riparazione temporanea, volta al controllo dello stato della laminato, con particolare attenzione all'assenza di difetti superficiali, inneschi di fenomeni di delaminazione, fibre non scoperte o, in generale, altri fenomeni di degrado meccanico.
- Verifica strumentale su tutta la superficie della durezza del composito con indentatore Barcol (ASTM D2583), al fine di escludere l'esistenza di fenomeni di degrado chimico o termico che possano aver alterato la resistenza del composito.

Tali esami vengono superati positivamente; in particolare, in riferimento alla verifica strumentale, non vi sono punti di lettura inferiori a 25 (valore di accettazione nella specifica di riferimento per il collaudo della riparazione appena applicata) e la media risulta pari a 27 gradi Barcol, indice di un'ottimale conservazione del laminato.

4.3 Considerazioni sulla durabilità

4.3.1 Condizioni ambientali

Il sistema PRS utilizza i principi del più conosciuto e comune materiale laminato composito quale è la vetroresina costituita in fibra di vetro, utilizzata comunemente in ambiente industriale.

Nelle più frequenti applicazioni, questi manufatti possono trovarsi esposti in modo simultaneo ad una serie di fattori esterni diversi: luce ultravioletta, variazioni di temperatura, vento, umidità o acqua (non necessariamente in condizioni di neutralità chimica, ma spesso acida o basica) e gelo.

L'effetto strutturale degli influssi citati sui compositi fibrorinforzati può essere modesto, finché non si ha una riduzione della resistenza ad impatto a causa della cricatura della superficie.

Nel caso specifico, il rinforzo PRS si trova interrato nel suolo ad una profondità di circa 1,5-2,0 m. La tubazione scarica sul terreno di sottofondo il suo peso in modo omogeneo non differenziale senza formazioni di tensioni di coazione sulla linea. Il terreno di rinfilanco laterale e di ricoprimento è costipato in modo da assicurare stabilità alla linea con un vincolo continuo [4, 5].

In queste condizioni non si hanno azioni meccaniche dall'esterno che possano compromettere la resistenza del rinforzo (sollecitazioni di flessione o torsione) [6].

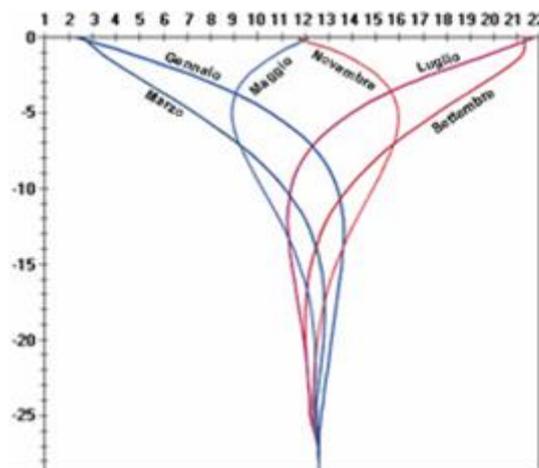


Figura 4. Andamento nel sottosuolo della temperatura in °C (ascissa) in funzione della profondità in metri (ordinata)

Inoltre alla quota di profondità citata la temperatura oscilla tra i 4 e i 20° C. In queste condizioni di temperatura il composito laminato non presenta alcun tipo di problema data la sua capacità intrinseca di raggiungere range di temperature ben più ampie (-30°C - +70°C). Quando il componente è sepolto nel suolo, è però da segnalare la presenza di una possibile attività microbiologica [7], che può portare alla biodegradazione della resina. Questo tipo di degrado è però indicato spesso a termine molto lungo dalla moderna letteratura sui materiali laminati in vetroresina.

Se però è associato al contatto con l'acqua liquida, questa può introdurre una pericolosità per il composito.

Se infatti vi è la presenza sulla superficie dello stesso di piccole fessurazioni indotte da un'attività microbiologica, l'acqua può muoversi per capillarità attraverso la resina, raggiungendo finalmente le interfacce tra fibra e matrice, ed espandere nei cicli di gelo-disgelo sollecitando a fatica le fibre.

Questo effetto è però da escludersi in quanto la temperatura alla profondità interessata non arriva mai al punto di congelamento dell'acqua: questa infatti rimane sempre allo stato liquido durante tutto il periodo dell'anno.

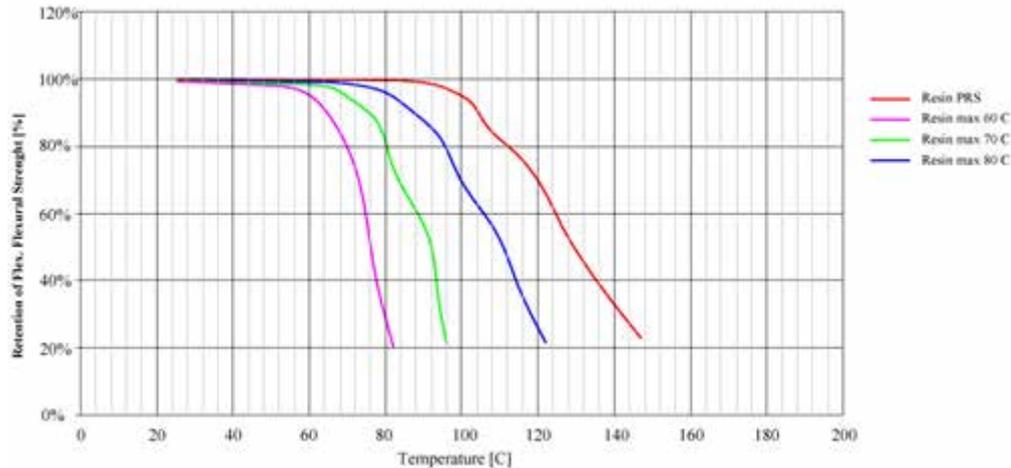


Figura 5. Andamento della resistenza a flessione della resina PRS in funzione della temperatura

La causa principale di perdite di proprietà dei compositi per esposizione in esterni è una combinazione degli effetti della luce solare e dell'ossigeno atmosferico.

La luce ultravioletta è una causa primaria di rottura nei polimeri e produce effetti che sono simili alla termodegradazione. Questi effetti includono la rottura dei legami chimici, che dà origine a radicali liberi, il cui risultato finale possono essere scissioni di catena oppure ulteriore reticolazione, a seconda del polimero coinvolto, della lunghezza d'onda della radiazione ultravioletta ed altri fattori.

I due effetti più comunemente percepiti sono opacizzazione e modificazione del colore.

Il calore atmosferico e l'umidità accelerano e modificano la natura del danneggiamento provocato dalla radiazione ultravioletta su molti polimeri per esterni, piuttosto che agire come cause primarie del danneggiamento, a meno non ci siano alte sollecitazioni oppure dei problemi di fabbricazione.

Questo degrado dovuto alla presenza di luce ultravioletta (fotodegradazione) è da escludersi per l'assenza di esposizione diretta ai raggi UV.

4.3.2 Il fattore tempo

[4] Di solito processi di invecchiamento artificiale vengono messi in opera in camere ambientali che riproducono una serie di condizioni diverse, o una combinazione di diverse condizioni. Tale procedura si realizza per esempio con un'alternanza di prove sotto pioggia artificiale, irradiazione ultravioletta, riscaldamento, umidificazione e nebbia salina con un condizionamento alternato con soltanto alcuni di questi fattori, allo scopo anche di costruire delle matrici di tipo Taguchi, allo scopo di valutare le tolleranze di tutte le possibili combinazioni di questi fattori di degradazione nel produrre una riduzione della qualità del materiale. In Figura 6 è riportato per esempio un insieme di grafici di scorrimento a trazione per un campione di vetroresina in funzione di un certo tempo d'invecchiamento simulato e del tempo di applicazione del carico (ovvero di servizio attivo). In tal caso l'effetto a lungo termine è sicuramente tangibile, ma viene largamente compensato dall'adozione di idonei coefficienti di sicurezza in fase di dimensionamento del sistema.

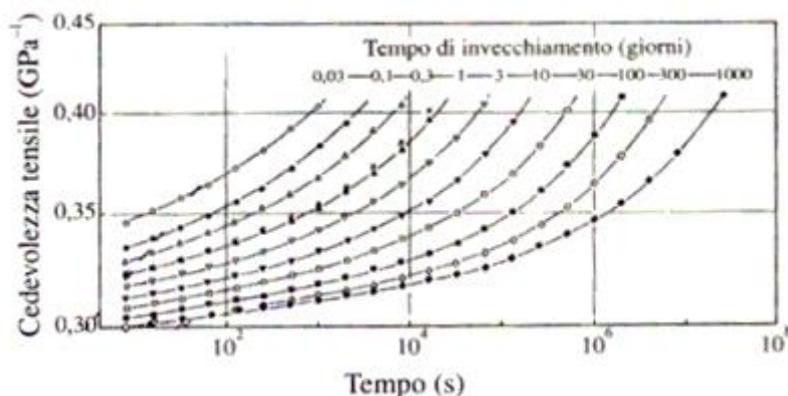


Figura 6. Esempio dell'effetto del fenomeno di invecchiamento sulla resistenza meccanica di un composito

5. Conclusioni

Nel corso degli ultimi 15 anni GMA ha avuto modo di applicare il sistema PRS ad una molteplice casistica di problematiche corrosive su componenti di impianto, spesso diagnosticate grazie a CND predittivi ed aiutando i gestori nel ridurre al minimo le perdite di produzione.

Il sistema PRS è supportato dalla realizzazione di un fascicolo della riparazione secondo i requisiti della UNI-TS 11325-5 e della Lettera Circolare ISPESL 821/10.

La presenza sul territorio e l'esistenza di contratti quadro di manutenzione pluriennali in vari siti permette agli ispettori GMA di monitorare nel tempo lo stato delle riparazioni fatte con il sistema PRS. Ciò ha consentito di osservare un corretto mantenimento delle riparazioni temporanee per un periodo anche di 5 anni fino alla sostituzione della componente interessata. In tale ottica sono state svolte delle valutazioni a lungo termine della durata attesa del composito, al fine di comprendere quali meccanismi si possano instaurare in un orizzonte temporale più esteso.

Inoltre, al fine di comprendere al meglio tali dinamiche, e poter minimizzare il rischio connesso all'esercizio della riparazione in materiale composito sono inoltre attivi dei progetti di R&S, volti in particolare all'identificazione di un sistema che consenta il monitoraggio in opera delle tensioni interne del composito e la predizione dell'innescio di eventuali fenomeni di delaminazione.

6. Bibliografia

- [1] Comel L. Rinforzo strutturale in P.R.S. di un grande serbatoio G.P.L. in seguito a "warning" da CND. Senza alcuna interruzione dell'operatività. Atti del congresso MCM 2013
- [2] Comel L. Stefanini P. Messa in sicurezza di un grande serbatoio G.P.L. Fluid Trasmissioni di potenza 2013 N°6 Novembre: pagine 30-32
- [3] Comel L, Grassetti R. Rinforzi strutturali in fibra di carbonio e resina PRS per apparecchiature, tubazioni e valvole, in seguito a warning da CND senza alcuna interruzione di operatività. Atti del convegno SAFAP 2016, Milano
- [4] De Deppo, Datei. Fognature, Edizioni Cortina, Padova
- [5] De Deppo, Datei, Fiorotto, Saladini. Acquedotti, Edizioni Cortina, Padova
- [6] Sardegna Ricerche. Verifica statica di una tubazione interrata. Dispensa
- [7] Santulli C. Degradazione della vetroresina per effetto di presenza di acqua od irradiazione ultravioletta. Dispensa del corso di Materiali Compositi, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e dell'Ambiente, Università Sapienza di Roma

Sviluppo di un tappo filettato per l'esclusione dall'esercizio di tubi di scambiatori a fascio tubiero in condizioni di effettiva sicurezza per le persone operanti in prossimità

R. Acerboni¹, F. Boella¹, A. De Palma¹, A. Barbon², R. Nicosia², G. Saputi³

¹ Inail - Uot di Venezia

² Vetrosesina Engineering Development Srl

³ Inail - Direzione centrale ricerca

Sommario

L'esclusione dal servizio di tubi scambiatori continua ad essere una pratica ricorrente. I tappi STP, presentati al SAFAP 2012 ed installati con successo in molte applicazioni, hanno evidenziato alcuni limiti tecnici in condizioni particolarmente complesse, tra cui:

- tubi scambiatori con forti ed irregolari corrosioni anche nelle estremità da tappare;
- elevate pressioni di esercizio delle apparecchiature;
- materiali a basso indice di lavorabilità alla filettatura per rullatura.

Questo ha comportato la necessità di rivedere l'approccio globale con l'attività di esclusione e si è intervenuti sul tipo di filettatura del tappo e sul modo di filettare l'estremità del tubo.

Si è passati da filettatura cilindrica a filettatura conica perché le condizioni dell'estremità del tubo spesso non erano più tali da assicurare la tenuta sulla superficie conica del tappo. Per questo motivo la tenuta alla pressione viene assicurata dalla filettatura.

La filettatura viene eseguita di norma con maschi conici per asportazione di truciolo e solo su materiali particolarmente lavorabili viene eseguita per rullatura. Il passaggio dalla maschiatura a rullare alla classica per asportazione di truciolo si è reso necessario per l'eccessivo sforzo manuale che richiedeva l'operazione, in particolare sugli acciai inossidabili e su tubi di diametro superiore a $\frac{3}{4}$ ". L'ancoraggio di tipo filettato conico, inoltre, comporta una sorta di rinvigimento della mandrinatura.

Il lavoro, dopo aver illustrato in dettaglio le modifiche tecniche e procedurali introdotte, vuole evidenziare come vengano di conseguenza confermati tutti i vantaggi tipici dell'applicazione, tra i quali:

- il collegamento filettato assicura un solido ancoraggio al tubo impedendone la proiezione accidentale a seguito della spinta della pressione;
- non è necessario ricorrere a schermi di protezioni per ispezionare la piastra tubiera;
- non si rischia più di innescare effetto domino sui tubi prossimi e per l'assenza di saldatura e per l'assenza di percosse sul tappo.

1. Oggetto dello studio

L'esclusione dal servizio di tubi scambiatori di calore continua ad essere una pratica necessaria e ricorrente. I tappi filettati STP - "Special Tube Plug" (presentati al Safap 2012 [1]), specificatamente progettati per tale impiego ed installati con successo in molte applicazioni, hanno evidenziato alcuni limiti tecnici in condizioni particolarmente complesse. Il presente studio esamina le problematiche riscontrate durante le varie applicazioni e descrive le modifiche apportate al tappo per aumentarne l'affidabilità e semplificarne le fasi di montaggio.

2. Modalità di intervento consolidate: tappi conici e ad espansione

La pratica di tappare le estremità del tubo scambiatore, con l'intento di isolarlo dal servizio

dello scambio termico, è molto diffusa e si adotta fundamentalmente quando nel tubo è presente un difetto che crei miscelazione dei fluidi o quando la giunzione del tubo alla piastra tubiera non garantisca più una buona tenuta, sia che si tratti di tubo semplicemente mandrinato o mandrinato e saldato.

Il sistema di esclusione maggiormente diffuso è quello di ricorrere a tappi tronco-conici (Fig.1), con semi angolo al vertice compreso tra 2° e $2,5^\circ$, solitamente dello stesso materiale del tubo scambiatore, e inserirli a percussione nel tubo da escludere. Alcuni utilizzatori, dopo che il tappo è stato ben inserito nel tubo, preferiscono eseguire una saldatura che di norma interessa il tappo, il tubo ed anche la piastra tubiera.



Figura 1. Tappo conico di acciaio

Altro sistema di esclusione è quello di impiegare tappi ad espansione, di materiale compatibile con la metallurgia del tubo e con le condizioni operative, composti di più pezzi, che si montano a mezzo chiavi di manovra con coppie di serraggio fornite dal costruttore in funzione delle condizioni di esercizio dell'apparecchiatura (Fig.2).



Figura 2. Tappo ad espansione

Entrambe le tipologie di tappo presentano caratteristiche esaminate e descritte nella memoria "*Studio di un tappo filettato per l'esclusione dall'esercizio di tubi di scambiatori a fascio tubiero in condizioni di effettiva sicurezza*" [1] presentata al Safap 2012 a cui si rimanda per approfondimenti.

3. Il tappo filettato STP

La peculiarità del tappo STP è che esso si ancora al tubo mediante la filettatura interna delle sue estremità.

Nella prima versione (Fig. 3), la filettatura nel tubo veniva eseguita per rullatura, previa una leggera alesatura conica di calibratura del foro stesso ai fini di permettere la maschiatura alla misura prestabilita.

La tenuta alla pressione era ottenuta attraverso il contatto tra l'estremità del tubo e la sede

tronco-conica praticata tra la testa e la filettatura del tappo.

Una feritoia ricavata sulla porzione terminale della filettatura del tappo garantisce la sua rimozione in condizioni di assoluta sicurezza anche nel caso imprevisto di fluido in pressione all'interno del tubo da escludere. In questo caso, infatti, la canalina realizzata sulla filettatura, avrebbe consentito la completa depressurizzazione del tubo con il tappo ancora saldamente collegato al tubo, evitando la sua proiezione accidentale.



Figura 3. Tappo STP di acciaio Inox

3.1 Caratteristiche del tappo STP

Il tappo filettato STP presenta alcuni vantaggi caratteristici rispetto ai tradizionali tappi conici o ad espansione. Di seguito ne elenchiamo i principali.

- Il collegamento filettato assicura un solido ancoraggio del tappo al tubo (Fig. 4), impedendone la proiezione accidentale a seguito della spinta della pressione.
- Non è necessario ricorrere a schermi di protezione per ispezionare la piastra tubiera durante il test idraulico.
- La rimozione dei tappi STP installati è un'operazione semplice e sicura, anche nel caso limite di tubo ancora in pressione.
- Non è necessario ricorrere alla saldatura del tappo.
- Non innescandosi l'effetto domino si interviene su un numero minimo di tubi e non si rischia quindi di diminuire eccessivamente la superficie di scambio.
- Non danneggiando i fori della piastra tubiera sarà possibile il normale reimpiego della stessa senza riparazione alcuna.



Figura 4. Tappi STP montati

3.2 Limiti del tappo filettato STP

I tappi filettati STP sono stati installati con successo in moltissime applicazioni nel corso degli ultimi anni.

In taluni casi, però, si sono riscontrate delle difficoltà per ottenere la tenuta a pressione

richiesta.

In particolare sono emerse le seguenti problematiche:

- durante la preparazione della filettatura delle estremità del tubo da escludere dal servizio, in presenza di materiali a basso indice di lavorabilità e diametri superiori a 3/4", è difficoltoso realizzare la filettatura per rullatura;
- a volte, a causa dell'irregolarità del diametro interno del tubo, la filettatura ottenuta per rullatura non consentiva di ottenere il carico di serraggio richiesto per realizzare la tenuta tra estremità del tubo e colletto del tappo;
- nel caso di tubi scambiatori con forti ed irregolari corrosioni nelle estremità da tappare (Fig. 5), il contatto della sede di tenuta tronco-conica del tappo non si realizza, impedendo di fatto l'esclusione del tubo;
- nel caso di elevate pressioni di esercizio delle apparecchiature, la tenuta non era stata completa.



Figura 5. Esempio estremità tubo danneggiata

4. Sviluppo del nuovo tappo STP a filettatura conica

Per risolvere le problematiche tecniche riscontrate in campo e mantenere i vantaggi propri del tappo filettato, si è deciso di apportare alcune modifiche al progetto.

Le modifiche sostanziali sono le seguenti:

- adozione della filettatura conica anziché cilindrica;
- uso della filettatura per asportazione di truciolo anziché per rullatura.

L'introduzione di queste varianti ha comportato una ridefinizione delle dimensioni del tappo (Fig. 6) e delle modalità di installazione.



Figura 6. Tappo STP a filettatura conica

Le differenze con il vecchio tappo ed i vantaggi del nuovo tappo STP a filettatura conica sono di seguito elencati e descritti.

- L'adozione della filettatura conica (conicità 1:16 secondo ANSI B2.1) permette di ottenere la tenuta anche in presenza di forti irregolarità dell'estremità del tubo, perchè la tenuta alla pressione viene assicurata dal contatto tra i filetti e non più dal contatto tra

la sede tronco-conica del tappo e l'estremità del tubo.

- La filettatura viene eseguita di norma con maschi conici per asportazione di truciolo. Il passaggio dalla maschiatura a rullare alla classica per asportazione di truciolo si è reso necessario per l'eccessivo sforzo manuale che richiedeva l'operazione, in particolare sugli acciai inossidabili e su tubi di diametro superiore a $\frac{3}{4}$ ".
- Il montaggio di tappi con filettatura conica comporta una sorta di rinvivimento "definitivo" della mandrinatura. A differenza del tappo STP, in cui tale azione veniva eseguita temporaneamente durante la maschiatura per rullatura.
- Il profilo conico della filettatura garantisce, durante le fasi di rimozione, l'eventuale depressurizzazione controllata del tubo escludendo la proiezione accidentale del tappo, espletando la funzione di sicurezza della feritoia del vecchio tappo.
- Il tappo STP a filettatura conica resiste a pressioni elevate (oltre 200 bar).



Figura 7. Filettatura del tubo

5. Dimensioni e materiali tappo STP a filettatura conica

Abbiamo focalizzato il nostro studio sul gruppo di tubi elencati in Tab. 1, che rappresenta la quasi totalità dei tubi impiegati nella costruzione di fasci tubieri di scambiatori di calore. Convenzionalmente si adotta il sistema **Birmingham Wire Gauge** (abbreviato **BWG**) per specificare lo spessore di tubi.

Ø nominale [inches]	Øe tubo [mm]	BWG	Sp. tubo [mm]	Øi tubo [mm]
3/4	19,05	10	3,40	12,24
		11	3,05	12,95
		12	2,77	13,51
		13	2,41	14,22
		14	2,11	14,83
		15	1,83	15,39
		16	1,65	15,75
1	25,40	10	3,40	18,59
		11	3,05	19,30
		12	2,77	19,86
		13	2,41	20,57
		14	2,11	21,18
		15	1,83	21,74
		16	1,65	22,10

Tabella 1. Dimensioni nominale tubi scambiatori

Abbiamo quindi verificato che, dopo la mandrinatura, le estremità del tubo subiscono una variazione del diametro esterno, che alla fine coinciderà con il diametro del foro della piastra tubiera, e del diametro interno, che sarà maggiore a causa della riduzione dello spessore nella misura del 3÷8%, in funzione del materiale e della forza della mandrinatura.

Le dimensioni dei tubi utilizzate per il dimensionamento dei tappi sono pertanto quelle elencate in Tab. 2.

Ø nominale [inches]	BWG	Øe tubo (1) [mm]	Øi tubo (2) [mm]	Øi tubo (3) [mm]
3/4	10	19,30	12,70	13,04
	11		13,39	13,69
	12		13,93	14,21
	13		14,62	14,86
	14		15,21	15,42
	15		15,75	15,93
	16		16,10	16,26
1	10	25,70	19,10	19,44
	11		19,79	20,09
	12		20,33	20,61
	13		21,02	21,26
	14		21,61	21,82
	15		22,15	22,33
	16		22,50	22,66

Note: (1) equivalente a diametro foro piastra tubiera
 (2) riduzione minima dello spessore del tubo 3%
 (3) riduzione massima dello spessore del tubo 8%

Tabella 2. Dimensioni tubi scambiatori dopo mandrinatura

Si è scelto di utilizzare la filettatura NPT in accordo al codice ASME B1.20.1.

Poiché le dimensioni dei tappi standard in accordo a ASME B16.11 non sono compatibili con quelle dei tubi mandrinati, abbiamo individuato delle filettature speciali su base NPT, con 18 filetti per pollice, fissando due parametri di base: profondità minima della filettatura in presa ($h=15$ mm) e spessore residuo della parete del tubo ($t=0,5$ mm).

Abbiamo così definito una gamma di tappi STP conici a testa esagonale con filettatura NPT ma dimensioni non standard, in grado di essere impiegati per l'esclusione dei tubi scambiatori più frequentemente utilizzati.

In Fig. 8 è rappresentato a titolo esemplificativo un tappo STP conico.

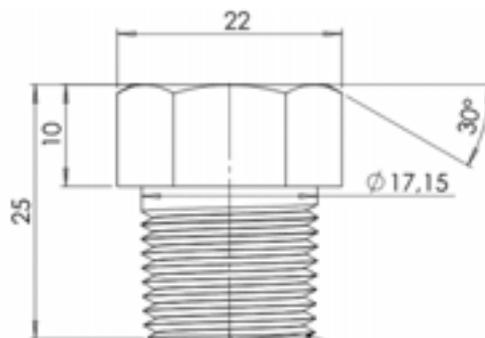


Figura 8. Esempio tappo STP conico

6. Modalità di installazione del tappo STP a filettatura conica

Per ottenere il risultato atteso, è opportuno seguire le modalità di installazione del tappo appresso elencate:

- pulizia accurata del foro;
- verifica dimensionale del diametro interno;
- verifica della compatibilità del tappo previsto;
- realizzazione eventuale foratura cilindrica;
- realizzazione maschiatura conica NPT speciale;
- lubrificazione con sigillante idoneo;
- installazione del tappo;
- serraggio del tappo alla coppia di serraggio prestabilita (Fig. 9).



Figura 9. Installazione tappo STP conico

7. Incisione dei tubi da escludere

Sia nel caso di utilizzo di tappi filettati STP che nel caso di impiego di tappi tradizionali conici a pressione o ad espansione, si consiglia, per evitare la pressurizzazione accidentale del tubo escluso dal servizio, di incidere sempre prima del montaggio dei tappi il tubo mediante appositi utensili troncatore (Fig. 10).



Figura 10. Utensile troncatore dall'interno di tubi singoli ad azionamento a motore

8. Applicazioni e conclusioni

I tappi STP conici rappresentano l'evoluzione dei tappi STP cilindrici e sono stati progettati per risolvere le problematiche tecniche emerse in questi anni durante l'applicazione in campo dei tappi cilindrici.

I tappi STP conici sono stati testati in laboratorio con successo fino alla pressione massima di 300 bar ed è in corso l'ultima fase di revisione del progetto prima della immissione del prodotto sul mercato.

I tappi STP conici sono in attesa di brevetto.

9. Bibliografia

[1] Maus Italia Srl, "Tube Expanders", 2010

[2] J. S. Pöll, "The story of the gauge", 1999

[3] ASME B1.20.1, "Standard on Pipe Threads, General Purpose", 2013

[4] ASME B16.11, "Forged Fittings, Socket-Welding and Threaded", 2011

Affidabilità dei sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe: attuazione del piano di controllo condotto sulle attrezzature a pressione della Valle d'Aosta

P. Castellano¹, G. Gorrino², F. Fournier³

¹ Inail - Uot di Aosta

² Inail - Uot di Alessandria

³ Associazione Valdostana Impianti a Fune (A.V.I.F.)

Sommario

Sin dagli inizi degli anni '80, il ricorso a metodologie per il controllo attivo del distacco artificiale delle valanghe (a protezione di lavoratori, degli abitanti e dei frequentatori di zone montane) si è sviluppato a livello tecnologico con il ricorso a sistemi fissi e mobili, atti a provocare distacchi artificiali controllati, in zone messe in sicurezza, di manti nevosi.

I sistemi fissi, oggetto dello studio e del piano di controllo presentato nel lavoro, sono caratterizzati da una esplosione locale controllata di una miscela di propano/ossigeno all'interno di esplositori, posizionati permanentemente in aree critiche per fenomeni valanghivi. Una serie di tubazioni collega i recipienti dei gas (di circa 400 L ognuno), posizionati in condizioni di sicurezza in una unità centrale di poliestere o acciaio, all'esterno della quale sono stoccate diverse bombole per il riempimento dei recipienti, dopo le esplosioni.

Tutto l'apparato è posizionato ad altitudini di 2500 – 3500 m s.l.m. in condizioni ambientali estreme, con temperature che possono raggiungere i - 30°C.

Nel presente lavoro viene illustrata la predisposizione del piano di verifiche attuato dalla Uot di Aosta e di Alessandria, su tutti i sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe della Valle d'Aosta (grazie anche alla sinergia con l'A.V.I.F.). Le attività del piano si sono svolte in accordo alla normativa vigente sulle attrezzature a pressione, ivi comprese le prime verifiche periodiche.

La particolarità delle attrezzature in questione, il loro posizionamento in zone difficilmente raggiungibili e le basse temperature riscontrate, hanno portato a condurre uno studio approfondito degli aspetti di affidabilità dei diversi componenti di tali attrezzature.

1. Introduzione

La tragedia di Rigopiano, località turistica del Massiccio del Gran Sasso (2912 m s.l.m.) del 18 gennaio 2017, che ha provocato la morte di 39 persone ed il ferimento di ulteriori 11 turisti, ha drammaticamente aumentato l'interesse rivolto alla prevenzione dal rischio valanghe anche con il ricorso alle tecnologie di controllo oggetto del presente lavoro.

Lo sviluppo degli sport invernali, ha portato nell'ultimo decennio, alla costruzione di impianti sciistici ad altitudini sempre più elevate, con un conseguente incremento dell'attenzione sul controllo del rischio valanghe. Nelle Alpi e negli Appennini centrali, la media storica degli ultimi 30 anni di tali eventi ha evidenziato 19 morti per anno con un leggero trend positivo negli ultimi anni, in accordo ai dati pubblicati dall'Associazione Interregionale Neve e Valanghe [1].

Al fine di controllare il rischio valanghe, sin dai primi anni '80 [2] è stato implementato lo sviluppo di nuove tecnologie. Il rischio di un incidente valanghivo, infatti, può essere ridotto attraverso il ricorso a varie misure [3] di tipo permanente (costruzioni, tunnel protettivi, gallerie etc.) e misure temporanee (ricorso a chiusure, messa in atto di sistemi di evacuazione, sistemi di distacco artificiale delle valanghe).

Il ricorso ad interventi di distacco artificiale volontario o programmato di accumuli instabili del manto nevoso, rappresenta un metodo di prevenzione per la gestione della sicurezza nei territori montani, in particolare, a tutela dei comprensori sciistici di piste, impianti di risalita, mezzi ed infrastrutture, strade e centri abitati.

I metodi di distacco artificiale delle valanghe, oggetto dello studio e del piano di controllo presentato nel lavoro, sono caratterizzati da una esplosione locale controllata di una miscela di propano/ossigeno all'interno di esploditori, posizionati permanentemente in aree critiche per fenomeni valanghivi.

Il documento "*Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa*", redatto dalla Regione Autonoma Valle d'Aosta [4] riporta una dettagliata descrizione dei contenuti e dei presupposti per la stesura di un Piano di Intervento di Distacco Artificiale Valanghe (PIDAV), nonché le modalità operative per metterlo in atto, con particolare riferimento alla Regione Autonoma Valle d'Aosta, seguita da una rassegna dei metodi di distacco artificiale di valanghe ad oggi esistenti e della normativa vigente in materia nel territorio italiano, francese e svizzero.

L'impiego del distacco artificiale di valanghe ha avuto inizio sull'arco alpino durante la prima guerra mondiale quale strumento bellico, mentre, a partire dagli anni '30 del ventesimo secolo, la tecnica con esplosivo è stata utilizzata in Svizzera per scopi civili e risale agli anni '60 del secolo scorso la nascita in Francia dei primi servizi di sicurezza piste [5].

Sebbene tra le diverse tecniche di distacco artificiale di valanghe esistano sostanziali differenze (caratteristiche tecniche, trasportabilità, costi etc.), si può affermare che non si può individuare un metodo ottimale da adottare, in quanto la scelta deve essere valutata in funzione delle caratteristiche del sito valanghivo, dei contesti economici e normativi in cui si intende operare, nonché delle condizioni meteorologiche presenti al momento in cui il distacco si rende necessario.

Tuttavia le limitazioni normative per il trasporto, l'uso e lo stoccaggio di cariche esplosive, congiuntamente alle difficoltà di manipolazione e di innesco ed agli aspetti connessi alla sicurezza degli operatori, hanno spinto ad individuare soluzioni tecniche alternative e differenziate a seconda delle esigenze, con un maggiore sviluppo e commercializzazione di metodi che innescano il distacco di masse nevose mediante esplosione (controllata da remoto) di miscele gassose.

Con quest'ultima definizione si intendono le esplosioni dovute ad una reazione chimica di combustione di miscele di gas e, in questa categoria, rientrano le esplosioni di nubi di vapore non confinate e quelle confinate all'interno di tubazioni o di apparecchiature di processo.

In Figura 1 viene riportato un sistema fisso per il distacco artificiale delle valanghe, oggetto del presente lavoro, basato su una esplosione controllata di una miscela di propano/ossigeno realizzata all'interno di un tubo di acciaio (esploditore) di notevole diametro, caratterizzato da differenti volumi e capacità di esplosione, posizionato in maniera permanente nelle aree di distacco delle valanghe (Figura 2).

Diversi tubi collegano l'esploditore ai recipienti di ossigeno e propano (approssimativamente di 400 L ognuno), installati in condizioni di sicurezza nell'unità centrale di gas (Figura 1), caratterizzata da un deposito o mini-deposito di acciaio o poliestere. Il deposito, costituente l'insieme, rappresenta la riserva di gas necessaria al funzionamento dell'impianto per tutta la stagione invernale.

In un riparo esterno sono alloggiato le bombole di ossigeno utilizzate per il riempimento dei recipienti di ossigeno durante la stagione invernale.

Le bombole di propano, per il riempimento dei relativi recipienti, sono invece collocate all'interno dell'unità centrale dei gas.

Sia i tubi, sia il deposito sono posizionati ad un'altezza tra i 2500 ed i 3500 m s.l.m. in condizioni climatiche estreme, con temperature che possono scendere al di sotto dei -30 °C). Come riferimento, per quanto riguarda i dati meteorologici per la Valle d'Aosta, sono

stati presi quelli registrati dalla stazione meteorologica del Plateau Rosa (3488 m s.l.m.), caratterizzata da temperature medie invernali di $- 11,5$ °C, temperature medie estive di $+ 1$ °C e con minime di $- 34$ °C¹.



Figura 1. Unità centrale dei gas con stazione meteorologica integrata



Figura 2. Esplosore

(Foto per gentile concessione di MND Group)

Un aggiornamento ed una integrazione dei PIDAV, con documentazioni inerenti ad un esame maggiormente approfondito degli aspetti legati alle procedure tecniche di verifica e di manutenzione delle attrezzature per realizzare il distacco artificiale delle valanghe, risulta, pertanto, necessario, considerato il diffuso utilizzo di tali sistemi e la loro complessità ed anche al fine di realizzare una capillare sensibilizzazione dei gestori dei comprensori sciistici e degli impianti all'ottemperanza ai disposti normativi di cui al d.m. 01.12.2004, n. 329 [6] ed al d.m. 11.04.2011 [7] per quanto attiene alle verifiche tecniche su tali dispositivi, come già evidenziato in un precedente lavoro presentato al Convegno SAFAP 2016 [8].

2. Obiettivi

L'obiettivo del presente lavoro è quello di definire un piano ottimale di ispezione per assicurare la maggiore affidabilità dei sistemi per il controllo di distacco artificiale delle valanghe. In merito, l'Unità Operativa Territoriale (Uot) Inail di Aosta, insieme al personale tecnico della Uot di Alessandria, con la collaborazione dell'Associazione Valdostana Impianti a Fune (A.V.I.F.), hanno realizzato, a partire dal 2016, uno studio suddiviso in tre fasi:

1. analisi del rischio;
2. verifica dell'ottemperanza agli aspetti normativi;
3. pianificazione delle verifiche.

La prima fase è consistita in uno studio dettagliato dei sistemi fissi utilizzati per il distacco artificiale delle valanghe. A tale scopo, si è fatto ricorso ai classici metodi di affidabilità, che tengono conto degli effetti avversi dell'ambiente in cui sono posizionati tali sistemi.

¹ <http://www.scia.isprambiente.it>

La seconda fase ha riguardato l'analisi degli aspetti normativi, in merito all'ottemperanza, come sopra citato, ai disposti del d.m. 329/2004 e, per quanto riguarda le prime verifiche periodiche, del d.m. 11 aprile 2011.

Nella terza fase, infine, sono stati discussi in dettaglio i seguenti aspetti sui parametri da prendere in considerazione nel piano e, in particolare:

- i. *cosa misurare;*
- ii. *perché misurare;*
- iii. *come misurare;*
- iv. *quando misurare;*
- v. *dove misurare.*

I primi tre punti riguardano il contenuto tecnico del piano e sono basati sui risultati della fase 1 sopra citata.

Gli ultimi due punti, invece, riguardano gli aspetti logistici delle misurazioni, condotte da parte del personale tecnico della Uot, stante il posizionamento di tali attrezzature, nella Regione Valle d'Aosta (Figura 3), ad altitudini elevate e l'installazione in punti difficilmente raggiungibili (alcuni di questi, ad esempio, soltanto ricorrendo all'utilizzo di elicottero) se non nei brevi periodi della stagione primaverile/estiva.

L'esame di tutti gli aspetti sopra citati ha portato alla realizzazione ottimale di un piano di verifiche tecniche (nell'anno 2017) volto a garantire la sicurezza di tutti gli stakeholders, compresi i proprietari degli impianti e gli utilizzatori, ma anche degli abitanti del territorio e di tutti i lavoratori coinvolti.

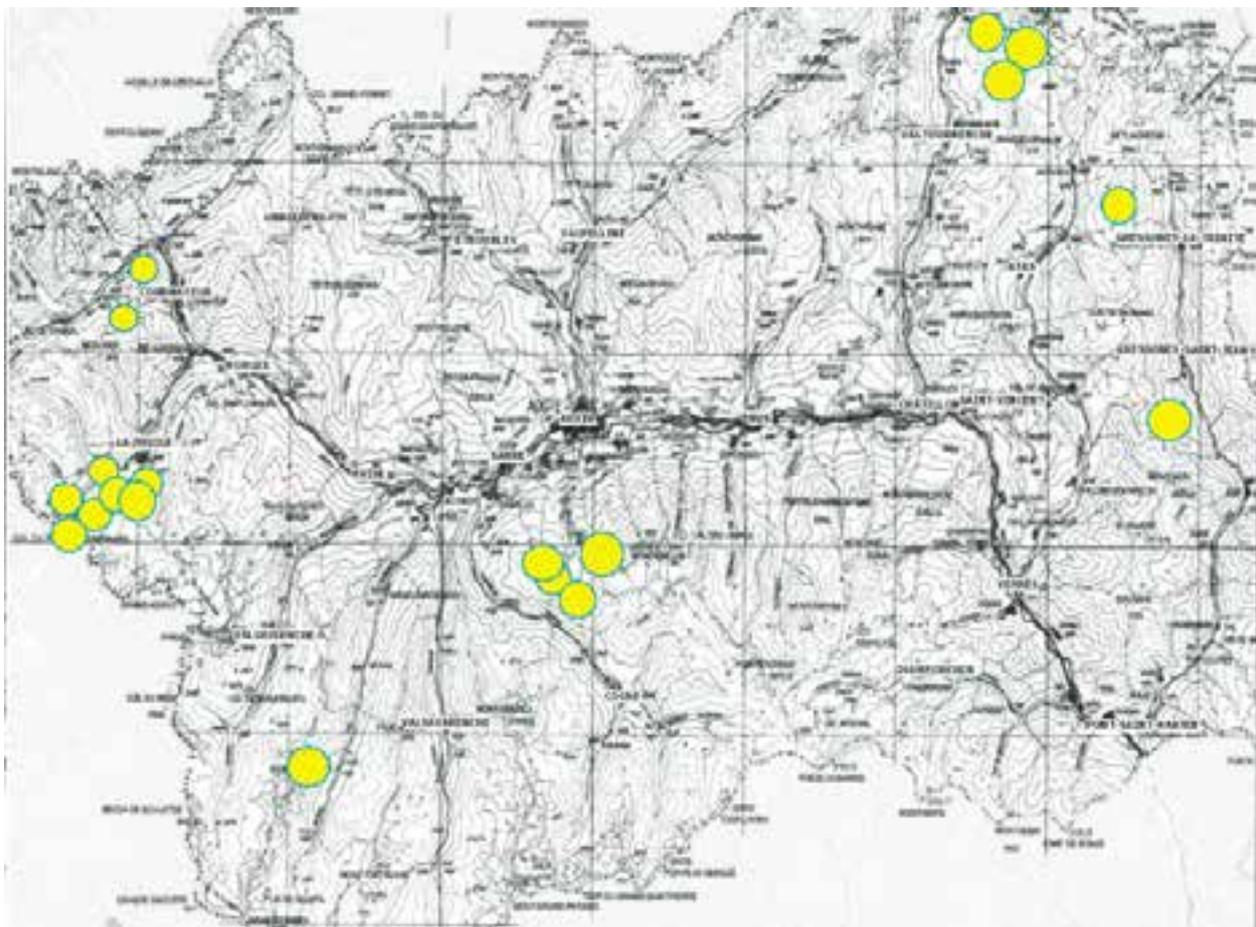


Figura 3. Mappa geomorfologica di localizzazione dei sistemi fissi nella Regione Valle d'Aosta

3. Caratteristiche tecniche dei sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe

In Figura 4 viene riportato lo schema tipico di un sistema fisso a gas per il distacco artificiale delle valanghe [9].

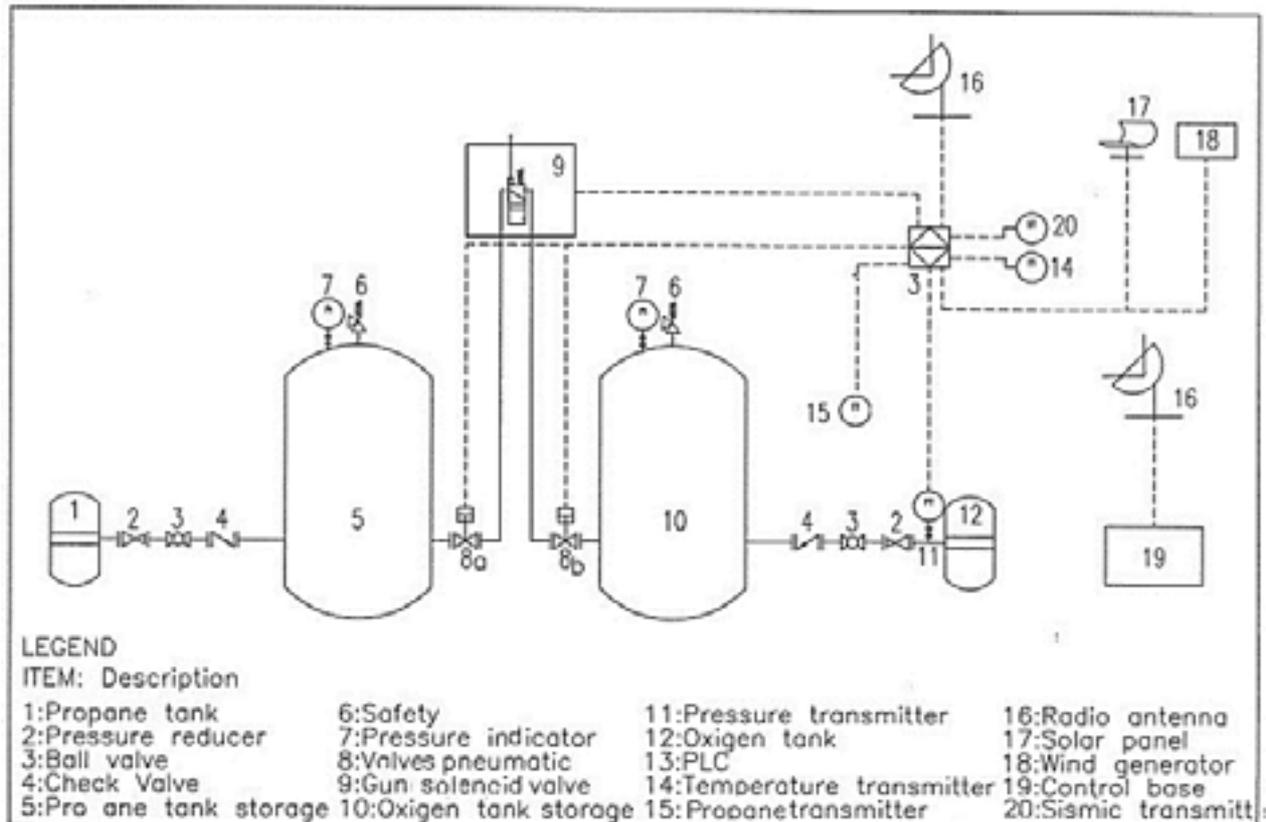


Figura 4. Schema tipo di un sistema fisso a gas

Le condizioni operative, con i relativi valori di pressione, sono riassunte come segue, in riferimento ai numeri riportati in Figura 4:

1. gruppo di bombole di propano: 7/8 bar
5. recipiente di stoccaggio di propano: 3.9 bar
12. gruppo di bombole di ossigeno: 200 bar
10. recipiente di stoccaggio di ossigeno: 10.0 bar

Per quanto riguarda le condizioni ambientali è stato fatto riferimento, come sopra evidenziato, a quelle della stazione meteorologica del Plateau Rosa.

Come già esplicitato nell'introduzione, tutte le attrezzature riportate in Figura 4 operano all'interno di un deposito, al fine di garantire una protezione dalle condizioni atmosferiche estreme.

La manutenzione del sistema a pressione per il distacco artificiale delle valanghe (attrezzature a pressione e relativi componenti) viene effettuata in accordo a quanto riportato nel manuale di uso e di manutenzione fornito dal produttore.

Nel presente lavoro non viene riportato lo studio effettuato sull'analisi di rischio e di affidabilità di tali attrezzature, oggetto di una specifica pubblicazione [9] in cui sono stati considerati i principali incidenti (e la loro credibilità) che potrebbero avvenire su tali sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe e le eventuali problematiche tecniche che

possono portare ad un conseguente non corretto funzionamento con possibili rischi da distacchi “non controllati” di masse nevose.

4. Aspetti normativi

Gli aspetti fondamentali del piano di controllo, riguardano gli obblighi sia del costruttore, sia del *downstream user* per quanto concerne, rispettivamente, l'immissione sul mercato di attrezzature a pressione in accordo ai requisiti essenziali di sicurezza (RES – Essential Safety Requirements) e l'espletamento di attività di manutenzione ordinaria e straordinaria, nonché le richieste di verifica di messa in servizio e di denuncia di messa in servizio, ai sensi degli artt. 4 e 6 del d.m. 329/2004 e di espletamento di verifiche periodiche ai sensi del d.m. 11 aprile 2011.

4.1 Costruzione

L'assemblaggio di queste attrezzature a pressione risponde alla Direttiva Europea PED, per quanto attiene alle regole per la costruzione e la commercializzazione delle attrezzature a pressione e soddisfa i RES.

Per quanto riguarda il d.m. 329/2004, come noto, questo impone controlli ed ispezioni volte a verificare la permanenza delle condizioni essenziali di sicurezza delle attrezzature a pressione, stabilite dalla Direttiva PED, durante la costruzione.

4.2 Verifiche

In accordo al d.lgs. 81/08 e s.m.i. [10], i datori di lavoro devono anche controllare periodicamente gli aspetti inerenti ai requisiti di sicurezza.

Le attrezzature a pressione, pertanto, devono essere periodicamente verificate dall'Inail, dalla Asl o dai soggetti abilitati (in accordo ai disposti dell'art. 2 del d.m. 11 aprile 2011 [7] - sottolineando, comunque, che l'Inail, attraverso le proprie Uot, è titolare della prima verifica periodica) al fine di valutare l'attuale stato di conservazione ed efficienza, con la frequenza stabilita dall'Allegato VII del d.lgs. 81/08 e s.m.i.

5. Piano di verifiche effettuate dalla Uot in Valle d'Aosta

Il ricorso crescente a metodi di distacco artificiale di valanghe ad esplosione di miscele gassose, la rilevata frequente scarsa chiarezza, in alcuni contesti territoriali, in merito alla corretta applicazione, per tali dispositivi, della normativa vigente in materia di attrezzature a pressione, rende necessaria una specifica implementazione della documentazione allegata ai PIDAV (citato al par.1), attraverso la descrizione degli obblighi normativi, rappresentando questo il documento centrale a garanzia della sicurezza dell'intero iter procedurale per realizzare il distacco artificiale.

Il piano di verifiche tecniche presentato nel lavoro, si basa sull'esperienza della Uot di Aosta sui sistemi di distacco artificiale delle valanghe ubicati nella Regione Valle d'Aosta.

Nella prima fase del lavoro è stata effettuata la mappatura di tali attrezzature della Regione, in relazione alle informazioni fornite dall'Associazione Valdostana Impianti a Fune (A.V.I.F.), attraverso la compilazione di questionari, somministrati all'Associazione in questione dalla Uot di Aosta, inerenti alle caratteristiche geomorfologiche delle aree in cui sono ubicati i sistemi fissi di distacco artificiale delle valanghe (Figura 3) e alla descrizione tecnica delle attrezzature a pressione (età, documentazione disponibile e stato dell'arte delle verifiche).

Nella seconda fase, un gruppo di lavoro tecnico, con la partecipazione di esperti dell'Inail (Uot di Aosta e personale tecnico della Uot di Alessandria), dell'Azienda Usl Valle d'Aosta (Struttura Complessa Prevenzione e Sicurezza degli Ambienti di Lavoro) territorialmente

competente e rappresentanti dell'A.V.I.F., ha discusso i dati raccolti al fine di focalizzare il piano di intervento, in accordo ai disposti normativi sopra citati.

L'organizzazione del piano di verifiche effettuato su tutti i sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe ubicati nei vari impianti della Regione Valle d'Aosta ha tenuto conto anche degli aspetti di prevenzione e di sicurezza per il personale tecnico coinvolto nelle attività, considerando l'ubicazione critica di tali sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe, nella maggior parte dei casi raggiungibili in maniera disagiata.

5.1 Le modalità di svolgimento delle verifiche

Nella Regione Valle d'Aosta, i sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe sono posizionati in luoghi inaccessibili per altezza, ubicazione, presenza di neve e di condizioni atmosferiche avverse (Figura 5).



Figura 5. Ubicazione (rispettivamente Monte Rosa e Pila) di sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe

La maggiore parte delle aree possono essere raggiunte nel periodo invernale esclusivamente utilizzando l'elicottero o, alternativamente, utilizzando il gatto delle nevi, funivie e percorrendo tortuosi ed impervi sentieri di montagna. Per tale motivo, le verifiche (ai sensi del d.m. 329/2004 e del d.m. 11 aprile 2011) sono state condotte, in particolare nei comprensori sciistici di Courmayeur, di La Thuile, di Breuil-Cervinia, di Pila ed anche del Monte Rosa, durante il periodo estivo e agli inizi di quello autunnale, in condizioni

atmosferiche che hanno reso meno difficoltoso l'espletamento di queste da parte del personale tecnico della Uot.

Gli esploditori (Figura 2) sono ubicati a differenti altitudini in varie aree della Regione (Figura 3), con il posizionamento di uno di questi anche a protezione della strada (Comune di Rhemes-Notre-Dame).

5.2 Verifiche tecniche

Nell'ambito del piano di verifiche condotte dalla Uot di Aosta in collaborazione con il personale tecnico della Uot di Alessandria, in accordo alla normativa vigente in materia, come sopra esplicitato, sui sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe della Regione Valle d'Aosta, nei mesi di luglio e di settembre 2017, sono stati effettuati, oltre ai test ed ai controlli richiesti dal manuale di uso e di manutenzione (ad es. controllo di batterie, sensori etc.)², verifiche di messa in servizio delle attrezzature a pressione, nonché espletate anche le prime verifiche periodiche focalizzate a valutare la conformità di quanto riportato nel registro di manutenzione delle attrezzature in questione, al manuale di uso e di manutenzione fornito dal produttore.

Le verifiche tecniche sulle valvole e sui dispositivi di sicurezza, sono effettuate ogni due anni, mentre le misure di spessimetria sulle attrezzature a pressione vengono espletate ogni dieci anni. Anche le bombole di ossigeno e di propano sono verificate ed approvate, prima di essere trasportate sul sito, in accordo al Regolamento ADR.

6. Conclusioni

I sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe, monitorati da remoto, sono caratterizzati da una maggiore affidabilità rispetto a metodi tradizionali utilizzati per effettuare il distacco artificiale delle valanghe (come, ad esempio, quelli attraverso il ricorso tradizionale ad esplosivi solidi).

E', tuttavia, fondamentale definire un piano di verifiche ottimale e standardizzato, da effettuare durante il breve periodo della stagione primaverile/estiva, al fine di garantire, nella stagione invernale, la massima affidabilità di questi sistemi anche al fine di evitare gravi incidenti, quali quello di Rigopiano.

Nonostante i diversi vantaggi nell'utilizzo di tali sistemi, è necessaria una divulgazione (rivolta soprattutto ai territori montani) della conoscenza delle verifiche alle quali devono essere necessariamente sottoposte tali attrezzature innovative e del quadro normativo di riferimento. L'affidabilità di tali sistemi dipende, infatti, fortemente da una corretta conduzione del piano di verifiche e di manutenzioni adottate che, comunque, è necessario implementare nel periodo di funzionamento delle attrezzature per il distacco artificiale delle valanghe. L'obbligo di effettuare le verifiche di legge su tali attrezzature, deve, pertanto, essere divulgato a tutte le figure coinvolte nei territori montani nella gestione di questi sistemi, evidenziando l'importanza dell'integrazione di un PIDAV con gli aspetti relativi all'impiego in sicurezza delle attrezzature a pressione utilizzate allo scopo, con particolare riferimento agli obblighi normativi per le verifiche previste ed in considerazione anche delle problematiche di *ageing* dei materiali sottoposti ad escursioni termiche giornaliere e stagionali di rilievo, al fine di un rafforzamento dello stesso piano nell'ambito di un contesto di utilizzo in sicurezza di tali attrezzature.

L'ottemperanza ai disposti normativi di cui al d.m. 329 del 01.12.2004 ed alle verifiche periodiche previste dal d.m.11.04.2011, nonché la rilevanza di una sensibilizzazione dei gestori al ricorso ai dispositivi per il distacco artificiale di valanghe, rappresentano le premesse fondamentali per una strategia di gestione in sicurezza dei sistemi per il distacco artificiale delle valanghe e per lo sviluppo di approfondimenti ed aggiornamenti tecnici sul tema.

² TAS (Società appartenente a MND Group): Manuale di manutenzione e d'uso GAZEX® 2013

Una acquisizione sistematica di dati sperimentali inerenti a guasti, anomalie, quasi incidenti, danneggiamenti ed avarie delle attrezzature per il distacco artificiale di valanghe già in uso, risulta fondamentale per l'elaborazione di una conoscenza condivisa sui modi di guasto che possa fornire indicazioni utili per la gestione della sicurezza e per la prevenzione di incidenti rilevanti, consentendo ai ricercatori di ottimizzare gli studi di affidabilità, essenziali per la definizione di piani di ispezione e di manutenzione mirati su tali sistemi.

I sistemi fissi in questione, pertanto, se sottoposti a corrette procedure di ispezione, in accordo alla normativa vigente, e di manutenzione rappresentano un notevole supporto per il controllo del distacco artificiale delle valanghe a garanzia della sicurezza di tutto il personale coinvolto, dei frequentatori dei comprensori sciistici e del territorio in generale.

7. Bibliografia

- [1] Pivot S. *Avalanche Accidents: Overview of Avalanche accidents in Italy in the winter season 2015 – 2016. Neve e Valanghe. 2016; 88: 74 – 79.*
- [2] Lieberman E, Schippers J & Lieberman S.C. The GAZEX® Avalanche Release System. *Atti dell'11° International Snow Science. Penticton (British Columbia), 29 settembre – 4 ottobre 2002, pp 46 – 48.*
- [3] Gubler H, Wyssen S, & Kogelnig A. Guidelines for artificial release of avalanches. *Wyssen avalanche control AG. Reichenbach, 2012, pp 1-39.*
- [4] Bruno E, Maggioni M, Freppaz M, Zanini E. *Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa, Regione Autonoma Valle d'Aosta. Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2012, pp 1-121.*
- [5] Cresta R. *L'esplosivo e la neve. Club Alpino Italiano. Servizio Valanghe Italiano. Milano, 2002, 1-148.*
- [6] Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93” (G.U. S.O. n. 22 del 28/01/2005).
- [7] Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, “Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo” (G.U. Serie Generale n. 98 del 29/4/2011 – S.O. n. 111).
- [8] Castellano P, Villani G, Gorrino G. Piano di Intervento Distacco Artificiale di Valanghe (P.I.D.A.V.): premesse per un approccio alla corretta standardizzazione di verifiche e manutenzioni delle attrezzature per il distacco di masse nevose mediante esplosione di miscele gassose a pressione. *Atti del Convegno su SAFAP 2016 Sicurezza ed Affidabilità delle Attrezzature a Pressione- La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio. Milano, 15-16 novembre 2016, pp 250 – 256.*
- [9] Castellano P., Gorrino G., Bragatto P.A.. Reliability of fixed and mobile systems for artificial avalanche detachment. *Safety and Reliability – Theory and Applications – Čepin & Briš (Eds)© Taylor & Francis Group. London, 2017, pp 1585 - 1592.*
- [10] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L).

Ringraziamenti

Si ringrazia la MND Group, oltre che per avere fornito alcune delle foto presentate in questo lavoro, per avere manifestato disponibilità ed interesse per la tematica affrontata. Un ringraziamento particolare viene rivolto anche alla Struttura Complessa Prevenzione e Sicurezza degli Ambienti di Lavoro dell'Azienda Usl Valle d'Aosta per tutte le informazioni a supporto, di carattere tecnico, specifiche per i sistemi fissi per il distacco artificiale delle valanghe ubicati nella Regione.

Applicazione della valutazione del rischio sismico dei luoghi di lavoro

N. Mordà¹, C. De Simone²

¹ DoMo Studio

² Studio Professionale Ing. De Simone

Sommario

La memoria focalizza l'attenzione sulla valutazione del rischio sismico nei luoghi di lavoro, che ricade nel più generale ambito di valutazione dei rischi derivanti da perdita di stabilità di un fabbricato destinato ad ambiente di lavoro.

Viene proposto un approccio metodologico utilizzabile per la valutazione dei rischi (ex art.28 d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.) cui risulta soggetta una costruzione cimentata da azione sismica, assumendo a caso di studio una struttura prefabbricata in cemento armato adibita ad area di produzione del comparto di assemblaggio meccanico.

La finalità del documento è relazionare la specifica disciplina tecnica deputata a garantire la sicurezza delle costruzioni (oggi rappresentata in Italia dalle NTC 2018) con gli obblighi derivanti dai disposti del summenzionato Testo Unico in materia di salute e sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro, in considerazione del fatto che le responsabilità dei soggetti obbligati non variano in dipendenza delle caratteristiche costruttive dei manufatti adibiti all'esercizio dell'attività.

La conoscenza del fabbricato che ospita i luoghi di lavoro – e, con esso, delle caratteristiche prestazionali dei materiali utilizzati per la costruzione e per gli eventuali successivi interventi occorsi nell'arco della sua vita utile – diviene pertanto requisito fondamentale *in primis* per la valutazione di idoneità in fase di insediamento, oltre che per le valutazioni del rischio (su grande scala o per specifico comparto¹) e le verifiche del mantenimento delle condizioni di sicurezza nel corso dell'attività. Il possesso di tale requisito è però tutt'altro che scontato².

L'esperienza sul campo reca inoltre evidenza del fatto che – soprattutto per luoghi di lavoro insediati presso fabbricati storici – il livello di conoscenza richiesto per l'acquisizione delle nozioni tecniche necessarie al perfezionamento di una modellazione analitica del fabbricato (ed eventualmente, per le applicazioni più esigenti, dei suoi contenuti) “vestita su misura” possa risultare addirittura sconveniente³ al fine di dimostrare l'idoneità del luogo di lavoro.

Può considerarsi infatti insito nel concetto di valutazione del rischio stabilire (a cura del Datore di Lavoro, quale principale soggetto obbligato dai disposti del d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.) la soglia di accettabilità che renda il documento di valutazione del rischio specifico uno strumento efficace e consapevole per la buona conduzione aziendale.

Il metodo sotto esposto prevede un approccio graduale di accompagnamento tecnico finalizzato alla dimostrazione del raggiungimento della soglia di accettabilità del rischio stabilita dal datore di lavoro, mediante tre livelli sistematici di analisi via via attivabili.

¹ Nel prosieguo della trattazione potrà apprezzarsi la flessibilità dell'approccio proposto, utilizzabile in linea di principio anche per valutazioni specifiche relative a singoli comparti insediati all'interno del fabbricato e/o a singoli componenti dell'unità produttiva.

² Le ragioni che motivano tale affermazione sono di diversa natura; ai fini della presente trattazione, giova considerare il fatto che l'adozione di una *best practice* da parte degli operatori di settore consentirebbe la pronta disponibilità dei dati da fornire ai valutatori, riducendo il rischio dell'esposizione economica indotta dalle risorse da impiegare per le campagne di campionamenti e le prove di laboratorio.

³ Al fine di non creare futuri fraintendimenti, si specifica che il più alto livello di conoscenza risulta sempre cautelativo ai fini della sicurezza strutturale, risultando sempre a discrezione del verificatore applicare i più ridotti fattori di confidenza consentiti dalla norma tecnica. Ciò non esclude tuttavia il fatto che possa essere previsto un approccio metodologico graduale di accompagnamento alla valutazione del rischio, che possa consentire al Datore di Lavoro – con le dovute restrizioni e le conseguenti soglie di accettazione del rischio – di attuare il massimo approfondimento delle indagini controllandone “step by step” l'effettiva necessità.

Utilizzando specifiche liste di controllo corroborate da analisi quantitative (tarate su classi di oggetti e generate mediante approccio probabilistico), si individuano in modo diretto degli intervalli di soglie di rischio cui sono esposti i lavoratori.

Tali valori vengono utilizzati all'interno della matrice di quantificazione del rischio, così riconducendo la valutazione alla visualizzazione di un *output* di più facile e consueta lettura. Il metodo risulta flessibile e facilmente utilizzabile per incorporare analisi di vulnerabilità più puntuali, potendo superare (con gli opportuni accorgimenti e tenendo sempre presente le limitazioni relative ai differenti livelli di approfondimento previsti dalla metodologia esposta) la limitazione dovuta al riferimento alla classe tipologica (elementi strutturali – principali e secondari – o elementi non strutturali – edili ed impiantistici) e quindi utilizzare i dati propri per lo specifico oggetto dell'analisi.

In merito alle azioni dinamiche, considerata la disponibilità di intervalli numerici di quantificazione probabilistica del rischio sismico, viene tratteggiata qualche riflessione sull'opportunità (*in primis* per il Datore di Lavoro) di correlare uno specifico programma di misure ed azioni di tutela (preventive, programmatiche e/o di salvataggio) alle fasce di rischio previamente definite⁴, ovvero identificare le cosiddette fasce ALARP⁵ (e successive formulazioni ALATA / ALARA) con riferimento alla letteratura internazionale sul tema.

1.Introduzione

La disciplina di valutazione del rischio nell'ambito della salute e della sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro prevede, in merito all'analisi dei rischi specifici, l'individuazione (sempre più privilegiandone la misurazione strumentale) di valori limite deputati alla:

- definizione delle soglie di accettabilità del rischio e di attenzione per la riduzione del rischio;
- conseguente definizione delle azioni preventive e correttive per la gestione del rischio residuo;
- monitoraggio del mantenimento e del miglioramento del tempo dei livelli di accettabilità definiti, in regime di Sistema di Gestione della Salute e Sicurezza sul Lavoro (SGSSL)⁶.

Partendo dalla disciplina classica e ripercorrendo l'evoluzione nel tempo delle varie materie specialistiche, l'approccio descritto – ormai consolidato per le sezioni normative dedicate alla salute dei lavoratori ed alla gestione della relativa sorveglianza sanitaria – va via via applicandosi (con successo se osservato nell'ottica della prevenzione degli infortuni) anche per le sezioni dedicate all'altro sostantivo fondamentale: la sicurezza dei lavoratori.

⁴ La valutazione del livello di accettabilità di un rischio ha visto, nel tempo, il fiorire di diversi metodi, tra i quali si annoverano quello delle “preferenze rivelate” (che prevede il coinvolgimento diretto, attraverso somministrazione di questionari, dei soggetti interessati), quello delle “preferenze espresse” (che prevede la ricostruzione dei livelli di rischio con riferimento a rischi già precedentemente accettati) o quello “degli standard naturali” (introdotto in Gran Bretagna e mirato all'identificazione della fascia intermedia, compresa tra le cosiddette “soglia limite” e “soglia obiettivo”).

⁵ Il Principio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) per la cui applicazione è consuetudine far riferimento all'approccio dell'Health and Safety Committee britannico in relazione alla quantificazione delle soglie poste a definizione dei tre livelli di rischio) riconosce tre grandi categorie di rischi:

- **Trascurabile:** Largamente accettato dalla maggior parte delle persone in quanto connaturato alla vita di tutti i giorni (vi si include, ad esempio, la possibilità di essere colpiti da un fulmine o avere un guasto ai freni dell'automobile).
- **Tollerabile** in vista dei benefici che si possono ottenere accettandolo: il costo (in termini di denaro) è bilanciato dalla scala del rischio e si accetta un compromesso (si può applicare, ad esempio, al viaggio in auto: si accetta possano accadere incidenti, ma minimizzando le probabilità che avvenga un disastro).
- **Non accettabile:** le perdite superano di gran lunga i benefici che si avrebbero dall'accettare tale rischio.

⁶In data 14 marzo 2018 è stata pubblicata la norma ISO 45001:2018 “Occupational health and safety management system – Requirements with guidance for use”, che sostituirà lo Standard OHSAS 18001:2007 sulla base delle indicazioni per la migrazione contenute all'interno del documento IAF MD 21:2018 pubblicato in data 18/01/2018 dall'International Accreditation Forum.

Utilizzando un linguaggio più speditivo, la “scatola” che ospita l’attività (ed i suoi contenuti, in termini di beni e sistemi tecnologici) va sempre più richiedendo al Datore di lavoro⁷ attenzione e dedizione analoghe a quelle impiegate per l’analisi ed il monitoraggio del cosiddetto “nastro lavorativo”: i luoghi di lavoro, tanto quanto le macchine e le attrezzature ivi presenti, costituiscono fonte di rischio da valutare attentamente, sia in ottica di prevenzione degli infortuni che di mantenimento di idonei livelli di comfort lavorativo e consapevolezza aziendale.

In un contesto così delineato, la prevenzione del rischio sismico riveste solo apparentemente carattere di secondaria importanza rispetto ai rischi (di ambito strutturale) cosiddetti “statici”: se è vero che i danni derivanti da perdita di stabilità indotta da azioni sismiche si verificano più raramente, è altrettanto statisticamente comprovato che gli stessi si presentano (quando indotti da sisma) con componenti di magnitudo ed esposizione di ben più ingente intensità.

Non è raro, infatti, che valutazioni di rischio sismico condotte per particolari realtà industriali (quali, ad esempio, gli stabilimenti cosiddetti “RIR” a Rischio di Incidente Rilevante assoggettati agli obblighi di cui al d.lgs. 105/2015) debbano contemplare, oltre che il Rischio Individuale, anche il Rischio Sociale, nelle sue diverse declinazioni.

La presente memoria, sebbene focalizzata su un ambito ben più ridotto, intende in ogni caso lasciar intravedere quanto l’argomento possa essere ampliato ed approfondito in più direzioni tra esse correlate.

2. Quadro normativo e considerazioni sintetiche in merito all’esposizione dei lavoratori sul luogo di lavoro

Le principali fonti legislative nazionali richiamate per l’inquadramento del tema oggetto di trattazione sono:

- d.m. 17 gennaio 2018 “*Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»*” (G.U. n.42 S.G. del 20/02/2018 – S.O. n.8, in vigore dal 22/03/2018)
- d.m. 28 febbraio 2017, n.58 “*Approvazione delle linee guida per la classificazione di rischio sismico delle costruzioni nonché delle modalità per l’attestazione dell’efficacia degli interventi effettuati*” (Testo coordinato con le modifiche introdotte dal d.m. 07 marzo 2017, n. 65)
- d.lgs. 9 aprile 2008 n.81 “*Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro – Attuazione dell’articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n.123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.*” (G.U. n. 101 del 30 aprile 2008 – S.O. n.108) – Testo coordinato con il Decreto integrativo e correttivo d.lgs. 3 agosto 2009, n.106 (G.U. n.180 del 05 agosto 2009 – S.O. n.142/L) e ss.mm.ii.⁸

Il richiamo al d.m. 58/2017 e s.m.i. merita alcune precisazioni, sinteticamente così esplicitabili:

- Il Decreto, emanato in attuazione dell’articolo 16, comma 1-*quater*, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63⁹, rappresenta lo strumento da adottare per l’ottenimento di benefici

⁷Quale puro invito ad interessanti approfondimenti da affrontarsi in altra sede, si sottolinea che le più recenti evoluzioni normative attribuiscono responsabilità diretta (o comunque solidale, in applicazione dell’art.26 del Titolo I del D.Lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.) al Datore di Lavoro sia nel caso in cui le lavorazioni si svolgano all’interno degli stabilimenti di propria conduzione, sia nel caso in cui i lavoratori siano impiegati presso altri stabilimenti, o autorizzati al lavoro in regime di *smart working*.

⁸Si segnala appena che, in forza del Decreto direttoriale dell’INL n.12 del 6 giugno 2018 (avviso nella G.U. n.140 del 19/06/2018) i, attuativo del l’art.306 c.4 bis del D.Lgs.81/2008 e ss.mm.ii., a decorrere dal 1° luglio 2018, sono state rivalutate nella misura dell’1,9% le ammende previste con riferimento alle contravvenzioni in materia di igiene, salute e sicurezza sul lavoro e le sanzioni amministrative pecuniarie previste dal decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 nonché da atti aventi forza di legge.

⁹Convertito, con modificazioni, dalla legge 3 agosto 2013, n. 90 (recante “*Disposizioni urgenti per il recepimento della direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla*

fiscali, ottenibili però entro un campo di applicazione ben delineato¹⁰.

- I principali indicatori di rischio (PAM e IS-V) rappresentano parametri di valutazione globale, spesso non relazionabili alle esigenze specifiche derivanti dalla necessità di dimostrazione del rispetto degli obblighi disciplinati dal d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.
- Gli *output* che si ricavano dall'applicazione delle Linee Guida sono orientati a dimostrare l'efficacia di un intervento di miglioramento sismico (misurato in base all'incremento di una o più classi di efficienza) e non il contenimento della probabilità del verificarsi di un danno entro soglie limite di accettabilità prefissate.

Il focalizzare invece l'attenzione sui precetti del d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii. ricentra decisamente il tema sulla valutazione e quantificazione del rischio nei confronti dell'esposizione dei lavoratori.

Con riferimento a ciascuna mansione lavorativa, il processo di definizione¹¹ dei cosiddetti G.O.L. (Gruppi Omogenei di Lavoratori, ovvero le unità soggette alle medesime categorie di rischio) implica la definizione del fattore di esposizione al rischio.

In caso di rischio sismico, il metodo proposto prevede (limitatamente alla relativa accuratezza, sia per il Livello 1 che per il Livello 2 definiti nel successivo §4) i seguenti scenari, evidentemente connessi agli stati limite raggiungibili dalla costruzione (come definiti dalle NTC) che ospita i luoghi di lavoro:

Stato limite	Componenti compromessi ¹²	Soggetti esposti
SLO	Arredi fissi; macchine ed attrezzature	Tutti i lavoratori presenti nei luoghi di lavoro interessati dall'analisi
SLD	Elementi non strutturali (edili ed impiantistici) di secondaria importanza; arredi fissi; macchine ed attrezzature	Tutti i lavoratori presenti nei luoghi di lavoro interessati dall'analisi
SLV	Elementi strutturali principali e secondari; elementi non strutturali (edili ed impiantistici) di principale importanza; beni contenuti (scaffalature, macchinari ed attrezzature) aventi massa complessiva significativa	Tutti i lavoratori presenti nei luoghi di lavoro interessati dall'analisi

prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale"), come modificato dall'articolo 1, comma 2, della legge 11 dicembre 2016, n. 232.

¹⁰Si riporta a tal proposito il seguente estratto dell'Allegato A al d.m. 58/2017 e s.m.i.: *"Il presente documento disciplina aspetti ormai consolidati in termini di mitigazione del rischio e tratta, solo marginalmente nel §2.2, i casi degli interventi che, pur mitigando significativamente il rischio, non sono ad oggi quantificabili/certificabili univocamente in termini di benefici apportati. Tali interventi, come ad esempio un'adeguata sistemazione dei controsoffitti al fine di scongiurarne la caduta in caso di sisma, ecc., sono auspicabili e auspicati ma l'attuale mancanza di procedure omogenee che ne quantifichino i contributi positivi, in termini sia di perdite (economiche) annue medie attese sia di incidenza sulla salvaguardia della vita, non ne consente al momento la trattazione. Anche per questi casi, comunque, è possibile ricorrere agli sgravi fiscali minimi già previsti dalle altre misure di agevolazione"*.

¹¹Tale processo è iterativo, in quanto implica la verifica delle ipotesi inizialmente assunte in base alle informazioni acquisite dal Datore di Lavoro ed alla conseguente analisi del cosiddetto "nastro lavorativo" dell'attività in esame. Affinché la valutazione del rischio sia fondata su dati ben bilanciati, il valutatore deve aver cura di verificare che la quantificazione di rischio rispetti l'effettiva omogeneità dei G.O.L. definiti. Le azioni correttive usualmente assunte al riscontrare eventuali valori "di picco" non adattabili al gruppo omogeneo considerato consistono nella definizione di un ulteriore gruppo omogeneo o nella ricollocazione della risorsa oggetto di valutazione in un differente gruppo omogeneo.

¹²L'assunto di base è che, parallelamente al superamento degli stati limite generati dal crescere dell'azione sismica, venga via via compromessa la funzionalità e, conseguentemente, la stabilità dei componenti del fabbricato e di quelli in esso contenuti. Nella seconda colonna vengono indicati quali "compromessi" i componenti per i quali possa presumersi la perdita di funzionalità. A mero titolo di esempio, in corrispondenza della riga SLD non vengono indicati gli elementi strutturali, pur se gli stessi possono presentare il manifestarsi di quadri fessurativi più o meno diffusi. Vale a tal proposito la considerazione espressa al successivo punto 6., in merito al "giudizio esperto del valutatore" da esprimere dopo attenta ricognizione dei luoghi di lavoro.

SLC	Struttura principale (elementi verticali e orizzontali)	Tutti i lavoratori (ed eventualmente le persone mediamente presenti nell'ambito interessato)
-----	---	--

Sempre ritenute valide ed essenziali le seguenti considerazioni inerenti il rischio sismico:

1. per attività lavorative svolte all'interno di costruzioni che, sottoposti ad azione sismica, possono – direttamente o indirettamente – generare rischi nei confronti dell'ambiente esterno (si pensi, rispettivamente, ai danni provocabili da incendio o esplosione di sostanze chimiche piuttosto che all'inquinamento ambientale producibile di conseguenza), alla valutazione del rischio individuale occorrerà accompagnare anche quella del rischio sociale, nelle forme meglio descritte nel successivo paragrafo;
2. il superamento degli stati limite ultimi (SLC, SLV) implica la perdita stabilità del fabbricato (o di porzioni significative dello stesso) ed è più strettamente correlabile alla probabilità di perdita di vite umane. L'accuratezza dell'analisi condotta (per il metodo proposto, crescente dal "Livello 0" al "Livello 2") può essere implementata partendo da base statistica (per i dati disponibili in letteratura e rappresentativi del caso in esame) fino a giungere a risoluzione analitica basata su constatazione e/o sperimentazione diretta;
3. il superamento degli stati limite di esercizio (SLD, SLO) può implicare il danneggiamento più o meno invasivo di elementi strutturali principali o secondari e/o la perdita di stabilità di elementi non strutturali o beni contenuti di secondaria importanza ed è più strettamente correlabile alla probabilità di infortunio;
4. in relazione alla prevenzione degli infortuni¹³, non è definibile a priori che a stati limite di minor intensità di azione sismica corrispondano minori probabilità di infortunio e di intensità di danno;
5. non è dato a priori stabilire quanti e quali sistemi tecnologici siano da sottoporre ad ulteriori indagini e/o valutazioni specifiche, in quanto tale valutazione risulta strettamente correlata alla specifica casistica analizzata (sia in ordine alle caratteristiche del fabbricato, sia in ordine alle caratteristiche organizzative e gestionali dell'attività lavorativa ivi svolta);
6. risulta in ogni caso indispensabile e basilare per una responsabile redazione del documento di valutazione del rischio specifico caratterizzare l'analisi sulla specifica realtà indagata, in quanto – a maggior ragione in ottica di prevenzione dagli infortuni – ogni organismo complesso (la costruzione e la sua storia) e "vivo" (l'attività lavorativa ospitata) necessita tanto di sorveglianza¹⁴ che di tracciamento e monitoraggio dei "near miss".

Naturalmente il tabulato sopra riportato si presta anche a valutazioni di opportunità di tipo economico, sia in ordine al rischio di danneggiamento dei beni, sia in ordine agli ulteriori rischi indotti, come più ampiamente esposto a seguire.

Resta inteso che, sebbene i soggetti apicali di un'attività (tra i quali è generalmente compreso anche quello investito della funzione di Datore di Lavoro ai sensi del d.lgs.81/2008 e ss.mm.ii.) non possano fare a meno di tenere in considerazione il più ampio ventaglio degli aspetti connessi al buon andamento dell'azienda, l'esposizione dei lavoratori (e, più in generale, della salute delle persone esposte, anche esterne ai luoghi di lavoro) costituisce elemento critico di attenzione.

3.Scelta della metrica di sicurezza e definizione del rischio

Ogni valutazione di rischio necessita (utilizzando una terminologia più avvezza al mondo

¹³ In relazione alla gravità di infortunio, le soglie di accettabilità del rischio possono essere opportunamente differenziate, anche in relazione alle procedure indotte per le relative casistiche (tipicamente per prognosi inferiore ai 3 giorni, compresa tra i 3 ed i 40 giorni e superiore ai 40 giorni) dai disposti del d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.

¹⁴ Il termine "sorveglianza" vuole qui comprendere sia l'audit di "stato 0" che i successivi da svolgere in ottica di sistema di gestione del processo. Dovendo al pari considerare il monitoraggio dello stato di efficienza del fabbricato, l'*optimum* è rappresentato da un sistema integrato con quello di gestione manutentiva del bene.

finanziario ed ai sistemi informatici) della previa individuazione della metrica di sicurezza. Questo termine è comunemente usato per denotare una misura che quantifica alcuni aspetti della sicurezza di un sistema, in diretta applicazione del concetto che “non si può gestire ciò che non si può misurare”. Per metrica di sicurezza deve pertanto intendersi, anche per l’approccio in questione, una funzione che mappi la vulnerabilità del sistema (nel caso oggetto di studio, gli occupanti di un fabbricato adibito a luogo di lavoro e soggetto ad azione sismica) e produca degli indicatori – aventi requisiti di validità, accuratezza e precisione – che favoriscano il processo decisionale (nel definire fasce di superamento dei rischi accettabili).

Nella convinzione degli autori che risulti “premiante” promuovere approcci metodologici che conducano – quanto più possibile – ad una quantificazione probabilistica più che qualitativa¹⁵ del rischio, un’accezione positiva del termine (*upside risk*) può venir data, tra le tante, dalla definizione di **rischio** come “la distribuzione dei possibili scostamenti dai risultati attesi per effetto di eventi di incerta manifestazione, interni o esterni ad un sistema”.

Ciò implica tanto l’esistenza di un risultato atteso – per il caso in esame, sulla base della determinazione delle funzioni che definiscono i valori di pericolosità (indicato più avanti con **H**), di vulnerabilità (**V**) e di Esposizione (**E**) – quanto l’accettazione dell’idoneità dello scostamento: è il concetto di “*effetto di incertezza sugli obiettivi*” proprio della norma ISO 31000:2009 “Risk management”¹⁶.

In ambito aziendale, in particolar modo per realtà molto strutturate – ancor più se dotate di proprio patrimonio immobiliare¹⁷ – è evidente la coesistenza dei seguenti diversi ambiti (ciascuno con importanti ricadute sia in materia di diritto amministrativo che penale) che obbligano ad un’attenta e responsabile valutazione dei rischi:

- Economico (rischi di natura economica, finanziaria e patrimoniale)
- Giuslavoristica (rischi relativi alla salute ed alla sicurezza dei lavoratori sul luogo di lavoro, con i relativi risvolti rispetto alla contrattazione collettiva ed ai contratti d’appalto, d’opera e di somministrazione)
- Ambientale (rischi relativi alla gestione dei rifiuti ed alla tutela ambientale dall’inquinamento di aria, acque e suolo)

Pur volendo incentrare la presente trattazione sulla tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori, appare innegabile che – di fatto ed in particolare relativamente al rischio sismico – alcune fonti di pericolo incidono giocoforza su tutti gli ambiti sopra citati, ragion per cui le scelte dell’organo apicale aziendale non potranno che voler contemperare, con le dovute priorità, tale moltitudine di aspetti. Di qui la volontà di prevedere un approccio metodologico che si fondi su un’architettura quanto più possibile affidabile e flessibile.

Un buon piano d’azione aziendale per la gestione del rischio prevede in ogni caso la disponibilità di un budget per le azioni di monitoraggio, mitigazione e gestione del rischio nel corso dell’attività, oltre che di un budget a titolo di “riserva economica” residua del rischio, a gestione della pre-accettata probabilità di accadimento del rischio.

Tutte le considerazioni sopra riportate risultano propizie all’introduzione delle seguenti definizioni, particolarmente adatte ai rischi – quale il sismico – che ben relazionano ambiti di gestione territoriale e di protezione civile con quelli di più stretta pertinenza del Datore di lavoro dell’attività:

- **Rischio Locale (RL):** esprime il valore di frequenza (annua) con cui, in un certo punto di

¹⁵ Soprattutto in relazione ad incidenti che possono provocare infortuni gravi o perdita di vite umane, appare responsabilizzante e necessario che l’Azienda si organizzi pre-accettando una soglia di probabilità di accadimento dell’evento (numericamente determinata) piuttosto che una definizione qualitativa di rischio (dalla prassi corrente, a titolo di esempio, “trascurabile” – “moderato” – “elevato” – “molto elevato”).

¹⁶ Recepita in Italia dalla UNI ISO 31000/2010 “Gestione del rischio - Principi e linee guida”.

¹⁷ Si sottolinea, pur con rimando ad altre sedi per i dovuti approfondimenti sul tema, che il condurre un immobile in regime di locazione non esula il Datore di Lavoro dalla massima parte degli obblighi di valutazione dei rischi previsti dal d.lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.

un'area geografica, si può verificare il danno di riferimento (ad es. morte od infortunio di un individuo), riferito ad un ipotetico soggetto presente permanentemente nel punto considerato;

- Rischio Individuale (RI): esprime il valore di frequenza (annua) con cui, in un certo punto di un'area geografica, si può verificare il danno di riferimento (ad es. morte od infortunio di un individuo), riferito sia alla probabilità di presenza del soggetto nel punto considerato che alla sua capacità di calmierare gli effetti di danno (ad es. mediante fuga o azioni di protezione);
- Rischio Sociale (RS): non è riferito a singoli punti di un'area, ma all'area nel suo complesso. Le rappresentazioni più note dei valori del rischio sono le tabelle F-N (Frequenza annua cumulata con la quale, a seguito di tutti gli incidenti ipotizzabili, si ha nell'area considerata un danno di riferimento non inferiore a N) e I-N (ripartizione della popolazione dell'area in diverse classi di rischio individuale, con N persone appartenenti alla classe di rischio I), rispettivamente graficabili in curve ed istogrammi.

Il caso in esame concentra l'attenzione su quello che nella letteratura specialistica viene definito "rischio individuale" (RI nel seguito).

4. Approccio per la valutazione quantitativa del rischio

L'approccio proposto è di tipo multilivello e si fonda sui seguenti gradi di sviluppo metodologico, ciascuno dei quali restituisce un *output* oggetto di rivalutazione da parte del Datore di Lavoro, deputata all'eventuale innesco del grado successivo.

- **Livello 0:** ricognizione dell'ambiente di lavoro ed analisi della documentazione fornita; redazione di specifiche liste di controllo per le componenti strutturali (sia principali che secondarie) e non strutturali (sia edilizie che impiantistiche); definizione di un set di indicatori sintetici di rischio; restituzione di reportistica ad illustrazione delle risultanze della diagnosi generale eseguita e delle eventuali informazioni da acquisire per il prosieguo dell'analisi.
- **Livello 1:** acquisizione delle soglie di rischio accettabile (od eventuale supporto tecnico per la relativa definizione ed esplicitazione); approccio analitico speditivo dedicato alla componente strutturale, finalizzato alla restituzione di una stima dell'intervallo di rischio sismico in termini probabilistici; restituzione di relazione illustrativa a giustificazione della fascia di rischio determinata, con indicazione delle eventuali azioni utili alla ricalmierazione del rischio residuo.
- **Livello 2:** approccio analitico puntuale fondato su metodi di analisi strutturale, non solo per la componente strutturale, in grado di valutare compiutamente l'intervallo di rischio sismico in termini probabilistici; restituzione di relazione tecnica a giustificazione della fascia di rischio determinata, con indicazione delle eventuali azioni utili alla ricalmierazione del rischio residuo.

L'attuale prassi tecnica, generalmente adottata in ottemperanza dei disposti delle NTC (quale base imprescindibile anche per l'applicazione dei disposti del d.m. 58/2017 e s.m.i.), è quella di partire da un grado di analisi definibile "*Livello2-base*"¹⁸; l'effetto pratico derivante dall'applicazione – in prima istanza – del metodo analitico può rivelarsi anche improduttivo in termini di effettiva riduzione del rischio sismico, considerato l'effetto "deterrente" molto spesso rappresentato per i Committenti dalle risorse da investire per la caratterizzazione dei materiali e per la modellazione dell'edificio esistente, in assenza di preventive considerazioni di opportunità e/o di analisi costi/benefici.

¹⁸ L'analisi di calcolo e le verifiche "codificate" previste dalle NTC sono riferite agli elementi strutturali e non possono prescindere dall'assunzione dei fattori di confidenza assunti sulla base del livello di conoscenza raggiunto sulla scorta delle informazioni documentate relative ai materiali; esse tuttavia non forniscono informazioni in merito agli elementi non strutturali, il cui danneggiamento non può essere ritenuto a priori trascurabile in termini di valutazione del rischio individuale.

Di contro, un approccio multilivello quale quello proposto agevola – senza mancare in coerenza rispetto ai precetti normativi – una visione più pragmatica e flessibile, consentendo di approfondire il grado di conoscenza dell’ambiente (nel suo insieme o per le porzioni interessate) mediante un “processo controllato” di identificazione delle sorgenti di maggior rischio e di controllo dei relativi effetti prodotti.

Sia per il “Livello 0” che per il “Livello 1”, la procedura fa uso di un apparato abbastanza consolidato (con alcune semplificazioni di carattere operativo), che prevede la determinazione delle seguenti componenti:

- pericolosità sismica del sito (**H**),
- vulnerabilità della struttura in termini di modelli di danneggiamento (**V**),
- esposizione (**E**).

4.1 Definizione operativa della pericolosità sismica: la componente H

Il luogo dove l’edificio è collocato è caratterizzato da una pericolosità sismica di base, così come prevista dalle NTC2018, definita da una specifica curva.

Già a questo livello risulta operativamente conveniente (al fine di evitare all’utente le operazioni di interpolazione e di costruzione puntuale della curva) introdurre quale prima semplificazione – coerente peraltro con il criterio adottato al §2 dell’Allegato A del d.m. n.58/2017¹⁹ e s.m.i. – l’adozione della curva di pericolosità in forma standard, mediante i due parametri: $\{\eta, k\}$.

Per comodità e coerenza normativa, il parametro η può essere dedotto dal d.m. 58/2017 e s.m.i., secondo le relazioni di seguito riportate:

$$\eta = 2.041 = 1/0,490 \quad a_g \geq 0,25 \text{ g (Zona 1)}$$

$$\eta = 2.326 = 1/0,430 \quad 0,25\text{g} > a_g \geq 0,15 \text{ g (Zona 2)}$$

$$\eta = 2.809 = 1/0,356 \quad 0,15\text{g} > a_g \geq 0,05 \text{ g (Zona 3)}$$

$$\eta = 2.941 = 1/0,340 \quad 0,05 \text{ g} > a_g \text{ (Zona 4)}$$

Il parametro k invece si deduce con riferimento ai valori a_g che definiscono le accelerazioni allo SLV ed allo SLD, $\{a_{g,v}, a_{g,d}\}$: $k_\alpha = [a_{g,\alpha}] \eta / TR_\alpha$ ($\alpha = \text{SLV, SLD}$)

Valori dei parametri a_g , F_s , T_C^* per i periodi di ritorno T_R

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_s [-]	T_C^* [s]
SLD	30	0,067	2,303	0,274
SLD	50	0,090	2,265	0,289
SLV	475	0,270	2,414	0,362
SLC	975	0,363	2,466	0,389

Figura 1. Esempio dei parametri di pericolosità sismica NTC 2018 (INGV)

assumendo il massimo valore tra i due valori risultanti: $k = \max \{k_{\text{SLV}}, k_{\text{SLD}}\}$.

La curva di pericolosità (**H**) sismica del sito così caratterizzata (su suolo rigido e pianeggiante) a mezzo dei due dati base $\{\eta, k\}$ deve essere inoltre opportunamente corretta per tenere conto dell’amplificazione locale e di eventuali effetti di sito.

Un modo operativamente comodo per far ciò è utilizzare l’approccio semplificato previsto dalle NTC tramite il coefficiente $S = S_s * S_T$, come meglio specificato nel prosieguo.

¹⁹ Il d.m. 28 febbraio 2017, n.58, come modificato con d.m. 7 marzo 2017 n. 65, ha stabilito (art.1) le “Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni, nonché le modalità per l’attestazione, da parte di professionisti abilitati, dell’efficacia degli interventi effettuati” una volta ricevuto il parere favorevole espresso all’unanimità dall’Assemblea generale del Consiglio superiore dei lavori pubblici nell’adunanza del 20/02/2017.

4.2 Modelli di danneggiabilità degli edifici: la componente V

La **vulnerabilità sismica** è tipicamente definita come “*la propensione dell’opera a subire danneggiamenti in presenza dell’azione sismica*”.

Essa dipende quindi: dalla tipologia costruttiva, dalla conformità ad eventuali regole di progettazione sismica, dallo stato di manutenzione e dal livello di degrado ecc.

Ogni struttura ha una sua propensione al danneggiamento, che nell’analisi del rischio è proprio la componente **V**.

Per ogni classe di edificio è possibile identificare dei **modelli di danno dell’edificio** che individuano dei valori medi (annui) di danneggiabilità. I modelli possono avere base statistica (di origine empirica o analitica) ovvero possono essere costruiti specificamente, in modo più o meno articolato per il singolo edificio. È questa la differenza tra i tre livelli proposti: il “Livello 0” fa uso di modelli statistici; gli altri due livelli di modelli specifici, semplificati o completi.

Ogni modello sarà caratterizzato da due parametri $\{x_m, \beta\}$ dedotti come appena detto con riferimento a stati di danno dell’edificio avanzato che tendono verso il collasso strutturale, essendo questo lo scenario che maggiormente pregiudica la sicurezza degli occupanti.

Il parametro x_m , che rappresenta una opportuna variabile di misura dello scuotimento sismico, in questo studio è identificato con l’**accelerazione di picco al suolo** (PGA o a_g) in frazione di “g”; il parametro β , invece, rappresenta una misura delle incertezze statistiche, sia del modello di vulnerabilità sia del segnale sismico. Nel seguito si assumono entrambi noti, come risultato ottenuto dai uno dei livelli di indagine prima descritti.

4.3 Elementi e/o beni esposti: la componente E

Richiamata la definizione²⁰ di “Esposizione” al rischio sismico come “*ciò che può essere negativamente affetto da un evento sismico e sul quale viene svolta l’analisi di rischio sismico. È identificabile attraverso categorie omogenee e sistemi che possono subire perdite a seguito di evento sismico. Esempi di categorie e sistemi esposti sono: popolazione, attività economiche, servizi pubblici, beni culturali, ecc.*” e con rimando rispetto a quanto già accennato in *Introduzione*, giova considerare come l’approccio metodologico proposto risulti flessibile alle differenti declinazioni proprie dell’esposizione al rischio.

Per una corretta applicazione, occorre tuttavia sottolineare l’importanza della verifica – da condurre a cura del valutatore e controllare da parte del datore di Lavoro – di coerenza dei valori di esposizione determinati per i differenti fattori e scenari di rischio con lo stato limite considerato.

Ai fini della presente trattazione si considera il parametro di esposizione **E₀**, direttamente riferito al rischio corso dal singolo lavoratore all’interno del luogo di lavoro.

L’esposizione del singolo lavoratore (o, se ben tarati, dei singoli G.O.L. come definiti al precedente §2 e sulla base della definizione di RI di cui al §3) può essere valutata mediante:

- la determinazione di un fattore di “esposizione di base”, quantificata sulla scorta dei dati di presenza media – desunti dalla percentuale di stazionamento medio giornaliero alla postazione assegnata / in reparto produttivo / al piano (in funzione dello stato limite considerato) – all’interno dello stabilimento;
- la definizione di un fattore riduttivo, quantificato in funzione dell’efficacia del piano di emergenza ed evacuazione interno adottato, determinata in base ad un opportuno indicatore basato su evidenze documentali monitorate (quali verbalizzazione dei tempi di evacuazione, prove di funzionalità dei sistemi e dei presidi antincendio, presenza e ridondanza di addetti in possesso di regolare formazione di base e relativi aggiornamenti);
- la definizione di un fattore moltiplicativo, da definire in funzione dell’eventualità possano

²⁰ Presidenza del Consiglio dei Ministri, Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della Protezione civile, Gruppo di lavoro MS, “*Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*”, 2008 – Parte I, paragrafo 1.4-Definizioni.

essere prevedibili effetti cumulativi derivanti da differenti fonti di pericolo, in corrispondenza dello stato limite considerato.

4.4 Definizione quantitativa del rischio sismico R

Definiti i parametri della pericolosità $H := \{\eta, k\}$ e della vulnerabilità $V := \{x_m, \beta\}$, per il calcolo del rischio occorrerebbe effettuare un calcolo (integrale piuttosto complicato), tradotto nella consueta formula:

$$R = H * V * E \quad (1)$$

Ora, tramite alcune espressioni standard della letteratura, il calcolo porta ad una forma chiusa che consente di definire un parametro **L** definito come **livello di rischio**:

$$L = B + \frac{\ln(SE_0 k) - \eta \left(\ln(x_m) + \frac{1}{2} \beta^2 \eta \right)}{\ln(10)} \quad (2)$$

col quale potrà essere definita una **scala di rischio**, ad esempio la seguente:

$$L = \begin{cases} \text{Basso se } L < 2 \\ \text{Medio se } L \in [2; 4[\\ \text{Alto se } L \in [4; 5[\\ \text{Molto alto se } L \geq 5 \end{cases} \quad (3)$$

Essa potrà essere oggetto di successivi approfondimenti al fine di quantificare in modo più opportuno i valori risultati e i livelli di rischio.

Nella formula precedente si riconoscono:

- il modello di danno dell'edificio $\{x_m, \beta\}$,
- la sismicità complessiva del luogo $\{\eta, k\}$,
- l'amplificazione per effetti di sito $\{S\}$

e due ulteriori parametri:

- **B** che è un parametro di traslazione, fissato al valore **B = 8**
- **E₀** che è l'**esposizione** del singolo occupante al rischio.

Quest'ultimo (**E₀**), che presenta la maggiore incertezza, quantifica (per il caso di studio riportato nel successivo paragrafo) la probabilità di danni letali all'individuo quando questi si trovi in un edificio, ospitante l'attività lavorativa, soggetto allo scenario sismico che lo porta al collasso, in altri termini tale parametro è una misura dell'esposizione dell'individuo allo scenario sismico.

Il parametro **B** individua **una soglia minima di rischio**, al di sotto della quale l'evento può, realisticamente, ritenersi improbabile o eccezionale.

Il livello di rischio **L** è un dato significativo, in senso assoluto, della criticità della sola componente strutturale. Per cui esso è già una prima metrica, accurata, del rischio sismico, ed è esattamente il rischio individuale **RI** che si è assunto come metrica di base per questo studio.

Chiaramente potrà essere arricchito con scenari che contemperino più fonti di rischio, e ciò sarà oggetto di successivi approfondimenti.

5. Un esempio pratico

Il caso pratico in esame rappresenta una attività lavorativa (uffici), dislocata in fabbricato in c.a. a struttura prefabbricata, realizzato in area precedentemente non classificata sismica; si assume che il tamponamento sia di tipo orizzontale. Per lo studio in esame si ipotizza di collocarla in vari scenari di pericolosità sismica.

Per essa è plausibile il seguente modello di danno molto avanzato: $\{x_m; \beta\} = \{0.44; 0.45\}$.

Si ipotizzano ancora:

- classe di suolo tale che sia $S = 1.5$
- esposizione del singolo individuo $E_0 = 20-50\%$ (collasso non catastrofico e catastrofico)

Si riporta alla successiva tabella la sequenza dei calcoli del livello di rischio **L**, ipotizzando che l'edificio si trovi in diverse zone a pericolosità decrescente, in termini di PGA:

Località	RC	AQ	CN	RM	GE
ZS	1	1	3	2	3
$\eta =$	2.041	2.041	2.326	2.326	2.809
$a_{g,SLV} =$	0.27	0.261	0.127	0.11	0.068
$a_{g,SLD} =$	0.09	0.104	0.049	0.052	0.03
$K_{SLV} =$	1.45E-04	1.36E-04	1.73E-05	1.24E-05	1.11E-06
$K_{SLD} =$	1.47E-04	1.97E-04	1.80E-05	2.06E-05	1.06E-06
$K =$	1.47E-04	1.97E-04	1.80E-05	2.06E-05	1.11E-06
L =	4.2	4.3	3.3	3.4	2.2
	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO

Figura 2. Rischio di letalità per edificio per uffici pluripiano in c.a. (collasso non catastrofico)

Si nota la differente soglia di rischio di letalità a seconda della diversa collocazione in termini di pericolosità sismica, nell'ipotesi di collasso non catastrofico dell'edificio.

Se invece si assume un collasso catastrofico, la probabilità di letalità aumenta e conseguentemente si ha il seguente scenario di rischio:

Località	RC	AQ	CN	RM	GE
ZS	1	1	3	2	3
$\eta =$	2.041	2.041	2.326	2.326	2.809
$a_{g,SLV} =$	0.27	0.261	0.127	0.11	0.068
$a_{g,SLD} =$	0.09	0.104	0.049	0.052	0.03
$K_{SLV} =$	1.45E-04	1.36E-04	1.73E-05	1.24E-05	1.11E-06
$K_{SLD} =$	1.47E-04	1.97E-04	1.80E-05	2.06E-05	1.06E-06
$K =$	1.47E-04	1.97E-04	1.80E-05	2.06E-05	1.11E-06
L =	4.7	4.8	3.8	3.9	2.7
	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO

Figura 3. Rischio di letalità per edificio per uffici pluripiano in c.a. (collasso catastrofico)

Si nota come il livello di rischio aumenti sensibilmente e per i vari scenari tenda a passare alla classe successiva di rischio nella scala di cui alla (3) (cfr. RC/AQ che passano da 4.2 a 4.8). Il grafico seguente diagramma l'evoluzione del livello di rischio nelle due ipotesi:

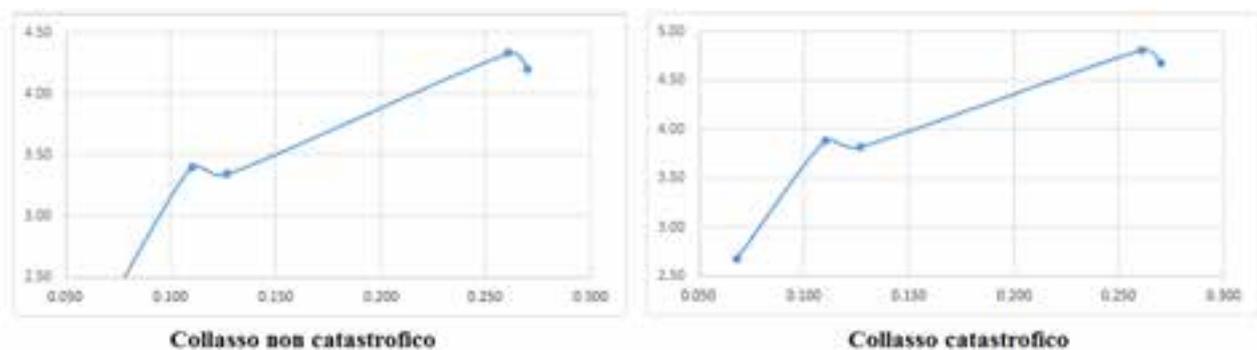


Figura 4. Variazione del livello di rischio **L** nelle diverse ipotesi di modello di collasso

Alle successive figure, si evidenziano le variazioni del livello di rischio di letalità **L** in funzione della capacità x_m dell'edificio per le diverse località indicate in funzione di $a_{g,v}$ (PGA per SLV codificata dalle NTC), ossia le curve **L**- x_m e le curve **L**- $a_{g,v}$ a parametro x_m :

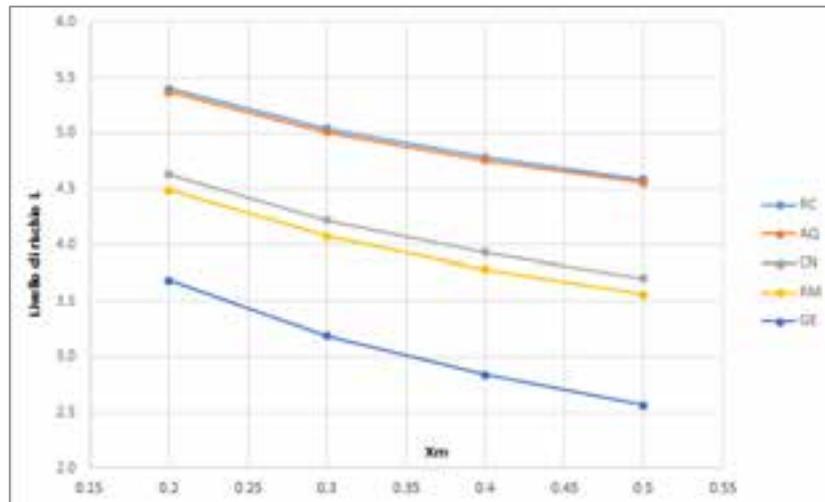


Figura 5. Variazione del rischio di letalità L in varie località in relazione al modello di danno ($\beta = 0.4$)

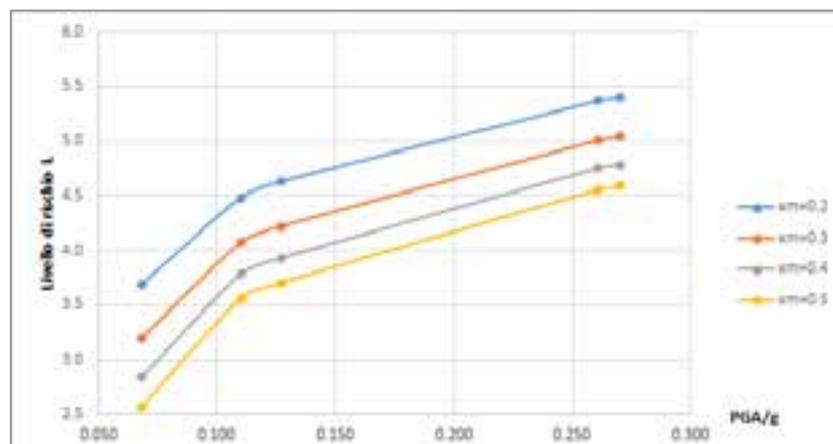


Figura 6. Variazione del rischio di letalità L con PGA-SLV per diversi modelli di danno ($\beta = 0.4$)

6. Analogie e considerazioni finali

Le considerazioni conclusive derivano da uno sguardo un po' più ampio circa gli approcci di valutazione del rischio già consolidati (sia dalla normativa che, in taluni casi, dalla legislazione nazionale) in altre discipline specifiche, oltre quelle già tratteggiate, anche non direttamente connesse alla sicurezza e salute dei lavoratori. Alcuni esempi, meritevoli di mirati approfondimenti, possono esser tratti dallo studio dei seguenti ambiti e riferimenti normativi:

Sicurezza di "Macchine e Impianti"

- UNI EN ISO 12100:2010 *"Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio"*: è la norma di riferimento per la messa in sicurezza di macchine e impianti e per la realizzazione del Fascicolo Tecnico richiesto dalla Direttiva Macchine. Interessanti rappresentazioni e metodi di stima del Rischio sono inoltre offerti dai Grafici di Rischio EN 14121-2 e dall'applicazione del Metodo RASE.
- UNI EN ISO 13849-1:2016 *"Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 1: Principi generali per la progettazione"*: è la Norma utilizzata per stimare l'affidabilità di un sistema di sicurezza. Vengono definiti Categoria e Performance Level in ordine alla sicurezza funzionale dei processi.
- EN CEI 61508/61511 per la sicurezza nell'industria di processo: basate sul "ciclo di vita" della sicurezza, individuano in modo preciso i criteri e i metodi per assegnare e verificare il livello di affidabilità (SIL) che i sistemi strumentali di sicurezza (SIS) devono assicurare per ridurre a livelli accettabili il rischio industriale in termini di salute, ambiente e proprietà. La EN CEI 61511:2016 *"Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector"* consiglia diverse metodologie per provvedere a ridurre il rischio, una volta stabilito il livello di

rischio che un certo evento pericoloso può determinare. Probabilmente la più utilizzata è la metodologia dei livelli indipendenti (LOPA). Affinché un livello di sicurezza possa entrare a far parte della metodologia LOPA deve essere Indipendente da tutti gli altri, ovvero essere dotato di sensori, logiche e attuatori non condivisi con gli altri sistemi.

Sicurezza “Sistemi IT”

- UNI CEI EN ISO/IEC 27001:2017 *“Tecnologie Informatiche - Tecniche di sicurezza - Sistemi di gestione della sicurezza dell'informazione - Requisiti”*: di particolare interesse la definizione degli indicatori chiave di rischio (KRI) ed indicatori chiave di performance (KPI) o “risultati di business”.

Sicurezza “Infrastrutture e trasporti”

- d.m. 28 ottobre 2005 *“Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”*: vengono stabiliti i livelli di accettabilità del rischio individuale (con distinguo della soglia di accettabilità tra i rischi liberamente assunti ed i rischi involontari) e del rischio cumulato (sociale), mediante costruzione della curva F-N.

- Ministero infrastrutture e Trasporti – Comitato Tecnico Permanente per la sicurezza dei sistemi di trasporto ad impianti fissi, *“Proposta di approccio metodologico per la valutazione e accettazione del rischio nelle metropolitane”*: vengono proposti alcuni criteri di accettabilità sia per il rischio individuale che per il rischio sociale.

Sicurezza “Eventi fieristici”

- Circolare Ministero dell'Interno del 28/07/2017 (in riferimento alle *“Linee di indirizzo sull'organizzazione dei soccorsi sanitari negli eventi e nelle manifestazioni programmate”*, approvate dalla Conferenza Stato-Regioni il 5 Agosto 2014).

- Circolare Ministero dell'Interno del 18/07/2018, recante *“Modelli organizzativi e procedurali per garantire alti livelli di sicurezza in occasione di manifestazioni pubbliche – Direttiva”* (con allegata *“Linea guida per l'individuazione delle misure di contenimento del rischio in manifestazioni pubbliche con peculiari condizioni di criticità”*).

Se ne ricava che, pur con gli opportuni e doverosi “distinguo”, i diversi ambiti di sviluppo tecnico paiono indicare un percorso comune (sia quanto al metodo, sia quanto alla ricerca di affidabilità ed alla sicurezza di sistema), ove la valutazione dei rischi “integrata” si avvia a diventare una base concreta anche finalizzata a direzionare investimenti aziendali di medio-lungo termine. Quanto alla gestione del patrimonio immobiliare (ove in esso vengano riconosciute - in uno - sia la funzione di primaria protezione dai rischi esterni che quella di potenziale sviluppo dell'attività), sia in ambito pubblico che privato vanno affiorando interessanti possibilità di gestione di banche dati utili ad ottimizzarne vita utile e costi di gestione.

Sempre più spesso, tuttavia, per differenti ragioni non sempre giudicabili, l'esperienza sul campo lascia registrare (soprattutto nel settore delle PMI) la “tentazione” della filosofia del “non fare per non sbagliare”. Sebbene per un datore di lavoro non risulti sempre agile coordinare “senza cortocircuiti” ambiti e discipline complessi e di differente natura, è sempre bene che l'organo apicale aziendale abbia presente, soprattutto in relazione agli effetti connessi all'applicazione del d.lgs. 231/2001 e ss.mm.ii., che - per quanto non comporti alcuna azione - la scelta di non agire rimane comunque un'attività scelta. Con la sua inevitabile influenza sul risultato.

7. Bibliografia

[1] Mordà N, De Simone C. “Progettazione sismica delle componenti industriali con approccio Risk-Based”. In Atti SAFAP 2016 *Sicurezza ed Affidabilità delle Attrezzature a Pressione. La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio. Milano, 15-16/11/2016*

[2] Daniele F, Bignami. *“Protezione civile e riduzione del rischio disastri. Metodi e strumenti di governo della sicurezza territoriale e ambientale”*, Maggioli Ed. Milano, Maggio 2010, pp. 30-32

[3] Mordà N, Ciani E. “La valutazione del rischio sismico nei DVR: applicazione ai complessi edilizi”. *Progetto Sicurezza n. 6 anno 2015, pag. 24-37*

Analisi sperimentale sulla caratterizzazione dei materiali dei serbatoi criogenici ai fini della valutazione antisismica

D. Barbagallo, L. Bonetti

Assogastecnici/Federchimica

Sommario

Nell'ambito delle attività di Assogastecnici, Associazione Nazionale Imprese Gas Tecnici, Speciali e Medicinali, facente parte di Federchimica, Federazione Nazionale delle Imprese Chimiche, un Gruppo di Lavoro composto da tecnici esperti si è posto l'obiettivo di verificare il quadro normativo antisismico e di identificare la metodologia di applicazione dello stesso al mondo dei serbatoi criogenici la cui peculiarità è legata ad un'elevata mobilità sul territorio.

Il presente Articolo intende dare seguito a quanto già esposto al SAFAP 2016, presentando il prosieguo del lavoro del gruppo in cui si sono affrontate le problematiche tecniche e metodologiche relative alla valutazione di analisi sismica dei serbatoi.

In altre parole, completata l'analisi della normativa, si è proceduto ad una serie di sperimentazioni e studi sul campo realizzati su due fronti: il primo, incentrato sulla caratterizzazione del materiale costituente il cilindro esterno, quello interno e le gambe di sostegno di serbatoi criogenici vetusti sui quali sono stati eseguiti esami metallografici per una valutazione microstrutturale, esami di analisi chimica e prove di trazione.

Un ulteriore campo di ricerca ha interessato il comportamento della perlite, materiale di isolamento utilizzato nell'intercapedine tra serbatoio esterno ed interno. Dopo i risultati già presentati in campo statico, si è proceduto a prove di vibrazione su tavola vibrante per valutarne le caratteristiche dissipative.

In ultimo, ad approfondimento degli studi di sicurezza eseguiti, viene esposta una casistica di scenari incidentali che possono coinvolgere i serbatoi criogenici verticali soggetti ad azione sismica.

1. Caratterizzazione del materiale dei serbatoi

1.1. Scopo dell'analisi

Scopo dell'analisi condotta è stato quello di determinare le caratteristiche meccaniche del materiale costituente il cilindro esterno ed interno di serbatoi criogenici e le gambe di sostegno dei medesimi. In particolare, è stata analizzata e determinata la composizione chimica e le caratteristiche meccaniche del materiale, oltre ad una valutazione della condizione microstrutturale.

Al fine di ottenere elementi di valutazione si è impostato il seguente programma d'analisi:

- analisi in microscopia ottica su opportune sezioni per valutare condizione microstrutturale del materiale;
- analisi chimica quantometrica per definire la qualità dell'acciaio utilizzato;
- prova di trazione a temperatura ambiente.

1.2. Il laboratorio accreditato

Le analisi e le prove sui materiali sono state effettuate da RTM Breda, centro fondato nel 1917 a Milano e specializzato in prove, analisi e valutazioni su materiali e componenti strutturali, realizzate ai massimi livelli di conoscenza tecnica e servizio.

1.3. Campioni

Per l'esecuzione delle analisi di laboratorio sono stati selezionati 7 serbatoi ante-PED di costruttori diversi e fabbricati più di trent'anni fa.

	Costruttore	Numero di fabbrica	Anno di fabbricazione
1	VRV	5840	1983
2	SIO	42424/779	1981
3	VRV	3919	1979
4	SIO	42230/543	1976
5	Mandressi	1648	1974
6	Bergum	1648	1972
7	SIO	42053/314	1971

Figura 1. Serbatoi analizzati

Per ognuno sono stati analizzati un campione della virola esterna, uno della virola interna e uno delle gambe.



Figura 2. Campioni dei serbatoi n. 1 e n. 6

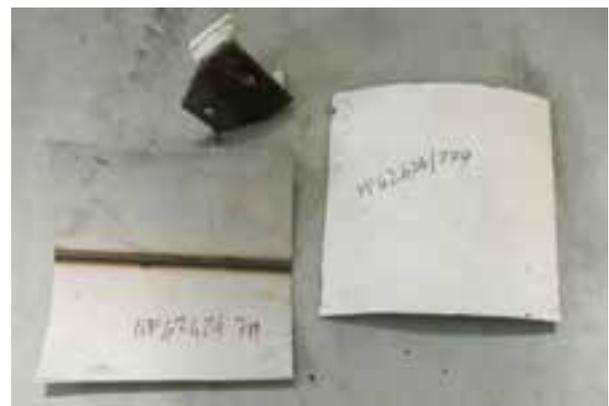


Figura 3. Campioni del serbatoio n. 2



Figura 4. Campioni dei serbatoi n. 3 e n. 5



Figura 5. Campioni del serbatoio n. 4



Figura 6. Campioni del serbatoio n. 7

1.4. Risultati delle analisi e prove

Analisi chimica

L'analisi chimica è stata eseguita su una sezione per ciascun campione mediante metodo di spettrometria ad emissione ottica in scintilla.

CAMPIONE	SERBATOIO	Elemento [%]													
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Al	Cu	V	N	Ti
VIROLA ESTERNA	1	0,17	0,077	0,6	0,01	0,023	<0,025	<0,0035	<0,025	-	<0,0025	0,043	-	0,0055	-
	2	0,067	0,34	0,47	0,026	0,035	0,28	0,032	0,13	-	0,0053	0,31	-	0,0085	-
	3	0,1	0,014	0,47	0,01	0,018	<0,025	<0,0035	<0,020	-	<0,015	<0,015	-	-	-
	4	0,16	0,021	0,75	0,015	0,011	<0,025	0,004	<0,020	-	<0,0025	<0,015	-	<0,0035	-
	5	0,059	<0,010	0,35	0,009	0,0096	<0,025	<0,0035	0,029	-	<0,015	0,071	-	-	-
	6	0,077	0,16	0,41	0,016	0,019	<0,025	0,0067	<0,025	-	0,057	<0,015	<0,010	-	-
	7	0,15	0,21	0,74	0,0093	0,012	<0,025	<0,0035	<0,020	-	0,058	<0,015	-	0,0053	-
UNI EN 10025-2 S235JR		<0,19	-	<1,50	<0,045	<0,045	-	-	-	-	0,6	-	-	-	-
VIROLA INTERNA	1	0,04	0,48	1,53	0,029	<0,010	18,2	0,63	8,9	0,23	-	0,14	-	0,095	-
	2	0,041	0,53	1,37	0,027	0,01	18,3	0,28	8,5	0,17	-	0,28	-	0,13	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	0,046	0,63	1,68	0,029	0,01	18,4	0,36	9,4	0,21	-	0,28	-	0,11	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	0,046	0,47	1,32	0,023	<0,010	18,5	0,32	9	0,17	-	0,23	-	0,1	-
	7	0,063	0,72	1,45	0,027	0,01	17,8	0,25	10,1	0,095	-	0,23	-	0,01	0,44
UNI EN 10088-2 X5CrNi18-10		<0,07	<1,00	<2,00	<0,045	<0,015	17,5 - 19,5	-	8,0 - 10,5	-	-	-	<0,10	-	-
GAMBE	1	0,053	0,042	0,22	0,0083	0,014	<0,025	0,0039	<0,025	-	0,039	<0,015	-	-	-
	2	0,048	<0,015	0,29	0,0059	0,015	<0,025	<0,0035	<0,020	-	0,004	<0,015	-	<0,0035	-
	3	0,096	0,22	1,19	0,021	0,0077	0,11	0,023	0,066	-	0,041	0,1	-	-	-
	4	0,089	0,27	0,95	0,014	0,014	<0,025	<0,0035	0,023	-	0,065	0,025	-	0,0074	-
	5	0,14	0,16	0,75	0,012	0,025	<0,025	0,0045	<0,020	-	0,041	<0,015	-	-	-
	6	0,12	0,063	0,65	0,00094	0,011	<0,025	<0,0035	<0,025	-	0,0058	0,016	-	0,0044	-
	7	0,067	<0,015	0,42	0,003	0,007	<0,025	0,0054	<0,020	-	<0,0025	0,023	-	<0,0035	-
UNI EN 10025-2 S235JR		<0,19	-	<1,50	<0,045	<0,045	-	-	-	-	0,6	-	-	-	-

Figura 7. Risultati analisi chimica sui serbatoi

Analisi microscopica

Le seguenti immagini illustrano un esempio dei dettagli al microscopio dei campioni metallici analizzati.



Figura 8. Dettagli microstruttura (x100)

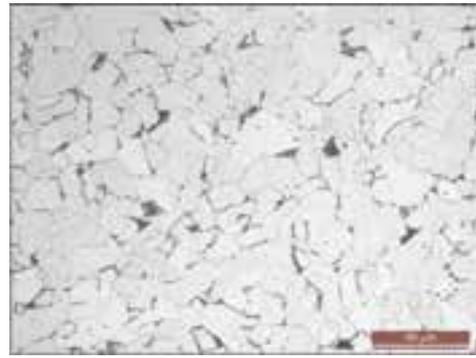


Figura 9. Dettagli micrografia della figura precedente (x500)

Prove di trazione

La prova di trazione è stata eseguita a temperatura ambiente su n°1 provetta piatta ricavata da ciascun campione.

CAMPIONE	SERBATOIO	a0	b0	ReH	Rm	A
		[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
VIROLA ESTERNA	1	5,52	10,05	290	399	32,0
	2	7,46	15,02	335	431	33,3
	3	6,13	9,96	268	374	40,0
	4	7,24	15,01	259	384	30,8
	5	4,93	9,97	250	361	45,2
	6	4,91	10,06	262	375	37,5
	7	6,30	15,06	305	429	34,5
UNI EN 10025-2 S235JR				> 235	360 ÷ 510	> 26
VIROLA INTERNA	1	7,24	9,99	307	619	64,5
	2	4,30	14,96	328	635	52,0
	3	-	-	-	-	-
	4	5,49	15,06	293	600	55,7
	5	-	-	-	-	-
	6	5,60	10,06	364	647	52,5
	7	5,44	15,03	355	621	46,9
UNI EN 10088-2 X5CrNi18-10				> 230	540 - 750	> 45
GAMBE	1	5,95	10,04	252	316	42,5
	2	5,24	14,94	231	309	41,3
	3	8,08	9,94	363	474	35,3
	4	5,71	14,92	286	390	34,1
	5	6,12	9,96	307	433	37,7
	6	7,05	10,04	257	374	61,0
	7	5,37	15,00	229	317	40,0
UNI EN 10025-2 S235JR				> 235	360 ÷ 510	> 26

Figura 10. Risultati prove di trazione sui serbatoi

1.5. Conclusioni

Il materiale costituente la lamiera della viola esterna e della gamba dei serbatoi criogenici esaminati è classificabile come acciaio al carbonio non legato per impieghi strutturali, corrispondenti al grado S235JR secondo la normativa UNI EN 10025-2.

Il materiale costituente la lamiera della viola interna dei serbatoi è classificabile come acciaio inossidabile X5CrNi18-10 secondo UNI EN 10088-2 2014.

Tali corrispondenze sono da considerarsi conservative in quanto le prove di trazione hanno fornito valori compatibili con materiali aventi proprietà meccaniche anche superiori.

Le verifiche microscopiche hanno dimostrato che il passare degli anni non ha alterato la struttura chimico-fisica del materiale.

2. Caratterizzazione della perlite

Già nel contributo Assogastecnici al Safap 2016 si era citato come il materiale d'isolamento fosse un fattore decisamente rilevante ai fini della stabilità strutturale. Tale materiale è la perlite utilizzata come isolante termico nell'intercapedine dei serbatoi criogenici al fine di ridurre il NER (Net Evaporative Ratio). Il suo contributo nel trasferire le azioni sismiche dal serbatoio interno a quello esterno era stato identificato come il fattore che giustificasse la differenza tra i risultati numerici e l'esperienza sul campo.

Un'analisi particolarmente approfondita sulla caratterizzazione della perlite e l'interazione tra la perlite e la struttura dei serbatoi è stata effettuata dalla Merli Engineering, studio di ingegneria che si è avvalso della collaborazione con Eucentre, European Centre for Earthquake Engineering nella definizione dei carichi sismici sui serbatoi e con il Politecnico di Milano, Dipartimento Ingegneria Geotecnica, nella modellazione della perlite e del serbatoio.

2.1. Prove di vibrazione su tavola vibrante

Al fine di una valutazione degli effetti di smorzamento, causato dalla presenza di perlite espansa all'interno dell'intercapedine dei serbatoi criogenici, delle vibrazioni del serbatoio interno rispetto all'involucro esterno, è stata implementata una prova sperimentale.

Tale prova, in fase di ultimazione, prevede alcuni test di vibrazione di un simulacro di serbatoio criogenico su tavola vibrante monoassiale in dotazione presso il Centro Collaudi di Piacenza. Per la prova si utilizza un serbatoio prototipo 3000 L di manifattura VRV opportunamente costruito, in modo da poter essere vincolato alla tavola vibrante mediante apposite selle.

Il serbatoio è stato strumentato come specificato nel seguente paragrafo.



Figura 11. Serbatoio prototipo 3000 l

Attrezzatura di prova

Il serbatoio oggetto della prova è caratterizzato da un involucro esterno, disposto orizzontalmente e sostenuto da due selle, e da un serbatoio interno, opportunamente rinforzato e tale da non presentare deformazioni significative nella condizione di sollecitazione dinamica imposta dalla prova. Le dimensioni del serbatoio interno sono state definite in modo da poter rispettare il limite di portata della tavola vibrante, una volta riempito il serbatoio interno con acqua; tali dimensioni permettono inoltre di ottenere valori di compressione della perlite similari alle sollecitazioni in gioco durante un evento sismico nei serbatoi comunemente installati. Per la presente prova si utilizza una tavola vibrante monoassiale (nella direzione verticale) con portata utile 6 ton ed eccitazione di tipo sinusoidale. La frequenza di vibrazione della tavola è variabile tra 0,5 Hz e 3 Hz.

Modalità di prova

Sono state individuate due modalità di prova, per un duplice obiettivo:

- 1) valutazione delle caratteristiche dissipative della sola perlite
- 2) valutazione delle caratteristiche dissipative della struttura in esame

Prova 1

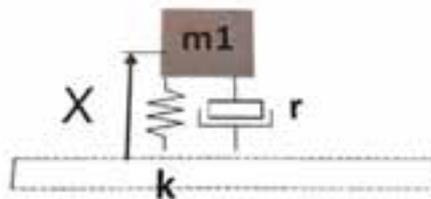


Figura 12. Schema della prova 1

Al fine della valutazione delle caratteristiche smorzanti della perlite, indipendentemente dalla struttura metallica in oggetto, si riporta il sistema serbatoio ad un sistema vibrante ad 1 gdl, vincolando rigidamente l'involucro esterno alla tavola vibrante mediante le apposite selle e collegando il serbatoio interno a quello esterno mediante un vincolo elastico con caratteristica nota. La struttura di interfaccia tra serbatoio interno ed esterno prevede l'utilizzo di molle in parallelo con rigidezza equivalente k , determinata in modo da avvicinare la frequenza propria del sistema al range di frequenza propria di serbatoi criogenici fissi standard (in assenza di perlite).

Nella configurazione di prova di cui sopra si effettuano le seguenti prove:

- *Serbatoio senza perlite, per cui*
 $m1$ = massa serbatoio interno (con relativo contenuto)
 $k = k1$ = rigidezza sistema elastico equivalente (noto)
 r = smorzamento struttura metallica (trascurabile in assenza di perlite)
- *Serbatoio con perlite, per cui*
 $m1$ = serbatoio interno (con relativo contenuto)
 $k = k_p + k1$ = rigidezza perlite (nota) + rigidezza sistema elastico (noto) interposto tra involucro interno e serbatoio esterno
 r = smorzamento perlite (incognita)

La rigidezza della perlite è stata valutato mediante test di laboratorio precedenti (prove triassiali ed edometriche); la densità della perlite, derivante dal processo di perlitaggio tipico per serbatoi criogenici fissi, è considerata pari a 120 Kg/m³

Tutte le prove sono effettuate in assenza di vuoto nell'intercapedine.

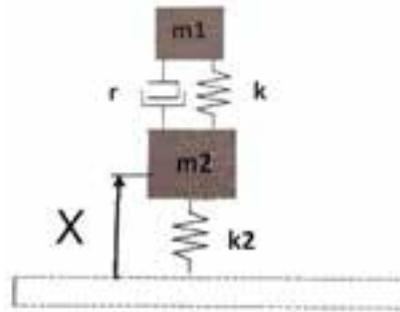
Prova 2

Figura 13. Schema della prova 2

Per la valutazione delle caratteristiche dissipative dell'intera struttura in esame, al fine di un paragone qualitativo diretto con l'effettiva sollecitazione imposta dall'evento sismico ai serbatoi criogenici, si prevede la possibilità di ricondurre il simulacro di serbatoio in oggetto ad un sistema vibrante a 2 gdl, vincolando elasticamente (mediante collegamento elastico con caratteristica nota) le selle di supporto dell'involucro esterno alla tavola vibrante e collegando il serbatoio interno a quello esterno mediante un secondo vincolo elastico anch'esso di caratteristica nota. Opportuni sistemi meccanici antirotazionali e traslazionali garantiscono il mantenimento di un singolo gdl sia per il serbatoio interno, sia per l'involucro esterno.

Nella condizione di prova di cui sopra si prevede di effettuare due differenti test:

- *Serbatoio senza perlite, per cui*
 $m1$ = serbatoio interno (con relativo contenuto)
 $m2$ = serbatoio esterno
 $k = k1$ = rigidezza sistema smorzante tra serbatoio interno e serbatoio esterno (noto)
 $k2$ = rigidezza sistema smorzante tra serbatoio esterno e tavola vibrante
 r = smorzamento struttura (trascurabile in assenza di perlite)
- *Serbatoio con perlite, per cui*
 $m1$ = serbatoio interno (con relativo contenuto)
 $m2$ = serbatoio esterno
 $k = k_p + k1$ = rigidezza perlite (nota) + rigidezza sistema elastico (noto) interposto tra involucro interno e serbatoio esterno
 $k2$ = rigidezza sistema smorzante tra serbatoio esterno e tavola vibrante
 r = smorzamento perlite (incognito)

Tutte le prove saranno effettuate in assenza di vuoto nell'intercapedine.

Strumentazione utilizzata

La tavola vibrante, il serbatoio esterno ed il serbatoio interno sono strumentati con accelerometri e sensori di spostamento per l'analisi delle accelerazioni e degli spostamenti nella direzione della forzante (verticale).

Si monitora inoltre la frequenza e la caratteristica dell'oscillazione (di tipo sinusoidale) imposta dalla tavola vibrante.

Conclusioni

L'analisi dei valori accelerometrici in fase di acquisizione permetterà di valutare l'effetto smorzante della perlite (smorzamento dell'oscillazione libera del serbatoio interno e diminuzione del picco massimo) e di stimare la migrazione della frequenza propria del sistema causato dalla presenza della perlite.

3. Scenari incidentali

La valutazione degli scenari incidentali che possono derivare dall'esposizione dei serbatoi criogenici all'evento sismico è necessaria per il completamento della valutazione dell'effettivo livello di rischio associato al pericolo sismico di tali installazioni.

A seguito dell'evento sismico il serbatoio potrà trovarsi nelle seguenti situazioni:

- Cedimento dei piedi/ribaltamento
- Cedimento del mantello esterno e conseguente perdita del vuoto
- Danneggiamento delle tubazioni interne per movimento differenziale degli involucri
- Rottura del fasciame interno con ingente perdita in intercapedine
- Nessun danno

Il ribaltamento è l'evento maggiormente temuto che ha come conseguenza la dispersione in ambiente del contenuto del serbatoio stesso, con scenari di sotto o sovra ossigenazione. Lo svuotamento è dovuto a rottura delle tubazioni di collegamento più che a danni all'involucro del serbatoio stesso.

Il cedimento del mantello esterno e la perdita del vuoto può essere dovuta ad un'azione di punzonatura dei supporti interni sull'involucro esterno.

Lo scenario conseguente è un lento innalzamento della pressione gestita comunque dalle valvole di sicurezza a protezione di tale evento.

Il cedimento di tubazioni interne, inteso con questo una perdita minore dalle tubazioni, è uno scenario protetto dal disco di rottura dell'involucro esterno (perdita vuoto) e conseguente ricaduta nello scenario precedente.

La rottura del fasciame interno, così come la rottura completa di tubazioni con perdite ingenti di prodotto nell'intercapedine è un evento considerato remoto in funzione della tipologia dei materiali e costruttiva prevedendo una verifica delle saldature al 100%.

Tenuto conto delle modalità di evoluzione di un evento sismico che permette l'evacuazione del personale dalle zone produttive ove sono di regola installati i serbatoi, gli scenari sopra descritti di norma non aggravano la situazione post terremoto.

4. Conclusioni

Assogastecnici è da tempo impegnata nell'analisi tecnico-scientifica delle caratteristiche strutturali dei serbatoi criogenici, soprattutto ai fini della capacità di resistenza alle sollecitazioni sismiche. Con questo contributo, si è voluto proseguire nella definizione dei parametri utili ai progettisti per procedere ad una verifica sismica dei serbatoi.

Impatto del rischio NaTech sugli scenari incidentali previsti nel rapporto di sicurezza: analisi di un deposito di prodotti petroliferi

A. Lambertini¹, C. Di Girolamo²

¹ Arpae - Emilia Romagna CTR-RIR

² Inail - Uot di Piacenza

Sommario

Molti studi a livello internazionale confermano che, anche in considerazione dei cambiamenti climatici globali, è in costante aumento negli ultimi anni il numero e l'intensità degli eventi NaTech, incidenti tecnologici innescati da disastri naturali.

Per la valutazione del rischio NaTech, così come accade nell'analisi di rischio di processo per gli incidenti industriali innescati da cause interne agli stabilimenti, non è sufficiente basarsi solo sull'analisi storica degli incidenti accaduti: la cronologia delle diverse tipologie di eventi naturali e la loro mappatura è solo il punto di partenza per successive valutazioni. La natura e l'impatto delle conseguenze, inoltre, non dipendono esclusivamente dalle caratteristiche dell'evento, ma anche da altri fattori, quali l'attuazione di misure di prevenzione e la pianificazione di emergenza.

Scopo del presente lavoro è l'applicazione ad un caso studio reale della valutazione dei rischi NaTech articolata nei seguenti passaggi:

- raccolta dati sito specifici sulla frequenza di eventi naturali e sulle loro conseguenze;
- individuazione delle strutture potenzialmente esposte agli effetti naturali;
- verifica dei criteri di progettazione e di protezione, in base alle norme disponibili e applicabili;
- valutazione delle probabilità che gli eventi naturali possano generare effetti sulle strutture critiche, tali da provocare incidenti rilevanti con stima delle eventuali conseguenze;
- individuazione di misure per la mitigazione degli impatti di eventuali incidenti NaTech.

In particolare, si analizzerà l'impatto del rischio sismico e idrogeologico sugli scenari incidentali previsti nel rapporto di sicurezza di un deposito di prodotti petroliferi di soglia superiore ai sensi del d.lgs. 105/2015.

1. Introduzione

Nella letteratura internazionale vengono definiti rischi NaTech (*NATural hazards triggering TECHnological disasters*) quegli incidenti tecnologici innescati da disastri naturali; si tratta incidenti che si verificano a seguito di terremoti, alluvioni, tsunami o altri eventi naturali, negli impianti, nella rete di distribuzione o durante il trasporto di sostanze pericolose [1].

Dall'analisi di varie banche dati incidenti internazionali (MARS, MHIDAS, EPA) emerge che l'incidenza del rischio naturale non è trascurabile in termini di frequenza e soprattutto di gravità delle conseguenze. Inoltre, i ricercatori hanno osservato che gli eventi NaTech si presentano con sempre maggiore frequenza ed intensità anche a causa dei cambiamenti climatici globali. Nel grafico successivo è riportato il numero di incidenti, dovuti a cause naturali, accaduti in Europa nel periodo 1980-2016, tratto dai dati forniti dal database europeo NatCatSERVICE [2].

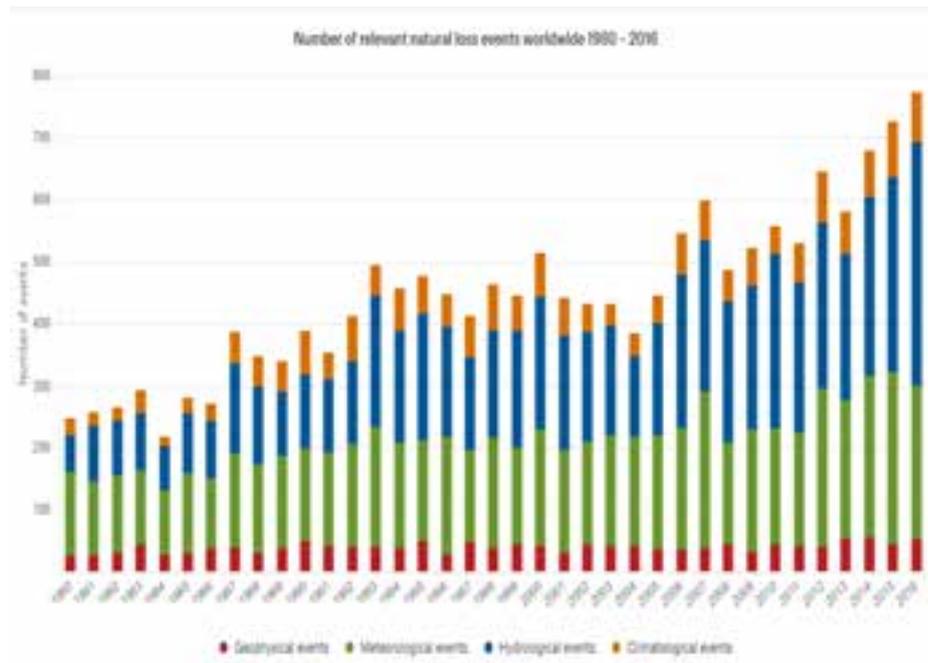


Figura 1. Numero di eventi dovuti a cause naturali in Europa dal 1980 al 2016 [2]

Fulmini e alluvioni sono i fenomeni naturali più frequenti, mentre i terremoti causano gli incidenti con le più gravi conseguenze [3]. Ma esistono anche altre tipologie di rischi naturali. Sulla base dei risultati ottenuti dall'IRDR (*Integrated Research on Disaster Risk*), programma di ricerca integrata sul rischio di catastrofi, è stato pubblicato il report intitolato "*Peril classification and Hazard Glossary*", in cui è riportato uno schema di possibile classificazione degli eventi naturali raggruppati per famiglie di rischio: Geofisico, Idrologico, Meteorologico, Climatologico, Biologico, Extraterrestre [4].

Famiglia	Esempi di eventi	Famiglia	Esempi di eventi
Geofisico	Terremoti Movimenti del terreno Attività vulcanica Liquefazione Tsunami	Climatologico	Siccità Incendi boschivi
Idrologico	Alluvioni Frane Valanghe Flash Floods	Biologico	Malattie da batteri, funghi, virus Infestazione da insetti
Meteorologico	Tempeste Nubifragi Cicloni tropicali Fulmini Vento forte Tornadi Grandinate	Extraterrestre	Asteroidi, meteoriti, comete Tempeste geomagnetiche

Tabella 1. Classificazione rischi naturali da Peril Report

In realtà la distinzione in famiglie dei vari fenomeni non è sempre così netta: molti eventi possono essere di tipo misto e/o conseguenti tra loro e in diversi casi è la combinazione di più fenomeni che porta a disastri naturali.

2. Valutazione del rischio Na-Tech

L'impatto di un evento naturale catastrofico su un impianto industriale può determinare il rilascio di ingenti quantità di prodotti pericolosi, con conseguente verificarsi di eventi incidentali rilevanti concomitanti, quali incendi, esplosioni, dispersioni tossiche, inquinamento di corpi idrici superficiali e falde acquifere. Gli incidenti NaTech si differenziano dai comuni incidenti industriali per diversi aspetti [5]:

- possibile presenza di rilasci multipli e simultanei di sostanze pericolose;
- indisponibilità delle utilities come acqua, energia elettrica e dei sistemi di comunicazione, nonché funzionamento non ottimale delle misure di mitigazione, tra cui gli impianti antincendio con aumento della probabilità di effetto domino;
- riduzione della capacità di risposta del personale dello stabilimento e sovraccarico della capacità di intervento di personale e mezzi di soccorso esterni;
- ritardi negli interventi per impraticabilità del territorio circostante con aggravio degli effetti del rilascio stesso.

2.1. La valutazione del rischio NaTech nel d.lgs.105/2015

La Direttiva Europea 2012/18/UE ha ribadito chiaramente il concetto, già richiamato nella precedente direttiva Seveso, che il rischio di incidente rilevante potrebbe essere maggiore a causa della probabilità di calamità naturali connesse con l'ubicazione dello stabilimento. In Allegato II alla Direttiva stessa, in cui sono definiti i contenuti minimi dei rapporti di sicurezza, si evidenzia che l'identificazione e l'analisi dei rischi di incidenti rilevanti deve comprendere non solo le cause operative strettamente legate agli impianti, ma anche le cause esterne, quelle connesse con effetti domino e le cause naturali, citando ad esempio terremoti o inondazioni. Le stesse informazioni sono richieste anche dall'Allegato 2 al d.lgs.105/2015, recepimento italiano della direttiva europea; inoltre in Allegato C, Parte 1 allo stesso decreto "*Contenuti richiesti per il Rapporto di Sicurezza*", in particolare al paragrafo C.3 relativo agli eventi meteorologici, geofisici, meteomarinari, ceraunici e dissesti idrogeologici, si richiede al gestore di fornire dettagli sulla cronologia di tali eventi nell'area, ma anche al paragrafo C.4.1. di tenere conto esplicitamente delle cause naturali nell'individuazione degli scenari incidentali. È facoltà del Gestore scegliere la metodologia di analisi di rischio, che comprende anche l'individuazione di eventi determinati da cause esterne di origine naturale, sulla base dello stato dell'arte in materia ed alle caratteristiche del proprio stabilimento e dei relativi rischi specifici. Nell'allegato C si specifica, inoltre, che nel Rapporto di Sicurezza devono essere riportate le informazioni relative agli standard di sicurezza adottati ed ai criteri di dimensionamento di strutture, sistemi e componenti, indicando in particolare le precauzioni adottate per garantire la sicurezza in caso di evento sismico, gli impianti di protezione da scariche atmosferiche, le precauzioni per la resistenza di eventuali spinte idrostatiche sulle apparecchiature o parti dell'impianto.

In allegato 5 al d.lgs. 105/2015, "*Modulo di notifica e di informazione sui rischi di incidente rilevante per i cittadini ed i lavoratori di cui agli artt. 13 e 23*", è previsto l'obbligo di riportare nella sezione G informazioni sui pericoli indotti da perturbazioni geofisiche e meteorologiche. Il rischio NaTech, infine, viene citato anche nell'allegato E al d.lgs. 105/2015, in cui viene specificato che, nell'ambito dello Studio di Sicurezza Integrato di Area (SSIA) per le aree ad elevata concentrazione di stabilimenti, è prevista la ricomposizione di tutti i rischi presenti nell'area, compresa l'analisi degli scenari incidentali causati da eventi naturali.

2.2. Metodologie per la valutazione del rischio Na-Tech

Come per gli eventi incidentali originati da cause interne allo stabilimento, la natura e la portata dell'impatto degli eventi naturali dipende non solo dalle caratteristiche dell'evento stesso, ma anche dalle condizioni del sito, come la densità demografica, le misure di prevenzione adottate e la pianificazione degli interventi di emergenza.

La definizione della frequenza con cui un evento catastrofico naturale può presentarsi in una determinata area è tipicamente basata su una analisi statistica delle serie storiche riguardanti l'evento. Le variabili che influenzano la magnitudo degli effetti di un evento Natech e le fasi principali da considerare per la valutazione dei rischi NaTech sono riassunti in tabella 2.

RISCHIO NATECH	
Variabili	Fasi della valutazione
<ul style="list-style-type: none"> – Intensità del fenomeno naturale; – Caratteristiche di vulnerabilità dell'impianto e delle apparecchiature; – Pericolosità delle sostanze rilasciate a seguito del danneggiamento dell'impianto; – Vulnerabilità delle persone e degli edifici all'evento catastrofico naturale e alle conseguenze del rilascio di sostanze. 	<ul style="list-style-type: none"> – Raccolta dati sito specifici sulla frequenza di eventi naturali e sulle loro conseguenze – Individuazione delle strutture industriali potenzialmente esposte agli effetti naturali e con potenzialità di rilascio di sostanze ed energia; – Verifica dei criteri di progettazione e di protezione, in base alle norme disponibili e applicabili – Valutazione delle probabilità che gli eventi naturali possano generare effetti sulle strutture individuate, tali da provocare incidenti rilevanti – Studio delle conseguenze, per gli incidenti risultati credibili – Individuazione delle misure di prevenzione e protezione

Tabella 2. Variabili e fasi della valutazione del rischio Na-Tech

La peculiarità dei problemi posti dall'interazione tra catastrofi naturali e impianti dell'industria di processo ha portato alla necessità di elaborare metodologie e procedure specifiche per la stima del rischio NaTech. In generale i metodi più dettagliati sono quelli basati sulla valutazione quantitativa del rischio di incidente rilevante (Quantitative Risk Assessment, QRA), la cui procedura si basa sull'individuazione degli eventi e dei possibili scenari incidentali, seguita dalla determinazione delle frequenze di accadimento degli scenari e della gravità degli effetti e si conclude con la ricomposizione del rischio. Tuttavia i metodi per la valutazione quantitativa del rischio richiedono notevoli risorse in termini economici e di tempo. Sono stati proposti quindi anche metodi di tipo qualitativo semplificati basati su un insieme ridotto di variabili ritenute maggiormente influenti per la valutazione del rischio NaTech, con l'obiettivo di fornire uno strumento di screening preliminare per discriminare gli impianti sui quali è necessario approfondire le valutazioni con i metodi della QRA.

3. Caso studio

Di seguito si riporta un caso studio di applicazione della valutazione dei rischi Natech ad uno stabilimento a rischio di incidente rilevante di soglia superiore.

3.1 Descrizione dello stabilimento

Lo stabilimento oggetto del caso studio è un deposito in cui si svolgono attività di stoccaggio

e movimentazione di idrocarburi liquidi.

Le principali attività svolte all'interno del Deposito in esame sono: 1) *stoccaggio degli idrocarburi in serbatoi*; 2) *movimentazione a mezzo oleodotti per ricezione dei prodotti da Raffineria*; 3) *movimentazione e spedizione di prodotti petroliferi per mezzo di autobotti; tubazioni fisse e pensiline di carico equipaggiate con sistemi di misura a bracci mobili*; 4) *impianti di denaturazione/additivazione in linea*; 5) *impianti di recupero vapori dalle pensiline di carico autobotti*.

Lo stabilimento è notificato di soglia superiore per la presenza di 57.873 tonnellate di prodotti petroliferi (benzina, gasolio e kerosene) di cui alla voce 34, parte 1 - Allegato 1 al D.lgs. 105/2015.

3.2 Raccolta dati sito specifici sulla frequenza di eventi naturali e sulle loro conseguenze

Per quanto concerne gli eventi sismici, il comune in cui è ubicato lo stabilimento è in classe sismica 3. I parametri sismici di riferimento calcolati al baricentro dello stabilimento relativi al suolo rigido e con superficie topografica orizzontale per i 4 Stati Limite (Stati Limite di Esercizio SLE: di Operatività (SLO) e di Danno (SLD); Stati Limite Ultimi SLU: di salvaguardia della Vita (SLV) e di prevenzione del Collasso (SLC) riportati in tabella 3 sono stati desunti dall'ultimo aggiornamento della notifica presentata dal gestore.

Stati Limite	Stati Limite (Pvr)			
	SLE		SLU	
	SLO	SLD	SLV	SLC
PVR	81%	63%	10%	5%
Tr [anni]	120	201	1898	2475
ag [g]	0,075	0,093	0,200	0,217
Fo	2,475	2,467	2,558	2,571
Tc* [s]	0,267	0,274	0,294	0,297

Tabella 3. Parametri sismici per il caso studio in esame

Relativamente a frane e inondazioni, facendo riferimento al d.p.c.m. 29/09/1998 ed al d.lgs. 49/10 [7,8] lo stabilimento è ubicato in un'area avente classe di pericolosità idraulica P2 - M (alluvioni con tempo di ritorno tra 100 e 200 anni) e la classe di rischio idraulico-idrologico R2 (rischio medio), per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche.

Relativamente alle informazioni meteorologiche, le classe di stabilità atmosfera di Pasquill più frequenti sono D e F e la direzione dei venti più frequente è Est e Sud-Ovest.

Per trombe d'aria e tornado è stata effettuata un'analisi storica nell'area limitrofa al deposito con caratteristiche del territorio il più uniforme possibile e rispetto ad un periodo di riferimento degli ultimi 100 anni. Sulla base del numero di eventi di tornado occorsi negli anni è stato considerato come fonte principale "ESWD - European Severe Weather Database"[9].

La caratterizzazione delle fulminazioni richiede invece la conoscenza della densità di fulminazioni al suolo, cioè il numero medio di fulmini a terra N_g in funzione della latitudine e della longitudine della zona; per il caso in esame il valore di N_g è pari a 0,89 fumini/anno/km².

4. Applicazione del metodo ad indici preliminare

In analogia ad altre metodologie per la valutazione preliminare di tipo qualitativo del rischio NaTech, viene proposto un metodo indicizzato per la valutazione preliminare del rischio nato dallo sviluppo del Metodo DICAM, elaborato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna [10].

Il metodo consente di calcolare una serie di indici di rischio NaTech in relazione a diversi fenomeni naturali (alluvioni, sismi, frane, forti venti, fulminazioni, ecc.), prendendo in esame sia il bersaglio uomo, sia il bersaglio ambiente. Viene definito un indice qualitativo del rischio NaTech determinato dalla combinazione dei fattori descritti nella formula seguente (1):

$$I_{NaTech,j} = \sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ bersagli}} (I_{NAi} + I_{sost,j} + I_{vuln,j}) \quad (1)$$

dove:

- I_{NAi} fattore legato al possibile verificarsi dell'evento naturale specifico;
- I_{sost} fattore proprio dello stabilimento dovuto all'attività svolta, alla tipologia ed alla quantità di sostanze pericolose stoccate;
- I_{vuln} fattore legato alla vulnerabilità della zona che circonda il sito industriale a causa della presenza di bersagli uomo e ambiente.

Applicando il metodo al caso in esame sulla base della raccolta dei dati sito specifici indicati nella seguente tabella 4 si ottengono i valori degli indici I_{NAi} per differenti eventi naturali:

INDICE SISMI		INDICE FRANE		INDICE ALLUVIONI	
Colore	giallo	Probabilità Frane	bassa	Probabilità Inondazione	moderata
PGA	0,05g<PGA<0,15g	IRFF	< 1%	Tempo di ritorno	100-200 anni
Zona	3	Intensità	bassa	Zona	urbanizzata
Isism	3	lfrane	4	lall	2
INDICE FORTI VENTI		INDICE FULMINI		INDICE NUBIFRAGI	
Zona	2	Ng (fulm/anno/km ²) al suolo	0,89	Colore	blu
Velocità vento (m/s)	25	Categoria Ng	< 1,5	Frequenza	molto alta
				Tempo di ritorno	1-8 anni
Iven	4	lfulm	4	Inub	1

Tabella 4. Indici di rischio relativi ai rischi naturali

Successivamente in base ai quantitativi complessivi di sostanze pericolose detenute dichiarati dal Gestore nella notifica si ricava il valore relativo all'indice sostanze pericolose $I_{sost,bers}$. Infine in base alla popolazione residente nell'area ed alla presenza di elementi territoriali e ambientali vulnerabili descritti nella notifica presentata dal gestore si è stimato un indice di vulnerabilità per l'uomo e per l'ambiente. I valori ottenuti per il caso in esame sono riportati in tabella 5.

INDICE SOSTANZE PERICOLOSE		INDICI VULNERABILITÀ	
Sostanze presenti	I,sostanza	Npop_tot_cv	4082
Benzina	0,04694	Npop_res	15313
Gasolio	2	Npop_tot	19395
Kerosene	0,268	Prevalenza terreni agricoli	
Sostanze pericolose per ambiente E2	0,0222	I vuln, uomo	2
Somma	2,33714	I vuln, amb	3
Isost,bers	4	I vuln	5

Tabella 5. Indici relativi alla presenza di sostanze pericolose e alla vulnerabilità

Dalla combinazione dei fattori indicati nelle tabelle precedenti secondo la formula (1) si ottiene per ogni fenomeno una classificazione del rischio NaTech corrispondente riportata in tabella 6.

Indice di rischio INatech specifico	Valore indice di rischio	Classificazione del rischio NaTech
INaTech,sisma	60	Medio
INaTech,frane	80	Basso
INaTech,alluvioni	40	Medio
INaTech,forti venti	80	Basso
INaTech,fulminazioni	80	Basso
INaTech,nubifragi	20	Medio

Tabella 6. Classificazione del rischio NaTech

Poiché gli indici di rischio relativi a sismi, alluvioni e nubifragi risultano nella classe di rischio medio è opportuno approfondire nei paragrafi successivi l'analisi per queste tipologie di eventi naturali.

5. Approfondimento rischio sismico

In una analisi iniziale delle unità dello stabilimento che, in caso di perdita di contenimento, possano determinare incidenti di magnitudo significativa, vanno presi in considerazione:

- componenti di impianti/stoccaggi, contenenti sostanze pericolose
- edifici strategici: sale controllo, edifici sede di gestione dell'emergenza, rimesse antincendio, infermeria - servizi ausiliari strategici per fronteggiare l'emergenza
- riserva idrica, stazione di pompaggio e relative tubazioni, alimentazione elettrica di emergenza
- strutture imponenti: camini, silos, che in caso di caduta, possono danneggiare edifici strategici o componenti contenenti sostanze pericolose.



Figura 2. Planimetria del deposito oggetto del caso studio

È stata effettuata una selezione preliminare di items da verificare sulla base delle analisi contenute nel Rapporto di Sicurezza sui quali è stata effettuata un'analisi speditiva di vulnerabilità strutturale mediante verifica sismica di livello 0 al fine di individuare eventuali criticità.

Dalle verifiche di livello 0 condotte sui serbatoi di stoccaggio è emerso che in un paio di casi le tensioni sulle virole dei serbatoi potrebbero risultare lievemente superiori al limite ammissibile per cui si è resa necessaria una valutazione più approfondita (Livello 1), previa verifica delle caratteristiche effettive dei materiali. Dalle ulteriori verifiche condotte è emerso che i serbatoi non presentano alcun livello di vulnerabilità sismica e pertanto non sono ipotizzabili scenari incidentali con conseguenze maggiori rispetto a quelli già analizzati nel rapporto di sicurezza. Nel corso dell'istruttoria di valutazione del rapporto di sicurezza il CTR ha inoltre richiesto la verifica di vulnerabilità sismica della sala pompe antincendio.

6. Approfondimento rischio alluvioni

Il rischio di inondazione può essere caratterizzato da due elementi principali: la frequenza e la severità dell'allagamento. Per quanto riguarda la caratterizzazione della frequenza, viene generalmente utilizzato il parametro tempo di ritorno (T_r), espresso in anni e ricavato da studi idrologici. La gravità di un'inondazione può essere espressa mediante i parametri altezza (h_w) e velocità dell'onda di allagamento (v_w) come descritto dal grafico di figura 3.

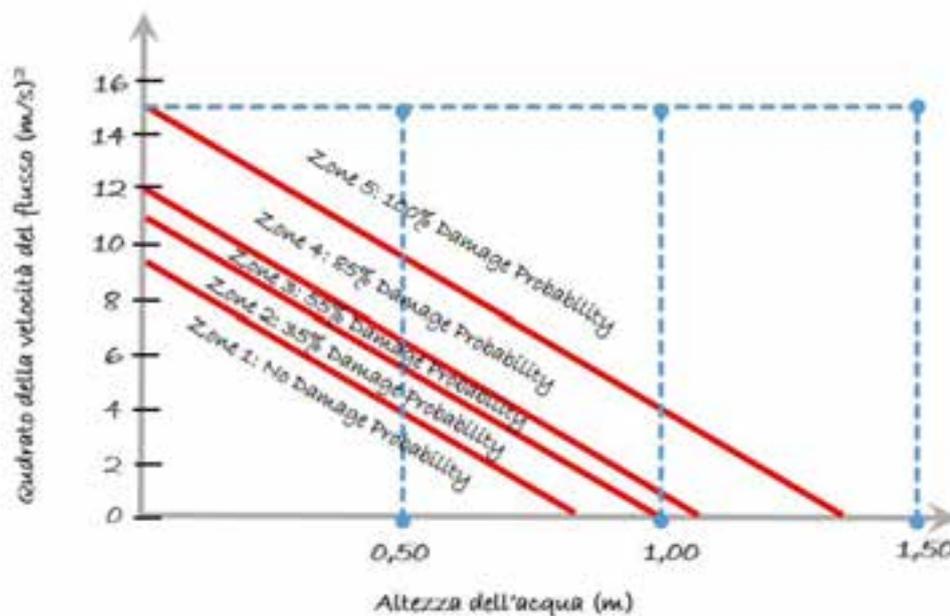


Figura 3. Curve di Fragilità (Antonioni et al. 2009)

Le apparecchiature maggiormente colpite da questi eventi naturali sono i serbatoi di stoccaggio cilindrici verticali atmosferici, contenenti in genere idrocarburi. La pressione esterna dovuta all'inondazione potrebbe portare alla rottura delle tiranterie degli ancoraggi e delle selle di appoggio delle attrezzature, delle flange di collegamento o delle connessioni ovvero al collasso del fasciame cilindrico del serbatoio a causa dell'instabilità provocata dal raggiungimento della pressione critica o a causa dell'impatto con detriti e lo scenario finale più frequente conseguente al cedimento è rappresentato dalla contaminazione dell'ambiente esterno, causata dal rilascio in acqua delle sostanze inquinanti, e lo sviluppo di gas tossici o vapori infiammabili in aria, in seguito a reazione di prodotti chimici con acqua. Dalla valutazione effettuata con riferimento alla normativa vigente, alle caratteristiche geomorfologiche della zona e alle misure impiantistiche e gestionali già adottate dalla Società, risulta che le conseguenze associate a un fenomeno alluvionale che dovesse

interessare il deposito non sono tali da determinare pregiudizio alla funzionalità degli edifici e delle infrastrutture dello stesso.

Nell'ambito del proprio Piano di Emergenza Interno, la Società ha comunque predisposto per il deposito un'apposita scheda di gestione dell'emergenza alluvionale.

7. Approfondimento rischio nubifragi

Dall'analisi storica degli incidenti provocati da precipitazioni meteo estreme emerge che i principali danni sono:

- affondamenti di tetti galleggianti di serbatoi di stoccaggio;
- danni strutturali ai serbatoi di stoccaggio;
- allagamenti e inondazioni;
- interruzioni di elettricità;
- accumulo di detriti e intasamento dei sistemi di drenaggio;
- forature distribuite sulle varie parti dell'impianto;
- interruzione dei trasporti.

Le apparecchiature più colpite risultano i serbatoi a tetto galleggiante, poiché la quantità di acqua che si accumula al di sopra di esso può raggiungere altezze tali da far affondare il tetto. Sono presenti sistemi di drenaggio dell'acqua, però nella maggior parte dei casi o non sono sufficienti per drenare l'elevata quantità di acqua che si accumula oppure si possono intasare a causa dei detriti.

La gravità dei danni e delle conseguenze dipende dall'intensità delle piogge e dalla velocità del vento. Il CTR ha richiesto al gestore di effettuare una verifica della capacità di drenaggio del tetto galleggiante dei serbatoi di stoccaggio in caso di un ipotizzato evento di pioggia di intensità eccezionale.



Figura 4. Serbatoio di stoccaggio a tetto galleggiante

Si riporta di seguito a titolo esemplificativo il calcolo del drenaggio del serbatoio a tetto galleggiante di maggior capacità presente nel deposito, in caso di un ipotizzato evento di pioggia di intensità eccezionale, assumendo valori di 100 mm di acqua caduta in un brevissimo periodo di tempo 10 minuti. Il caso specifico è relativo ad un serbatoio ad asse verticale avente diametro di 42.67 m, altezza di 14.72 m composto da n° 6 virole con anello di irrigidimento tra la terza e la quarta virola sulla sommità del mantello. Il tetto galleggiante

a singolo pontone è stato progettato in accordo alle norme API 650 [13]: queste prevedono che il tetto sia realizzato per resistere ad un battente di acqua accumulato di 250 mm. Sotto l'ipotesi di evento meteo estremo (100 mm in 10 minuti) la massima quantità di acqua accumulabile sul tetto galleggiante è data dalla differenza tra la portata della precipitazione e la portata massima drenabile. Nelle condizioni in esame si ottiene che la quantità accumulabile risulta inferiore al valore di riferimento adottato per la progettazione del tetto. Tuttavia è opportuno verificare l'effettiva configurazione geometrica e lo stato di conservazione del tetto galleggiante e del sistema di drenaggio del tetto, in modo da verificare che la quantità d'acqua accumulabile possa essere adeguatamente smaltita. È stato dimostrato quindi che, in caso di evento meteorico eccezionale come quello ipotizzato, non si verifica l'affondamento del tetto del serbatoio in esame.

Nell'ambito dell'elaborazione del Rapporto di sicurezza è stata effettuata infine una valutazione dei rischi legati ai fulmini sulle strutture rappresentative del deposito, in conformità alla norma CEI EN 62305-2 [14], sia per fulminazione diretta che indiretta, dalla quale risulta che le strutture del deposito sono autoprotette. Inoltre è stata condotta una valutazione del rischio incendio del tetto galleggiante del serbatoio.

8. Conclusioni

Il maggior livello di approfondimento dei rischi Natech indotto dal D.lgs. 105/2015 sta portando alla valutazione nell'ambito dell'analisi di rischio non solo di eventi indotti da terremoti e alluvioni, ma anche da altri rischi naturali. Una valutazione preliminare attraverso l'utilizzo di un metodo ad indici di tipo speditivo può essere utile per analizzare preliminarmente diverse tipologie di rischi, selezionando quelli su cui è necessario approfondire l'analisi.

L'adozione di criteri di progettazione per il mantenimento dell'integrità strutturale e l'introduzione di misure specifiche di sicurezza di prevenzione e protezione di tipo impiantistico e gestionale per la salvaguardia degli impianti, nonché la riduzione dei quantitativi di sostanze pericolose possono condurre ad una riduzione del rischio.

Infine, procedure di emergenza dedicate per ogni tipologia di evento naturale dovrebbero essere predisposte dal gestore analizzando l'impatto dei vari fenomeni sia sugli impianti di processo che sui sistemi strategici per la gestione delle emergenze.

9. Bibliografia

- [1] Steinberg, L. J. and Cruz, A. M., When Natural and Technological Disasters Collide: Lessons from the Turkey Earthquake of August 1999, *Natural Hazards Review*, 5, No. 3, 2004, pp. 121-130
- [2] Munich RE, NatCatSERVICE Loss events Worldwide 1980-2015, Marzo 2016
- [3] Krausmann E., Renzi E., Campedel M., Cozzani V., Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis, *Natural Hazards*, 59, 2011, pp.285-300
- [4] IDRDI Integrated Research on Disaster Risk, Peril classification and hazard glossary, marzo 2014, Beijing, China
- [5] M. Campedel, Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal accident databases, 2008, JRC
- [6] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003: Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica

- [7] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 29 settembre 1998 “Atto di indirizzo e coordinamento per l’individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all’art. 1, commi 1 e 2, del decreto legge 11 giugno 1998, n. 180”
- [8] Decreto Legislativo del 23 febbraio 2010, n. 49 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni”
- [9] European Severe Storm Laboratory, ESWD European Severe Weather Database
- [10] Morra P., Antonioni G., Bonvicini S., Spadoni G., Cozzani V., 2012, Valutazione del rischio dovuto ad incidenti rilevanti causati da eventi naturali, congresso VGR2012, Pisa
- [11] Salzano E., Basco A., Busini V., Cozzani V., Marzo E., Rota R., Spadoni G., Public awareness promoting new or emerging risks: Industrial accident triggered by natural hazards (NaTech), 2013, Journal of Risk Research, 16, pp. 469-485
- [12] Landucci, G., Tugnoli, A., Antonioni, G., Cozzani, V., Damage models for storage and process equipment involved in flooding events, Chemical Engineering Transactions, 2013, Vol. 31, pp. 697- 702.
- [13] API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, ed.2011.
- [14] CEI EN 62305-2: Protezione contro i fulmini. Valutazione del rischio, ed.2013

Lo studio di vulnerabilità sismica in ottemperanza alle nuove NTC2018 dei serbatoi in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante

A. Altieri¹, E. Andriuzzi², A. Castellano³, A. Fraddosio³, N. Pecere⁴, M.D. Piccioni³

¹ Arpa Puglia - Direzione Scientifica Servizio TSGE

² Libero professionista

³ Politecnico di Bari - dICAR

⁴ 2S.I. Software e Servizi per l'ingegneria Srl

Sommario

Nel corso degli ultimi anni la normativa italiana ha visto diversi aggiornamenti portando in primo piano il problema dello studio sulla vulnerabilità sismica delle strutture esistenti ed in particolare quello degli impianti industriali.

Nella Regione Puglia sono numerosi gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, regolamentati dal Decreto Legislativo n.105 del 26 giugno 2015, di attuazione della Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, quali impianti di raffinazione del petrolio, acciaierie, stabilimenti chimici e petrolchimici, centrali termoelettriche, depositi di esplosivi, depositi di fitofarmaci e depositi di gas liquefatti.

Le commissioni ispettive di cui all'art. 27 sono tenute a verificare che il Gestore di tali stabilimenti abbia valutato all'interno del SGS due aspetti fondamentali introdotti nel vigente decreto sopraindicato, quali l'invecchiamento e la verifica sismica degli impianti spesso connessi tra loro.

Si propone in questo lavoro di affiancare alle classiche tecniche di calcolo dinamico teorico, la misura sperimentale delle frequenze naturali del sistema attraverso il metodo dell'interferometria radar di recente introduzione. Tratteremo di seguito il caso pratico di impiego di una metodologia che ha il vantaggio di monitorare in continuo e da remoto un'attrezzatura oggetto di verifica sismica, sia essa un impianto o parti di esso, tubazione o serbatoio in condizioni normali di esercizio, con il beneficio di evitare la fermata dell'impianto, necessaria spesso per il monitoraggio richiesto nei piani di verifica e nei programmi di manutenzione.

1 Introduzione

Alla luce della recente norma NTC 2018 in vigore dal 22 marzo 2018, nel presente lavoro viene affrontato il problema della valutazione della vulnerabilità statica e sismica con particolare riferimento ai serbatoi contenenti liquido, considerati quali *"apparecchiature critiche"* in stabilimenti a rischio di incidente rilevante, analizzando anche le tipologie e strategie di intervento/modifica possibili con riferimento ad alcuni casi ricorrenti negli impianti in questione. Le commissioni ispettive di cui all'art. 27 sono tenute a verificare che il Gestore di questi stabilimenti abbia predisposto piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento, in conformità con quanto previsto dagli Allegati 3 e B del suddetto decreto e abbia effettuato la valutazione della sicurezza del rischio sismico per quanto concerne le *"attrezzature critiche"*, nonché programmato ed eseguito interventi di miglioramento/adequamento sismico in conformità con quanto previsto dall'Allegato 5 Sezione G dello medesimo decreto. Dette attrezzature sono contenute nelle procedure di cui al controllo operativo al § 4 della Lista di Ricontra, oggetto di analisi da parte delle Commissioni nelle visite ispettive di cui all'art. 27 del d.lgs. n.105/2015, condotte in

conformità con quanto previsto dall'Allegato H, nonché nei procedimenti di valutazione dei Rapporti di Sicurezza di cui all'art. 17 del d.lgs. 105/2015.

Tra le novità fondamentali introdotte dal nuovo decreto d.lgs. 105/2015, vi sono gli aspetti concernenti l'invecchiamento e le verifiche sismiche di attrezzature/impianti critici degli stabilimenti soggetti al rischio di incidente rilevante. Il legislatore ha voluto così porre l'attenzione su tematiche precedentemente sottovalutate, anche alla luce di "rilievi" più volte evidenziati dalle stesse commissioni ispettive in ambito Seveso, ma anche mostrati nelle rescrizioni/raccomandazioni di cui ai rapporti finali d'ispezione, dovuti essenzialmente allo stato obsoleto di molti impianti. Dette criticità sono ricorrenti negli impianti di molte regioni d'Italia e sono spesso causa di "quasi-incidenti", in quanto sottoposti a molte ore di esercizio, poca manutenzione e non sostituiti con elementi tecnologicamente più avanzati, anche dal punto di vista dell'utilizzo dei materiali. Questo tipo di analisi è effettuata all'interno del "controllo operativo" del sistema di gestione della sicurezza di stabilimento.

Inoltre, la procedura per l'individuazione dei sistemi tecnici da verificare nel corso dell'ispezione, a partire dagli eventi incidentali ipotizzati nel Rapporto di Sicurezza di cui all'art.17 del d.lgs. 105/2015, costituisce un importante punto di riferimento per la Commissione per le verifiche sugli impianti ed apparecchiature "critiche" previste dalla lista di riscontro dell'attuazione del SGS-PIR (elementi relativi al "Controllo operativo" – punti 4.i e 4.iv - e alla "Pianificazione di emergenza" – punti 6.i, 6.iii, 6.iv e, dove pertinenti, 6.v e 6.vi), che richiedono la presa visione di come è stato stabilito e attuato dal gestore il criterio di "criticità" e l'effettuazione di riscontri a campione, allo scopo di verificare che i controlli e le manutenzioni previsti per tali sistemi tecnici "critici" siano effettuati come da programma.

Per quanto attiene l'applicazione di procedure e istruzioni mirate al monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento e alla corrosione si fa riferimento all'Allegato 3 § b) iii del d.lgs. n.105/2015 e Allegato B al § 3.4.4, mentre per l'analisi sismica degli impianti/infrastrutture di stabilimento all'Allegato 5 del medesimo decreto.

Spesso gli impianti industriali esistenti sono stati progettati e verificati con norme ormai obsolete, aventi per lo più valenza tecnica utilizzata per strutture civili (edifici, capannoni, ecc.), e quindi caratterizzate da azioni sismiche inferiori a quelle attuali e/o progettate con fattori di struttura elevati.

Durante le verifiche ispettive è richiesto al Gestore dello Stabilimento a rischio di incidente rilevante, una relazione inerente *"la compatibilità sismica dello stabilimento redatta ai sensi delle NTC 2008"* di cui all'Allegato 5 del d.lgs. 105/2015, Sezione G. In particolare per quanto attiene le *"Informazioni sulla sismicità"*, la Società viene chiamata ad eseguire uno *"studio volto alla verifica sismica degli impianti/strutture, nonché eventuali opere di adeguamento in esito al predetto studio"*. Tutti questi interventi previsti all'interno dei SGS-PIR hanno un impatto non trascurabile in termini economici legati anche alla messa fuori servizio e/o fermata degli impianti per l'esecuzione dei lavori.

Con il presente lavoro è doveroso evidenziare le novità introdotte dalle NTC 2018 al capitolo 8 "Costruzioni esistenti", con particolare riferimento ai paragrafi 8.3 "Valutazione della sicurezza" e 8.4 "Classificazione degli interventi". Le innovazioni più significative riguardano il paragrafo 8.3 in ambito di prestazioni previste e criteri relativi alla valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni/opere infrastrutturali esistenti, nonché l'eventuale incremento del livello di sicurezza che si persegue, con verifiche anche agli SLE per le attrezzature definite critiche dalle procedure SGS negli stabilimenti di soglia superiore e di soglia inferiore, edifici di interesse strategico ed industriali nei quali avvengono lavorazioni di materie pericolose inserite di cui alla normativa Seveso . *"Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza quando ricorra anche una delle seguenti situazioni: - riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta ad azioni*

ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni), situazioni di funzionamento ed uso anomalo, deformazioni significative imposte da cedimenti del terreno di fondazione; - provati gravi errori di progetto o di costruzione; - cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o della classe d'uso della costruzione; - interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità o ne modifichino la rigidità". "La valutazione della sicurezza deve permettere di stabilire se: - l'uso della costruzione possa continuare senza interventi; - l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso); - sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante".

"La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguite con riferimento ai soli SLU, salvo che per le costruzioni in classe d'uso IV, per le quali sono richieste anche le verifiche agli SLE specificate al § 7.3.6; in quest'ultimo caso potranno essere adottati livelli prestazionali ridotti."

Spesso questo decadimento strutturale si rileva in opere infrastrutturali rilevanti sottoposte a fenomeni di invecchiamento e/o corrosione. Le anomalie e deformazioni di queste attrezzature/impianti sono evidenziate da un attento monitoraggio eseguito negli anni.

Relativamente al capitolo 8, per le attrezzature già esistenti, per quanto attiene le classi d'uso, si fa presente la Determinazione della Regione Puglia n. 1214 del 31/05/2011 che considera le infrastrutture ed edifici di interesse strategico allocati negli impianti Seveso di classe 3 e 4 ai sensi del precedente d.lgs. 334/99 superato dall'attuale d.lgs. 105/2015 e ai sensi dell'o.p.c.m. n°3274/03 nonché del d.p.c.m. n°3685/03, d.g.r. n°153/04 Allegato 2, d.m. 14.01.2008 § 2.4.2, concernenti *"Individuazione degli "Edifici di interesse strategico e opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile"*, per cui è previsto il raggiungimento di un livello di sicurezza maggiore.

2 Il monitoraggio dinamico dei serbatoi

Le apparecchiature critiche sono tradizionalmente sottoposte sostanzialmente a una serie di controlli previsti nei programmi di manutenzione di stabilimento e che possono però considerarsi di carattere locale, riguardanti lo spessore, le saldature, ecc. e che hanno rilevanza sulle verifiche statiche delle parti in pressione e degli appoggi. Questo tipo di indagini sperimentali, di tipo locale, seppur utili non aggiungono informazioni ulteriori rispetto alla geometria nota dai disegni di progetto e pertanto, il calcolo delle azioni sismiche e le relative verifiche previste dalla normativa vigente sono svolte con le informazioni di progetto.

Il metodo di analisi lineare di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica, per comportamenti strutturali sia dissipativi sia non dissipativi, è l'analisi modale con spettro di risposta o "analisi lineare dinamica". In essa l'equilibrio è trattato dinamicamente e l'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto definito dalle NTC 2018 al § 3.2.3.5.

Con riferimento ad uno studio precedente sulle sfere Horton [5] si vuole evidenziare in questo articolo la necessità di affiancare alle analisi teoriche un approccio sperimentale basato sulla misura delle frequenze naturali del sistema, effettuando un monitoraggio dinamico dei serbatoi.

3 Interferometria radar e analisi dinamica modale

L'analisi dinamica modale individua i modi di vibrare della struttura ed in particolare le frequenze naturali e le forme modali ad esse associate e per ogni modo determina anche

la massa eccitata del sistema. Per la valutazione dell'azione sismica, la norma fornisce i parametri necessari alla costruzione dello spettro elastico in termini di accelerazione utilizzando il fattore struttura, rinominato dalle NTC 2018 fattore di comportamento, che consente il passaggio allo spettro di progetto, a partire dallo spettro elastico a seconda della tipologia di suolo (in figura 1).

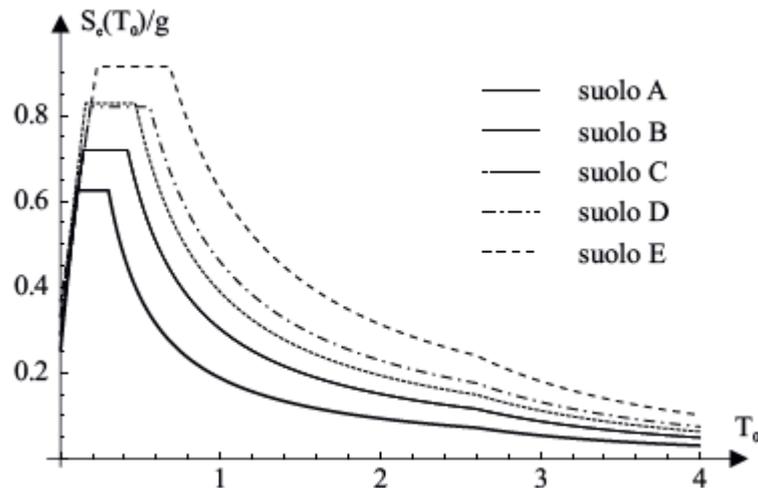


Figura 1. Spettro elastico per i vari tipi di suolo

Questo spettro fornisce, a meno della massa, le massime forze sismiche che si destano su un oscillatore elementare di assegnate proprietà dinamiche: si noti che le forze sismiche sono proporzionali alle accelerazioni totali.

In definitiva l'analisi dinamica determina il periodo fondamentale della struttura e tale valore consente, attraverso l'uso dello spettro (elastico o di progetto), di determinare l'accelerazione max assoluta e quindi le forze sismiche che subisce il sistema.

Come è facile verificare analiticamente, nel caso delle sfere Horton (cfr. fig. 12 e 3), la quasi totalità della massa viene eccitata al primo modo di vibrare (cfr. tab. 1), pertanto la forza sismica totale che sollecita la struttura è determinata dall'ordinata dello spettro in corrispondenza del valore del periodo fondamentale della struttura. Tale valore viene determinato analiticamente mediante l'uso di un software di calcolo e dipende dalla massa, dalla rigidità, dallo smorzamento, dalle condizioni di vincolo, ecc.

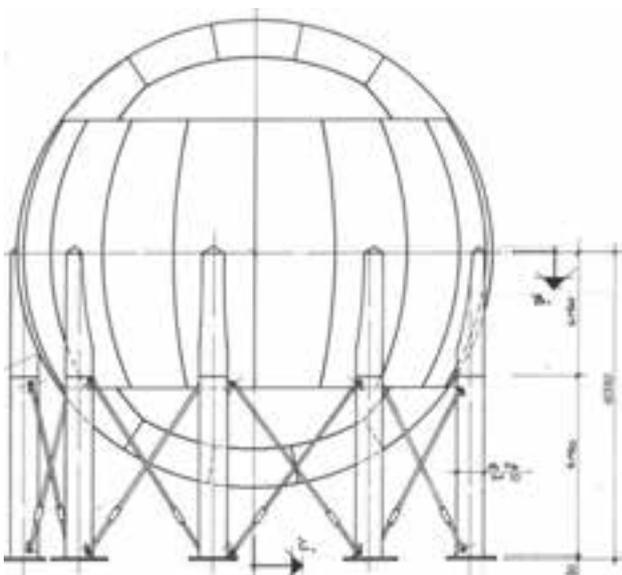


Figura 2. Serbatoio tipo Horton

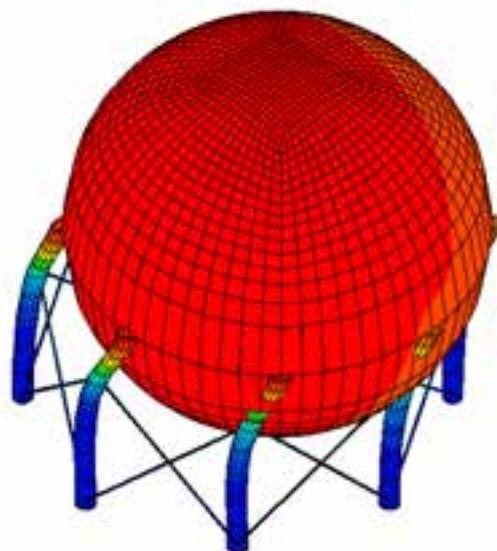


Figura 3. Forma del 1°modo di vibrare

Modo	Frequenza	Periodo	Acc. Spettrale	M efficace X x g	%	M efficace Y x g	%	M efficace Z x g	%	Energia	Energia x v
	Hz	sec	g	daN		daN		daN			
1	1.286	0.777	0.260	1.073e+06	99.1	1.15e-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.289	0.776	0.261	1.15e-06	0.0	1.076e+06	99.4	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.127	0.470	0.375	2815.68	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	6.402	0.156	0.344	1089.68	0.1	9.55e-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	6.403	0.156	0.344	9.55e-04	0.0	1088.95	0.1	0.05	4.34e-06	0.0	0.0
6	7.482	0.134	0.314	0.0	0.0	2.63e-05	0.0	1.074e+06	99.3	0.0	0.0
7	22.006	0.045	0.198	2.50e-06	0.0	2.93	2.70e-04	55.51	5.13e-03	0.0	0.0
8	22.322	0.045	0.197	10.71	9.89e-04	2.13e-04	0.0	3.41e-04	0.0	0.0	0.0
9	22.692	0.044	0.196	5.38e-05	0.0	8.88	8.20e-04	19.72	1.82e-03	0.0	0.0
Risulta				1.077e+06		1.077e+06		1.074e+06			
In percentuale				99.49		99.49		99.26			

Tabella 1

Data la forma dello spettro, risulta fondamentale, ai fini della valutazione della sicurezza della struttura nei confronti dell'azione sismica, individuare l'esatto valore della frequenza naturale del sistema e in questo lavoro se ne propone, oltre alla determinazione teorica, la determinazione sperimentale attraverso l'uso dell'**interferometria radar** di recente sviluppo.

4 Monitoraggio con metodologia dell'interferometria radar

Le tecniche di misura tradizionali utilizzate di frequente per la misura delle caratteristiche dinamiche di una struttura sono basate sull'uso di una catena di misura accelerometrica che comprende un trasduttore, un amplificatore ed un indicatore.

La catena di misura più completa è costituita da:

- *trasduttore* (in generale sono utilizzati gli accelerometri, in particolare sono molto diffusi quelli piezoelettrici);
- *pre-amplificatore* (amplifica l'ampiezza del segnale proveniente dal trasduttore che, solitamente, è molto debole. Il guadagno dell'amplificatore è in genere regolabile e la sua scelta è lasciata all'operatore);
- *condizionatore di segnale* (Il segnale amplificato viene poi trattato dal condizionatore di segnale che compie alcune eventuali operazioni, come il filtraggio, una ulteriore amplificazione, l'integrazione nel tempo, ecc.);
- *convertitore analogico - digitale* (il convertitore A/D permette di trattare il segnale con un calcolatore: il segnale proveniente dal trasduttore è un segnale "analogico" continuo, il cui andamento è analogo a quello della grandezza misurata; il convertitore A/D rileva il valore istantaneo del segnale a intervalli regolari di tempo, trasformandolo in un insieme discreto di numeri (segnale "digitale");
- *analizzatore di segnale* (analizzatore di spettro o software per l'elaborazione del segnale)
- *altri dispositivi* (visualizzatore, stampante, plotter, ecc.).

Dal punto di vista applicativo per effettuare le misure occorre:

- effettuare uno studio teorico della struttura (ad esempio con il metodo FEM) per poter definire il tipo, il numero e le posizioni dei punti di misura e quindi dove applicare i trasduttori;
- dopo aver effettuato un sopralluogo preliminare occorre redigere un progetto della prova nel quale devono essere definiti le attrezzature, i ponteggi, ecc., per poter consentire ai tecnici di raggiungere (in sicurezza) i punti di prova;

- dal punto di vista applicativo si installano i trasduttori accelerometrici (con diversi sistemi che fanno uso di adesivi, di collegamenti bullonati, uso di magneti, ecc.) rendendoli solidali alla struttura (collegamento alle travi, alla soletta di impalcato, ecc.);
- Per il collegamento dei trasduttori alla centralina di acquisizione dati si possono utilizzare cavi schermati oppure un collegamento wireless;
- Prima di eseguire le misurazioni occorre effettuare una serie di test e di controlli sul segnale per valutare il corretto funzionamento del sistema di misura.

L'uso della tecnica di misura brevemente descritta presenta una serie di problematiche relative proprio all'installazione ed in particolare alla necessità di mezzi (come ad esempio ponteggi, gru, carrelli elevatori, ecc.) e personale (in aggiunta ai tecnici sperimentatori) per giungere in prossimità dei punti di applicazione. La facilità o meno di poter accedere alle zone di applicazione dei trasduttori può condizionare la scelta dei punti di interesse strutturale, oltre a porre seri problemi anche in ordine alla sicurezza degli operatori.

Vista la difficoltà operativa nell'uso delle tecniche tradizionali basate sull'applicazione in sito di sensori e centraline di acquisizione, che rende molto oneroso (anche in termini economici) la misura delle grandezze dinamiche di interesse strutturale, si sono sviluppati in questi ultimi anni metodi a "distanza" e, tra questi, oggetto del presente lavoro, è il sensore radar, denominato IBIS (Image By Interferometric Survey), sviluppato dall'Azienda IDS (Ingegneria Dei Sistemi SpA di Pisa) in collaborazione con il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università di Firenze, basato sull'applicazione dei principi dell'interferometria.

Il **sistema IBIS** si compone di un modulo sensore, un'unità di controllo su PC e un'unità di alimentazione. Il modulo sensore consiste in una apparecchiatura radar dedicata alla generazione, trasmissione e ricezione di segnali elettromagnetici. È costituito da due antenne per la trasmissione e la ricezione delle onde elettromagnetiche e utilizza una tipica architettura super-eterodina e un dispositivo Direct Digital Synthesis (DDS). Il DDS è formato da un circuito di base comprendente un controllore elettronico, una RAM, un riferimento di frequenza, un contatore e un convertitore digitale-analogico (DAC), il tutto per generare un'onda sinusoidale. La sezione radio-frequenza irradia ad una frequenza centrale di 16,75 GHz con una larghezza di banda massima di 300 MHz, di conseguenza, il radar è classificato come banda Ku-band, in accordo alle specifiche IEEE Standard 521-1984.

La calibrazione finale garantisce la necessaria stabilità di fase. Il modulo sensore viene di norma installato su un supporto rigido dotato di una testa rotante, che permette l'orientamento nella direzione desiderata.

Il PC di controllo, connesso al modulo sensore mediante un'interfaccia USB, consente la gestione del sistema, la configurazione dei parametri di acquisizione, la memorizzazione e l'elaborazione numerica dei segnali acquisiti, nonché la visualizzazione dei primi risultati in tempo reale. Inoltre l'unità di alimentazione fornisce energia al sistema attraverso batterie a 12 V.



Figura 4. Strumento IBIS - S

Il sistema è basato sulla tecnica SF-CW (Stepped-Frequency Continuous Wave) mediante trasmissione continua di successivi treni di N impulsi monocromatici ove il generico k -esimo impulso è caratterizzato dalla frequenza $f_k = f_0 + k\Delta f$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$). Gli N impulsi monocromatici effettuano il campionamento nel dominio delle frequenze dello spazio indagato, con larghezza di banda pari a $B = (N - 1) \Delta f$. La risoluzione in distanza Δr dipende dalla larghezza di banda secondo la seguente relazione ($c =$ velocità della luce):

$$\Delta r = \frac{c}{2B}$$

Nel sensore IBIS, la tecnica SF-CW è implementata in modo da ottenere una risoluzione in distanza di 0,50 m; pertanto due bersagli possono essere individuati singolarmente dal sensore se la loro distanza relativa è maggiore di 0,50 m. Il modulo sensore trasmette e riceve l'intera larghezza di banda alla frequenza massima di 100 Hz, cosicché il corrispondente intervallo temporale $\Delta t = 0,01$ s è pienamente adeguato a descrivere accuratamente le storie temporali di spostamento per un sistema strutturale. Una volta che l'immagine dello scenario illuminato dall'antenna radar è stata determinata con passo temporale Δt , lo spostamento di ogni bersaglio individuato nello scenario è valutato usando una tecnica interferometrica. In generale, infatti, le onde elettromagnetiche riflesse da un oggetto in movimento rispetto al modulo sensore emittente presentano differenti valori di fase in istanti successivi. Ne discende che lo spostamento del bersaglio considerato può essere determinato in base alla differenza di fase misurata dal sensore radar nei successivi tempi discreti di acquisizione. Lo spostamento radiale d_p (ovvero lo spostamento lungo la direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica) e la differenza di fase $\Delta \varphi$ sono legati dalla relazione seguente:

$$d_p \propto \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi$$

La tecnica interferometrica fornisce una misura dello spostamento radiale d_p . Ogni altra componente dello spostamento è facilmente determinabile con considerazioni geometriche. Ad ogni istante di tempo campionato, sia le componenti in fase che in quadratura dei segnali ricevuti sono acquisiti in modo che i dati risultanti sono costituiti da un vettore di N campioni complessi, che rappresentano la risposta in frequenza misurata a N frequenze discrete. Effettuando la Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) la risposta viene ricostruita nel dominio del tempo.

Viene, infine, costruito il profilo in distanza (Range profile) degli echi radar che fornisce una mappa tridimensionale degli oggetti nello spazio in funzione della loro distanza relativa dall'apparecchiatura. Nella figura seguente è visualizzato, con riferimento a un caso reale, il Range profile espresso in scala lineare in funzione dei singoli rangebin, è inoltre possibile selezionare quale rangebin analizzare.

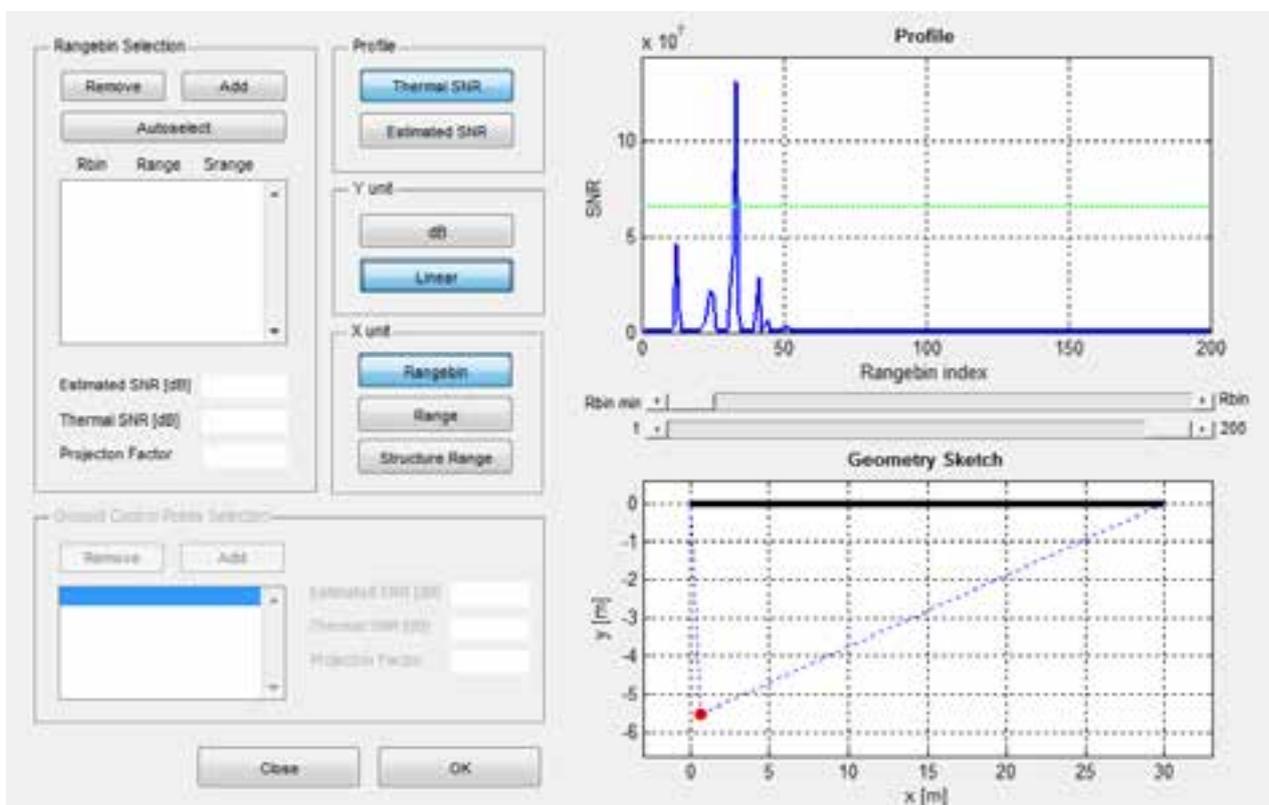


Figura 5. La vista in scala lineare mostra in particolare i bersagli individuati sulla struttura

Il nuovo sistema radar è quindi capace di misurare la risposta dinamica in termini di spostamento di differenti punti di una struttura, con una sensibilità di circa $0,01 \div 0,02$ mm con una frequenza di campionamento sino a 100 Hz, per cui risulta utile per le strutture di interesse civile ed industriale.

Nella figura seguente si mostra un tipico output nel dominio del tempo e delle frequenze.

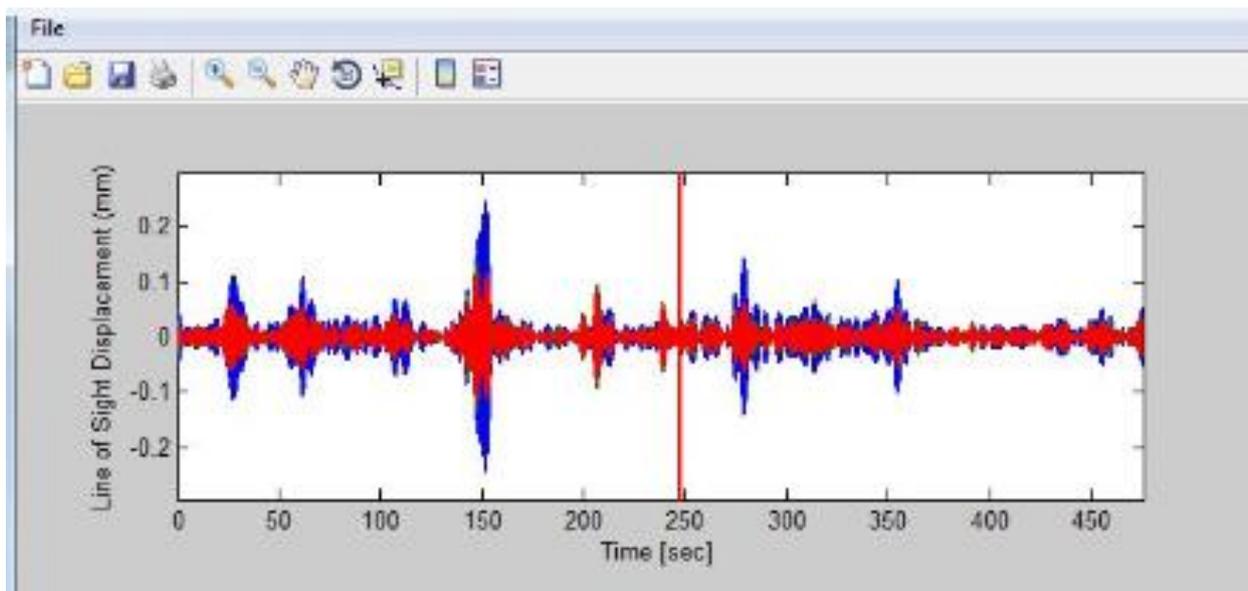


Figura 6. Time history di alcuni segnali misurati dall'IBIS-S

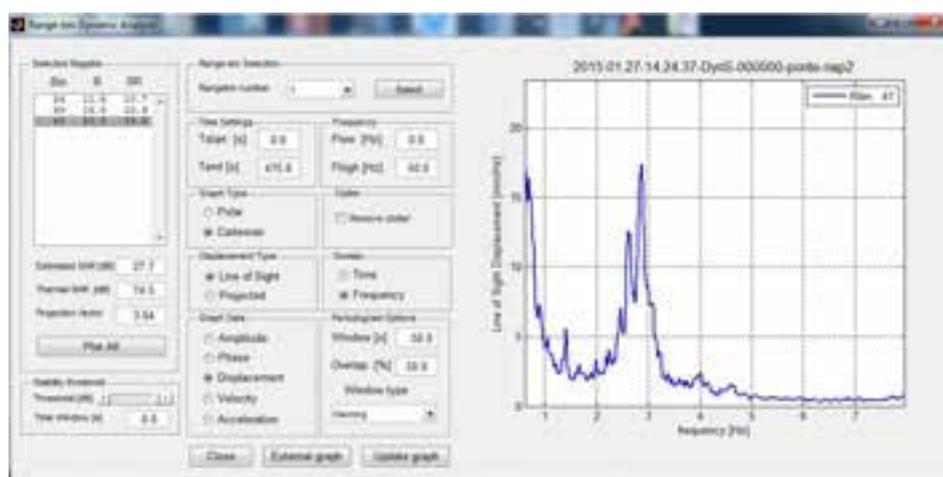


Figura 7. Elaborazione di un segnale nel dominio delle frequenze e individuazione delle frequenze naturali del sistema

I vantaggi del metodo possono essere così riassunti:

- il monitoraggio remoto può essere eseguito senza la necessità di accedere direttamente alla struttura per installare sensori o bersagli ottici. In casi speciali, quando la struttura non è sufficientemente riflettente alle onde elettromagnetiche o quando deve essere misurato lo spostamento di punti specifici, si può far ricorso a elementi riflettenti passivi (corner reflector) il cui montaggio risulta particolarmente agevole e veloce;
- l'interferometro radar è veloce e facile da installare e può essere usato sia di giorno sia di notte, in tutte le condizioni ambientali;
- il sensore può essere utilizzato per la misura degli spostamenti sia in condizioni statiche (ad esempio, durante una prova diretta di carico) sia in condizioni dinamiche (ad esempio, durante le normali condizioni di esercizio dell'impianto industriale).

5 Conclusioni

Come sopra evidenziato nell'introduzione, i gestori degli stabilimenti sono chiamati a presentare le risultanze delle verifiche sismiche e delle eventuali misure di adeguamento sismico su attrezzature spesso soggette anche a fenomeni di invecchiamento.

Dal punto di vista sismico è necessaria una caratterizzazione dinamica sperimentale di tipo globale, atteso che per molte strutture al periodo fondamentale è associata la maggior parte della massa e quindi delle forze sismiche sollecitanti l'impianto e condizionanti, anche economicamente, la verifica.

Fra i metodi sperimentali e più innovativi, nel presente lavoro si propone il metodo della interferometria radar, la quale comporta una serie di vantaggi dal punto di vista operativo e della sicurezza, consentendo, tra l'altro, di svolgere le prove durante l'esercizio dell'apparecchiatura senza necessariamente interromperne il servizio.

Questo approccio di tipo globale, permette di analizzare l'attrezzatura durante l'effettivo esercizio, fornendo valutazioni in tempo reale e non in determinati periodi quali ad esempio quelli programmati delle fermate di stabilimento.

Bibliografia

- [1] Bernardini, G. et al. (2007). Microwave interferometer for ambient vibration measurements on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests, Proceedings of Int. Conf. on Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures (EVACES'07), 143-152.
- [2] S. Rödel, S. Rödel, G. Lauffer, C. Gerstenecker, M. Becker. Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L. Journal of Applied Geodesy 4 (2010), 41-54.
- [3] Conversa N.. Adeguamento sismico di un serbatoio sferico metallico (sfera Horton). Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile – Indirizzo Strutture - Politecnico di Bari. A.A. 2015/2016.
- [4] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. La valutazione del rischio sismico nella progettazione delle attrezzature a pressione. Convegno SAFAP 2010 (ISBN 978-88-7484-230-8).
- [5] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. Progettazione sismica degli apparecchi a pressione e dei tanks con la presenza di liquido. Convegno SAFAP 2012 (ISBN 978-88-7484-230-8).
- [6] V. Annoscia, N. Pecere, A. Altieri. Utilizzo di norme nazionali in ambito PED. Convegno SAFAP 2014 (ISBN 978-88-7484-418-0).
- [7] M. D. Piccioni, A. Fraddosio, A. Altieri, V. Annoscia, N. Conversa, N. Pecere. Lo studio di vulnerabilità sismica e metodi per il miglioramento e/o adeguamento sismico dei serbatoi sferici di GPL tipo Horton in Stabilimenti soggetti a Rischio di Incidente Rilevante. Convegno SAFAP 2016 (ISBN 978-88-7484-520-0).
- [8] J. Gocat, L. Ortyl et al. Determination of displacements and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry. Wydawnictwa AGH, Krakow 2013.

Approcci metodologici innovativi per la gestione del rischio sismico in impianti industriali a rischio di incidente rilevante

M. Ciucci¹, A. Marino¹, A. C. Lio¹

¹ Inail - Dit

Sommario

Numerosi eventi, anche recenti, hanno sottolineato la rilevanza delle interazioni fra rischio industriale e rischi naturali (NATECH), in particolare per quanto concerne il rischio sismico. La Direttiva 2012/18/EU, e il d.lgs. 105/2015 che la recepisce, tra i suoi elementi di novità, richiede esplicitamente, l'analisi dei rischi NATECH. L'implementazione di tecnologie innovative (sensori, attuatori e sistemi innovativi per la protezione sismica) agli elementi di impianto critici, gestite in un sistema avanzato di monitoraggio, può ridurre in modo significativo il rischio di incidente rilevante e le relative conseguenze rispetto alle azioni sismiche. Tale implementazione, dedicata al rischio sismico, può essere inserita nei sistemi già esistenti di SHM e PCS con evidenti vantaggi in termini economici, tecnici e gestionali. Ovviamente per assicurare che il sistema sia efficiente occorre valutare adeguatamente tutti gli aspetti significativi, dall'identificazione corretta degli elementi critici di impianto, alla scelta dei sistemi di monitoraggio e quindi dei sensori più performanti, fino alla corretta definizione dei threshold di attivazione dei sistemi di mitigazione e delle reti comunicazioni. L'utilizzazione di queste tecnologie innovative può portare ad un miglioramento significativo della sicurezza sismica degli impianti esistenti (progettati secondo vecchie normative meno conservative) riducendo azioni strutturali impegnative e onerose. Inoltre, tenendo conto che il sisma interessa simultaneamente l'intero impianto, compresi i sistemi di sicurezza (fornitura idrica e linea elettrica), tali approcci innovativi permettono potenzialmente il controllo dell'impianto nel suo complesso.

1. Introduzione

L'impatto di un disastro naturale su un impianto industriale può comportare il rilascio di sostanze pericolose con possibili gravi conseguenze al di fuori del sito con rilascio di sostanze nocive, incendi o esplosioni. Gli incidenti innescati da un evento naturale in impianti industriali a rischio di incidente rilevante sono comunemente definiti eventi NaTech. Uno dei problemi principali degli incidenti NaTech è il verificarsi simultaneo di un disastro naturale e di un incidente tecnologico. Entrambi richiedono sforzi simultanei nell'affrontare una situazione in cui gli impianti di sicurezza dedicati alla mitigazione dell'incidente possono essere fuori uso, perché danneggiati dal disastro naturale. Inoltre, rilasci di sostanze pericolose possono essere generati da fonti singole o multiple, con il risultato di incidenti contemporanei o a catena nello stesso impianto. Inoltre le risorse umane e materiali dedicate alla gestione delle emergenze potrebbero essere contemporaneamente occupate nel rispondere al disastro naturale sul territorio interessato.

In sintesi un evento NaTech può comportare:

- Un incremento della frequenza di accadimento associata agli eventi incidentali.
- Una estensione delle aree di danno, determinata sia dal contemporaneo verificarsi di più eventi incidentali, sia dalla possibile indisponibilità dei sistemi di protezione e di mitigazione
- Una modifica significativa degli scenari incidentali con effetti anche nell'ambito della pianificazione dell'emergenza e della pianificazione territoriale e urbanistica

Nonostante il crescente numero di studi e di normative più cautelative nei confronti della progettazione e della gestione delle attività industriali, gli incidenti NaTech rappresentano ancora una minaccia. Il riconoscimento dell'impatto dei NATECH sulla gestione della sicurezza negli impianti a rischio di incidente rilevante è una delle principali novità introdotte dal D.lgs. 105/2015, come già dalla direttiva 2012/18/UE di cui rappresenta l'attuazione.

Per quanto riguarda l'identificazione e i metodi di analisi e di prevenzione dei rischi di incidente rilevante, tra i dati e le informazioni minime da riportare nel rapporto di sicurezza, è richiesta una descrizione dettagliata dei possibili scenari di incidente rilevante e delle loro probabilità di accadimento o delle condizioni in cui essi si verificano includendo un riepilogo degli eventi che possono avere un ruolo nell'innescare di ognuno di questi scenari, le cause interne o esterne all'insediamento considerato; in particolare devono essere incluse le possibili cause naturali, quali ad esempio terremoti o alluvioni.

In questa prospettiva l'utilizzazione di sistemi "smart" può certamente contribuire in modo efficiente ed efficace alla prevenzione, alla riduzione ed alla mitigazione del rischio Natech. Tuttavia, lo sviluppo di metodologie da utilizzare a questo scopo è ancora all'inizio.

2. Analisi quantitativa del rischio sismico di impianti a rischio incidente rilevante per l'individuazione di elementi critici

Il metodo classico Quantitative Risk Assessment (QRA) è un metodo molto ben consolidato per la valutazione del rischio negli impianti di processo, che si basa sull'analisi logica delle conseguenze. Questo metodo, fondamentalmente probabilistico, è stato proposto principalmente per le condizioni incidentali in cui l'evento di danno e le relative conseguenze dipendono da una componente di rischio predefinita e da un evento di rilascio predefinito (LOC). Di conseguenza, il calcolo del rischio individuale e collettivo, che è espresso in termini di probabilità di letalità in un punto specifico dell'area circostante o in un certo numero di decessi nell'intera area, può essere eseguito tenendo conto di tutti gli scenari rilevanti.

In caso di eventi NaTech, invece, l'analisi è molto più complessa perché l'interazione casuale indipendente tra evento naturale e unità di processo può determinare il danno simultaneo a diverse apparecchiature, innescando più rilasci di materiale pericoloso che, a loro volta, possono produrre molteplici eventi a catena che possono anche interagire tra di loro. In generale, i suddetti metodi tentano una valutazione della vulnerabilità complessiva dell'impianto a causa dei possibili scenari incidentali causati dal rilascio di sostanze pericolose a causa di eventi LOC provocati da terremoti o da altri pericoli naturali, ma non includono procedure sistematiche per analizzare la catena degli incidenti e trascurano la relazione causale dettagliata tra danno strutturale e LOC. Inoltre, sono spesso basati su approcci probabilistici semplificati, che rendono difficile e non completamente affidabile l'analisi degli effetti di propagazione.

In ogni caso sono stati fatti degli sforzi per definire una metodologia più affidabile possibile attraverso il metodo Monte Carlo Simulation (MCS) per la definizione degli scenari di danno più probabili. Tale valutazione quantitativa del rischio è comunque necessaria per l'identificazione degli elementi critici degli impianti.

3. Earthquake early warning systems

I sistemi di early-warning sismico sono utilizzati da tempo per la prevenzione degli incidenti nucleari, mentre scarsa attenzione è stata data all'applicazione per la gestione della sicurezza sismica negli impianti industriali.

Con questi sistemi è possibile fornire un allarme affidabile da pochi secondi a un minuto prima che arrivi il sisma. È facile comprendere che maggiore è il tempo di preallarme, maggiore è la possibilità di prevenire danni agli impianti e, eventualmente, mitigare gli effetti del terremoto.

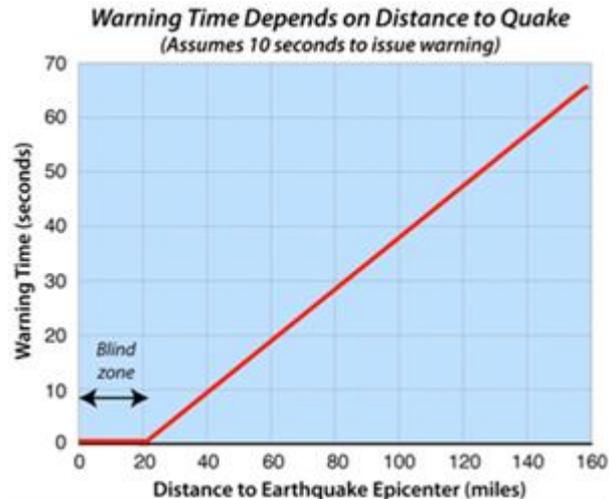


Figura 1. Tempi di allerta stimati per siti a differenze distanze dall'epicentro del terremoto.

La caratteristica principale di un EWS, per lo sviluppo di efficaci azioni di mitigazione in caso di terremoto, è il tempo di arrivo delle onde sismiche. I tempi di avviso stimati per le posizioni a diverse distanze dall'epicentro del terremoto sono essenziali. I siti entro 30 km dall'epicentro probabilmente non riceveranno alcun segnale di avvertimento poiché, in media, occorreranno 10 secondi per rilevare e localizzare il terremoto (Fig. 1).

Il tempo richiesto per rilevare ed emettere l'avviso per un terremoto dipende dalla distanza tra la sorgente del terremoto e la stazione di misurazione più vicina. Ci vuole poco tempo affinché le onde sismiche viaggino dalla sorgente (ad esempio la faglia) alla stazione sismica. Le prime onde che arrivano a una stazione sono le cosiddette "onde P" che viaggiano a 6,2-8,2 km al secondo. Le "onde S", di ampiezza maggiore (più dannosa) viaggiano a 3,6-4,7 km al secondo. Pertanto, più una stazione è vicina alla sorgente sismica, più rapidamente il terremoto può essere rilevato. Rilevamenti più precisi dipendono dalla disponibilità di più stazioni di misurazione (stazioni di misurazione multiple); quindi, aumentando la densità delle stazioni migliora la velocità di rilevazione del sisma.

I dati di più stazioni devono poi essere raccolti e analizzati dalle reti sismiche regionali, quindi le informazioni sul sisma devono essere trasferite dalla stazione al centro di elaborazione. I segnali sismici ricevuti dalle stazioni vengono utilizzati in tempo reale per rilevare il terremoto e per determinare la posizione e la magnitudo dell'evento. La componente più importante di un sistema di early-warning sismico regionale è quindi costituita da una fitta rete di stazioni sismiche con comunicazioni efficienti ed affidabili. Altri dispositivi di monitoraggio dei terremoti (come i sensori GPS) possono essere integrati negli algoritmi EW e possono essere in grado di aiutare a ridurre i tempi di rilevamento e a migliorare le stime iniziali di magnitudo e posizione dei terremoti.

I sistemi regionali possono essere efficacemente integrati da sistemi di early-warning on-site.

Un esempio è rappresentato dalla realizzazione di reti di monitoraggio locale in cui un sistema di sismografi rileva i segnali provenienti da sensori velocimetrici o accelerometrici. Il segnale rilevato dai sismografi viene gestito tramite un sistema di elaborazione che consente anche l'attivazione di sistemi automatici di allarme nonché il trasferimento del segnale in sala controllo dell'impianto con la possibilità di attivazione di sistemi di protezione e mitigazione di eventuali eventi incidentali.



Figura 2. Sistema di Early Warning Sismico.

Per quanto riguarda i sensori accelerometrici particolarmente interessanti sono i sistemi micro-elettro-meccanici (MEMS) perché si tratta di sensori a basso costo e dimensioni minime in grado di fornire in tempo reale informazioni sul moto sismico ma anche sul movimento e sull'inclinazione delle strutture.

4. Early warning systems

Alcuni sensori (sensori a fibra ottica e MEMS: Micro-Electro-Mechanical-System) integrati nei sistemi di monitoraggio di sicurezza strutturale (SHM Structural Health Monitoring) sono già applicati per l'identificazione di danni e rilasci di sostanze pericolose. La loro applicazione è generalmente limitata al monitoraggio della sicurezza strutturale, ma può essere applicata anche in caso di terremoti. Questo tipo di sistemi sono chiamati Early Warning (EW) e comportano l'uso di sensori per l'identificazione e il controllo di spostamenti, deformazioni e rotture, nonché del rilascio di sostanze pericolose, e sono integrati con i sistemi di early warning sismico. I vantaggi nell'utilizzo di questi sensori nell'ambito dei sistemi PCS (Process Control Systems) sono chiari: il monitoraggio permanente dei componenti critici di un impianto consente, da un lato, di pianificare le operazioni di manutenzione, e dall'altro di sviluppare sistemi decisionali in grado di limitare le conseguenze in caso di eventi sismici. Questi sistemi di Early Warning (EW) possono essere implementati in un sistema intelligente al fine di rilevare immediatamente gli effetti di un terremoto sui componenti degli impianti industriali ed eventualmente attivare in modo automatico sistemi di sicurezza volti a ridurre il rischio di incidente e a limitare le conseguenze. Per la gestione di questi sistemi di rilevamento è necessario utilizzare sistemi di comunicazione efficienti e affidabili. Il corretto posizionamento dei sensori per SHM deriva da un'adeguata analisi del rischio.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di sensori che potrebbero essere installati su supporto fisso o mobile.

4.1 Sensori laser, ottici e estensimetri di contatto per la segnalazione di spostamenti e deformazioni

4.1.1 Sensori laser o a luce rossa senza contatto

Misurano distanze su oggetti scuri fino a 30 m, su oggetti chiari fino a 65 m. La risoluzione del sensore di 1 mm permette misure precise lungo tutto il campo di misura. Si dispongono in prossimità della base dei serbatoi (lungo la circonferenza) e in prossimità delle tubazioni con particolare riguardo all'inizio e alla fine. Per quanto riguarda i serbatoi possono misurare

gli spostamenti e segnalare possibili fenomeni di buckling e elephant foot; per le tubazioni segnalano spostamenti e deformazioni.



Figura 3. Sistemi laser o a luce rossa.

4.1.2 Micrometri laser

Misurano la posizione, lo spostamento e la variazione di diametro delle tubazioni. Sono notevolmente precisi.



Figura 4. Micrometro laser.

4.1.3 Estensimetri elettrici precablati.

Gli estensimetri elettrici precablati a foglio e circolari sono progettati per misurare le deformazioni dei materiali che si verificano in risposta alla forza applicata; rilevano compressioni e/o allungamenti, anche impercettibili, nelle strutture. Possono lavorare nel range di temperatura $-269 + 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 5. Estensimetri elettrici precablati.

4.1.4 Estensimetri dinamici saldabili.

Gli estensimetri monoassiali incapsulati, con base metallica saldabile, includono due elementi (1/2 ponte) per la compensazione termica. Effettuano misure statiche e dinamiche. Si posizionano ortogonali o paralleli alla tubazione. Segnalano la deformazione di una tubazione.



Figura 6. Estensimetri dinamici saldabili

4.1.5 Trasduttori rettilinei di posizione

I trasduttori rettilinei di posizione segnalano spostamenti. Le piccole dimensioni e i diversi sistemi di montaggio e fissaggio li rendono particolarmente versatili



Figura 6. Trasduttore rettilineo a corpo cilindrico.

4.2 Rivelatori di perdite in condotte, impianti di stoccaggio, linee di trasferimento e serbatoi.

4.2.1 Spettrometri a infrarosso

Sono sistemi spettroscopici integrati per la rilevazione remota e in continua. Operano anche in ambienti chimicamente aggressivi. Misurano vari gas come metano, biossido di azoto, protossido di azoto, vapore acqueo, ammoniaca, acido solforico, metano. Segnalano perdite di gas, forature e rotture in serbatoi e tubazioni.



Measurement Ranges

Measurement Ranges in PPMV					
Component	Range*	LOD*	Path	Units	
Process Control	Methane	0-2000	5	100m	ppmv
	Acetylene	0-20	0.2	100m	ppmv
	Ethane	0-500	5	100m	ppmv
	CO	0-5	0.05	100m	ppmv
Address for Product Certification	CO ₂	0-5	0.05	100m	ppmv
	Ammonia	0-20	0.2	100m	ppmv
	H ₂ S	0-50	2	100m	ppmv
Water	0-50	0.1	100m	ppmv	
	Methanol	0-100	1	100m	ppmv

*Components and ranges are indicative. Actual requirements will depend on complete gas list. Detailed specs will be provided during the ordering process.
*Repeatability $\pm 1\%$ of reading or the limit of Detection (LOD), whichever is greater.

Figura 7. Spettrometro a infrarosso.

4.2.2 Analizzatori di gas a Infrarosso

Rilevatori a luce infrarossa di gas con doppio percorso ottico (ricettore-emissore) e doppia lunghezza d'onda utilizzano la tecnologia a IR misurando la lunghezza d'onda del materiale attraversato aria-gas e determinando/comparando la trasmittanza e rilevando quindi la presenza di gas. Le distanze di utilizzo sono dai 2 ai 6 metri, normalmente utilizzati in ambiente chiuso. Si installano sopra le tubazioni. Segnalano perdite di gas, forature e rotture in tubazioni. Operano anche in ambienti aggressivi



Figura 8. Spettrometro a infrarosso.

4.2.3 Sensori Catalitici

Si posizionano in prossimità delle tubazioni e segnalano perdite di gas, forature e rotture delle tubazioni. Fra i vantaggi offerti da questo tipo di sensori ci sono la notevole durabilità, la scarsa sensibilità alle variazioni di temperatura, pressione e umidità atmosferica, l'elevata precisione di misura, la rapidità di risposta e la capacità di identificare un elevatissimo numero di gas e vapori dispersi in aria. Il principale svantaggio è rappresentato dalla necessità di un tenore minimo di ossigeno, generalmente nell'ordine del 10÷14%.



Figura 9. Sensori Catalitici

4.2.4 Sensori Elettrochimici

La tecnologia dei sensori elettrochimici è impiegata nel rilevamento di gas tossici e combustibili in concentrazioni molto ridotte. Si posizionano in prossimità delle tubazioni e segnalano perdite di gas, forature e rotture delle tubazioni. Fra i vantaggi offerti da questo tipo di sensori vi sono la durabilità, la non dipendenza dalla temperatura, la rapidità nella segnalazione. Sono in grado di rilevare tutti i principali gas tossici. Forniscono la concentrazione dei gas misurati



Figura 10. Sensore elettrochimico

4.2.5 Rivelatori di incendio.

Si tratta di sensori in grado di rilevare la presenza di fumo nelle fasi iniziali dell'incendio, e di rivelatori ottici di fiamma e rivelatori termici.



Figura 11. Rivelatori di incendio

5. Sistemi di protezione attiva

Questi sistemi non controllano alcun processo ma di fatto entrano in gioco quando non è possibile controllare un processo attraverso mezzi normali. Di solito sono installati come misure protettive. L'impiego intelligente dei sistemi di protezione attiva implica che siano collegati a una rete di sistemi di comunicazione e attivazione affidabile e efficiente.

Eventualmente, questi sistemi possono essere utilizzati anche nel caso di un evento sismico. Alcuni esempi sono:

5.1 Valvole di sfioro pressione

Una valvola di sfioro pressione è un dispositivo di sicurezza progettato per proteggere un recipiente o un sistema pressurizzato in caso di sovrappressione. Riduce la sovrappressione in Gas e Fluidi attraverso uno scarico verso l'esterno. Per queste valvole, l'apertura è proporzionale all'aumento della pressione nel recipiente, con un'apertura graduale. I sistemi elettronici, pneumatici e idraulici possono essere controllati tramite le variabili (pressione, temperatura e portata) del fluido e sono in grado di funzionare in ogni momento, anche in caso di interruzione dell'alimentazione (quando i controlli del sistema non funzionano) e dopo un lungo periodo di mancato funzionamento. La valvola di sfioro pressione, in alcuni casi, può essere l'unico dispositivo rimasto per impedire un guasto e quindi un incidente.



Figura 11. Valvole di sfioro pressione

5.2 Safety interlock systems (SIS)

Sistemi chiamati anche emergency shutdown systems. La progettazione e la manutenzione di un SIS rappresentano una sfida in quanto non è frequente l'utilizzo di questi dispositivi; d'altra parte, un SIS deve essere disponibile per funzionare ogni volta che è necessario.

In questo ambito una valvola di blocco è un dispositivo di sicurezza il cui compito è di intercettare rapidamente il flusso del gas o fluido qualora la pressione controllata raggiunge i limiti prestabiliti o manualmente se richiesto dall'operatore in sito o tramite un comando a distanza.



Figura 11. Valvola di blocco

5.3 Sistemi automatici antincendio che utilizzano agenti di estinzione, quali schiume e prodotti chimici secchi.



Figura 12. Sistemi automatici antincendio

6. Conclusioni

Individuando gli elementi critici nei confronti delle azioni sismiche dell'impianto e mediante l'utilizzo di «sistemi intelligenti» è possibile ottenere una notevole riduzione del rischio di incidente rilevante e delle relative conseguenze. L'applicazione di queste tecniche consente un miglioramento delle condizioni di sicurezza negli impianti esistenti (spesso non a norma perché progettati secondo normative del passato meno stringenti) senza grossi interventi strutturali e di conseguenza con costi contenuti. Inoltre considerato che il sisma interessa contemporaneamente tutto l'impianto, nonché i sistemi di sicurezza, queste tecnologie consentono un controllo simultaneo e in tempo reale di tutta la struttura. Tale implementazione, dedicata al rischio sismico, può essere inserita nei sistemi già esistenti di SHM e PCS con evidenti vantaggi in termini economici, tecnici e gestionale. Esistono ovviamente alcuni elementi critici nell'applicazione dei «sistemi intelligenti». E' necessario realizzare una attendibile valutazione del rischio per identificare gli elementi critici e definire così il corretto posizionamento dei sensori. Esiste poi la possibilità di falsi allarmi o allarmi eccessivi che devono essere gestiti attraverso la definizione di «soglie» di allarme (threshold) come ad esempio la PGA omper l'early warning sismico. Un altro elemento

critico è l'efficienza ed affidabilità delle reti di comunicazione e dati soprattutto nel caso di un sisma di notevole entità.

Ad ogni modo è evidente che le tecnologie "smart" possono svolgere un ruolo rilevante nella prevenzione, gestione e mitigazione del rischio NATECH.

7. Bibliografia

- [1] Alessandra Marino, Mariano Ciucci e Fabrizio Paolacci (2016) Smart technologies for integrated natural risk management: innovative methodologies and remote sensing" ASME PVP 2017 - Pressure Vessels & Piping Conference.
- [2] Caputo, A.C., Giannini, R., Paolacci, F. (2015). Quantitative Seismic Risk Assessment of Process Plants. State of the Art Review and Directions for Future Research, Proc. ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference PVP 2015 July 19-23, Boston, Massachusetts, USA
- [3] CEN (2004) Comit. European de Normalisation, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1:2004.
- [4] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC.
- [5] ISO 15686-1.
- [6] NTC 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». – Decreto 17 Gennaio 2018.
- [7] OPCM 3274 2003

Indagine sulla corrosione localizzata di un sistema di tubazioni facenti parte di un impianto antincendio

D. Lega¹, M. Romitelli²

¹ Inail - Dit

² Libero professionista

Sommario

In questa memoria viene presentata una indagine metallografica sulla corrosione localizzata di un sistema di tubazioni in acciaio inossidabile austenitico AISI 304 facenti parte della rete di distribuzione dell'acqua dell'impianto antincendio di una industria farmaceutica. I fenomeni di corrosione hanno portato in molti punti alla perforazione delle tubazioni e si sono verificati solo pochi mesi dopo il collaudo dell'impianto. Sono state effettuate indagini in microscopia ottica ed elettronica allo scopo di individuare le cause del fenomeno corrosivo. Le osservazioni effettuate hanno consentito di rilevare la presenza di difetti nelle saldature, quali ossidazione termica e spruzzi, e la partecipazione dei batteri ai fenomeni di corrosione. In particolare numerose evidenze metallografiche portano alla conclusione che i fenomeni corrosivi sono stati determinati da batteri ossido riduttori del Fe e del Mn e da batteri solfato - riduttori naturalmente presenti nelle acque sotterranee. Vengono fornite delle indicazioni per evitare o ridurre i rischi relativi al ripetersi dei fenomeni descritti.

Introduzione

La rete di distribuzione dell'acqua relativa all'impianto antincendio di una industria farmaceutica presenta in numerosi punti delle perforazioni dopo soli pochi mesi di servizio. Le tubazioni sono in acciaio inossidabile austenitico AISI 304, il fluido di processo è costituito da acqua di pozzo, ed il sistema opera a temperatura ambiente con una pressione massima di 10 bar. In questa memoria viene presentata una indagine metallografica in microscopia ottica ed elettronica volta ad individuare le cause del fenomeno corrosivo. L'acciaio inossidabile austenitico AISI 304 viene largamente impiegato negli impianti di distribuzione dell'acqua per la sua buona resistenza alla corrosione. Tale proprietà di resistenza alla corrosione si realizza soprattutto in acque con un basso tenore di cloruri, mediamente inferiore a 100 ppm, non stagnanti, e relativamente fredde [1, 2, 3]. Tuttavia sono note situazioni di corrosione localizzata con fenomeni di vaiolatura o corrosione interstiziale anche in situazioni ottimali. Generalmente i fenomeni di vaiolatura si realizzano in relazione a discontinuità presenti nel film di passività, tali discontinuità possono essere imperfezioni di natura meccanica o possono nascere in relazione a fenomeni di natura chimica. Questi ultimi sono determinati da una lacerazione locale dello strato passivante determinata dall'azione di elementi quali gli ioni cloruro o gli ioni fluoruro. Il contenuto di ioni cloruro o fluoruro dell'acqua è quindi un fattore determinante per la corrosione da vaiolatura degli acciai inossidabili. Un altro aspetto importante è costituito dalla finitura superficiale. Una superficie liscia è meno capace di catturare particelle, depositi o sali che possono iniziare l'attacco corrosivo. [1, 2] Le saldature dell'acciaio AISI 304 sono spesso soggette a fenomeni di corrosione localizzata. [4] Infatti il procedimento di saldatura può determinare una variazione nella composizione chimica del materiale saldato che può alterare la micro-struttura del film passivante e la sua resistenza alla corrosione. Durante il procedimento di saldatura, per azione del calore, ed in presenza di una atmosfera contenente ossigeno, si realizza il fenomeno della ossidazione a caldo, che corrisponde alla formazione di ossidi scuri in superficie. Le aree

interessate da questo fenomeno sono spesso soggette a fenomeni di vaiolatura o corrosione interstiziale. [1, 2, 5] Le acque naturali, inoltre, contengono una moltitudine di batteri che possono interagire direttamente o indirettamente con le superfici metalliche attraverso i loro processi metabolici accelerando i processi corrosivi. Anche i semplici processi di respirazione o fotosintesi creano delle areazioni differenziali che possono favorire la corrosione. La corrosione battericamente assistita costituisce un problema serio in relazione al carattere improvviso ed alla rapidità del processo corrosivo. [6, 7, 8, 9] L'acciaio Inox AISI 304 risulta particolarmente suscettibile a questo tipo di corrosione soprattutto nelle zone saldate. [4]

Materiali e metodi

Le porzioni di tubo esaminate in questo studio provengono dalla rete idrica di un sistema antiincendio. Si tratta di due spezzoni di tubazione in acciaio inossidabile AISI 304 con diametro 10 cm e spessore 2 mm. (Fig.1) Nella rete suddetta fluiva acqua di pozzo a temperatura ambiente ed alla pressione massima di 10 bar.



Figura 1. Spezzone di tubazione esaminato

Gli esami macro sono stati effettuati con stereo microscopio Leica M125. I campioni per gli esami metallografici sono stati preparati in automatico con tagliatrice di precisione Buehler Isomet 400, inglobatrice a caldo Buehler Simplimet 400 e lucidatrice Buehler Phoenix Beta. Le indagini in microscopia ottica sono state realizzate con microscopio ottico Nikon Eclipse ME600 su campioni attaccati con reattivo "gliceregia". Le analisi in microscopia elettronica sono state effettuate con microscopio elettronico ad emissione di campo Zeiss Ultra Plus e microsonda EDX Inca 250 X-MAX 50.

Risultati

Esame visivo e macro

Nella fig. 2 è mostrata la superficie interna delle tubazioni esaminate in prossimità del cordone di saldatura. Si osserva la presenza di fenomeni di vaiolatura con perforazione del tubo (fig. 2a). La saldatura presenta il fenomeno della ossidazione a caldo (fig.2a) e difetti quali spruzzi (fig. 2b).



Figura 2. Superficie interna delle tubazioni esaminate: a) ossidazione a caldo, b) spruzzi

Le colorazioni dell'ossidazione a caldo nei giunti saldati dell'acciaio AISI 304 vanno dal giallo al blu scuro con relativa diminuzione della resistenza alla corrosione. [1, 2, 4, 5]. Nella porzione di tubazione esaminata le colorazioni vanno dal marrone scuro al blu. In fig. 3 sono mostrate alcune immagini del cordone di saldatura ottenute allo stereo microscopio.

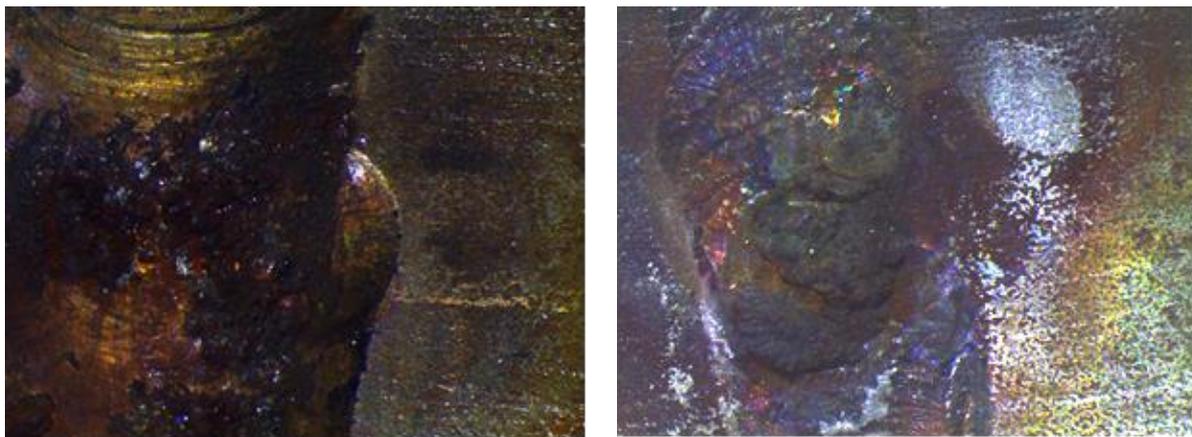


Figura 3. Immagini allo stereo microscopio del cordone di saldatura

Si osserva la presenza di depositi con una forma a “catena montuosa”. L'acciaio austenitico AISI 304 a contatto con l'acqua può sviluppare delle forme di corrosione battericamente assistite. In questi casi si assiste alla formazione di depositi con una forma a vulcano o a catena montuosa. Tali depositi sono realizzati dai batteri che ossidano il ferro IOB (iron oxidising bacteria) o il Mn MOB (manganese oxidising bacteria). I batteri IOB danno luogo alla seguente reazione di ossidoriduzione: $Fe^{+2} + IOB \rightarrow Fe^{+3}$ che porta alla formazione in acqua di idrato ferrico $Fe(H_2O)_6^{3+}$ uno ione che favorisce i processi corrosivi diminuendo localmente il pH mediante la reazione di idrolisi: $Fe(H_2O)_6^{3+} + H_2O \rightarrow [Fe(H_2O)_5OH]^{2+} + H_3O^+$. Gallionella, Siderocapsa, Leptothrix sono alcuni dei batteri naturalmente presenti nelle acque dolci responsabili di questo fenomeno. I batteri ossidanti il Mn MOB danno luogo alla seguente reazione: $Mn^{+2} + MOB \rightarrow Mn^{+4}$, si forma diossido di Mn che è un potente ossidante. Nei pressi di un cordone di saldatura sono stati rinvenuti degli “spruzzi” con a fianco diverse vaiolature. (fig.4)

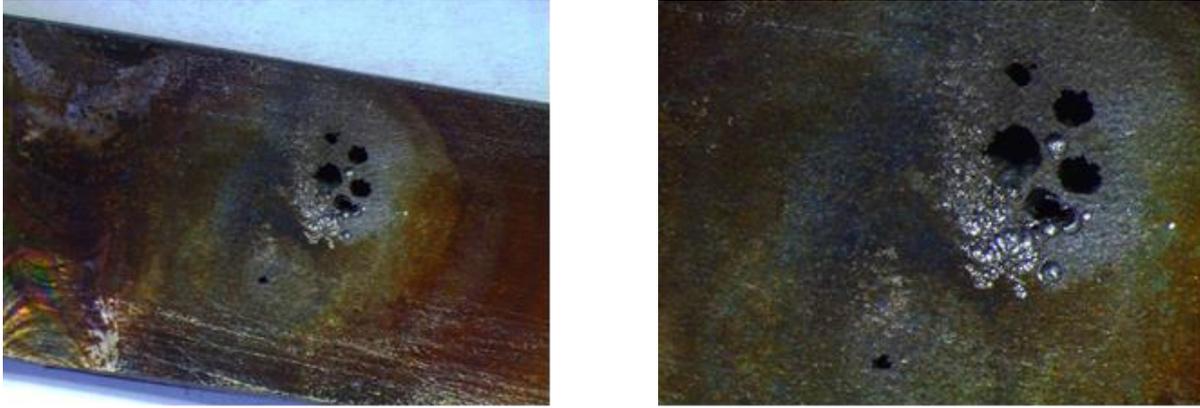
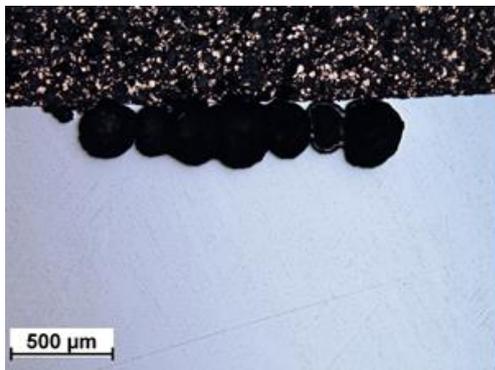


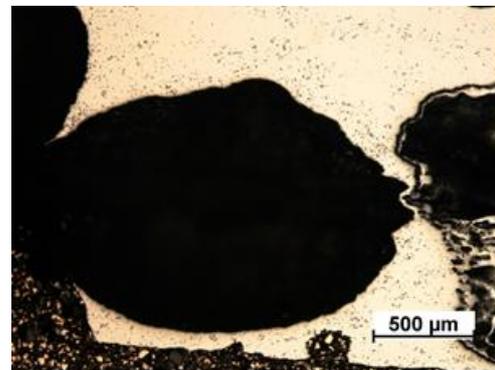
Figura 4. Spruzzi di saldatura a ridosso del cordone con diverse vaiolature

Esame al microscopio ottico

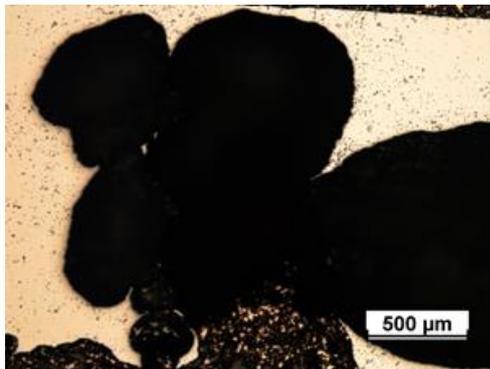
L'esame al microscopio ottico di campioni non attaccati chimicamente mostra la presenza di una serie di cavità al di sotto della superficie con una apertura superficiale molto piccola. (fig.5)



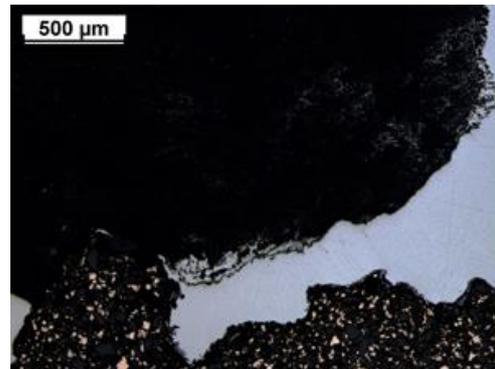
a) zona vicino alla saldatura



b) zona vicino agli spruzzi



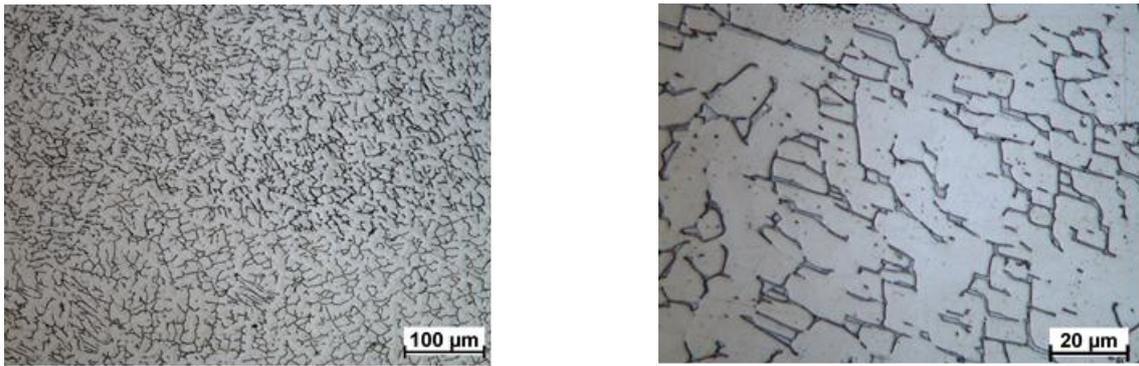
c) zona vicino agli spruzzi



d) saldatura

Figura 5. Cavità sub-superficiali generate da fenomeni corrosivi

Nelle saldature degli acciai austenitici la corrosione generata dai batteri assume una morfologia caratteristica e distintiva legata alla presenza di cavità arrotondate di grosse dimensioni aventi solo un piccolo foro sulla superficie organizzate in catene o gruppi. [6, 9, 10, 11] L'esame metallografico del materiale base non ha rilevato alcuna anomalia, la microstruttura è correttamente costituita da austenite. In fig. 6 viene mostrata la zona fusa, la fase scura è ferrite delta con una morfologia a catena detta "skeletal type". Generalmente la zona fusa di un acciaio austenitico presenta una microstruttura duplex, la ferrite delta è la fase presente in minore quantità e distribuita con diverse morfologie nella matrice austenitica. [4, 15, 16]

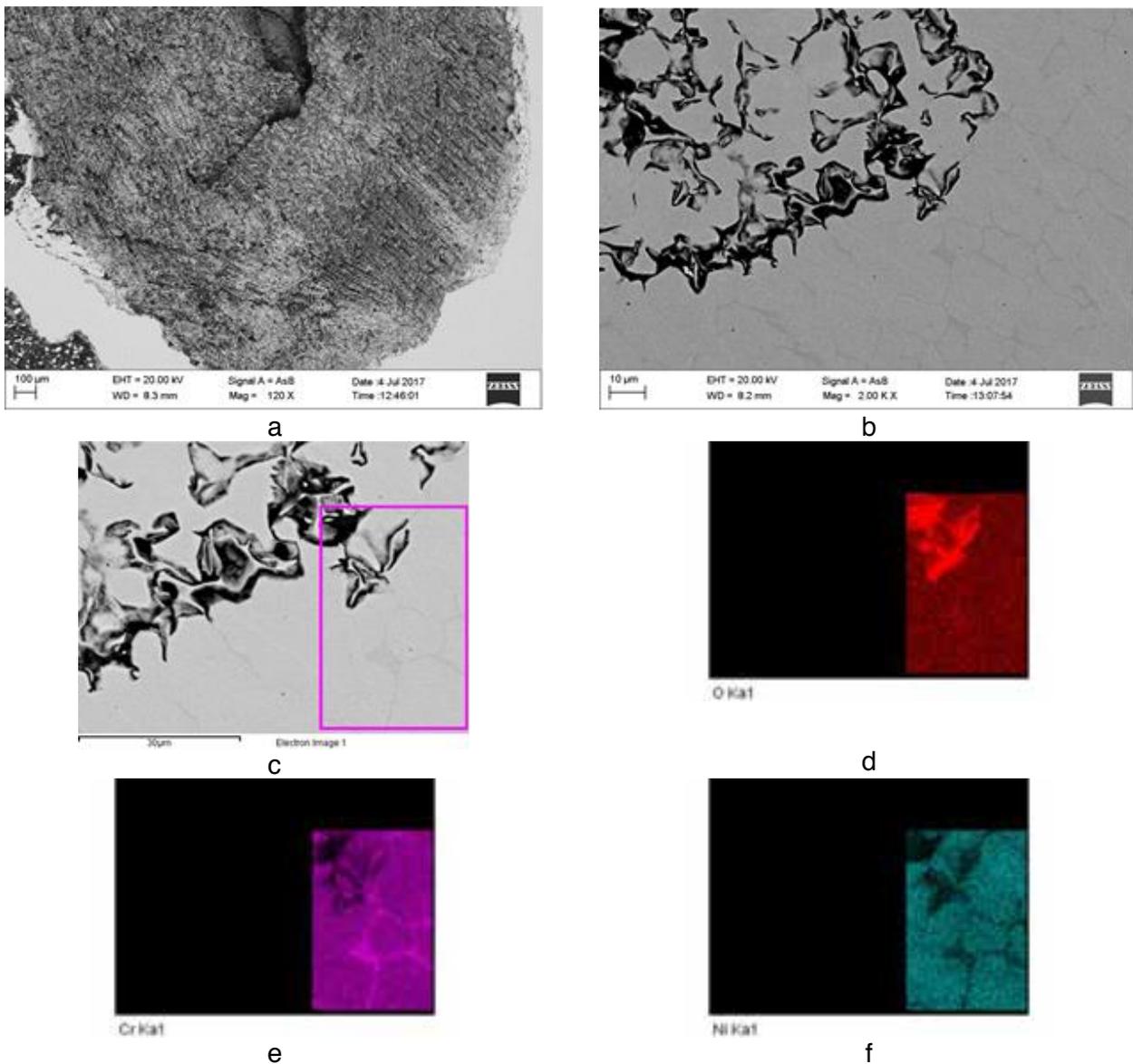


a)

b)

Figura 6. Micrografie della zona fusa

In fig.7 viene mostrata la micrografia al FEGSEM di una zona corrosa della saldatura, è evidente che l'attacco corrosivo avanza nell'ambito della fase ferrite delta.



a

b

c

d

e

f

Figura 7a. Micrografia a bassi ingrandimenti di una zona corrosa della saldatura - 7b. micrografia che evidenzia l'avanzare dell'attacco corrosivo sulla ferrite delta - 7c, 7d, 7e, 7f. mappe EDS della zona periferica del cratere di corrosione.

Generalmente il comportamento corrosivo della ferrite delta dipende dall'ambiente corrosivo. In linea generale in ambienti ricchi di cloruri o in ambienti riducenti la fase ferrite

delta è corrosa selettivamente, in tutti gli altri casi la ferrite delta si corrode più lentamente dell'austenite in relazione al più alto contenuto di Cr. [18] L'analisi metallografica di componenti corrosi a seguito di MIC mostrano che l'attacco corrosivo può procedere interessando selettivamente entrambe le fasi, sia la ferrite delta che l'austenite. Questo indica che i microambienti corrosivi nell'ambito dei biofilms possono essere molto diversi. [10] Tuttavia l'attacco preferenziale della ferrite delta è stato sempre osservato in presenza di batteri IOB e MOB. [1] La fig. 8 mostra la stessa zona corrosa a più alti ingrandimenti, si osserva una matrice con morfologia "skeleton type".

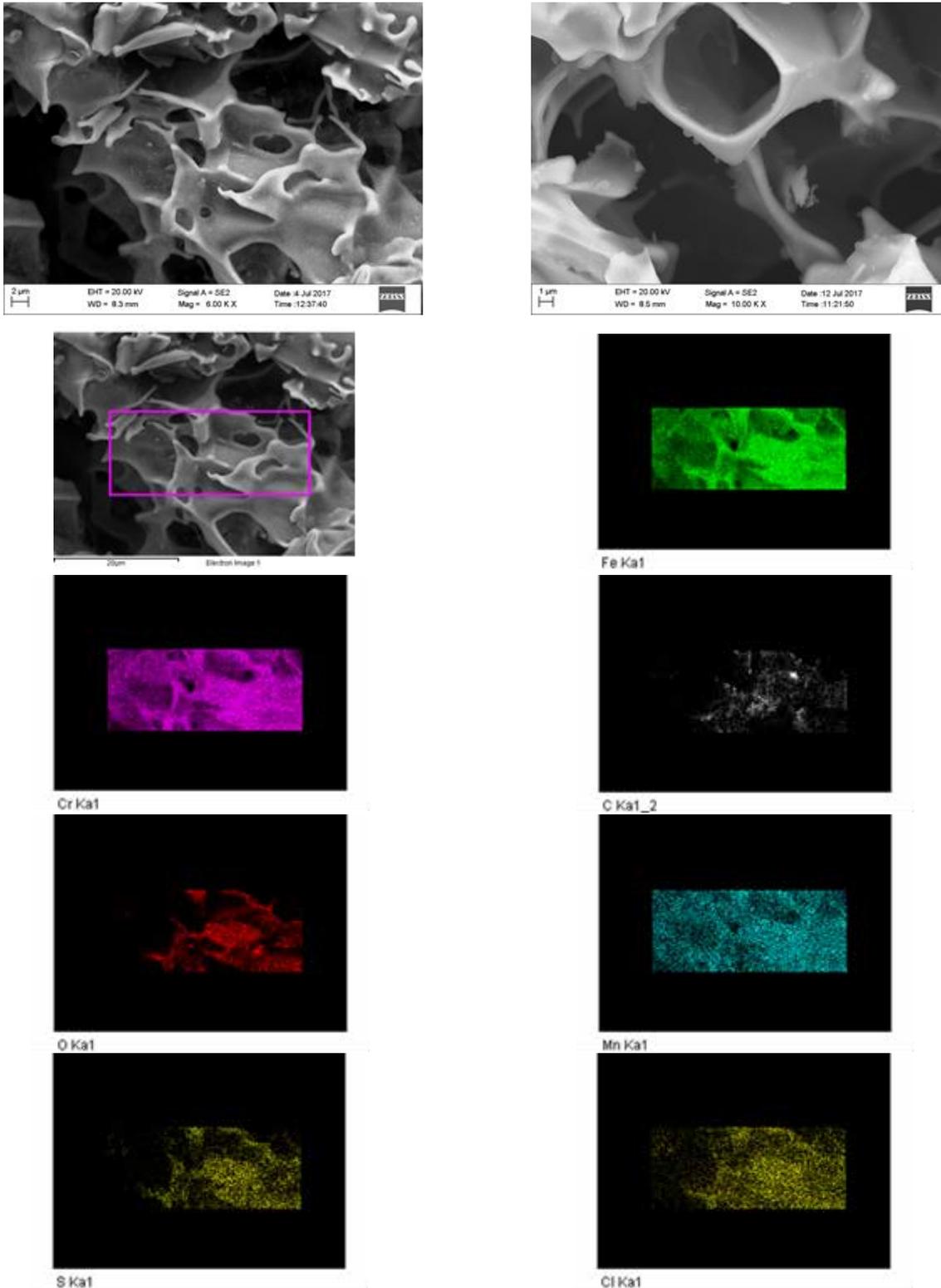


Figura 8. Micrografia al FEGSEM e mappa EDS di una saldatura corrosa

Una microstruttura con questo tipo di morfologia “skeleton type” è indicativa di una corrosione battericamente assistita. [1, 7, 16]. L'analisi EDS dei depositi situati all'interno delle cavità sub-superficiali o nelle zone corrose della saldatura mostrata in tabella 1 evidenzia una abbondanza relativa di elementi quali il Fe, il Cr, il C, e l'O, accompagnata da piccole quantità di Ni, Mn, S, Cl.

	Fe	Cr	C	Ni	O	Mn	S	Cl	Si	Altro
Zona fusa corrosa	42,2	14,9	27,1	3,0	10	0,87	0,19	0,13	1,6	-
Superficie interna di una cavità	68,65	17,44	30,5	0,19	39	1,96	0,40	0,38	0,56	Ca 0,4
Superficie interna di una catena di cavità	62,6	18,4	0,4	7,0	6,17	1,52	0,14	0,32	2,44	-
Cratere di pitting vicino uno spruzzo di saldatura	35,28	10,13	24,9	3,6	15,2	0,86	0,1	2,33	3,68	Cu 4,2
Matrice	66,3	18	0,08	9,0	-	0,6	0,03	-	0,6	-

Tabella 1. Analisi EDS delle zone corrose e della matrice

L'elevato contenuto di C presente in tutte le zone interessate da corrosione può essere dovuto al materiale organico generato dai corpi cellulari dei batteri o in alternativa, dove presente il Ca^{++} , da depositi di carbonato. Elementi invece quali lo S ed il Cl sono tipici delle corrosioni batteriche e sempre presenti nelle zone interessate da tali fenomeni corrosivi. [6, 9] L'abbondanza relativa dello S è determinata dalla presenza dei batteri solfato-riduttori SRB (sulfur reducing bacteria), un gruppo di batteri anaerobici quasi sempre presenti nelle acque dolci. Tali batteri determinano la riduzione di solfati, solfiti o tiosolfati ad acido solfidrico H_2S secondo le seguenti semi reazioni: $4\text{Fe}^0 \rightarrow 4\text{Fe}^{+2} + 8\text{e}^-$ e $\text{SO}_4^{2-} + 8\text{e}^- + 10\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$. L'acido solfidrico svolge un'azione estremamente corrosiva sul metallo: $\text{H}_2\text{S} + \text{Fe}^0 \rightarrow \text{H}_2 + \text{FeS}$. [19-21] La presenza del Cl nei depositi di corrosione è invece determinata dai batteri ossidanti il Fe, IOB, tali batteri ossidano lo ione ferroso a ione ferrico che reagisce con i cloruri formando FeCl_3 una specie chimica estremamente reattiva che dà luogo per idrolisi alla formazione di acido cloridrico: $\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl}$. [6, 9, 19] E' necessario sottolineare che generalmente i batteri agiscono in modo cooperativo, e la biocorrosione sugli acciai inossidabili è generalmente generata dalla presenza contemporanea di batteri che ossidano il Fe ed il Mn, IOB e MOB, e batteri che riducono i solfati SRB. [8, 9, 20] La porzione di tubo da esaminare è arrivata in laboratorio completamente asciutta, tale condizione non ha reso possibile lo svolgimento delle prove microbiologiche atte a rilevare l'eventuale presenza dei batteri. Tuttavia le analisi FEGSEM-EDS hanno rilevato la presenza nelle aree corrose di materiale organico con una morfologia filamentosa, i filamenti appaiono ricoperti di prodotti di corrosione. (fig. 9) Tale morfologia è tipica dei batteri ossidanti il Fe IOB quali Gallionella. [21]

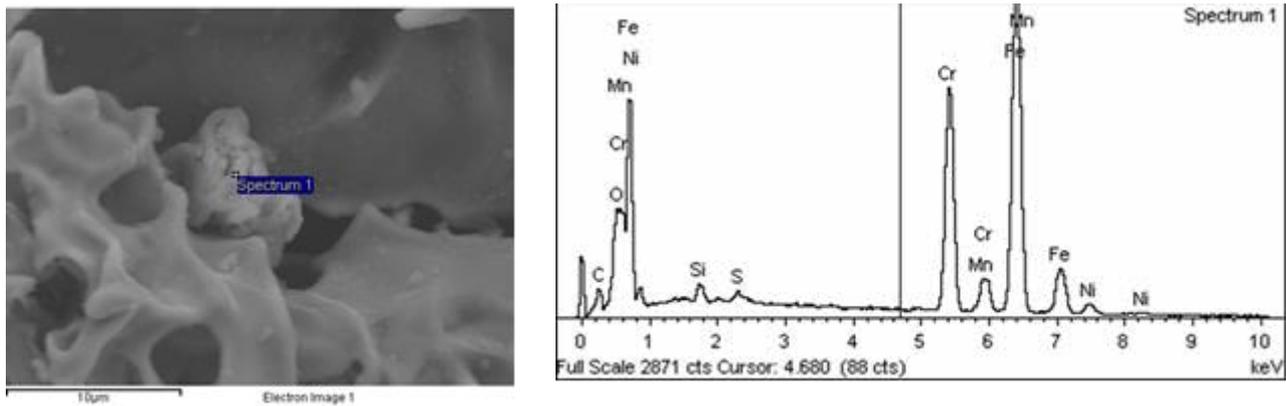


Figura 9. Micrografia FEGSEM di una zona corrosa, si osserva la presenza di agglomerati filamentosi contenenti materiale organico ed inorganico

I risultati dell'analisi chimica dell'acqua di pozzo, costituente il fluido di processo, rilevati da una stazione di monitoraggio localizzata nei pressi dell'industria farmaceutica, sono indicativi di un'acqua non potabile con un contenuto di cloruri inferiore a 100 ppm. [23] Tale tipologia di acqua è considerata compatibile con l'acciaio AISI 304. [1, 2]

Il fenomeno corrosivo descritto presenta tutti gli aspetti microstrutturali tipici di una corrosione battericamente assistita. I metodi impiegati per prevenire l'insorgere di tale tipologia di corrosioni agiscono principalmente sulle condizioni "ambientali" in cui proliferano le forme batteriche ed hanno lo scopo di inibire la crescita e/o l'attività metabolica di questi microrganismi. Possono essere di natura fisica o chimica, spesso impiegati in modalità sinergica e comprendono la rimozione fisica dei depositi, l'uso di biocidi, di rivestimenti protettivi e di inibitori della corrosione (tab.2). [24, 25, 26]

Metodo	Esempio	Modalità di azione	Problemi associati
Fisico	<ul style="list-style-type: none"> • Pulizia manuale • Lavaggio con abrasione • Iniezione di aria o gas 	Rimozione fisica dei depositi	Danno al film protettivo
Chimico	<ul style="list-style-type: none"> • Biocidi • Rivestimenti protettivi • Inibitori della corrosione 	<ul style="list-style-type: none"> • Prevenzione, inibizione o eliminazione dei microrganismi • Formazione di un film protettivo • Formazione di un film protettivo 	Tossicità elevata, in alcuni casi danno al film passivante del metallo

Tabella 2. Metodi utili per il controllo della corrosione battericamente assistita

I biocidi sono generalmente molto tossici ed hanno un elevato impatto ambientale, attualmente sono numerosi gli studi che vedono la loro sostituzione con l'utilizzo di prodotti naturali quali gli estratti di piante con attività antimicrobica quali per esempio l'aglio, la cipolla, il tamarindo, il cumino, la cannella, i chiodi di garofano. I risultati ottenuti sembrano promettenti sia rispetto all'azione antimicrobica che rispetto all'inerzia nei confronti del film passivante metallo. [26]

Conclusioni

Il fenomeno corrosivo esaminato presenta tutte le caratteristiche tipiche di una corrosione battericamente assistita:

- Il processo corrosivo è stato rapido, considerevole e localizzato. La corrosione battericamente assistita rappresenta l'unico meccanismo di corrosione in grado di perforare un acciaio Inox in un ambiente acquoso neutro nell'arco di pochi mesi.
- La corrosione è localizzata nelle saldature. In questo caso la presenza di difetti nelle saldature quali spruzzi o fenomeni di ossidazione a caldo sono stati elementi critici che hanno agito da innesco.
- I crateri di corrosione sono molto piccoli e sono accompagnati da larghe e vaste cavità che si sviluppano sotto la superficie. Nei pressi dei crateri sono presenti dei depositi.
- La corrosione nella zona fusa presenta una morfologia "skeleton type".
- Sono stati riscontrati livelli moderatamente elevati di Cl e S nei prodotti di corrosione

L'influenza dell'attività microbica ha avuto un ruolo decisivo nell'ambito del processo corrosivo sopra descritto, il quale ha determinato la perforazione dei tubi in diversi punti a pochi mesi dal collaudo dell'impianto. La presenza di difetti in saldatura quali spruzzi e ossidazione a caldo ha favorito l'innesco della corrosione battericamente assistita. La totale assenza di sistemi di prevenzione o di controllo ne ha favorito il propagarsi in tempi rapidi.

Bibliografia

- [1] Corrosion ASM handbook vol. 13, ASM handbook, ASM International, pp 798-804
- [2] Corrosion: Fundamentals, testing and protection, vol.13A, ASM handbook, ASM International, pp301-316
- [3] Leena Carpen et al. Unexpected corrosion of stainless steel in low chloride water – microbial aspect Eurocorrosion conference 2009
- [4] Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, ASM handbook, ASM International, pp 1192-1195
- [5] T. Brajkovic et al. "Influence of surface treatment on corrosion resistance of Cr-Ni steel" "Engineering Review vol. 33, issue 2, 2013, pp129-134
- [6] Failure analysis and prevention ASM handbook vol. 11, ASM handbook, ASM International, pp1869-1895
- [7] K.R. Sreekumari, Y. Sato and Y.Kikuchi "Antibacterial metals-A viable solution for bacteria attachment and microbiologically influenced corrosion" "Materials Transactions vol. 46, n.7, (2005), pp1636-1645
- [8] G. Cheng et al. "Localized corrosion behavior of 316L stainless steel in the presence of sulfate reducing bacteria and iron oxidizing bacteria" Materials science and engineering A 443 (2007) pp235-241
- [9] F. Mansfeld et al. "Microbiologically influenced corrosion", vol. 5, Nace International 1997
- [10] J. R. Kearns and S.W. Borenstein "Microbiologically influenced corrosion testing of welded stainless steel alloy for nuclear power plant service water system" "The Nace annual conference, march 1991, Cincinnati Ohio
- [11] "Damage mechanism affecting fixed equipment in the refining industry" Recommended Practice 571 American Petroleum Institute

- [12] I.B. Beech and C.C. Gaylarde "Recent advances in the study of biocorrosion-an overview" *Revista de microbiologia* (1999) 30:177-190
- [13] B. J. Little et al. "Mini-review: the morphology, mineralogy and microbiology of accumulated iron corrosion products" *Biofouling* (2014): 30, 8, 941-948
- [14] R.I.Ray et al "The anatomy of tubercles on steel" *Nace International Corrosion Conference 2011*, March 13-17, Houston, Texas
- [15] M. Atapour et al. "Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel" *Materials and Design* vol. 55, 2014, pp905-911
- [16] S.A. David "Ferrite morphology and variation in ferrite content in austenitic stainless steel welds" *Welding research supplement* 63s, April 1981
- [17] J.J. de Damborenea et al. "Selective dissolution of austenite in AISI 304 stainless steel by bacterial activity" *Materials Letters* 61 (2007) 821-823
- [18] M. Atapour et al. "Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel" *Materials and Design* 55 (2014) 905-911
- [19] G. Cheng et al. "Localized corrosion behavior of 316L stainless steel in the presence of sulphate reducing and iron oxidizing bacteria" *Materials science and engineering A* 443 (2007) 235-241
- [20] C.C. Gaylarde et al. "Recent advances in the study of biocorrosion –an overview" *Revista de Microbiologia* (1999) 30: 177-190
- [21] D. Enning, J. Garrelfs "Corrosion of iron by sulfate reducing bacteria": new view of an old problem" *Applied and Environmental Microbiology* (2014), vol. 80, n.4, pp1226-1236
- [22] T.S. Rao et al. "Carbon steel corrosion by iron oxidizing and sulphate reducing bacteria in a fresh water cooling system" *Corrosion Science* 42, 2000, pp 1417-1431
- [23] Arpa Emilia Romagna "La qualità delle acque sotterranee in provincia di Reggio Emilia", www.arpae.it
- [24] Maiara C. Moura, Emmanuel V. Pontual, Patrícia M. G. Paiva and Luana C. B. B. Coelho "An Outline to Corrosive Bacteria" (FORMATEX 2013)
- [25] Hector A. Videla "Prevention and control of biocorrosion" *International biodeterioration and biodegradation* 49 (2002) 259-270
- [26] P.S. Giuamet, S.G. Gomez de Saravia "Laboratory studies of biocorrosion control using traditional and environmental friendly biocides: an overview" *Latin american applied research* 35:295-300 (2005)

Flow Accelerated Corrosion: case study relativamente ad un GVR di un ciclo combinato dell'Enipower Mantova

P. Traini¹, N. Palumbo², F. Rossetti², G. Pitti³

¹ Enipower Mantova SpA

² Inail - Uot di Brescia

³ Versalis SpA - Stabilimento di Mantova

Sommario

La Flow Accelerated Corrosion (FAC) è uno dei fenomeni di danneggiamento più frequenti che interessano principalmente i Generatori di Vapore a Recupero (GVR) degli impianti termoelettrici di generazione di potenza a Ciclo Combinato. Tale fenomeno, che coinvolge quasi esclusivamente gli acciai al carbonio, è basato su un processo di corrosione elettrochimica, accelerato dall'elevata velocità del fluido primario del ciclo Rankine (acqua surriscaldata o vapore umido). La FAC è nota da molti anni, e altrettanto note sono le azioni da intraprendere, sia dal punto di vista della progettazione e manutenzione predittiva dell'impianto che in termini di controllo e monitoraggio dell'acqua di caldaia: a tale scopo la società Enipower Mantova S.p.A. ha adeguato alle "best practices" in materia, già da vari anni, sia la gestione dell'acqua di caldaia che i programmi di manutenzione ispettiva dei GVR. Tuttavia, su alcune membrature a pressione del banco evaporatore di bassa pressione del GVR, è stata recentemente registrata una sensibile riduzione dello spessore di parete del tubo, causata da FAC.

In seguito ai rilievi e all'individuazione dell'anomalia e del meccanismo di danneggiamento agente, la società ha intrapreso tutte le azioni finalizzate a progettare un intervento di sostituzione dei componenti ammalorati con altrettanti aventi la medesima geometria (spessore e diametro esterno), ma con un livello di affidabilità superiore nei confronti della FAC.

La presente trattazione comprende la rilevazione dei difetti mediante CND, le indagini in campo ed in laboratorio per l'individuazione delle cause della "failure", la ricerca di soluzioni in letteratura scientifica, l'individuazione e l'applicazione della soluzione ottimale secondo le "best practices" per la sostituzione del componente danneggiatosi, chiedendo il benestare all'intervento alla Uot Inail territorialmente competente.

1. Introduzione

Lo stabilimento produttivo Enipower Mantova SpA è costituito, oltre che da una centrale termica tradizionale a combustione tangenziale del 1971, alimentata a gas naturale, con turbina a vapore in contropressione da 56 MW elettrici in condizioni di esercizio nominali, anche da due Cicli Combinati fabbricati e marchiati CE secondo il d.lgs. n. 93/2000 come Insieme e denunciati nel 2005 con Dichiarazione di Messa in Servizio ai sensi dell'art. 6, comma 1, del d.m. 329/04. I Cicli Combinati generano, in funzionamento di piena condensazione, 380 MW elettrici ciascuno.

Ogni Ciclo Combinato è costituito da una turbina a gas, alimentata da gas naturale, da 258 MW elettrici in condizioni ISO, da un Generatore di Vapore a Recupero (GVR) a tre livelli di pressione (bassa, media ed alta), con risurriscaldatore di media pressione ed attraversamento fumi orizzontale, da una turbina a vapore a tre stadi da 130 MW elettrici e da un condensatore ad aria (Air Cooled Condenser). Entrambi i cicli combinati lavorano in assetto cogenerativo, esportando vapore surriscaldato, per uso industriale, verso la rete vapore dell'attiguo stabilimento petrolchimico Versalis SpA, e per uso civile, verso la rete di teleriscaldamento della città di Mantova.

A completamento delle centrali a ciclo combinato ci sono poi i servizi ausiliari composti principalmente dalla stazione di filtrazione e riduzione di pressione del gas naturale per le turbine a gas; dal sistema di stoccaggio e pompaggio dell'acqua demineralizzata di reintegro dei cicli; dal sistema di compressione e stoccaggio dell'aria servizi e strumenti; dal sistema a torri del tipo WET DRY per il raffreddamento dell'acqua a ciclo chiuso delle utenze di ciclo da raffreddare; dal sistema di piping di distribuzione del vapore surriscaldato a bassa e a media pressione.

La fig.1 riporta, in sintesi, lo schema di un Ciclo Combinato, con la rappresentazione degli elementi principali che lo costituiscono (ad esclusione dei sistemi ausiliari).

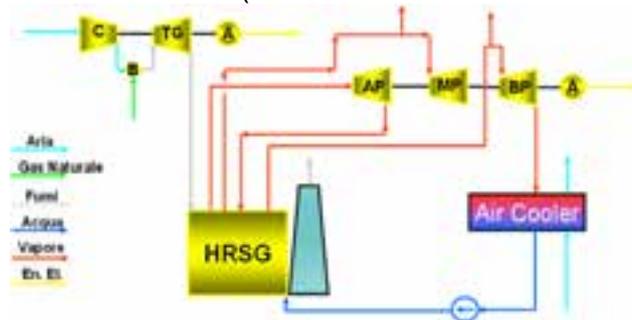


Figura 1. Schema del Ciclo Combinato di Mantova

All'interno del ciclo vapore, il GVR rappresenta il cuore del ciclo combinato, in quanto sfruttando la potenza termica dei fumi di scarico dalla turbina a gas (TG), lo stesso genera poi all'interno di attrezzature a pressione (tubi e recipienti) il vapore surriscaldato per la generazione di potenza della turbina a vapore (TV) e per l'esportazione verso utenze che ne sfruttino la potenza termica per fini impiantistici (petrolchimico e teleriscaldamento). Fatta eccezione per il preriscaldatore di bassa pressione, costruito in acciaio inossidabile, tutte le attrezzature a pressione del GVR (tubazioni, corpi cilindrici, collettori, tubi alettati di scambio, ecc.) sono state fabbricate in acciaio al carbonio, acciaio legato P22 e acciaio martensitico P91. La fig.2 riporta lo schema delle parti in pressione dei GVR con i relativi materiali di costruzione.

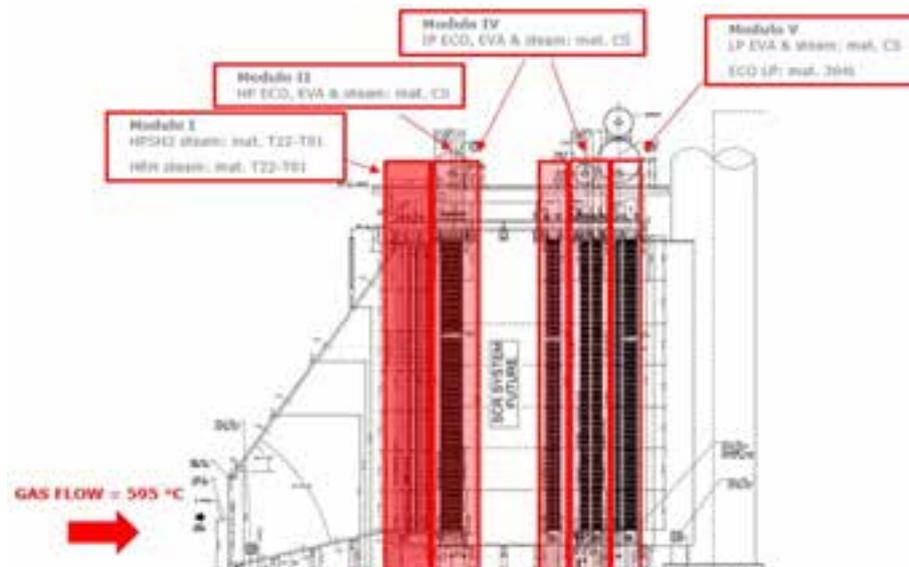


Figura 2. Schema delle parti in pressione dei GVR Enipower Mantova S.p.A. (vista in sezione longitudinale)

La presente trattazione riguarda il danneggiamento occorso per FAC sui 6 tubi di collegamento tra i 3 collettori superiori interni del banco Evaporatore (EVA BP) ed il Corpo Cilindrico della sezione di Bassa Pressione (CCBP), la loro analisi per l'investigazione del meccanismo di danno agente e la conseguente sostituzione con tubi nuovi, ma con

materiale migliorativo e maggiormente resistente. Nella fig.3, è stata evidenziata la posizione dei 6 componenti oggetto della presente trattazione, deputati dal punto di vista funzionale a convogliare il vapore saturo umido in risalita (“tubi risers”), spinto dalla circolazione naturale dai banchi di scambio alettati interni al GVR verso il CCBP esterno.

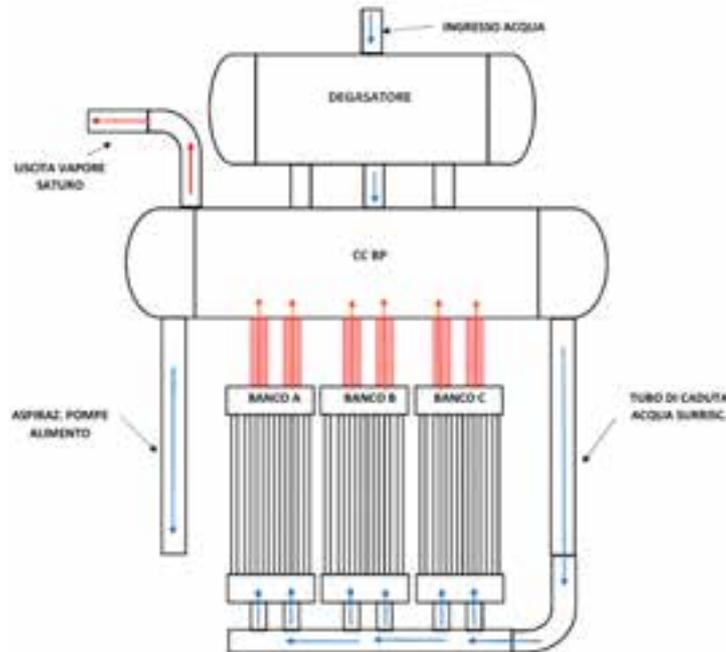


Figura 3. Schema dell'EVABP e posizione dei sei “tubi risers” (vista in sezione trasversale) Dal punto di vista certificativo i tubi risers sono inseriti all'interno dell'EVABP e quindi del GVR come membrane a pressione, progettate secondo la raccolta Ispesl VSG rev.95 ed.1999.



Figura 4. Rappresentazione grafica della certificazione CE dell'insieme GVR

Al fine di poter essere commercializzato, a sua volta il GVR, composto oltre che dai risers anche da altre membrane a pressione marcate CE e non, tra loro collegate per costituire un tutto integrato e funzionale, è stato nella sua interezza sottoposto ad una procedura globale di valutazione di conformità alla direttiva PED, per essere poi marcato CE, come Insieme, mediante l'attestazione di conformità di un Organismo Notificato (fig.4).

2. Il danneggiamento e la sostituzione dei “tubi risers”: dalla comprensione del meccanismo di danno alla soluzione applicata

Nei paragrafi successivi verrà ripercorsa la vicenda dal punto di vista della trattazione tecnica, con l'individuazione e la scelta della migliore soluzione ingegneristica intrapresa per la sostituzione dei 6 tubi danneggiati, col fine di raggiungere un livello globale di sicurezza ed affidabilità superiore agli originari.

2.1 Gli esiti dei CND e la possibile causa del fenomeno: i risultati della failure analysis

Durante una campagna ispettiva di controlli non distruttivi eseguiti sul GVR1, nello specifico effettuando la misura dello spessore di parete dei sei tubi mediante la tecnica ultrasonora (UT), sono state individuate delle aree soggette ad una forte riduzione di spessore.

Di seguito si riportano i dati caratteristici dei componenti danneggiati:

Materiale: ASTM A 106 Gr. B;

Diametro esterno: 273 mm;

Spessore nominale: 9,27 mm;

Sovrasspessore corrosione: 0 mm;

Temperatura di esercizio: 160 °C;

Pressione di esercizio: 6 bar;

Temperatura di progetto: 250 °C;

Pressione di progetto: 10 bar;

Fluido: Vapore d'acqua allo stato saturo umido.

Nella fig.5 è riportata la mappa dei rilievi UT, effettuati esternamente al GVR, suddividendo ciascun tratto di tubo in 13 sezioni, a 50 mm l'una dall'altra, e considerando per ogni sezione 8 generatrici. Dai rilievi è emerso che gli spessori minimi misurati, per ogni tubo, erano collocati nella sezione n.1, ossia quella più vicina al “tetto caldaia”, e quindi ai collettori superiori interni. Man mano che ci si allontanava dai collettori verso il CCBP, lo spessore ritornava a valori prossimi a quello nominale o comunque nell'ambito di un rateo di corrosione accettabile e compatibile con l'“aging” del GVR.

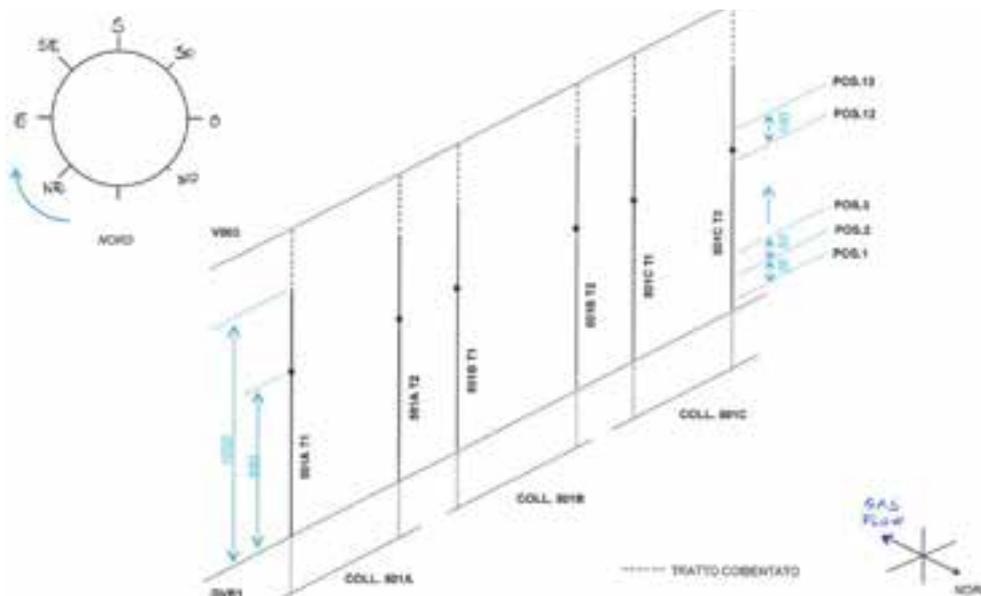


Figura 5. Mappa dei controlli di spessore UT

Nella fig.6 sono rappresentati i valori misurati in corrispondenza degli 8 quadranti della sezione n. 1 dei 6 “tubi risers”, in confronto allo spessore nominale di 9,27 mm. Da una lettura attenta del grafico di fig.6, si può notare come i 2 tubi del collettore A, quelli in prossimità del tubo di aspirazione delle pompe alimento, abbiano avuto una corrosione accettabile (considerando ovviamente lo spessore nominale da disegno e senza tener conto

della tolleranza di fabbricazione e della misura effettiva del tubo al momento dell'installazione). Al contrario, sugli altri 4 tubi sono stati misurati spessori tutti al di sotto dello spessore nominale, col valore minimo rilevato (pari a 5,6 mm) sul tubo n. 2 del collettore B e col valore minimo della media degli spessori sul tubo n. 2 del collettore C (quello più vicino al tubo di caduta del CCBP).

In vista dell'imminente fermata di manutenzione del GVR1, è stato programmato ed eseguito un intervento di sostituzione dei 6 tubi danneggiati, chiedendo il benestare all'intervento all'INAIL UOT di Brescia mediante la presentazione di un progetto di riparazione migliorativo rispetto a quello originario ed i cui contenuti verranno illustrati nei paragrafi successivi.

Sul tubo n. 2 del collettore C sostituito, quello mediamente più corroso, sono state condotte una serie di analisi di laboratorio volte a comprendere le cause ed i meccanismi che hanno indotto una riduzione di spessore così repentina (nel punto più danneggiato dell'ordine dei 0,3 mm/anno).

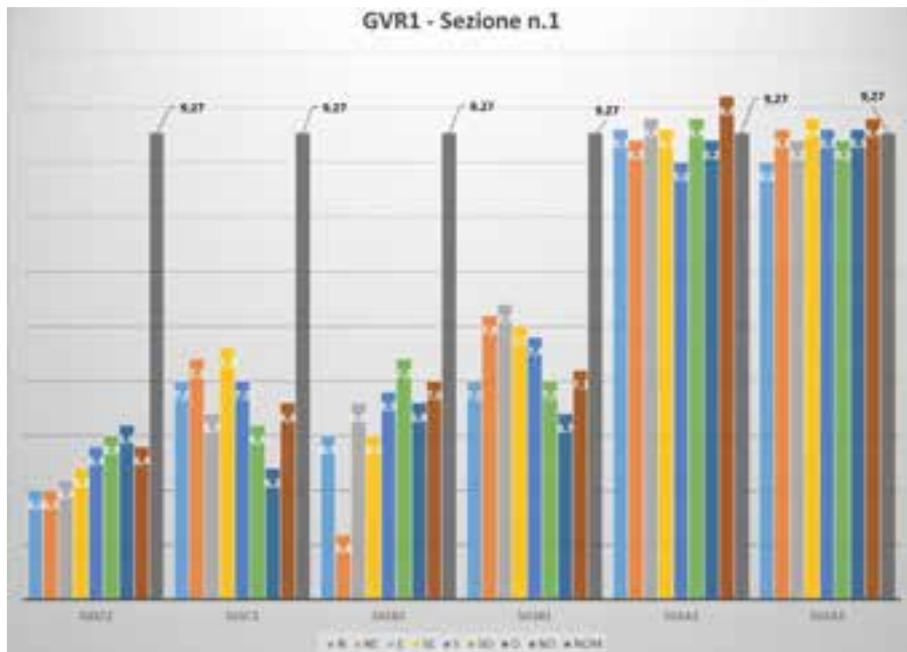


Figura 6. Misura degli spessori relativamente alla sola sezione 1

Le analisi effettuate sul campione di tubo sono state le seguenti:

a) Esame visivo e mediante stereomicroscopio

a.1) la superficie esterna ha presentato corrosione generalizzata di lieve entità, con depositi di prodotti di corrosione stratificati e incrostazioni concentrate in prossimità della saldatura tra tubo e pannello casing superiore del GVR. La superficie interna, con aspetto a "buccia d'arancia" (orange peel), ha presentato evidenti segni di corrosione/erosione a forma di "ferro di cavallo" (horseshoes or scallops) come mostrato dall'esame visivo e dalla stereomicrografia di fig.7, attribuibili con molta probabilità al fenomeno della FAC e tutti orientati nella direzione del flusso.



Figura 7. Stereomicrografia superficie interna lato collettore: presenza di "horseshoes" tipiche da FAC

a.2) la sezione del tubo lato corpo cilindrico BP si è presentata con un profilo regolare dello spessore residuo; sul lato collettore era caratterizzata, invece, da una sezione a profilo ellittico (fig.8) dove, diametralmente opposte, si sono potute osservare le due zone più spesse (Y) e le due zone più assottigliate (X).

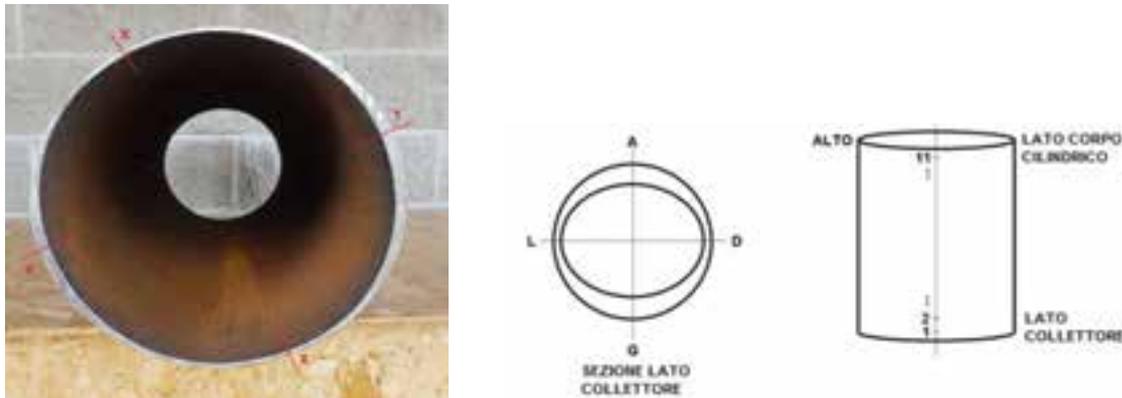


Figura 8. Vista in sezione dello spessore del tubo lato collettore e reticolo degli spessori misurati sul campione di tubo

b) Rilievi spessimetrici mediante UT

sono state effettuate misure di spessore eseguendo un reticolo con un passo circonferenziale pari a 12 generatrici ed un passo longitudinale pari a circa 70 mm (11 sezioni totali e per un totale di 132 punti).

Tutti i valori, dalla sezione lato collettore alla sezione lato corpo cilindrico, sono risultati inferiori al valore di spessore nominale pari a 9,27 mm: in particolare, come si può osservare dal grafico di figura 9, si rileva un diverso comportamento della corrosione lungo le dodici generatrici, dalla sezione lato collettore a quella lato opposto collettore, verso il CCBP.

Si possono distinguere 2 diversi andamenti: ad esempio lungo la generatrice H (lo stesso vale per B, C, D, I, L, M), che ha lo spessore minimo nella sezione lato collettore, si verifica un aumento lineare dello stesso verso il lato opposto collettore; mentre per la generatrice F (insieme ad A, E, G, N), il valore minimo di spessore è collocato a metà del tubo, con i valori massimi alle estremità. Ciò denota come l'azione corrosiva sia stata senza dubbio supportata, ed enfatizzata, da una componente erosiva, legata alle vorticosità del fluido in regime turbolento e determinate dal repentino cambio di direzione del vapore dai tubi del collettore verso i tubi risers.

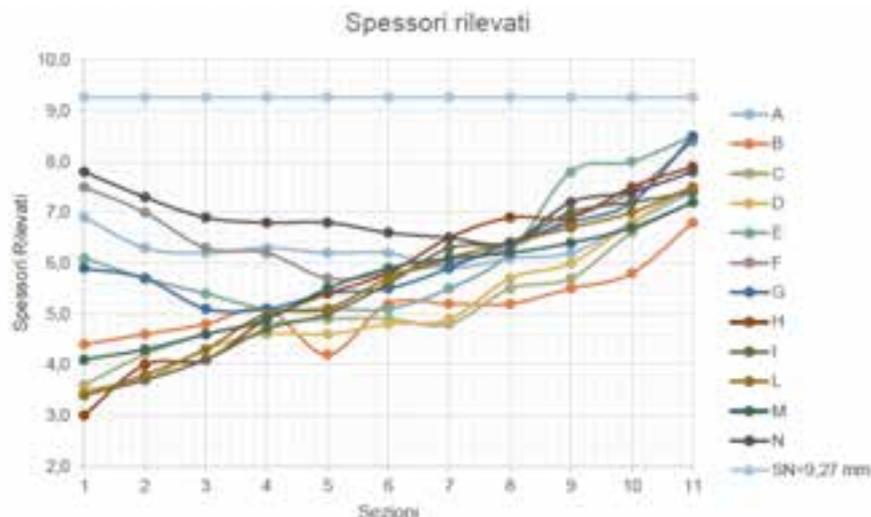


Figura 9. Andamento degli spessori per le 11 sezioni e lungo le 12 generatrici

c) Analisi metallografica secondo ASTM E3-E407:

l'analisi metallografica è stata condotta su due campioni prelevati sulla sezione lato collettore, rispettivamente in corrispondenza della parte più spessa e della parte assottigliata della sezione. Per entrambi i campioni, sulla superficie interna è stato osservato il fenomeno corrosivo/erosivo tipico della FAC ed identificabile dall'andamento "ondulato" della superficie interna e dall'assenza di prodotti di corrosione.

La microstruttura è risultata essere regolare, composta da grani poligonali di ferrite, più grani di perlite uniformemente distribuiti.



Figura 10. Superficie interna: crateri di cavitazione con assenza di ossido e microstruttura materiale base

d) Esame microsclerometrico

L'esame microsclerometrico, effettuato con microdurometro DuraScan EmcoTest e metodo HV1 – errore $\pm 0.1\%$, ha dato valori di durezza in linea per un acciaio al carbonio tipo ASTM A106 Gr. B ($R_m = 415 \text{ N/mm}^2$; durezza 138 HV).

e) Analisi alla microsonda elettronica a raggi x con metodo EDS

L'analisi elementare mediante spettroscopia a dispersione di energia (EDS) è stata effettuata utilizzando un microscopio elettronico a scansione equipaggiato con microanalisi in dispersione di energia EDS. L'analisi effettuata sul materiale base ha riscontrato una composizione elementare tipica di un acciaio al carbonio tipo ASTM A106 Gr. B (fig. 11).

Si	P	S	Mn	Fe	Total
0.50	0.016	0.017	0.76	98.707	100.00

Figura 11. Risultati quantitativi della spettroscopia sul materiale base del tubo, lato interno

2.2 Conclusioni delle indagini

In base alle risultanze delle indagini condotte, si può sostenere che il fenomeno corrosivo che ha interessato il "tubo riser" sottoposto ad esame sia da imputare al fenomeno di corrosione da flusso accelerato bifase acqua/vapore (two-phase FAC), caratterizzata visivamente da crateri che ricordano le tipiche impronte a ferro di cavallo (horseshoes o scallops) tutte orientate nella stessa direzione (quella del flusso) e dall'aspetto a buccia d'arancia (orange peel) presenti sulla superficie interna.

Gli spessori rilevati, misurati sullo spezzone di tubo pervenuto, hanno mostrato un andamento non lineare: in particolare, assumendo di considerare solo 4 generatrici del tubo diametralmente opposte e partendo dalla sezione lato collettore con valori massimi (n°2 generatrici opposte) e valori minimi di spessore rilevati (n°2 generatrici opposte), si può notare come lo spessore segua due differenti andamenti (vedi grafico di figura 9). Le 2 generatrici opposte che hanno valori minimi sono caratterizzate da un andamento lineare di aumento di spessore, dalla sezione lato collettore alla sezione lato corpo cilindrico. Le 2 generatrici opposte, che hanno valori di partenza massimi, hanno il minimo di spessore posto a circa la metà della lunghezza dello spezzone di tubo. Ciò denota, probabilmente,

un moto turbolento e pseudo-elicoideale del flusso all'interno del "tubo riser", attivando così il fenomeno di FAC nelle zone lungo il tubo laddove, localmente, il flusso è disturbato da vorticosità.

La FAC è un fenomeno corrosivo, accelerato dalla velocità del fluido che scorre nel tubo, che si manifesta con la riduzione di spessore di tubazioni e componenti in acciaio al carbonio per progressiva dissoluzione della magnetite (Fe_3O_4), che generalmente funge da ossido protettivo, in regime di flusso turbolento, fino alla eventuale foratura o rottura catastrofica. La velocità di riduzione dello spessore può raggiungere, nei casi peggiori, anche il valore di 3 mm/anno. Condizione necessaria per il suo verificarsi è quindi la presenza di elevate velocità di flusso e di cambi di direzione e/o ostacoli al flusso (curve, T, ingresso serbatoi, orifici, ecc.): tali condizioni di "disturbo" ostacolano la rigenerazione della magnetite. Infatti, in condizioni "normali", il processo di passivazione delle tubazioni in acciaio al carbonio è un fenomeno chimico dinamico in cui la quantità di magnetite che continuamente si forma è superiore a quella che si solubilizza dando ioni Fe^{2+} . Nel caso invece dell'azione del fluido ad elevate velocità, aumenta il gradiente di dissoluzione degli ioni Fe^{2+} nel fluido, ostacolando il completamento della reazione di passivazione mediante la formazione della magnetite Fe_3O_4 .

Dal punto di vista chimico, le fasi della FAC, rappresentate in fig.12, sono [1]:

- 1) l'ossidazione del metallo ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) sull'interfaccia metallo/ossido;
- 2) diffusione degli ioni Fe^{2+} attraverso lo strato di ossido all'interfaccia col fluido;
- 3) dissoluzione degli ioni Fe^{2+} in FeOH^+ all'interfaccia col fluido;
- 4) diffusione del FeOH^+ verso il bulk del fluido;
- 5) trasporto nel bulk del fluido degli ioni FeOH^+ ;
- 6) ulteriore ossidazione del ferro ($\text{FeOH}^+ \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$) e particelle sospese trasportate via.

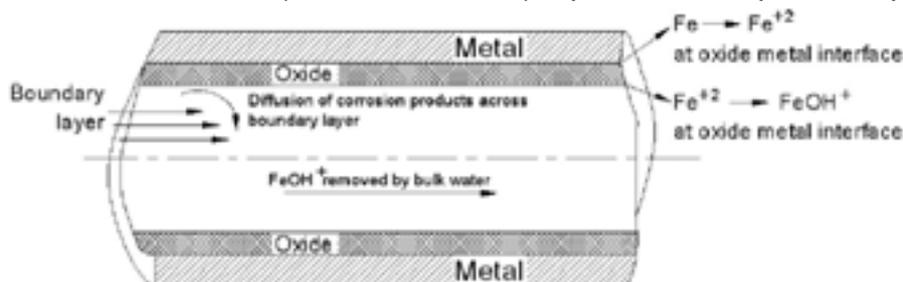


Figura 12. Rappresentazione schematica del processo elettrochimico della FAC

Come ormai consolidato nella letteratura scientifica, la FAC e l'erosione/corrosione (E/C) possono essere facilmente confuse, ma sono due fenomeni di danneggiamento differenti, i cui effetti sono però molto simili. Entrambi i tipi di danneggiamento comportano la distruzione del film di ossido protettivo sulla parete interna del tubo. La rimozione dello strato di ossido si riferisce generalmente ad un processo erosivo, a cui segue un'ossidazione elettrochimica o un attacco corrosivo del metallo sottostante. Le differenze tra FAC ed E/C coinvolgono il meccanismo mediante il quale viene rimosso il film protettivo dalla superficie metallica. Nella E/C, il film viene rimosso meccanicamente dalla superficie; al contrario, nella FAC, l'ossido si solubilizza nel fluido o ne viene impedita la formazione, permettendo la corrosione del metallo non protetto. Non sono da escludere condizioni che permettono il verificarsi simultaneo di entrambi i fenomeni, FAC ed E/C.

La FAC può verificarsi sia in condizioni di flusso bifase (ad es. vapore saturo umido) sia in condizioni di flusso monofase. Nel caso di flusso bifase, la compresenza del vapore (maggiore volume specifico e quindi maggiore velocità) aumenta l'effetto erosivo; rimane tuttavia essenziale la presenza della fase acquosa (goccioline d'acqua) per la dissoluzione degli strati di ossido che proteggono il metallo base. Pertanto, nel caso di vapore secco, la FAC non agisce.

Nella FAC bifase, il meccanismo di dissoluzione dell'ossido è simile alla FAC monofase, ma questo tipo di danneggiamento si verifica nelle tubazioni che trasportano vapore umido o nel caso di vapore di flashing. La presenza di acqua nel vapore è essenziale per la dissoluzione dell'ossido (reazione elettrochimica). La velocità della FAC bifase varia con la qualità del vapore, che è funzione della quantità di umidità nello stesso. La fase liquida, in una tubazione in cui fluisce vapore umido, scorre in uno strato sottile vicino alla parete interna del tubo, mentre la fase vapore scorre nel nucleo del flusso e si muove molto più velocemente rispetto alla fase liquida, per la differente densità. La differenza di velocità crea forze di taglio all'interfaccia liquido vapore. Se queste forze sono superiori alla forza di tensione superficiale all'interfaccia, un po' di liquido sarà trascinato dal vapore e si allontanerà dallo strato vicino alla parete. Questo liquido formerà delle goccioline che saranno intrappolate e accelerate nel nucleo del vapore e che incideranno il film di ossido sulla superficie interna del tubo, rompendolo o favorendone la dissoluzione, esponendo così il metallo all'attacco corrosivo.

Una variante della FAC bifase è la Liquid Droplet Impingement (LDI), nella quale le goccioline di acqua contenute nel vapore, nel caso di cambi repentini di direzione (come nel caso delle curve a 90°), urtano direttamente la parete interna del tubo e causano una LDI localizzata. Questo accade a velocità delle goccioline di acqua molto elevate (>200 m/sec), altrimenti a velocità più basse si verifica la FAC, con il medesimo meccanismo illustrato sopra. La fig.13 raffigura i 3 tipi di danneggiamento su esposti [1].

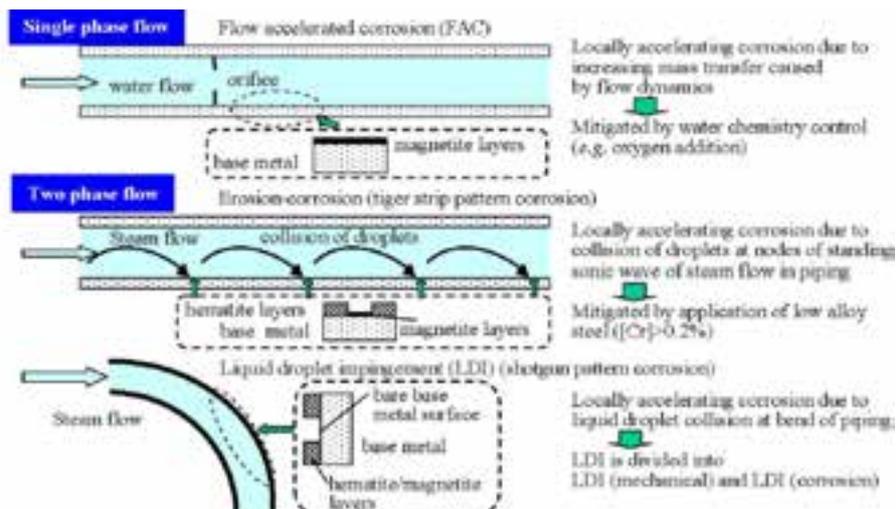


Figura 13. FAC monofase, bifase e LDI

Ad oggi, dopo la fatica termica, la FAC è la seconda causa di avaria più importante nei GVR ed è causa di più del 50% delle rotture occorse nei cicli combinati. Nella fig. 14 si riportano una serie di foto di componenti danneggiatisi per FAC [2].

Ritornando ai fattori che influenzano il fenomeno della FAC, questi possono essere sintetizzati in:

- 1) Fluidodinamici: velocità del fluido, temperatura del fluido, geometria del componente;
- 2) Chimici: PH del fluido, ossigeno disciolto, concentrazione di deossigenante, potenziale redox;
- 3) Fisici: titolo del vapore;
- 4) Materiale: tipo di acciaio, rugosità e porosità interna.



Figura 14. Componenti soggetti a FAC ed ingrandimento delle aree corrose

Concentrandosi sui fattori principali, l'aumento della velocità del fluido influisce, incrementandolo, sul processo di solubilizzazione degli ossidi protettivi, in quanto favorisce l'asportazione ed il trasporto di materia nella fase liquida (fig.15 e 16). In aggiunta, le discontinuità geometriche che modificano il regime fluidodinamico, introducendo vorticosità o turbolenze, influiscono sulla suscettibilità alla FAC (fig.15: valori più elevati del fattore di forma significano maggiore influenza sulla FAC). Nella fig. 16, le turbolenze indotte dalla geometria del tubo favoriscono la disgregazione del film di magnetite, la dissoluzione degli ioni Fe^{2+} e quindi la corrosione del metallo [2], [3].

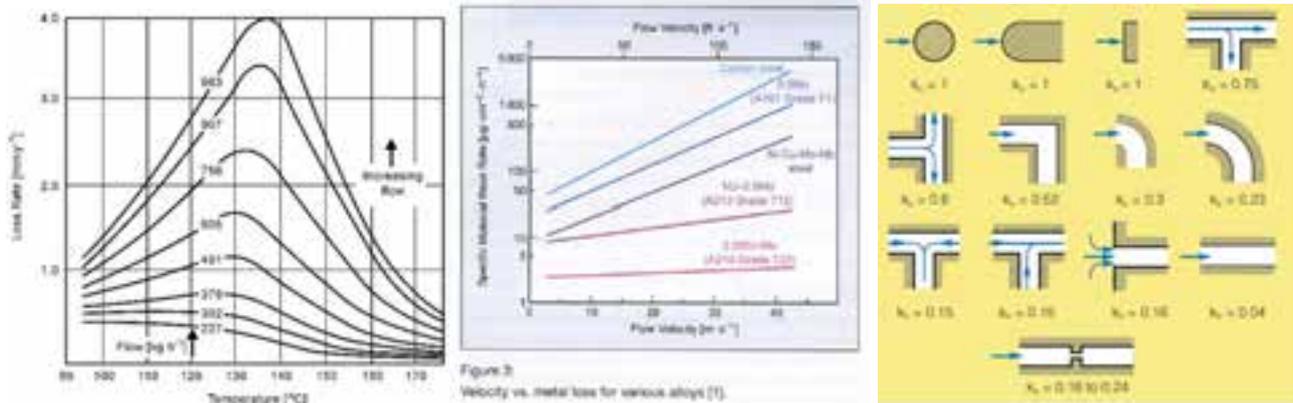


Figura 15. Effetti della velocità (anche per diversi materiali) e dei fattori geometrici sulla FAC

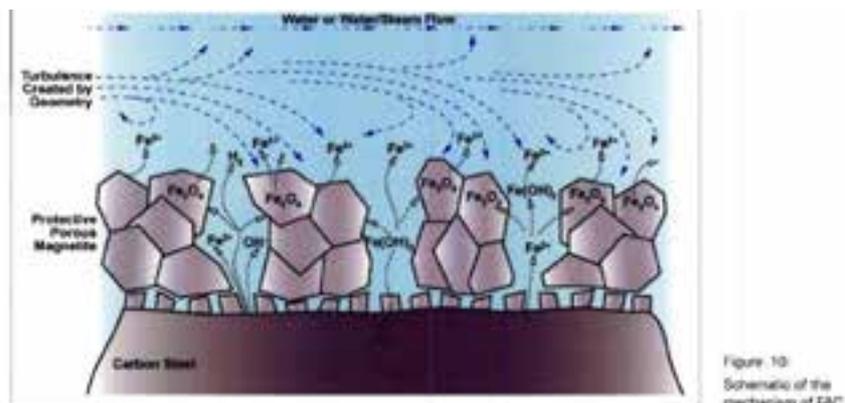


Figura 16. Effetti della geometria sul meccanismo della FAC

La dissoluzione del ferro è fortemente influenzata non solo dalle condizioni riducenti del fluido e quindi dal potenziale redox, ma anche dal pH e dalla temperatura della soluzione. La corrosione raggiunge un massimo tra i 150°C e i 170°C, pertanto gli evaporatori di bassa pressione dei GVR sono particolarmente sensibili (fig.17) [3], [4].

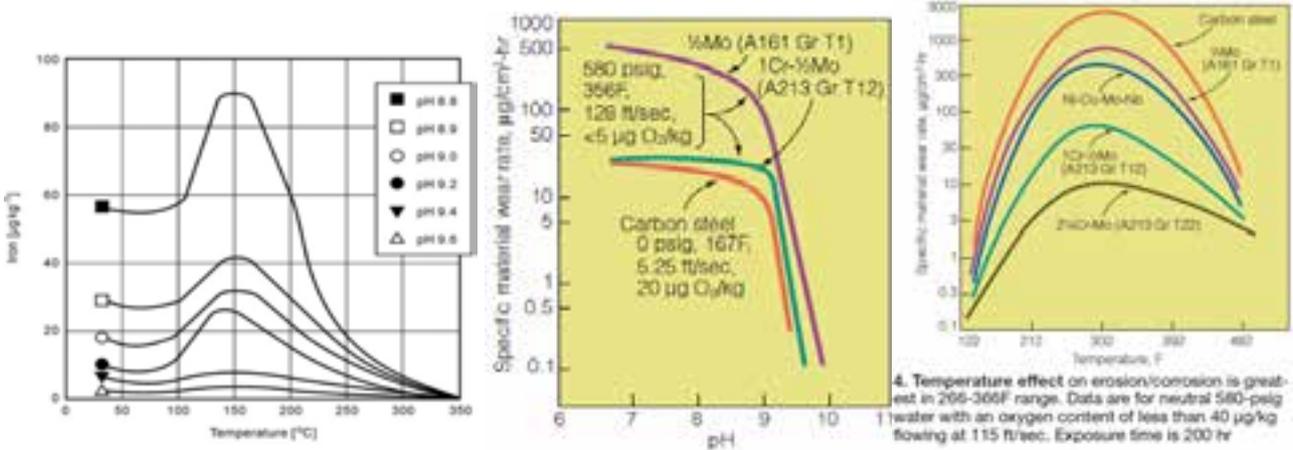


Figura 17. Effetti del pH e della temperatura sulla FAC

In ultimo, ma non meno importante, alcuni elementi di lega che costituiscono l'acciaio, in particolare il Cr, Mo, Cu, possono dare benefici significativi contro la FAC. Tra questi elementi, quello che offre maggiore resistenza è il Cr, a tal punto che gli acciai inossidabili austenitici sono praticamente immuni alla FAC. Dal grafico di fig.18 si può notare come già una percentuale di Cr pari allo 0,4 % possa ridurre drasticamente la velocità di corrosione [2]. Pertanto già la scelta di un acciaio al carbonio legato del tipo A335 Gr. P11, con un contenuto di Cr pari a circa 1,25%, può risultare vincente rispetto ad un acciaio al carbonio.

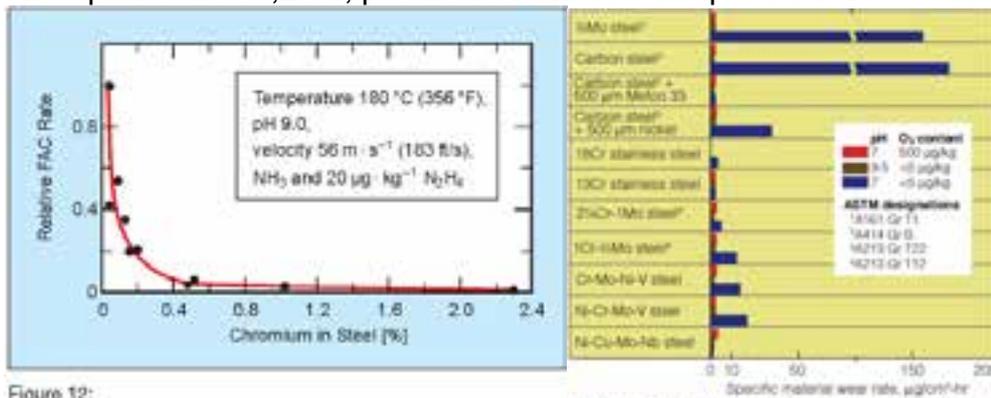


Figure 12: The effect of chromium on the rate of single-phase FAC. (Source: J. Ducreux [62]).

3. Wear rate of various materials from erosion/corrosion in 356°F water at 580 psig moving at 65.6 ft/sec is shown for three typical pH/oxygen combinations

Figura 18. Effetti della % di Cr e del tipo di acciaio sulla velocità di corrosione

2.3 Il progetto di riparazione dei 6 tubi risers in compliance con le “best practices” contro la FAC

Noto il meccanismo di danno maggiormente probabile che ha agito sui 6 tubi risers danneggiatisi sul GVR1, nella preparazione del progetto di riparazione si è scelto di sostituire il materiale dei nuovi tubi, passando dall’ASTM A106 Gr. B all’ASTM A335 Gr. P11. La scelta è ricaduta sul P11, anziché su materiali con più elevati tenori di Cr (tipo P22 o P91), perché tale materiale costituisce un ottimo compromesso tra resistenza all’usura da FAC e compatibilità, in termini di saldabilità, con l’A106 Gr. B.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le composizioni chimiche e le caratteristiche di resistenza meccanica dei due acciai secondo le schede tecniche dei materiali ASTM estratte dal documento Ispesl prot. n.002999 del 12/03/2002, da cui si evince che per il P11 la percentuale dell’elemento Cr è maggiore, e quindi il materiale offre una maggiore resistenza all’azione di danneggiamento della FAC. Dalla fig.18 (ultimo grafico a destra), si può notare come tra un acciaio al carbonio ed il T12 (materiale molto simile al T11), alla temperatura di massima corrosione/erosione di 302 °F, ci sia una spiccatissima differenza di velocità di usura a favore del T12, maggiormente resistente.

Materiale	Composizione chimica %									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cu	Cr	Mo	V
A106	Min	0,29			0,1					
	Max	0,3	1,06	0,035	0,035		0,4	0,4	0,4	0,15
P11	Min	0,05	0,3			0,5			1	0,44
	Max	0,15	0,6	0,025	0,025	1			1,5	0,65

Tabella 1. Composizione chimica da tabelle ISPEL degli acciai A106 Gr. B e A335 G. P11

Materiale	Caratteristiche meccaniche N/mm ²		
	RM _{min}	R _{p(0,2)min} a T amb.	R _{p(0,2)min} a 250°C
A106	415	240	197,1
P11	415	205	178,5

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche da tabelle Ispesl a T amb. e a T progetto (TS=250°C) degli acciai A106 Gr. B e A335 G. P11

Dal punto di vista però della resistenza meccanica, a livello tabellare il P11 presenta, sino alla temperatura di progetto, dei valori di σ ammissibili inferiori a quelli dell'A106 Gr. B. Pertanto, in fase di acquisto dei nuovi tubi in P11 è stato richiesto espressamente un materiale che avesse caratteristiche meccaniche, sia a temperatura ambiente, che a quella di progetto, superiori a quelle dell'A106 Gr. B di costruzione dei componenti originari. Nelle Tabelle 3 e 4 è riportato il confronto tra il materiale P11 acquistato e l'A106 Gr. B.

Materiale	Composizione chimica %										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cu	Cr	Mo	V	
A106	Min	0,29			0,1						
	Max	0,3	1,06	0,035	0,035		0,4	0,4	0,4	0,15	0,08
P11 (acquistato)		0,13	0,41	0,009	0,001	0,63	0,06	0,08	1,23	0,52	0,4

Tabella 3. Composizione chimica degli acciai A106 Gr. B e A335 G. P11 (tubo acquistato)

Materiale	Caratteristiche meccaniche N/mm ²			
	RM _{min}	R _{p(0,2)min} a T amb.	R _{p(0,2)min} a 250°C	R _{p(0,2)min} a 500°C
A106	415	240	197,1	NA
P11 (acquistato)	491	328		223

Tabella 4. Caratteristiche meccaniche da tabelle Ispesl a T amb. e a T progetto (TS=250°C) degli acciai A106 Gr. B e A335 G. P11 (tubo acquistato)

In tal modo, eseguendo una verifica di stabilità dell'intero banco evaporatore (sia in prova idraulica che in progetto) ed applicando il medesimo codice di calcolo utilizzato in fase di costruzione e certificazione (Raccolta VSG rev.95 ed.1999), nonché le stesse sollecitazioni indotte sui tubi risers dalla pressione interna e dai carichi esterni, si è potuto ottenere con la riparazione mediante cambio di materiale un "coefficiente globale di sicurezza" maggiore di quello originario utilizzato dal fabbricante (rif. Lettera circolare dell'Ispesl n. 14/05 dal titolo "Applicazione del d.m. 329/04 di attuazione dell'Art 19 del d. lgs. 93/2000 – Chiarimenti e precisazioni sulle "Riparazioni" e Lettera circolare dell'Ispesl n. 161/07 dal titolo "Procedura specifica per la riparazione, mediante sostituzione di membrature di ricambio, di una attrezzatura a pressione – Rifer. Circolare Ispesl n. 14/05").

Il medesimo risultato, lo si sarebbe potuto ottenere mantenendo il materiale originario A106 Gr. B ed aumentando lo spessore di parete dei nuovi tubi fino a raggiungere il medesimo "coefficiente globale di sicurezza" della membratura originaria. In realtà però, questo approccio sarebbe stato iniquo nei confronti della FAC per due ragioni:

- 1) aumentando lo spessore, sarebbe aumentato il diametro interno e quindi la velocità del fluido, con conseguente aumento della velocità di corrosione da FAC (come già ampiamente illustrato al paragrafo precedente);
- 2) senza cambio di materiale, non avendo apportato migliorie metallurgiche che contrastassero il fenomeno della FAC, con l'aumento dello spessore il rateo di

corrosione sarebbe rimasto invariato, procrastinando solo leggermente il tempo per raggiungere lo spessore minimo resistente della membratura.

D'altronde, qualora si intendesse il “coefficiente globale di sicurezza” espresso dalla circolare Ispesl 14-05, non come parametro di sicurezza al punto zero di installazione della membratura, ma, appunto in senso “globale”, come coefficiente dinamico nel tempo e correlato all’esercizio dell’attrezzatura GVR, è facilmente dimostrabile come pur utilizzando le caratteristiche meccaniche tabellari del P11, questo nel tempo presenti delle prestazioni in termini di sicurezza superiori rispetto all’A106 Gr. B. A tal uopo, è stato condotto uno studio del tipo “Life Time Extension” che dimostrasse in base ai rilievi in impianto (CND), ai dati di esercizio e alla letteratura e ricerca scientifica in materia [3], come anche basandosi sui valori “teorici” degli ammissibili, il P11 sia più resistente alla FAC nel tempo rispetto all’A106 Gr. B. Le fasi dello studio [5] sono state le seguenti:

- 1) individuazione dei carichi e quantificazione delle sollecitazioni agenti sui tubi in condizioni di esercizio, progetto, e prova idraulica;
- 2) determinazione delle σ ammissibili in condizioni di esercizio, progetto e prova idraulica tratte dalle schede tecniche Ispesl per i due materiali: P11 e A106 Gr. B;
- 3) calcolo, in esercizio, progetto e prova idraulica, dei fattori di utilizzo (FU) definiti come rapporto tra sollecitazione complessiva agente (S_{app}) e la sollecitazione massima ammissibile (S_{amm}): $FU = S_{app} / S_{amm} \times 100$ (1)
- 4) sulla base dei dati operativi di esercizio (temperatura, pressione, contenuto di ossigeno, pH, velocità del fluido), e di pubblicazioni scientifiche in materia di FAC, determinazione del rapporto “teorico” tra la velocità di FAC del P11 e quella dell’A106 Gr. B. La velocità di FAC è espressa in $\mu g/(cm^2 \cdot h)$. Tale rapporto, denominato Fattore di Correzione Globale (FCG) è risultato pari a $FCG = 0,0845$;
- 5) dai rilievi di spessore effettuati in impianto mediante la tecnica UT, stima della velocità di FAC “reale” nelle 100.000 h di esercizio del tubo in A106 Gr. B, risultata pari a $19,8 \mu g/(cm^2 \cdot h)$;
- 6) moltiplicando il fattore FCG per la velocità di FAC del tubo in A106 Gr. B pari a $19,8 \mu g/(cm^2 \cdot h)$, si è ottenuta la velocità di FAC per il P11 pari a $1,6731 \mu g/(cm^2 \cdot h)$;
- 7) calcolo del rateo di corrosione per i due acciai, pari a $2,55 \times 10^{-5} mm/h$ per l’A106 Gr. B e $0,215 \times 10^{-5} mm/h$ per il P11;
- 8) poiché i due materiali presentano dei ratei di corrosione da FAC differenti, diversa sarà anche l’evoluzione temporale dei FU per i due acciai, in quanto l’A106 Gr. B perderà spessore (con conseguente variazione anche del diametro) più velocemente rispetto al P11, e pertanto le sollecitazioni complessive S_{app} avranno un aumento più ripido per l’A106 Gr. B rispetto al P11. Da qui, la costruzione delle due curve del FU nel tempo per i due acciai, nelle condizioni di esercizio (fig.19).

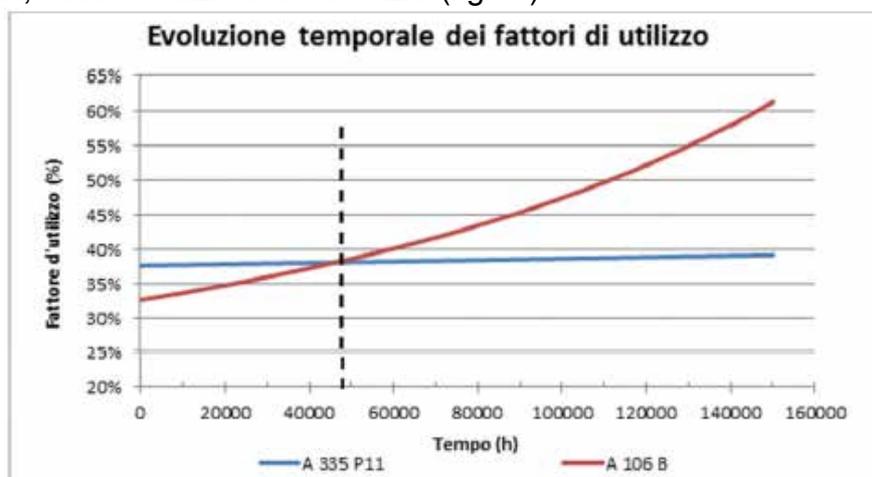


Figura 19. Andamento nel tempo dei FU per l’A106 Gr. B ed il P11

Dalla lettura del grafico, si evince che la diversa sensibilità alla FAC degli acciai A106 Gr. B e A335 P11, implica che i fattori di utilizzo dei “tubi risers” dell’Evaporatore di bassa pressione realizzati con i due acciai variano nel tempo con velocità diverse. In particolare, intorno alle 50.000 ore di esercizio, il fattore di utilizzo di un “riser” in A335 P11, inizialmente più elevato, diventa inferiore a quello di un “riser” in A106 Gr. B, rendendo possibile un prolungamento della vita di esercizio ben oltre la vita di progetto.

Si può infine notare come, sempre in riferimento al solo meccanismo di danneggiamento indotto dalla FAC, il Fattore di utilizzo dell’A335 P11 rimanga pressoché costante durante tutta la vita utile di progetto delle membrature (“risers”), mentre per l’A106 Gr. B la vita teorica di progetto è limitata nel tempo (come per altro è stato dimostrato dai rilievi sul campo).

3. Conclusioni

Il presente lavoro ha voluto illustrare l’approccio critico con cui la società Enipower Mantova SpA, a fronte di un problema rilevato su un componente critico di impianto, ha effettuato tutte le analisi di campo e di laboratorio, nonché le ricerche documentali in materia scientifica, per individuare la causa e quindi la migliore soluzione ingegneristica in termini di sicurezza, affidabilità e durabilità per la sostituzione del componente.

Nel caso specifico, il meccanismo di danneggiamento diagnosticato è stato quello della FAC, fenomeno corrosivo molto severo che per quanto noto e studiato ormai da molti anni, presenta ancora aspetti e caratteristiche molto complesse, soprattutto perché sono molteplici i parametri che lo influenzano. Poiché tali fattori non coinvolgono solo gli utilizzatori (gestione della chimica dell’acqua di caldaia, piani di manutenzione ispettiva, assetti di esercizio), ma anche, e soprattutto, i progettisti/fabbricanti (scelta dei materiali, delle configurazioni geometriche e fluidodinamiche dell’impianto) e gli specialisti di manutenzione/service (società di servizi per la gestione della chimica dell’acqua di caldaia), l’auspicio è che la comunità industriale e scientifica nazionale, come fatto in altri paesi tra cui gli USA già da parecchi anni, affrontino il problema in maniera organica e comune.

Bibliografia

- [1] Vivekanand Kain, “Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies”, *1st International Conference on Structural Integrity, ICONS-2014*.
- [2] R. Barry Dooley, “Flow Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle/HRSG Plants”, *Power Plant Chemistry GmbH, 2008*.
- [3] Otakar Jonas, “FAC and cavitation: Identification, assessment, monitoring, prevention”, *Combined Cycle Journal, 2004*.
- [4] Bred Bucker, “Control of Flow-Accelerated Corrosion in Steam Generators”, *73rd Annual International Water Conference, 2012*.
- [5] Carlo Fossati, “Centrale a Ciclo Combinato Mantova - Confronto tra i fattori di utilizzo dei vecchi e nuovi “Risers” dell’EVA LP”, Soncino, 2018.
- [6] Decreto Ministeriale n. 329 del 01/12/2004 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.”
- [7] Lettera circolare Ispesl n. 14/05 “Applicazione del d.m. 329/04 di attuazione dell’Art. 19 del d.lgs. 93/2000 – Chiarimenti e precisazioni sulle “Riparazioni”.
- [8] Lettera circolare Ispesl n.161/07 “Procedura specifica per la riparazione, mediante sostituzione di membrature di ricambio, di una attrezzatura a pressione - Rif. Circ. Ispesl n. 14/05”.
- [9] Schede tecniche dei materiali ASTM: documento Ispesl prot. n.002999 del 12/03/2002.
- [10] Raccolta Ispesl VSG rev.1995 “Specificazioni tecniche applicative del d.m. 21 novembre 1972 per la verifica di stabilità per i generatori di vapore d’acqua”, ed. 1999.

Verifica secondo API 579 - Fitness for service - dell'idoneità al mantenimento in esercizio di un reattore per hydrocracking con indicazione di un difetto planare propagato dalla placatura inossidabile interna nel materiale base

F. Perini¹, S. Sarti², S. Cavalleri², M. Camposaragna²

¹ ATB Riva Calzoni Spa

² EnginSoft Spa

Sommario

Per considerazioni economiche, di cost-saving, la valutazione dell'idoneità al mantenimento in servizio di apparecchiature e impianti è un tema di rilevante interesse e importanza.

Tale valutazione è particolarmente critica nel settore delle apparecchiature in pressione dove l'esigenza si combina considerazioni di sicurezza data l'estrema criticità che può derivare da un eventuale cedimento dell'apparecchiatura per cui è fondamentale applicare metodologie di previsione del rischio e delle azioni correttive che siano complete e affidabili. In questa memoria si propone un calcolo di Livello 3 eseguito in accordo alla "Recommended Practice API 579 Fitness for service" per la verifica di idoneità al mantenimento in servizio, anche per un periodo di tempo limitato, per permettere la pianificazione di un intervento di riparazione, di un reattore operante in regime di creep a seguito dell'identificazione di un difetto nel fasciame cilindrico.

In accordo alle procedure di Livello 3, è stata condotta un'analisi ad elementi finiti tenendo conto del difetto, classificato mediante i controlli non distruttivi, come una discontinuità planare, originatosi nella placatura in acciaio inossidabile della superficie interna (weld overlay) e propagato per qualche millimetro di profondità nel materiale base. Sono stati sviluppati modelli tridimensionali dell'apparecchio in cui è stata introdotta una modellazione esplicita della cricca. Nella valutazione dei risultati dell'analisi è stato tenuto conto dell'interazione tra i fenomeni di creep e la propagazione per carichi meccanici della cricca modellata. È stata inoltre condotta un'analisi di sensitività sull'effetto della temperatura di esercizio.

1. Introduzione e scopo del lavoro

In occasione della fermata di una unità di hydrocracking di una raffineria in Giordania è stata eseguita un'ispezione del reattore con lo scopo di valutarne l'integrità strutturale e lo stato di conservazione dopo sette anni di esercizio.

L'apparecchiatura in oggetto opera ad alta temperatura (superiore a 400 °C) ed è stata realizzata in acciaio legato contenente vanadio (2¼Cr-1Mo-¼V). L'aggiunta di vanadio consente di ottenere proprietà meccaniche generalmente superiori, ma particolare attenzione va posta nella valutazione di possibili danneggiamenti da scorrimento viscoso, come riportato in diversi lavori reperibili in letteratura [1]. In particolare, questo tipo di leghe ha mostrato una certa suscettibilità a fenomeni di danneggiamento ad alta temperatura in particolare nelle zone termicamente alterate in prossimità di saldature [2] - [7].

Conferma dell'attenzione necessaria per la progettazione di apparecchiature in leghe con Vanadio è fornita dall'introduzione nel 2008 all'interno del codice ASME del Code Case 2605 per la progettazione di apparecchiature a pressione realizzate in SA-182 F22V, SA-336 F22V, SA-541 22V, SA-542 TypeD Cl.4a e SA-832 Gr22V. Questo Code Case richiede la valutazione dell'interazione tra fenomeni di creep e danneggiamento a fatica. [8] - [10]. Riferimenti analoghi relativi alla resistenza a creep, in particolare delle leghe contenenti

Vanadio, si possono trovare all'interno della normativa API-579/ASME FFS-1 [11] in cui è prevista la verifica dell'interazione dei danneggiamenti dovuti a creep e a fatica.

Le ispezioni condotte sul reattore hanno riguardato principalmente le saldature del fasciame e degli attacchi esterni. Danneggiamenti della placcatura e del metallo base (cricche longitudinali affioranti) sono state tuttavia evidenziate sulla superficie interna. Questi riscontri sul campo, uniti alle considerazioni fatte sulla resistenza a creep del materiale base, hanno portato ad un approfondimento della problematica per stimare la vita utile residua dell'apparecchiatura al fine di pianificare un intervento di riparazione risolutivo. Vista la criticità dell'apparecchiatura, la tipologia di difetti riscontrati, il loro numero e la distribuzione di questi, si è optato per un'analisi approfondita applicando le metodologie di valutazione contenute nella API-579/ASME FFS-1.

È stato sviluppato un modello ad elementi finiti della porzione del reattore interessata dalle cricche includendo il bocchello adiacente alla zona danneggiata. L'analisi numerica è stata condotta utilizzando il software di calcolo ANSYS rel. 19.1. La zona danneggiata è stata analizzata nel dettaglio includendo una modellazione esplicita dei difetti e delle asportazioni di placcatura eseguite durante i controlli non distruttivi. Dati i possibili effetti secondari indotti dalla presenza del bocchello e dalla riduzione locale di spessore e considerata la presenza di più difetti paralleli e vicini, si è scelto di calcolare i parametri caratteristici del difetto (*stress intensity factor*) tramite approccio con meccanica della frattura computazionale lineare elastica. Il tool di definizione automatica della cricca, presente in ANSYS, ha consentito di creare un modello agli elementi finiti in cui le dimensioni della cricca sono i parametri di controllo. Una procedura automatica calcola il danneggiamento sulla base delle formule riportate nelle API-579/ASME FFS-1 e permette di simulare l'avanzamento della cricca.

In questo lavoro viene presentata la metodologia di calcolo applicata con particolare attenzione al modello numerico sviluppato e all'implementazione della procedura di calcolo del danneggiamento e conseguente propagazione del difetto. Nella sezione relativa alla discussione dei risultati si riporta un'analisi di sensitività condotta per valutare l'impatto della variazione della temperatura operativa sulla vita residua.

2. Dati dell'apparecchio

I dati di progetto e di esercizio dell'apparecchio sono riportati di seguito: si riassumono inoltre le evidenze emerse a seguito dell'ispezione condotta dopo sette anni dalla messa in servizio.

2.1. Dati principali e caratteristiche generali

L'apparecchio oggetto dello studio è un reattore per hydrocracking con un solo letto catalizzatore. Codice di progetto e fabbricazione: ASME VIII Div. 2 "ed. 2004 + Addenda 2005. L'anno di installazione e messa in esercizio dell'apparecchiatura è il 2010.

Le caratteristiche principali dell'apparecchiatura sono riportate in Tabella 1, mentre i dati di progetto ed esercizio sono riassunti in Tabella 2.

Per la costruzione sono stati impiegati i seguenti materiali:

- mantello cilindrico e fondi: 2¼Cr1Mo¼V in lamiera ASME SA 542 Gr D Cl 4a.
- Bocchelli: 2¼Cr1Mo¼V in acciaio fucinato ASME SA 336 F22V.
- Placcatura della superficie interna: acciaio inossidabile tipo 347 con spessore nominale 4.5 mm. La placcatura sulla superficie del mantello cilindrico e dei fondi eseguita con procedimento ad elettroscoria a nastro, monostrato.

Diametro interno dell'apparecchio	1981.2 mm (78")
Spessore del mantello cilindrico (materiale base)	122 mm
Raggio interno dei fondi emisferici	1020.5 mm
Spessore del fondo superiore (materiale base)	70 mm
Spessore del fondo inferiore (materiale base)	65 mm
Lunghezza tra le tangenti	12647 mm

Tabella 1. Principali dimensioni dell'hydocracker

Pressione di progetto	2775 psig (191.13 bar)
Temperatura di progetto	860°F (460°C)
Range di pressione di esercizio	181.5 – 191.3 bar
Fluido di processo	idrocarburi
Apparecchio in "hydrogen service" con pressione parziale di idrogeno massima	181.5 bar
L'apparecchio non è soggetto a significativi cicli di fatica dovuti a escursioni termiche o variazioni di pressione	

Tabella 2. Principali dati di progetto e di esercizio

2.2. Controlli eseguiti e risultati

L'ispezione dell'apparecchio è stata condotta nel 2017 in corrispondenza del fermo impianto programmato. I controlli eseguiti sulle saldature del fasciame e sulle saldature degli attacchi esterni non hanno evidenziato discontinuità o anomalie. L'esame mediante repliche metallografiche non ha evidenziato danneggiamenti da scorrimento viscoso, microdifetti o danneggiamenti microstrutturali.

Durante l'esame visivo della superficie interna è stata riscontrata nella prima virola partendo dall'alto, poco al di sopra del bocchello F6, una zona con evidente erosione della placcatura. La zona è stata leggermente molata per permettere una ricarica della placcatura. L'esame con liquidi penetranti ha evidenziato delle indicazioni lineari trasversali alla direzione della nastratura in corrispondenza della linea di sovrapposizione di due passate adiacenti e distanziate tra di loro da 20 a 40 mm. Le indicazioni si estendevano per una lunghezza in senso circonferenziale di 710 mm. L'erosione della placcatura e l'indicazione dei difetti lineari riscontrati prima e dopo rimozione della placcatura stessa sono mostrati in Figura 1. Ad un successivo esame con ultrasuoni e con liquidi penetranti, le indicazioni sono state classificate come cricche aventi lunghezza variabile da 7 a 20 mm e profondità dalla superficie della placcatura da 7 a 12 mm. Le cricche penetravano quindi nel materiale base da un minimo di 2.5 a un massimo di 7.5 mm. Lo schema dell'apparecchiatura con la posizione e la dimensione della zona oggetto dell'ispezione è mostrato in Figura 2.

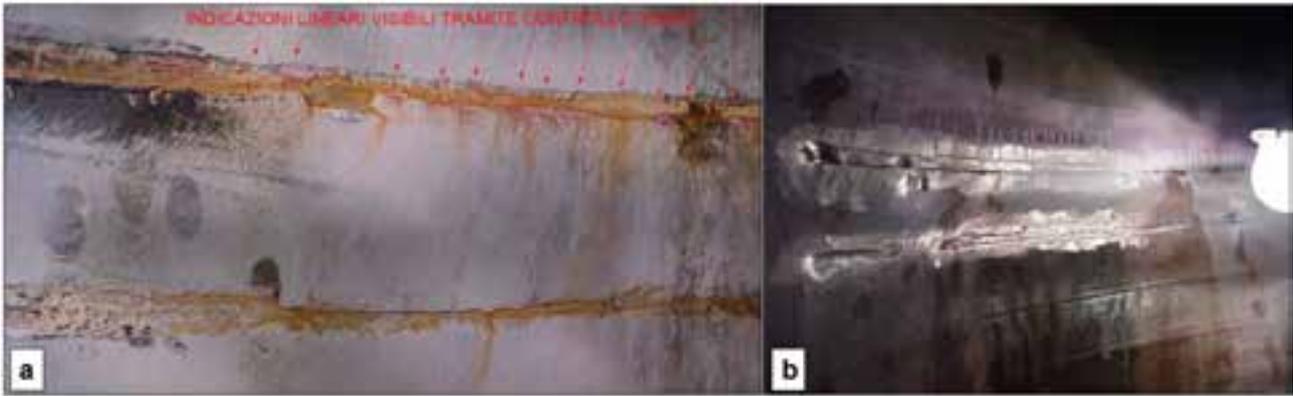


Figura 1. Schema dell'apparecchio e della zona con indicazioni lineari. a) stato della placcatura, b) dopo asportazione parziale della placcatura

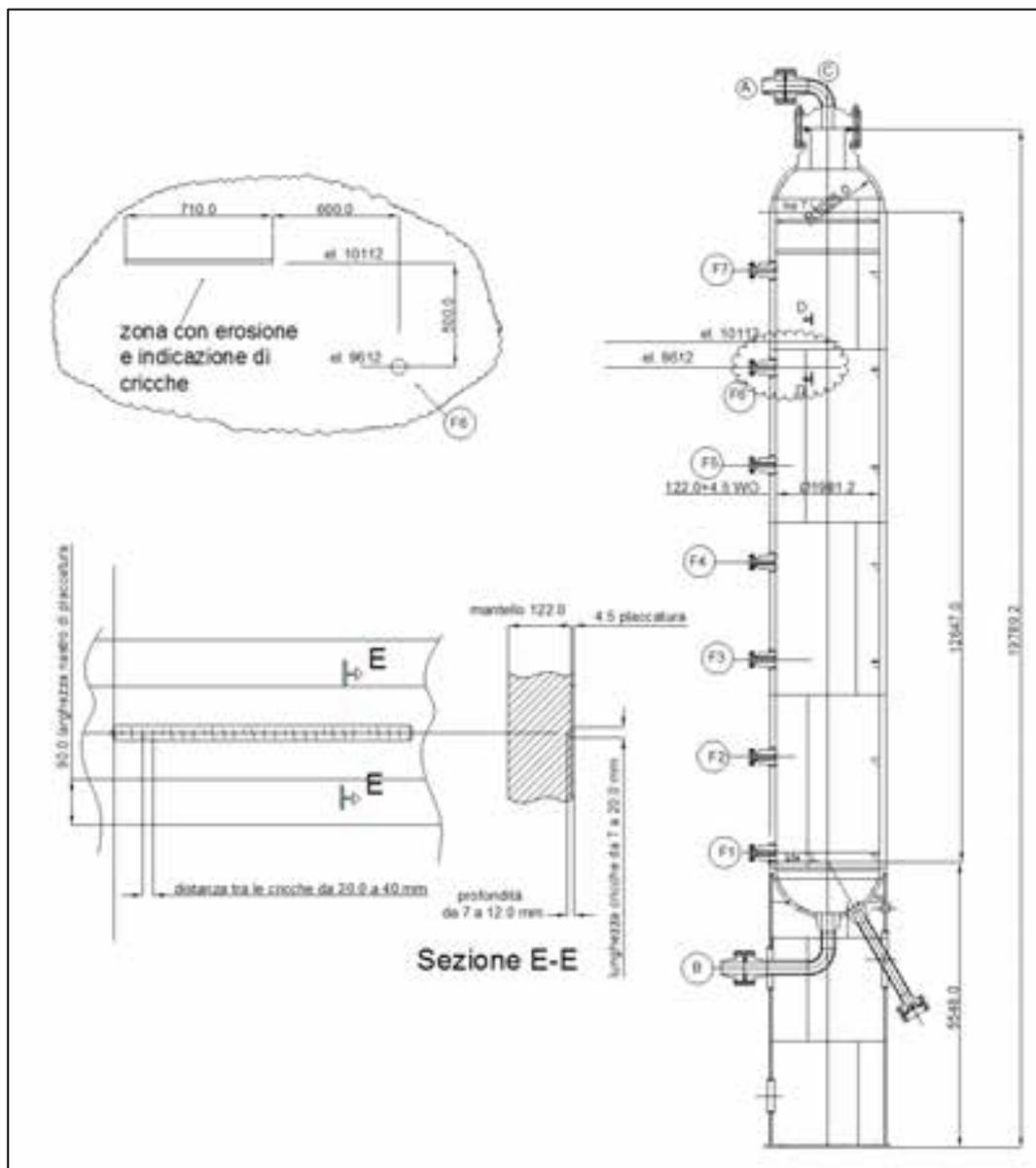


Figura 2. Schema dell'apparecchio e della zona oggetto di indagine: in particolare è evidenziata la topologia delle cricche.

Non è stato possibile identificare a priori il fenomeno che ha generato i difetti riscontrati e sulla base della documentazione relativa all'apparecchiatura è stato escluso che si tratti di difetti di fabbricazione.

Per poter programmare l'intervento di riparazione in funzione anche delle esigenze di produzione, la raffineria ha chiesto di valutare se le cricche potevano evolvere verso condizioni di rischio non accettabili o se il reattore poteva ancora essere considerato idoneo al mantenimento in esercizio anche per un periodo di tempo limitato considerando che nella zona interessata dai difetti è stata condotta una riparazione provvisoria con ripristino della placcatura e sovrapposizione di un ulteriore piatto di protezione. In mancanza di dettagli relativi ai possibili fenomeni erosivo-corrosivi che possono aver generato il difetto e con un approccio conservativo si è deciso di studiare i difetti come riscontrati assumendo la dimensione massima e non tenendo conto di nessuna procedura di riparazione. Si assume inoltre che i difetti possano propagare soltanto per fenomeni di creep. Per valutare possibili condizioni di funzionamento non previste è stata condotta un'analisi di sensitività sulla temperatura massima a partire dalla condizione di design e considerando un incremento non previsto dell'ordine del 10 %.

3. Modello numerico

La presenza di cricche ha reso necessario l'utilizzo di un approccio di Livello 3 per la valutazione della vita residua dell'apparecchiatura. Un modello ad elementi finiti tridimensionale della zona interessata dal danneggiamento è stato creato nella zona comprendente il bocchello F6 e una porzione di mantello lungo l'asse dell'apparecchio sufficientemente grande da comprendere la zona erosa e non introdurre effetti di bordo dati dalle condizioni al contorno. Per ragioni di semplicità è stata applicata una doppia simmetria e quindi è stato modellato solo 1/8 del recipiente come mostrato in Figura 3. Nella zona erosa dove sono stati riscontrati i difetti è stato ricavato un sottomodello nel quale è stata introdotto in maniera esplicita una cricca semiellittica affiorante sulla superficie interna. In accordo alle misurazioni in campo condotte durante l'ispezione, per il difetto sono state assunte dimensioni iniziali rispettivamente pari a 6 mm per il raggio minore (a) e 10 mm per il raggio maggiore ($2c$). La cricca è stata posizionata lungo la direzione circonferenziale nella zona più critica individuata a seguito di un'analisi di sensitività nella quale è stato determinato il fattore di intensificazione degli sforzi (K_I) al variare della posizione della cricca nella zona erosa a partire dalla zona più vicina al bocchello. Il sottomodello sviluppato con dettagli della modellazione della cricca e della mesh sviluppata sono mostrati in Figura 4. È stata inoltre valutata l'eventuale mutua influenza di difetti vicini confrontato i valori di K_I considerando la presenza di una sola e di tre cricche adiacenti. I risultati delle analisi di sensitività su posizione e numero di cricche sono riassunti nella sezione relativa alla discussione dei risultati.

4. Procedura di calcolo

Per il calcolo del danneggiamento da creep e della conseguente propagazione del difetto è stata implementata una procedura di calcolo in accordo a API-579/ASME FFS-1 Parte 10 (valutazione di componenti operanti in regime di creep), che nel caso specifico richiama la Parte 9 (valutazione di componenti contenenti difetti assimilabili a cricche). La procedura implementata combina i risultati della soluzione numerica (estrazione del fattore di intensificazione di stress all'apice) e la verifica analitica per la protezione dal collasso plastico e per la costruzione del diagramma di accettabilità del difetto. L'entità della propagazione del difetto in funzione del tempo è definita sulla base del danneggiamento da creep calcolato.

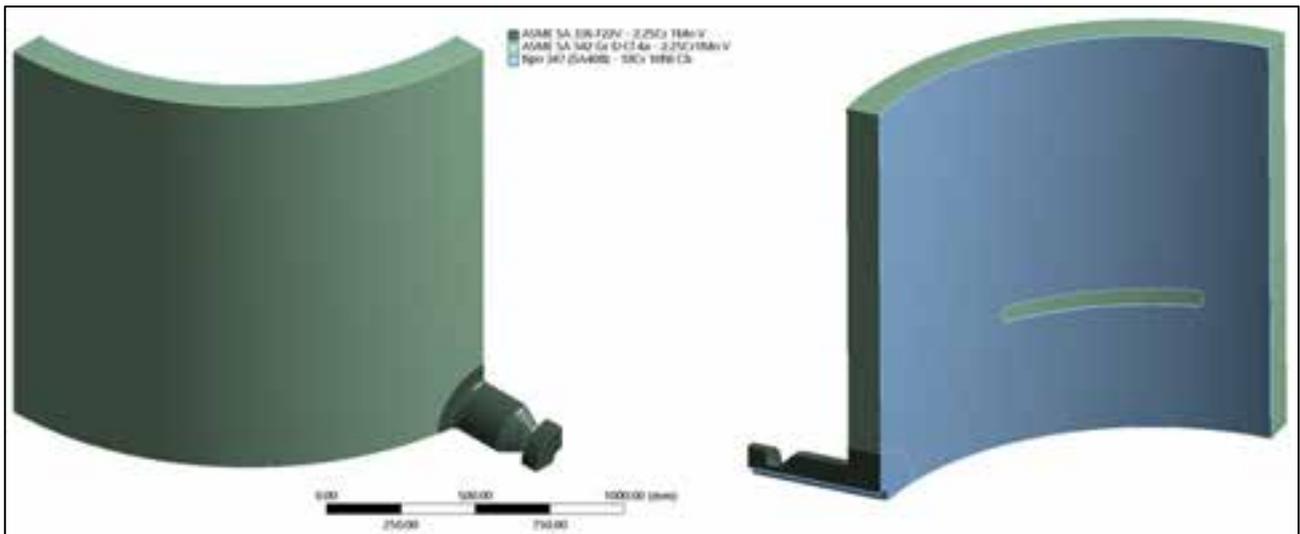


Figura 3. Geometria del modello FEM 3D sviluppato

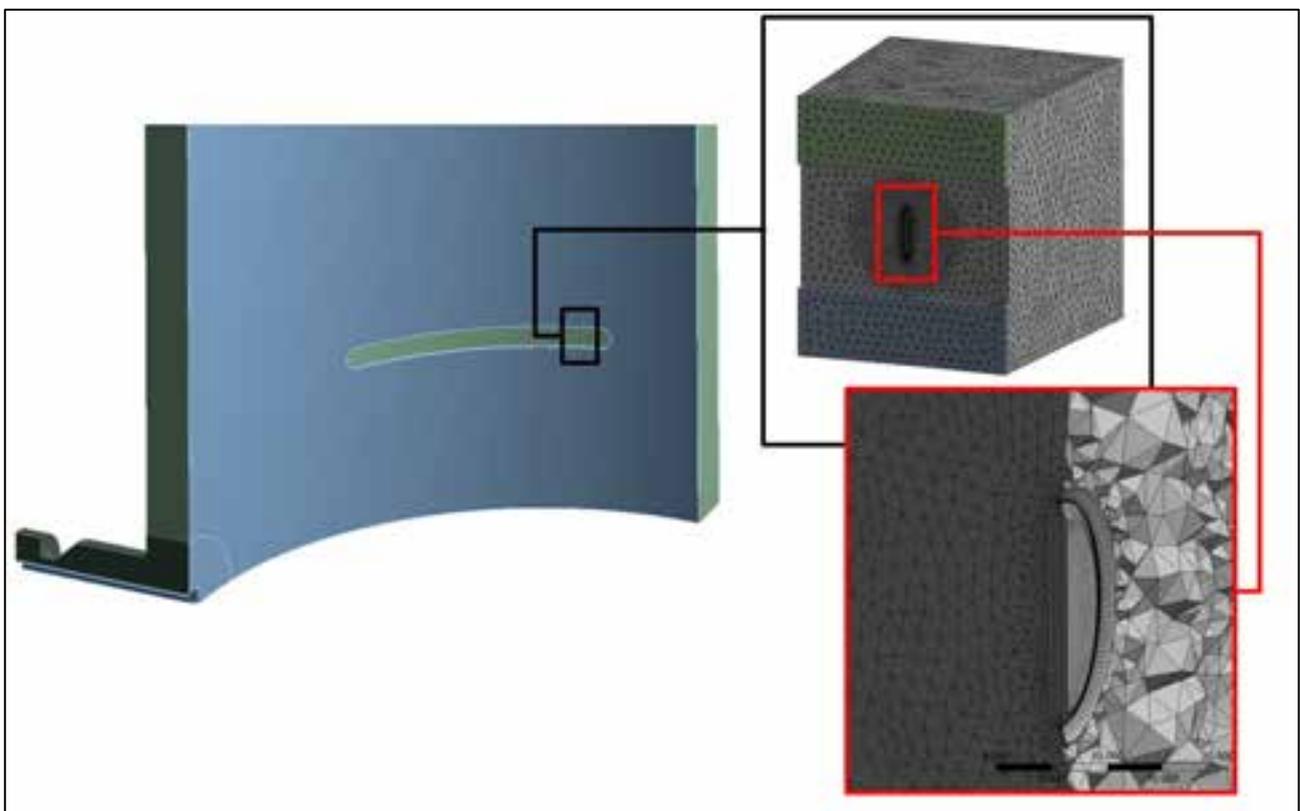


Figura 4. Dettagli del sottomodello e mesh nella zona del difetto

Tramite un eseguibile python e uno script sviluppato in Matlab è stato possibile guidare in modo automatico il codice di calcolo ad elementi finiti per aggiornare dinamicamente le dimensioni della cricca, ridefinire la mesh ed estrarre K_I all'apice da utilizzare per valutare la criticità del difetto e calcolare il danno da creep cumulato. Le fasi principali della procedura di calcolo sono riportate in Tabella 3. Le proprietà meccaniche del materiale ($2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$) in funzione della temperatura sono state calcolate secondo ASME II part D, unitamente alla tenacità a frattura stimata in accordo a API-579/ASME FFS-1 ANNEX 9F (Exemption curve A) che nel caso in esame da un valore di K_{mat} pari a $220 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($6957 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$) per temperature superiori a $160 \text{ }^\circ\text{C}$. La verifica dell'accettabilità del difetto viene condotta tramite l'uso del diagramma FAD (*Failure assessment diagram*) che consente di tracciare la curva

limite di accettabilità nel piano L_r , K_r , dove L_r è il rapporto tra il carico agente nella sezione con difetto e il carico limite per il collasso plastico, mentre K_r è il rapporto tra il fattore di intensificazione all'apice del difetto e la tenacità a frattura. L'arresto della procedura di calcolo avviene nel caso in cui si verifichi una delle seguenti condizioni:

- Non sia soddisfatta la verifica al collasso plastico nella sezione con difetto
- Il punto sul diagramma FAD cada fuori dalla regione di accettabilità
- Il danneggiamento cumulato da creep sia superiore al limite di accettabilità

PROCEDURA DI CALCOLO DANNEGGIAMENTO DA CREEP E PROPAGAZIONE	
1.	Determinazione della storia di carico passata e attesa
2.	Definizione proprietà meccaniche materiali e tenacità a frattura (K_{mat}) Determinazione del danneggiamento da creep prima dell'insorgenza del difetto (D_{bc}) <i>Calcolo stress riferimento (σ_{ref})</i>
3.	<i>Verifica del collasso plastico</i> <i>Calcolo del danneggiamento a creep mediante metodo MPC Omega</i> <i>Nel caso in esame non viene considerato questo tipo di danneggiamento, in quanto le cricche sono state rilevate già al primo fermo impianto.</i>
4.	Determinazione del danneggiamento da creep mediante metodo MPC Omega quando insorge il difetto (${}^0D_{ac}$): vengono introdotti dei fattori correttivi basati sulla dimensione della cricca (e quindi su K_I)
5.	Inizializzazione delle dimensioni della cricca e del tempo di integrazione (dt)
<i>Per ciascun i-esimo step di avanzamento della cricca</i>	
6.i	Calcolo del FAD basato su iK_r e iL_r
7.i	Determinazione del danneggiamento da creep per l'intervallo di tempo i-esimo (${}^iD_{ac}$) – come punto 4 con la dimensione della cricca aggiornata in base alla velocità di avanzamento calcolata al punto 12i
8.i	Calcolo del danneggiamento cumulato $D_{tot} = D_{bc} + {}^0D_{ac} + \sum {}^iD_{ac}$ e verifica del danneggiamento massimo rispetto al danno ammissibile ($D_c^{allow} = 1.0$)
9.i	Calcolo dello strain rate di riferimento (${}^i\dot{\epsilon}_{ref}$)
10.i	Calcolo del fattore di intensificazione alle due estremità del difetto rispettivamente (${}^iK_{I,0}$, ${}^iK_{I,90}$)
11.i	Determinazione della crack <i>driving force</i> alle due estremità del difetto ($C_t^{0,90}$)
12.i	Calcolo dell'avanzamento della cricca nelle due direzioni: $da/dt = f(C_t^{0,90})$
12.i	Ridefinizione del tempo di integrazione sulla base della velocità calcolata

Tabella 3. Procedura per il calcolo del danneggiamento e propagazione del difetto

5. Discussione dei risultati

In Figura 5 si riporta il risultato dell'analisi di sensitività condotta sulla posizione dei difetti e la loro eventuale interazione. Sono state modellate diverse cricche nella zona di asportazione della placcatura in accordo a quanto rilevato dalle ispezioni in campo (passo tra le cricche da 80 a 20 mm). Il risultato del fattore di intensificazione degli sforzi è stato

diagrammato rispetto all'ascissa curvilinea in accordo alla Figura 2 (L'origine è in corrispondenza della sezione più vicina al bocchello, la lunghezza della zona erosa è di circa 600 mm). Dal risultato dell'analisi si nota come il difetto più critico sia in corrispondenza della sezione posta a 450 mm dall'inizio della zona di asportazione della placcatura e, in generale, il fattore di intensificazione calcolato numericamente sia circa il 5% superiore rispetto alla soluzione analitica. L'utilizzo del modello FEM è più conservativo e può essere utilizzato anche per cricche che non ricadono nelle casistiche risolubili per via analitica. La sottomodellazione è stata applicata nella sezione dove il difetto è risultato più critico. È stato verificato che non c'è interazione tra i diversi difetti: considerando un singolo difetto o tre diversi adiacenti non si ha sensibile variazione di K_I .

Scelta la posizione più critica, è stata avviata la procedura di calcolo a diverse temperature operative: in Figura 6 è riportato il diagramma FAD: le curve A, B, C rappresentano, a diverse temperature, i valori di L_r e K_r per i diversi step di propagazione della cricca. Si nota come per la temperatura operativa di 460 °C non si ha sostanziale variazione dei punti sul diagramma e quindi non si ha propagazione per creep. Per le temperature superiori si ha invece una considerevole variazione dei valori di K_r e L_r : questo indica che si ha propagazione del difetto e le sue dimensioni potrebbero diventare critiche tanto da uscire dalla zona di accettabilità.

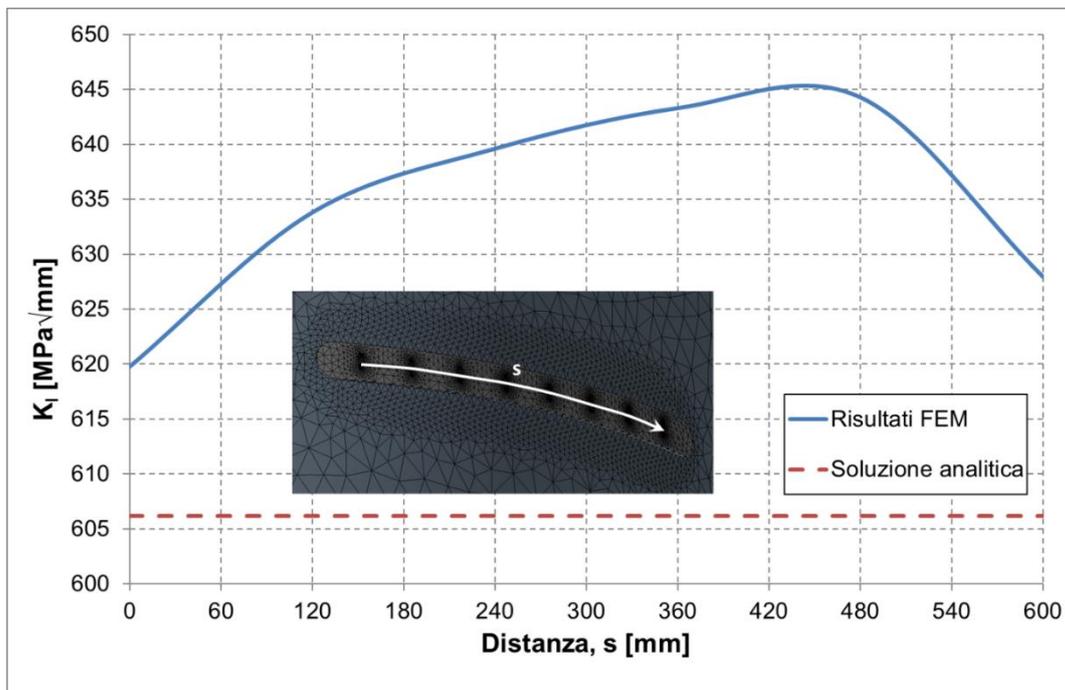


Figura 5. Variazione di K_I nella zona danneggiata. Confronto numerico-analitico

Dal diagramma FAD non si evince in modo esplicito il tempo associato alla propagazione, per tale ragione in Figura 7 si riporta il diagramma della variazione di profondità del difetto rispetto al tempo (vita residua dell'apparecchiatura). Dai risultati si nota che per la temperatura operativa di 460 °C si ha sostanziale propagazione considerando una vita residua di oltre 20 anni. All'aumentare della temperatura si evidenzia una considerevole riduzione della vita utile: per una temperatura operativa di 520 °C la vita residua è pari a circa 2 anni, valore appena compatibile con la richiesta di idoneità al mantenimento in servizio per un periodo di tempo sufficiente a permettere la pianificazione di un intervento di riparazione. Nei casi di temperatura superiore a 460 °C la propagazione instabile del difetto rispettivamente dopo 20, 10 e 2 anni è associata a danno da creep pari a 1.

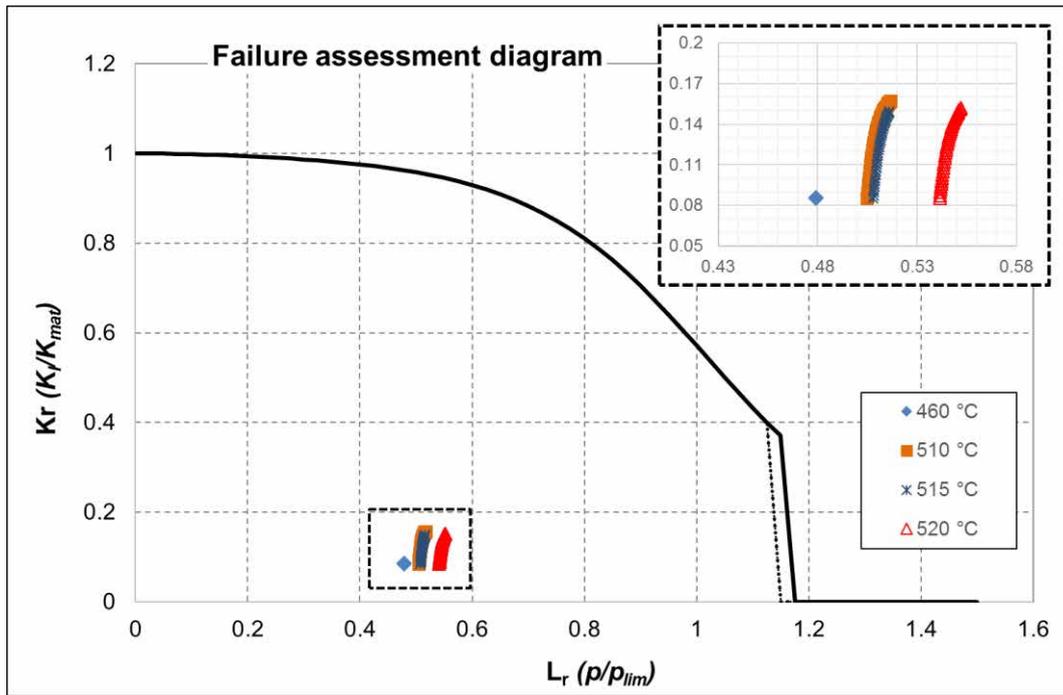


Figura 6. Diagramma FAD con propagazione del difetto alle diverse temperature.

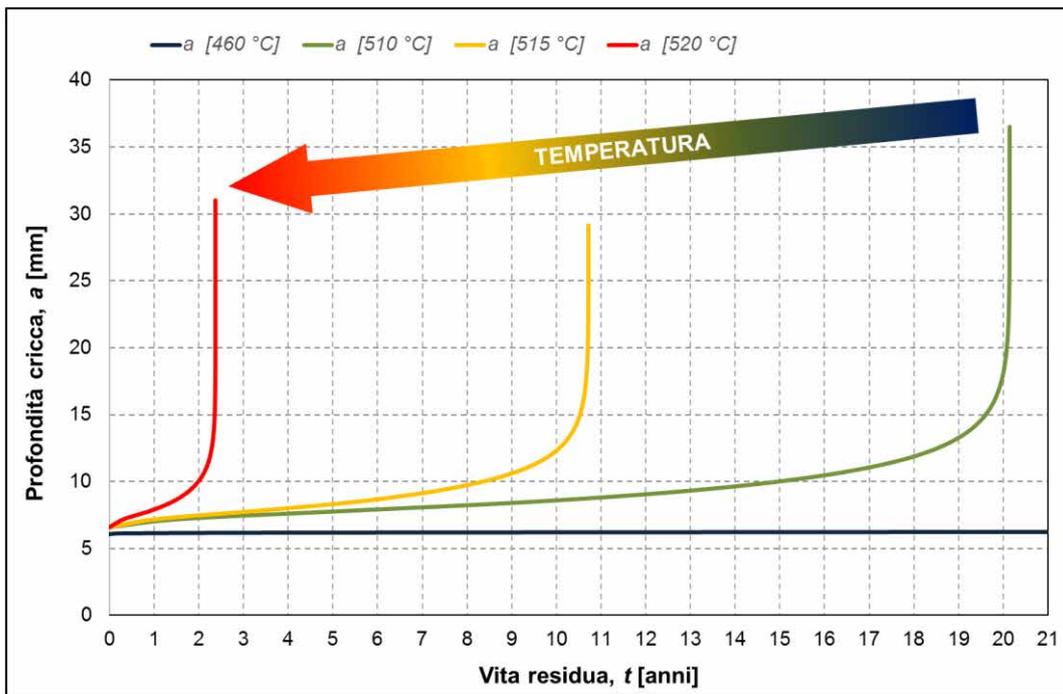


Figura 7. Diagramma dell'evoluzione della profondità della cricca nel tempo

6. Conclusioni

Il lavoro condotto ha evidenziato che la normativa applicata (API 579/ASME FFS-1) fornisce un approccio riconosciuto per la valutazione della sicurezza delle apparecchiature in caso di presenza di difetti. I diversi possibili fenomeni di danneggiamento sono trattati in modo esaustivo e si hanno indicazioni quantitative utili per decidere se mantenere l'apparecchiatura in servizio e per quanto tempo. Nello specifico del caso in esame l'analisi ha consentito di confermare che è presente un margine di sicurezza sufficiente per

programmare un intervento di manutenzione senza fermare l'impianto, minimizzando l'impatto sulla produzione e al contempo garantendo la sicurezza dell'apparecchiatura. La procedura di calcolo sviluppata è robusta e consente di analizzare in tempo reale difetti riscontrati consentendo un monitoraggio attivo della vita residua dell'apparecchio. L'utilizzo di modelli ad elementi finiti permette di calcolare in modo più preciso i coefficienti di intensificazione degli sforzi, tenendo conto dell'influenza di effetti secondari anche locali, come la rimozione della placatura per ispezione. I modelli numerici permetterebbero inoltre di analizzare cricche non longitudinali e posizionate in zone diverse dal mantello. La temperatura di esercizio infine è risultata essere il parametro che influenza maggiormente la vita residua del sistema.

7. Bibliografia

- [1] Hashimoto K., Tokuno K., Hamada K., Tsuchida Y., Prager M. Creep embrittlement of V-modified 2.25 Cr-1 Mo steels. *ASME, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*. 1992; 239. 81-87.
- [2] Bin Y., Fu-Zhen X., Xin-Ping L., Heterogeneous creep behavior of a CrMoV multi-pass weld metal. *Materials Science and Eng: A*. 2017; Volume 690: Pages 6-15.
- [3] Mandina M., Magnasco M., Zappavigna G., Processo di placatura ad elettroscoria: applicazione e principali problematiche metallurgiche di controllo nella fabbricazione dei reattori in 2 ¼ Cr-1Mo-¼V di grosso spessore. Giornate Nazionali di Saldatura 6. 2011. Genova, Italy.
- [4] Fusari F, Marangoni P, Musti M, Alberini S. Improvements in the Welding Technology for Heavy Wall Pressure Vessels 2 ¼ Cr 1Mo ¼ V Low Alloy Steels. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2005; Volume 5.
- [5] Antalffy L, Fusari F, Bertoni AA, Miller G, Kirkpatrick K. The Use of Vanadium Modified Materials for Reactor Fabrication. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2005; Volume 7.
- [6] Tanner DJ, Sun W, Hyde TH. Cross-Weld Creep Comparison of Power Plant Steels CrMoV, P91 and P92. *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* 2013;135(2):021408-021408-5.
- [7] Parker JD. Prediction of Creep Deformation and Failure for 1/2 Cr-1/2 Mo-1/4 V and 2-1/4 Cr-1 Mo Steels. *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* 1985;107(3):279-284.
- [8] Prager M., and Osage D.A., Background to the Development of ASME B&PV Code Case 2605 – Extension of 2.25Cr-1Mo-V Alloy into the Creep Range”, *ESOP Conference*, 2010. Paris, France.
- [9] Guerra, B.A. & Cecchi, A & Grandicelli, R & Pagano, S & Cosso, G.L. Application of the specifications in ASME Code Case 2605-1 to verify the creep-fatigue interaction in pressure apparatuses made of 2.25Cr-1Mo-V steel. (2011). 63. 623-628.
- [10] Zhao M. Coupled Creep Fatigue Analysis on 2-1/4 Cr-1Mo-V Pressure Components Per Code Case 2605. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2010: Volume 3 ():687-691.
- [11] Smith M., *Fitness for Service, API 579-1/ASME FFS-1*. No publisher name. 2016.

Caratterizzazione del degrado strutturale di tubazioni in polietilene

C. Andenna¹, D. Lega¹, C. Mennuti¹, E. Pichini¹, C. Ratti¹

¹ Inail - Dit

1. Sommario

Per il trasporto di gas combustibili e prodotti chimici e petrolchimici - e non più soltanto per il trasporto di acqua potabile e reflua - trovano impiego sempre più largo le tubazioni in polietilene ad alta densità (HDPE). In genere per tali tipi di tubazioni si considera un tempo di servizio pari ad almeno 50 anni. Tuttavia, il polietilene è soggetto a fenomeni di invecchiamento che ne alterano le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione. Per azione di diversi fattori ambientali quali per esempio la luce solare, l'acqua, la temperatura, l'escursione termica, la chimica del suolo, le catene polimeriche subiscono delle modificazioni strutturali come interruzioni, ramificazioni, ossidazioni. Tali fenomeni comportano variazioni nella densità e nella percentuale di cristallinità del materiale polimerico che sono strettamente correlate alle proprietà meccaniche del HDPE quali la resistenza a trazione, la resilienza e la durezza.

La memoria vuole presentare un excursus sulle principali caratteristiche e sugli effetti dei parametri ambientali sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche del HDPE assieme ad una rassegna delle principali tecniche analitiche attualmente impiegate nella caratterizzazione del degrado strutturale generato dall'invecchiamento.

2. Introduzione

Il polietilene ad alta densità è stato sintetizzato nel 1953 da Karl Ziegler e Erhard Holzkamp mediante l'uso di un catalizzatore a bassa pressione; per questa sintesi Ziegler nel 1963 ha avuto il premio Nobel per la chimica. In Italia è stato utilizzato a partire dagli anni '90 soprattutto per la realizzazione di tubazioni destinate al trasporto e alla distribuzione del gas metano, dell'acqua potabile e per le reti di scarico dei liquami civili ed industriali [1],[2]. In questi ultimi anni la produzione e l'impiego del polietilene sono aumentati notevolmente e di conseguenza sono sorti nuovi impulsi in merito agli studi sulle possibilità di utilizzo in sicurezza di tale materiale.

3. Caratteristiche chimiche

Il polietilene $(C_2H_4)_n$ è un polimero ottenuto dalla reazione di polimerizzazione dell'etilene $CH_2=CH_2$, monomero organico che deriva dal petrolio. La catena è mediamente composta da un numero compreso fra 500.000 e 1.000.000 di unità monomeriche. Si tratta di un polimero lineare (Figura 1), dove le macromolecole si sviluppano in una direzione preferenziale. La catena adotta una configurazione che corrisponde all'energia potenziale minima, gli atomi di carbonio C hanno un andamento a zig-zag e sono complanari formando due angoli di valenza pari a circa 109.5° . La distanza C-C è pari a 0.154 nm e gli atomi di H sono disposti gli uni sopra gli altri. Le diverse catene sono tenute insieme da deboli forze di Van der Waals e per azione del calore si allontanano facilmente fra loro (temperatura di fusione $110-137^\circ C$) [3],[4],[5]. La distribuzione dei pesi molecolari delle catene ottenute e il grado di ramificazione sono alcuni parametri che determinano le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del prodotto finale (Figura 2).



Figura 1. Stereochimica del polietilene [3]

Il polietilene viene generalmente classificato in più categorie sulla base della distribuzione dei pesi molecolari delle catene, parametro a cui è legata la densità, e la percentuale di cristallinità [1], [3], [6]. Le principali categorie sono LDPE - Polietilene a bassa densità, MDPE - Polietilene a media densità, LLDPE - lineare a bassa densità, HDPE - Polietilene ad alta densità.

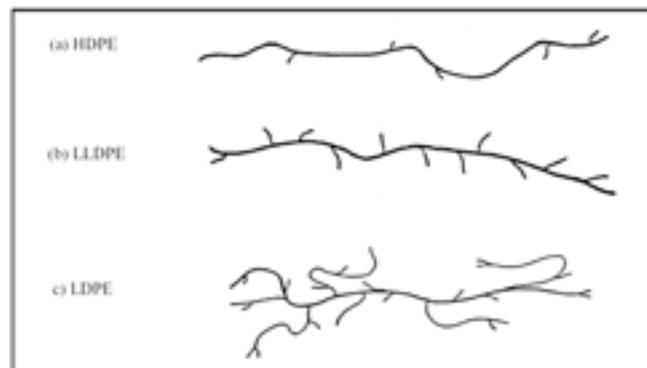


Figura 2. a) HDPE, b) LLDPE, c) LDPE [8]

La densità varia da 0.92 a circa 0.96 g/cm³ proporzionalmente alla cristallinità che va dal 40 all'80 % e a una resistenza a trazione da 6 a 37 MPa [7].

4. Morfologia e microstruttura del HDPE

Il polietilene è un polimero semicristallino. La fase cristallina ha una microstruttura costituita da lamelle (Figura 3a) contornate da una matrice di materiale amorfo. Una più precisa descrizione della morfologia del HDPE distingue la presenza di tre fasi: la fase cristallina, la fase amorfa, l'interfase cristallino-amorfo. Se la cristallizzazione avviene da un fuso le lamelle ed il materiale amorfo sono organizzati in una morfologia sferulitica, dove per sferulite si intende una colonia di cristalli sfericamente simmetrica (Figura 3b) [8],[9].

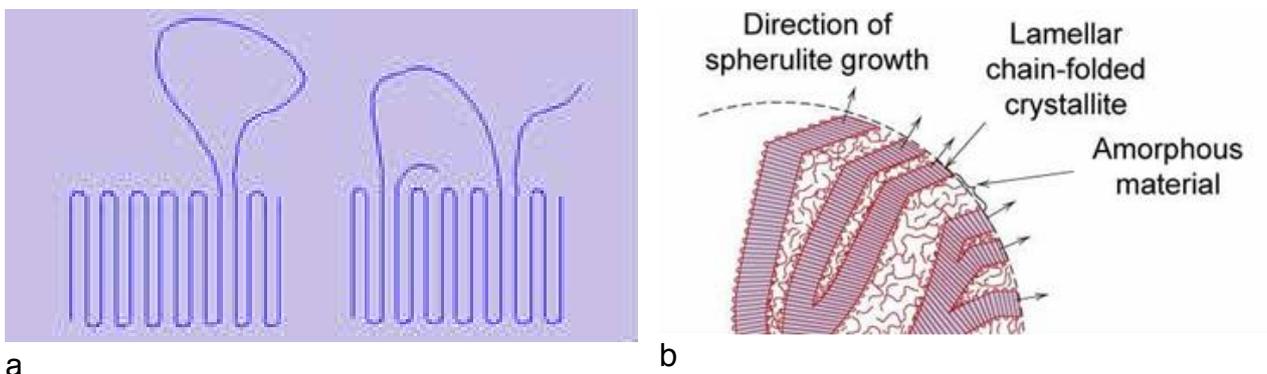


Figura 3. Lamelle nella fase cristallina del HDPE (a), morfologia di uno sferulite (b). [8]

La morfologia lamellare può essere visualizzata al microscopio elettronico previo un attacco chimico (3 h con permanganato in una soluzione di acido solforico e fosforico concentrata) per sciogliere la frazione amorfa. A titolo di esempio, nella micrografia seguente viene mostrata l'immagine SEM di una tubazione in HDPE nuova ed esercita [9],[10],[11].

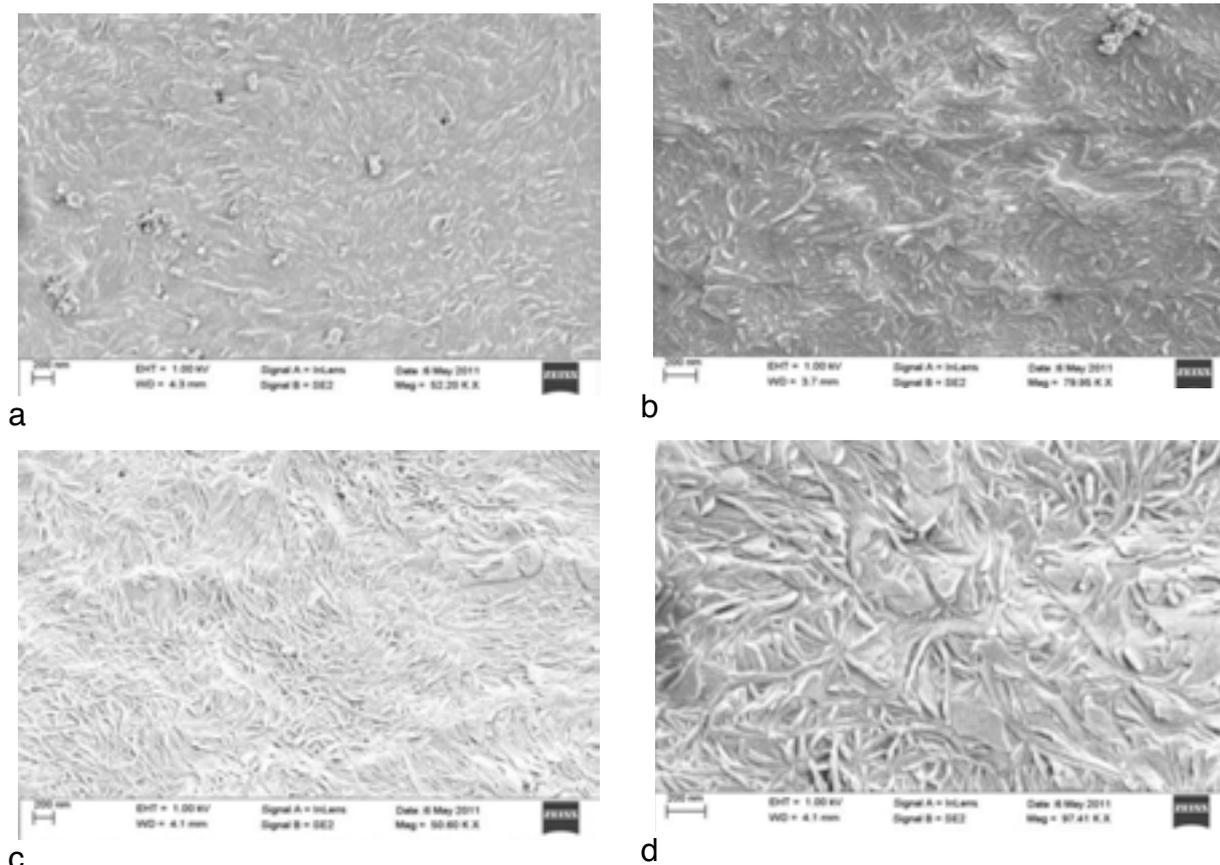


Figura 4. micrografia SEM ottenuta dopo attacco chimico ed eliminazione della frazione amorfa di campioni di tubazioni in HDPE: a) superficie esterna di un tubo esercito; b) bulk di un tubo esercito; c) superficie esterna di un tubo nuovo; d) bulk di un tubo nuovo

Si osserva che la morfologia degli sferuliti appare più assottigliata nel tubo esercito. Infatti è noto che per azione del calore le lamelle diventano più sottili in relazione a fenomeni di scorrimento delle catene [12].

5. Caratteristiche meccaniche

L'utilizzo di gran lunga più rilevante dei prodotti fabbricati con HDPE è quello di trasporto di sostanze in condotte. I tubi quindi sono il componente che maggiormente viene studiato e per il quale è più importante conoscere il comportamento nel tempo e stimarne la vita residua.

Il comportamento a rottura dei materiali HDPE viene in genere schematizzato come in Figura 5. In pratica vengono distinti tre stadi.

- Il primo stadio corrispondente ad una frattura duttile dovuta alla presenza di una tensione (circonferenziale nello schema presentato) tale da determinare un cedimento plastico del componente.
- Il secondo stadio corrisponde ad una frattura fragile in cui il cedimento è innescato da un difetto da cui parte una cricca che sottoposta ad opportune condizioni di carico esterno tende a crescere fino a comportare il cedimento del pezzo.
- Il terzo stadio corrisponde ad una frattura fragile dovuta al deperimento del materiale per cause ambientali esterne che porta alla rottura per tensioni relativamente basse.

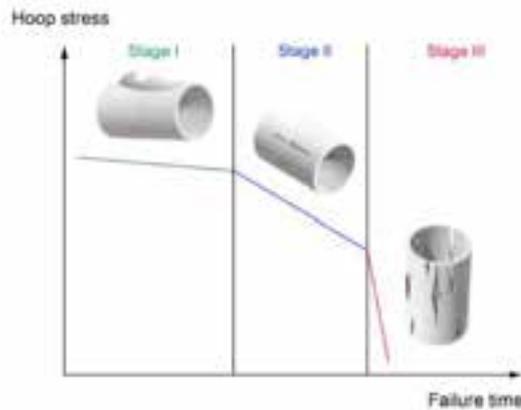


Figura 5. I tre stadi della rottura di un polimero [13],[21]

Nel primo stadio il materiale cede perché sottoposto a tensioni troppo elevate per le sue caratteristiche meccaniche. Da un punto di vista ingegneristico la frattura in questo stadio è pilotata dalla tensione di snervamento del materiale e dalla tensione circonferenziale ad esso applicata [14], [15]. Un modello matematico per la stima del tempo di vita del componente viene proposta [14] confrontando la diminuzione della tensione di snervamento pilotata dalla velocità di deformazione con l'aumento della tensione circonferenziale causata dall'assottigliamento dello spessore del tubo a pressione idrostatica interna costante. Il modello trova una dipendenza semilogaritmica tra tempo a frattura e tensione di snervamento sperimentalmente mostrata in altri lavori (Figura 6) [15]. Data la diretta proporzionalità con la tensione di snervamento, il principale parametro microstrutturale che regola il tempo a rottura, in questo stadio, risulta essere la percentuale della fase cristallina presente nel materiale [15]. La resistenza al cedimento quindi, aumenta all'aumentare della percentuale di fase cristallina presente e quindi, vista la proporzionalità diretta, alla densità del materiale [15] [16].

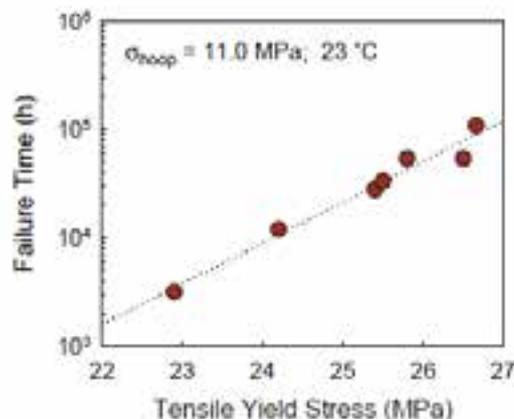


Figura 6. Frattura duttile: tempo di cedimento vs. tensione di snervamento [15]

Il comportamento delle principali fasi di un materiale polimerico durante una deformazione plastica può essere descritto in maniera semplice considerando una prova di trazione (Figura 7).

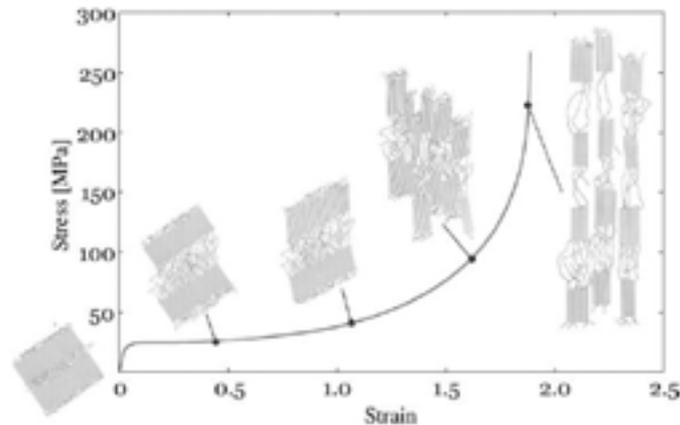


Figura 7. Andamento della frattura duttile del polietilene [8]

Nella regione in cui lo stress si mantiene relativamente costante la deformazione è determinata da un ri-arrangiamento della fase amorfa e uno scorrimento delle lamelle di cristallino una sull'altra. Quando lo stress e la deformazione si accrescono avviene un fenomeno di incrudimento: qui la fase amorfa ha raggiunto la sua massima estensione e ogni successiva deformazione è determinata unicamente dalla rottura delle lamelle. La superficie di frattura presenta un aspetto fibroso [8].

Nel secondo stadio si passa a una frattura essenzialmente fragile. In questa fase il cedimento è in genere associato alla presenza di difetti o cricche sulla superficie o all'interno del materiale. L'effetto di questi difetti è quello di amplificare le tensioni localmente presenti nel loro intorno causate dall'applicazione di un carico esterno e/o da tensioni residue nel componente. In pratica il difetto si comporta come un intensificatore di sforzi. Al suo apice una eventuale tensione esterna può essere aumentata fino alla locale rottura del materiale che può quindi propagare fino al cedimento del componente. Tanto più il difetto è acuto tanto maggiore sarà la sua capacità di incrementare le tensioni esterne. In questo ambito tipicamente viene utilizzata la meccanica della frattura lineare (LEFM) e le caratteristiche di tenacità del materiale vengono descritte tramite dei parametri fisici come il K_{Ic} (Figura 8) e dei fattori che tengono conto della forma della cricca [17].

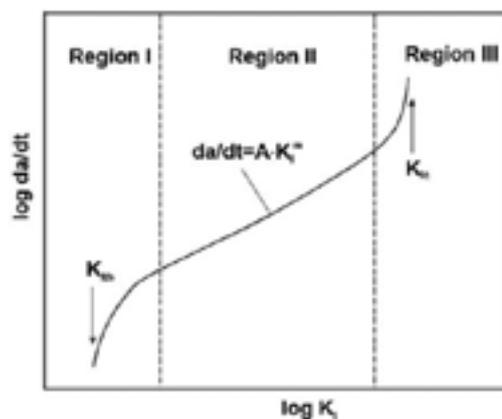


Figura 8. Schema della velocità di crescita per creep [17]

Una volta noto il valore del K_{Ic} (ad esempio con prove su provette CT [17]), dei fattori di forma e delle grandezze che regolano la velocità di crescita della cricca (A ed m della legge di Paris di Figura 8) è possibile stimare il tempo di vita residuo del componente tramite la relazione [17],[18]:

$$t_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A[K_I(p_{int}, d, s, a)]^m} \quad (1)$$

dove a_0 e a_f sono rispettivamente le dimensioni iniziali e finale della cricca, d il diametro esterno del tubo, s il suo spessore e p_{int} la pressione interna (Figura 9).

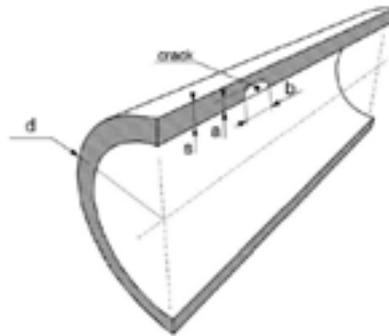


Figura 9. esempio di schema della geometria di una cricca in un tubo [17]

In questo caso spesso si fanno delle assunzioni sulle dimensioni iniziali della cricca (a_0) eventualmente basate sulle rilevanze di prove non distruttive o di ipotesi ritenute ragionevoli, oppure si cercano le dimensioni dei difetti che potrebbero risultare critici [18]. In genere la resistenza all'avanzamento lento delle cricche aumenta all'aumentare del peso molecolare delle catene e al diminuire della percentuale di fase cristallina nel materiale, e viceversa [15].

Nel terzo e ultimo stadio della frattura del polimero, quello per degrado del materiale, si osserva una ossidazione del materiale per reazione con gli agenti esterni come l'acqua, la temperatura. In questo caso la vita del pezzo non dipende praticamente più dalla tensione applicata.

Il tempo di vita in questo caso diventa una caratteristica del materiale nel senso della sua resistenza all'invecchiamento. Una tecnica, proposta da alcuni ricercatori, per stimare questo tempo si basa sulla misura del tempo di OIT (Oxidation Induction Time) con il metodo DSC [19] (Differential Scanning Calorimetry). In pratica l'esecuzione di più misure del tempo OIT (t_i) al variare della temperatura (T) permette di costruire un grafico t_f vs $1/T$, che consente di calcolare i parametri incogniti nella relazione [19]:

$$t_f(OIT) = C_{ox} \exp(E_{ad}/RT) \quad (2)$$

Una volta determinati i parametri C_{ox} ed E_{ad} (energia di attivazione, R rappresenta la costante dei gas perfetti) si può calcolare il tempo di vita per una data temperatura T di esercizio.

In questo caso la vita del componente è determinata dalle caratteristiche di resistenza all'ossidazione da parte del materiale. Al fine di migliorare la resistenza all'ossidazione vengono aggiunti degli additivi. Ad esempio l'aggiunta di un ritardante di fiamma (idrossido di alluminio) ad un materiale LLDPE (polietilene lineare a bassa densità) ha comportato un aumento dei tempi di OIT e quindi un allungamento nella sua attesa di vita a parità di condizioni di esercizio [19],[20].

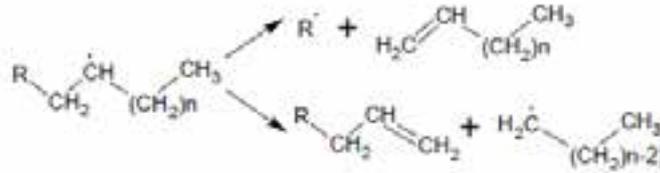
6. Meccanismi di degradazione termo-ossidativa del HDPE

La degradazione termo-ossidativa del HDPE avviene per azione dell'ossigeno, della luce, del calore, dell'umidità, degli agenti chimici e delle tensioni di taglio e segue lo schema di reazione radicalica tipico delle poliolefine, con le fasi di iniziazione, propagazione e terminazione [21],[22],[23]. La fase di iniziazione consiste nella formazione di radicali alchilici:



Figura 10. Formazione di radicali alchilici [21]

Tale processo avviene per azione delle tensioni di taglio e della temperatura, ed interessa prevalentemente gli atomi di C presenti in posizioni ramificate o insature. In assenza di ossigeno i radicali formati danno luogo a reazioni di propagazione che comportano una depolimerizzazione quali scissioni in β (Figura 11) e trasferimenti di H.

Figura 11. Esempio di β scissione [21]

Le reazioni di propagazione in presenza di ossigeno invece comportano la reazione dei radicali alchilici con l'ossigeno stesso e la formazione di idroperossidi, composti altamente reattivi ed instabili (Figura 12).

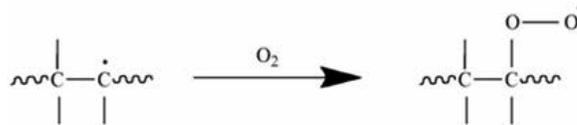


Figura 12. Formazione di idroperossidi [21]

Gli idroperossidi per azione della luce e del calore si trasformano facilmente in composti carbonilici e acqua, oppure in aldeidi e radicali alchilici con scissione di catena (Figura 13)

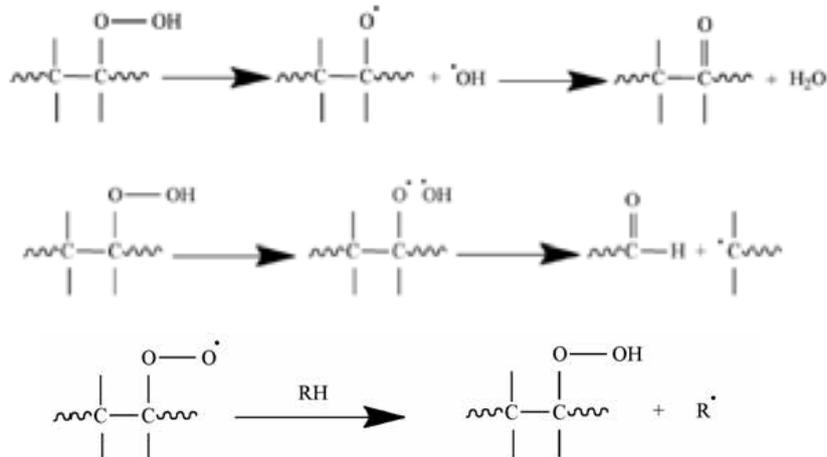


Figura 13. Trasformazione degli idroperossidi [21]

La fase di terminazione consiste in una ricombinazione o disproporzione dei radicali formati che a sua volta contribuisce alla propagazione della reazione a catena.

Le reazioni chimiche sopra descritte comportano la progressiva rottura delle catene polimeriche ed un graduale aumento della fragilità del polimero accompagnato da un deterioramento delle proprietà meccaniche, con una riduzione della resilienza, della

microdurezza, dell'allungamento e della resistenza a rottura [23],[24],[25],[26]. In particolare alcuni autori ritengono che sia la fase amorfa del polimero semicristallino ad essere maggiormente interessata dalle reazioni chimiche descritte con una depolimerizzazione ed una diminuzione del volume della zona di interfase amorpho-cristallino (Figura 14) [27],[28].

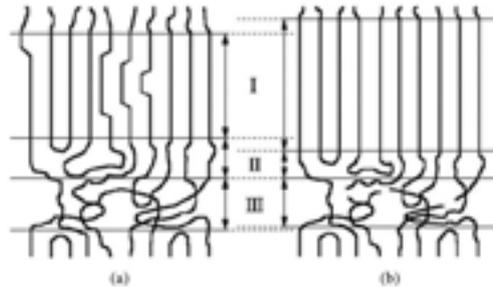


Figura 14. Cambiamenti microstrutturali del HDPE : a) prima del degrado termo-ossidativo, b) dopo il degrado termo-ossidativo [27]

I processi di degrado termo-ossidativo influenzano prevalentemente la parte amorfa in quanto nella fase cristallina è molto più ostacolata la diffusione dell'ossigeno [29]. Le condizioni di esercizio influenzano significativamente il meccanismo e la cinetica del processo termo-ossidativo. Un incremento della concentrazione dell'ossigeno rende dominanti le reazioni dei perossiradicali, mentre un aumento della temperatura o delle tensioni di taglio favorisce la fase di iniziazione delle reazioni a catena. Se la reazione di ossidazione consuma più ossigeno di quello disponibile per diffusione nel bulk del polimero, il fenomeno rimane limitato alla superficie e poi si arresta. [30] La vastità e la complessità delle reazioni di degrado sopra descritte rende difficili eventuali correlazioni fra gli invecchiamenti artificiali e ciò che succede nella vita di servizio [30].

7. Il ruolo degli additivi nei fenomeni di degrado

Gli additivi stabilizzanti sono sostanze chimiche che vengono aggiunte al polimero in piccole quantità (1-2%) per limitare le reazioni di degradazione sopra descritte. In linea generale queste sostanze chimiche agiscono reagendo con i radicali liberi o con gli intermedi reattivi che si formano durante le fasi di iniziazione e propagazione; nella seguente Figura 15 viene presentato uno schema generale dei principi di funzionamento.

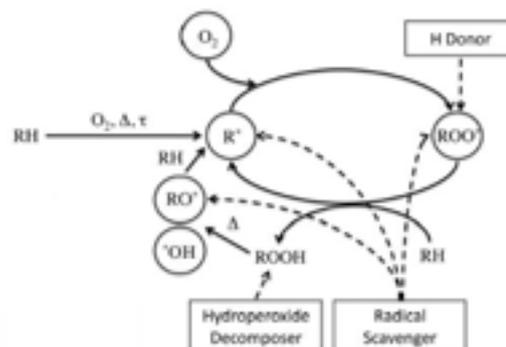


Figura 15. Schema generale di azione degli stabilizzanti in una poliolefina [21]

Nel PE trova largo impiego il nerofumo, una sostanza che assorbe la radiazione UV ed agisce come stabilizzante. A seconda dell'origine è costituito da particelle con diversa granulometria, area superficiale e porosità; la struttura chimica è la seguente Figura 16:

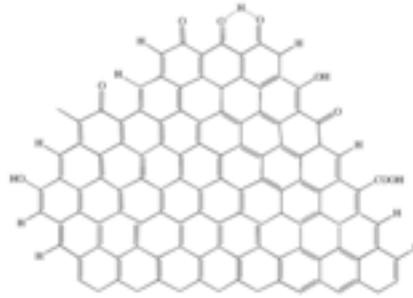


Figura 16. Struttura chimica del nerofumo [21]

Contiene gruppi fenolici, carbossilici, esteri e lattoni che lo rendono reattivo nei confronti dei perossiradicali.

Nei polimeri e nel HDPE molto raramente viene utilizzato un singolo additivo, generalmente è presente un insieme di additivi che agiscono sinergicamente: fenoli o ammine, fosfiti... Tutti i processi di degrado termico o termo-ossidativo del polimero che conducono alla frattura fragile cominciano quando gli additivi si sono consumati. Il consumo degli additivi è un processo chiave nel tempo di vita di un polimero ed avviene per dilavamento, per evaporazione o per reazione chimica. La stabilità chimica, la diffusione e la solubilità degli additivi rispetto alle condizioni di servizio hanno un ruolo cruciale nel degrado del polimero e costituiscono un fenomeno chimico-fisico molto complesso. [13], [21], [30],[31],[32].

8. Conclusioni

L'importanza del polietilene per la sua grande versatilità ed economicità è destinata a crescere nel tempo, anche nel settore delle attrezzature a pressione. In questo lavoro, senza alcuna pretesa di essere esaustivo, si è cercato di illustrare i principali aspetti legati alle caratteristiche di questo materiale dal punto di vista chimico, fisico e ingegneristico.

9. Bibliografia

-
- [1] Plastic Pipe Institute: History and physical chemistry of HDPE by Lester H. Gabriel PhD, <https://plasticpipe.org>
- [2] Manuale tecnico dei tubi in polietilene. Centraltubi. <https://tubi.net>
- [3] William F. Smith, Scienza e tecnologia dei materiali, seconda edizione McGraw-Hill
- [4] W. Kurz, J.P. Mercier, G. Zambelli "Introduzione alla scienza dei materiali" Biblioteca scientifica Hoepli
- [5] Dispense del corso "Degrado dei materiali non metallici", Università degli studi di Cagliari, <https://dipcia.unica.it>
- [6] Plastic Pipe Institute : Handbook of polyethylene pipe, www.performancepipe.com
- [7] <http://www.sbai.uniroma1.it/~mauro.pasquali/page2/page9/page10/files/04-00.pdf>
- [8] Joy J. Cheng "Mechanical and chemical properties of high density polyethylene: effects of microstructure on creep characteristics", PhD in chemical engineering 2008 Waterloo, Ontario, Canada
- [9] Buckley Crist, Jerold M. Schultz "Polymer spherulites a critical review" , Progress in polymer science , 56, 2016, pp1-53
- [10] Lukas Boge, Emil Hjartfors "Surface analysis of polyethylene pipes and failure characterization of electrofusion joints" Chalmers University of Technology Goteborg , Sweden 2011, report n. 380

-
- [11] M.M. Shain, R.H. Olley, M. J. Blisset “Refinement of etching techniques to reveal lamellar profiles in polyethylene banded spherulites” *Journal of Polymer science part B polymer physics* , 1999, vol. 37, pp 2279-2286
- [12] J. Suwanprateeb “Rapid examination of annealing conditions for HDPE using indentation microhardness test” *Polymer testing* 23, 2004, 157-161
- [13] Eric M. Hoang , David Lowe “Life prediction of a blue PE 100 water pipe, *Polymer degradation and stability*”, 93, 2008, 1496-1503
- [14] Cheng Xu, Ping Xu, Jianfeng Shi “Investigation On Creep-rupture Failure Time Of HDPE Pipe Under Hydrostatic Pressure”, *Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference PVP2011 July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA.*
- [15] Rajendra K. Krishnaswamy “Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes”, *Polymer* 46 (2005) 11664–11672
- [16] “DSC Measurement of Polyethylene - The correlation of polyethylen density and melting -”, *TA. N. 26, Feb., 1986, Hitachi High Tech*
- [17] Pavel Hutar, Martin Ševcik, Luboš Nahlik, Gerald Pinter, Andreas Frank, Ivaylo Mitev “A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes”, *Engineering Fracture Mechanics* 78 (2011) 3049–3058
- [18] A. Frank, G. Pinter, R.W. Lang “Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use”, *Polymer Testing* 28 (2009) 737–745
- [19] Zbigniew Dobkowski “Lifetime prediction for polymer materials using OIT measurements by the DSC method”, *POLIMERY* 2005, 50, nr 3, 213-215
- [20] Zbigniew Dobkowski “Assesment of polyethylene stability using the standardized OIT procedure by DSM method”, *POLIMERY* 2004, 49, nr 5, 343-345
- [21] Raquel Maria “Monitoring the degradation pf PE pipes by IR microscopy”, PhD thesis Lisbona 2014
- [22] L. C. Mendes et al. “Mechanical , thermal and microstructure evaluation of HDPE after weathering in Rio de Janeiro City “ *Polymer degradation and stability* 79, 2003, 371-383
- [23] Adam Gnatowski, Mateusz Chyra “Prediction of changes in properties of pipes from polyethylene in the research of simulation of aging “ *Acta Innovations* , 2015, n.16, pp39-47
- [24] L. C. Mendes et al. “Mechanical , thermal and microstructure evaluation of HDPE after weathering in Rio de Janeiro City “ *Polymer degradation and stability* 79, 2003, 371-383
- [25] F. Carrasco et al. “ FTIR and DSC study of HDPE structural chenges and mechanical properties variation when exposed to weathering aging during canadian winter” *Journal of applied polymer science*, 1996, vol. 60, pp 153-159
- [26] S. Bal et al. “ Effect of changing environments on microstructure of HDPE polymer” *Journal of minerals & materials characterization & engineering* vol. 6, n.1, pp1-16, 2007
- [27] J. Wang et al. “ Effects of thermo-oxidative aging on chain mobility, phase composition, and mechanical behavior of high density polyethylene” *Polymer engineering and science* 2011, 51, pp 2171-2177
- [28] F. Gugumus “Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state: part.5. Kinetic of functional group formation in PEHD and PELLD. *Polymer degradation and stability* 55, 1997, pp21-43
- [29] H. D. Hoekstra et al. “UV exposure of stabilized and non stabilized HDPE films :physico-chemical characterization” *Polymer degradation and stability* 49,1995, pp 251-262

[30] I. Kriston “ Some aspects of the degradation and stabilization of Phillips type polyethylene , PhD thesis, Laboratory of plastics and rubber technology , 2010 Budapest University of technology

[31] N.S. Allen et al. “Aging and stabilisation of filled polymer : an overview” Polymer degradation and stability 61, 1998, 183-199

[32] I. Kriston et al. “Dominating reactions in the degradation of HDPE during long term aging in water “ Polymer degradation and stability 93, 2008, 1715-1722

API 579:2016. Confronto con le edizioni precedenti

F. Giacobbe¹, C. Sampietri², G. Sironi²

¹ Inail - Uot di Messina

² Element Materials Technology Milan

Sommario

Lo standard API 579 dal titolo Fitness-For-Service da quando è stato rilasciato per la prima volta nel 2000 è stato utilizzato in tutto il mondo come strumento per valutare se un'attrezzatura a pressione, in presenza di un difetto o di un danno, fosse idonea per un servizio continuato, indicando anche utili informazioni sul fattore tempo residuo. Pertanto, questa norma tecnica è utilizzata dagli utilizzatori per evitare interruzioni di esercizio non pianificate, con conseguenti aspetti economici, e non necessarie in tempi immediati, in quanto le attrezzature mantengono comunque condizioni di affidabilità. Nel corso degli anni è stata revisionata sia nel 2007 che recentemente nel 2016.

L'attuale terza edizione presenta diverse novità che riguardano sia la struttura del documento che i suoi contenuti tecnici. In particolare ogni tematica non è più trattata nella specifica sezione e negli allegati, ma in forma completa e raccolta nella sola sezione di riferimento. Un ulteriore esempio di novità riguarda le considerazioni relative alla valutazione metallurgica e delle proprietà meccaniche nel caso di danni da incendio.

Nel presente lavoro oltre ad approfondire gli aspetti di novità verrà commentato un caso studio.

In conclusione l'edizione 2016 tiene conto dell'esperienza scaturita dall'applicazione dello standard nel corso degli anni e prende in considerazione anche gli aggiornamenti normativi degli altri codici tecnici comunque correlati.

1. Introduzione

Di seguito si riportano alcune delle principali modifiche apportate con l'edizione 2016 rispetto all'edizione 2007:

- Gli allegati sono stati spostati dalla fine del documento alla sezione a cui sono pertinenti;
- Gli allegati che si applicano nelle diverse sezioni vengono riportati nella parte 2 (come equazioni di spessore, metodi di analisi delle sollecitazioni, proprietà dei materiali, ecc.);
- Le considerazioni tecniche e la convalida sono state aggiunte in allegato a ciascuna parte;
- Nella parte 4 i criteri di accettazione sono stati modificati in quanto non si confronta più lo spessore minimo misurato con il tempo t_{min} calcolato RSF;
- Nella parte 5 sono stati aggiunti componenti di tipo B di classe 1 e di classe 2;

Tipo	Classe	2007	2016
A	n/a	Equazione di calcolo strutturale che rapporta in modo specifico la pressione, e altri carichi, allo spessore delle pareti	Equazione di calcolo strutturale che rapporta in modo specifico la pressione, e i carichi supplementari, allo spessore delle pareti e la pressione modifica lo spessore delle pareti
B	1	Nessuna distinzione in 'Classe' nel 2007	Uguale al Tipo A, ma i carichi supplementari possono modificare lo spessore delle pareti
	2	Nessuna equazione lega la pressione allo spessore delle pareti, ma esiste un codice nelle procedure del calcolo strutturale	
C	n/a	Nessuna equazione lega i carichi allo spessore delle pareti, e non è presente alcun codice nelle procedure del calcolo strutturale	

Tabella 1. Confronto tra le tipologie di componenti

- Le distribuzioni delle sollecitazioni residue di saldatura sono state completamente riformulate;
- Nuove costanti del materiale da utilizzare nelle valutazioni di scorrimento viscoso, ulteriori modifiche riguardano in particolare, la frazione di danno da creep consentita è stata modificata da $Dc^{allow} = 0,8$ (2007) a $Dc^{allow} = 1$ (2016) (vedere l'equazione 10.28);
- Introdotte nuove considerazioni per le valutazioni di danno da incendio. Nell'allegato 11B vengono fornite delle linee guida per l'esecuzione delle indagini metallurgiche (limitate ad acciai al carbonio, basso legati ed inossidabili) e per l'interpretazione dei relativi risultati;
- La parte 14 riguarda le rotture da fatica.

2. Caso esempio

Il componente considerato è un reattore petrolchimico le cui principali caratteristiche sono: diametro compreso tra 1900 mm (top) e 3000 mm (bottom), spessore compreso tra 12 mm (top) e 52 mm (bottom), progettato secondo ASME Sez. VIII, Div. 1. Il componente è supportato da una gonna avente diametro compreso tra 3073 mm (top) e 4805 mm (bottom) e spessore nominale pari a 45 mm. Il reattore è realizzato in acciaio SA 516 Gr. 70. Le condizioni di progetto sono: $P = 5$ barg, $T = 180$ °C. In Figura 1 è riportato un disegno schematico del componente esaminato.

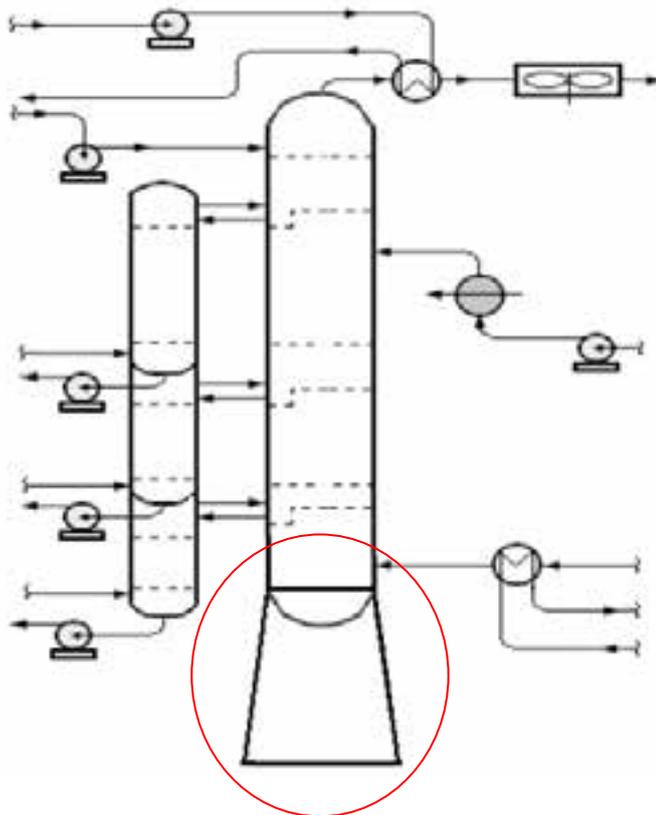


Figura 1. Schema del componente

Per ragioni costruttive non è stato possibile effettuare il trattamento termico alla saldatura tra gonna e fasciame del reattore ed è stato quindi necessario eseguire un'analisi ECA/FFS della saldatura medesima al fine di valutare la validità dei criteri di accettabilità previsti in ASME B&PV Div. 2 anche in assenza del trattamento termico stesso.

2.1 Metodologia adottata

L'analisi è stata condotta in due fasi:

- valutazione dello stato di sforzo agente sulla saldatura dovuto a peso proprio, carichi sui bocchelli, vento ed azione sismica utilizzando il metodo degli elementi finiti,
- valutazione della stabilità dei difetti in accordo ad API 579-1/ASME FFS-1 – Parte 9 Livello 2 (sia ed. 2007 che ed. 2016) tenendo conto sia degli sforzi valutati al punto precedente che delle tensioni residue dovute all'assenza del trattamento termico.

2.2 Analisi ad elementi finiti

2.2.1 Modello di calcolo

In Figura 2 è riportata la sezione del modello geometrico adottato per il calcolo degli sforzi mentre in Figura 3 è riportata la discretizzazione geometrica, realizzata mediante 213410 elementi esaedrici e tetraedrici e 188044 nodi.

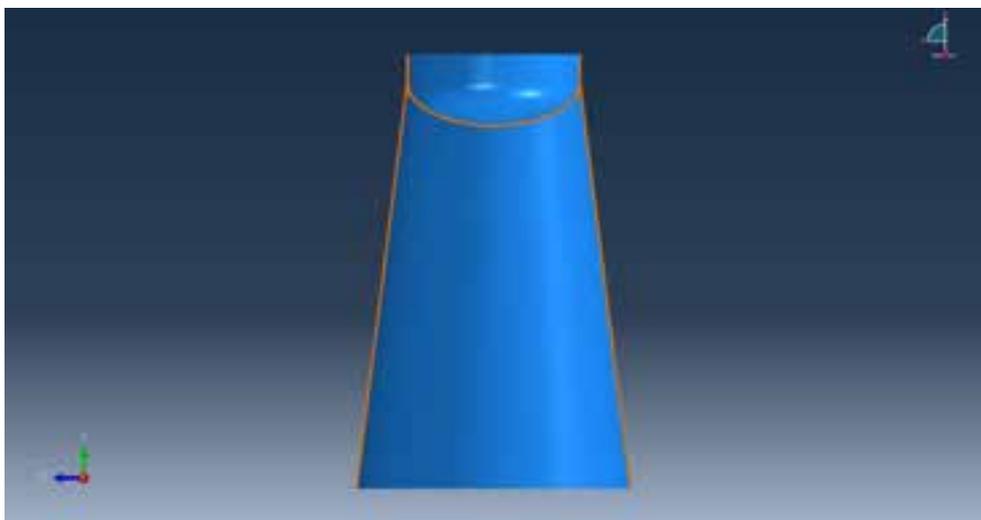


Figura 2. Modello geometrico

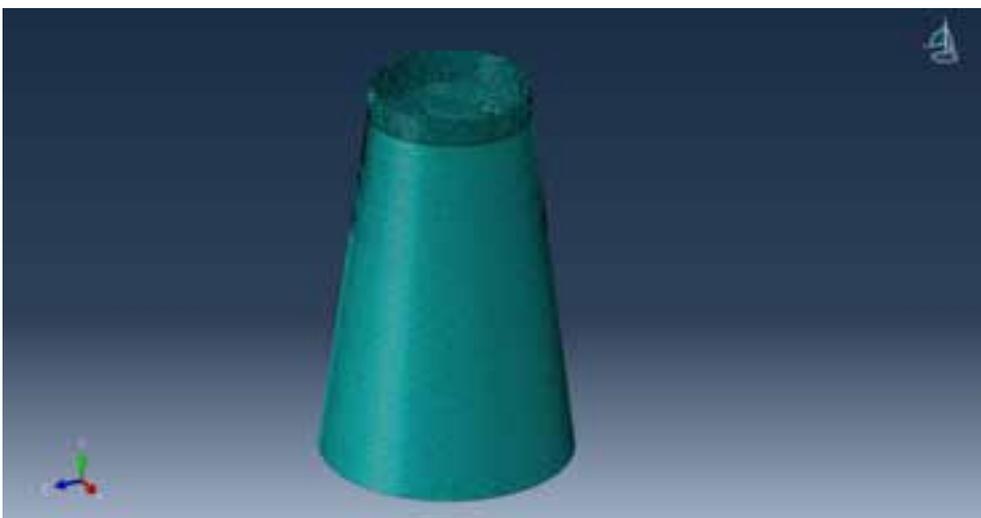


Figura 3. Discretizzazione

2.2.2 Risultati ottenuti

La Figura 4 mostra il massimo sforzo principale nella gonna: Per l'analisi FFS è stato adottato lo sforzo principale massimo agente in corrispondenza della saldatura da analizzare pari a 54.8 MPa. Si osservi che tale valore è stato, conservativamente, assunto come costante su tutta la sezione interessata dalla saldatura ed è stato considerato come carico primario.

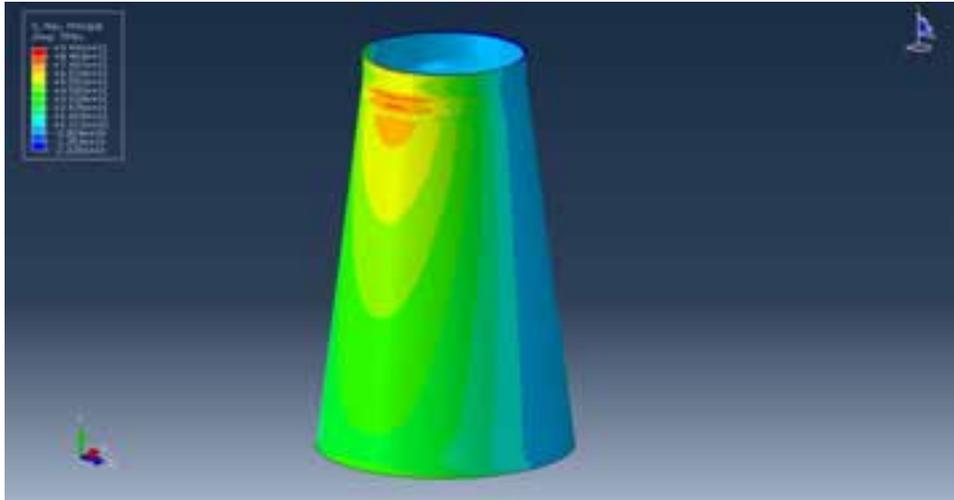


Figura 4. Sforzo principale nella gonna

2.3 Analisi FFS/ECA

Come già anticipato l'analisi è stata condotta sulla base di quanto previsto da API 579-1/ASME FFS-1 – Parte 9 Livello 2 (sia ed. 2007 che ed. 2016).

2.3.1 Tipologia di difetti considerati

Sono state considerate sei tipologie di difetti:

- difetto circonferenziale situato sulla superficie interna della saldatura con lunghezza pari all'intera circonferenza della gonna (Figura 5 a),
- difetto circonferenziale situato sulla superficie esterna della saldatura con lunghezza pari all'intera circonferenza della gonna (Figura 5 b),
- difetto circonferenziale interno con lunghezza pari all'intera circonferenza della gonna (Figura 5 c),
- difetto circonferenziale semiellittico situato sulla superficie interna della saldatura con vari rapporti $a/2c$ (Figura 5 d),
- difetto circonferenziale semiellittico situato sulla superficie esterna della saldatura con vari rapporti $a/2c$ (Figura 5 e),
- difetto circonferenziale ellittico interno con vari rapporti $2a/2c$ (Figura 5 f),

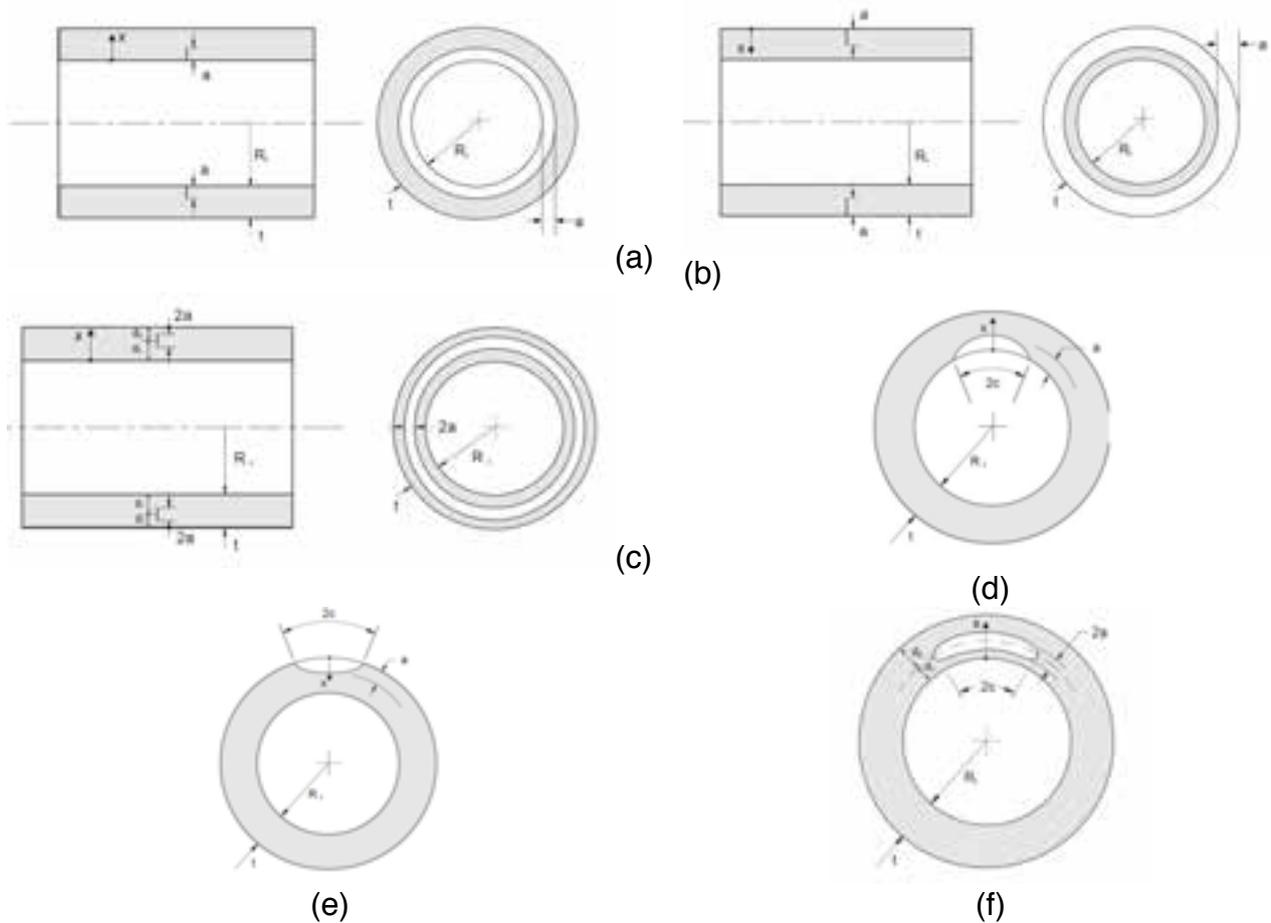


Figura 5. Tipologie difetti

2.3.2 Carichi considerati

I difetti sono stati considerati sottoposti ai seguenti carichi:

Carichi primari

I difetti sono stati considerati soggetti al massimo sforzo principale (54.8 MPa) considerato come carico membranale.

Sforzi residui

Il calcolo degli sforzi residui è stato ampiamente modificato e maggiormente dettagliato nell'ed. 2016 rispetto all'ed. 2007. Tuttavia se ci si limita al calcolo degli sforzi residui sulla superficie del componente e tale valore viene assunto conservativamente come costante in tutta la sezione della saldatura il calcolo può essere notevolmente semplificato ottenendo quanto segue:

$$\sigma_{r_{ys}} = \sigma_{ys} + 69 \text{ MPa} = 260 \text{ MPa} + 69 \text{ MPa} = 329 \text{ MPa} \quad (1)$$

Tale valore risulta uguale sia per l'ed. 2007 (Annex E eq. E.1) che per l'ed. 2016 (Annex 9D eq. 9D.1) della API 579-1/ASME FFS-1.

2.3.3 Tenacità a frattura e coefficienti di sicurezza

Tenacità

La tenacità a frattura è stata assunta pari a $110 \text{ MPa m}^{0.5}$ come suggerito sia dall'ed. 2007 (Annex F.4.4.1) che per l'ed. 2016 (Annex 9F.4.2) della API 579-1/ASME FFS-1.

Coefficienti di sicurezza

Per quanto riguarda i coefficienti di sicurezza l'ed. 2016 non prevede esplicitamente l'uso di coefficienti di sicurezza e non fornisce alcuna indicazione al riguardo. L'ed. 2007 in accordo alla Tabella 9.3 prevede quanto segue:

- PSF_{stress} 2.0
- PSF_{toughness} 1.0
- PSF_{crack length} 1.0

2.3.4 Risultati

Per poter confrontare in modo più stringente le due edizioni è stato effettuato dapprima un calcolo introducendo nella procedura dell'ed. 2016 gli stessi coefficienti di sicurezza dell'ed. 2007 e quindi un secondo calcolo senza tali coefficienti. Per brevità si riportano esclusivamente i risultati relativi alla cricca circonferenziale situata sulla superficie interna ma quanto riscontrato è estendibile a tutte le tipologie di difetti considerati.

Per quanto riguarda l'ed. 2007, il coefficiente K è stato calcolato mediante l'eq. C.185 (Annex C) e il reference stress mediante l'eq. D.70 (Annex D).

Per quanto riguarda l'ed. 2016, il coefficiente K è stato calcolato mediante l'eq. 9B.185 (Annex 9B) e il reference stress mediante l'eq. 9C.72 (Annex 9C).

In Tabella 2a e 2b ed in Figura 6 sono riportati i risultati ottenuti nel primo calcolo: i valori del coefficiente K e del reference stress sono identici nei due casi ma varia il parametro Φ che regola l'interazione tra carichi primari e carichi secondari per cui il risultato complessivo è leggermente differente e l'ed. 2016 appare più restrittiva

360° - Circumferential internal surface crack: a = 1.4 mm (height)						
Primary stress distribution (Mpa)					K ^P (MPa m ^{0,5})	
σ ₀	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄		
54.80	0.00	0.00	0.00	0.00	8.339	
P _m (MPa)		P _b (MPa)			S _{ref} ^P (MPa)	L _r ^P
54.8		0.0			113.1	0.435
Secondary stress distribution (MPa)					K ^{SR} (MPa m ^{0,5})	
σ ₀	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄		
329.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.03	
P _m (MPa)		P _b (MPa)			S _{ref} ^{SR} (MPa)	L _r ^{SR}
329.00		0.0			339.4	1.31
K _r		L _r ^P			Φ	
0.333		0.435			1.13	

Tabella 2a. Risultati ed. 2007

360° - Circumferential internal surface crack: a = 1.4 mm (height)						
Primary stress distribution (Mpa)					K ^P (MPa m ^{0,5})	
σ ₀	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄		
54.80	0.00	0.00	0.00	0.00	8.339	
P _m (MPa)		P _b (MPa)			S _{ref} ^P (MPa)	L _r ^P
54.8		0.0			113.1	0.435
Secondary stress distribution (MPa)					K ^{SR} (MPa m ^{0,5})	
σ ₀	σ ₁	σ ₂	σ ₃	σ ₄		
329.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.03	
P _m (MPa)		P _b (MPa)			S _{ref} ^{SR} (MPa)	L _r ^{SR}
329.00		0.0			339.4	1.31
K _r		L _r ^P			Φ	
0.379		0.435			1.33	

Tabella 2b. Risultati ed. 2016

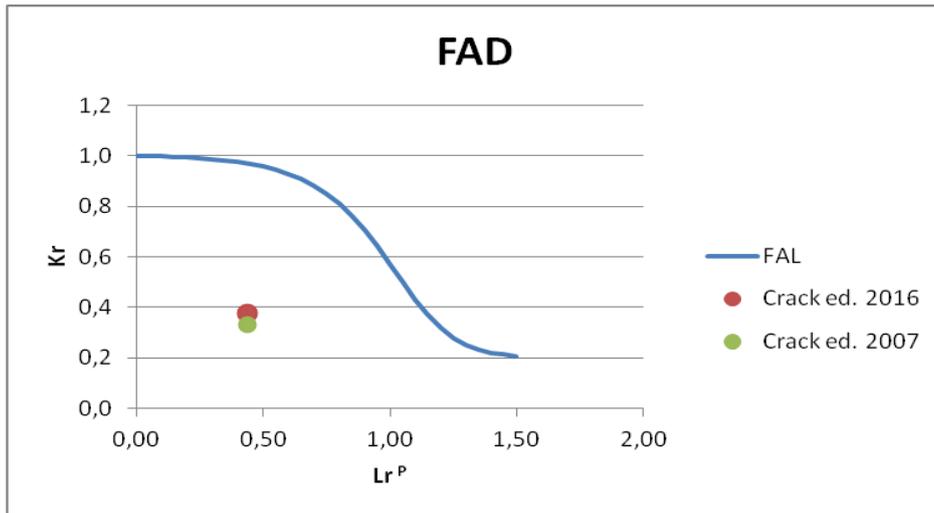


Figura 6. Confronto risultati

In Tabella 3 ed in Figura 7 sono riportati i risultati ottenuti nel secondo calcolo: i valori del coefficiente K e del reference stress sono chiaramente differenti nei due casi e l'ed. 2007 appare decisamente più restrittiva, come atteso.

360° - Circumferential internal surface crack: a = 1.4 mm (height)						
Primary stress distribution (MPa)					K ^P (MPa m ^{0,5})	
σ0	σ1	σ2	σ3	σ4		
54.80	0.00	0.00	0.00	0.00	4.169	
Pm (MPa)		Pb (MPa)			S _{ref} ^P (MPa)	L _r ^P
54.8		0.0			56.5	0.217
Secondary stress distribution (MPa)					K ^{SR} (MPa m ^{0,5})	
σ0	σ1	σ2	σ3	σ4		
329.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.03	
Pm (MPa)		Pb (MPa)			S _{ref} ^{SR} (MPa)	L _r ^{SR}
329.00		0.0			339.4	1.31
K _r		L _r ^P		φ		
0.321		0.217		1.24		

Tabella 3. Risultati ed. 2016 senza PSF (da confrontarsi con Tabella 2a)

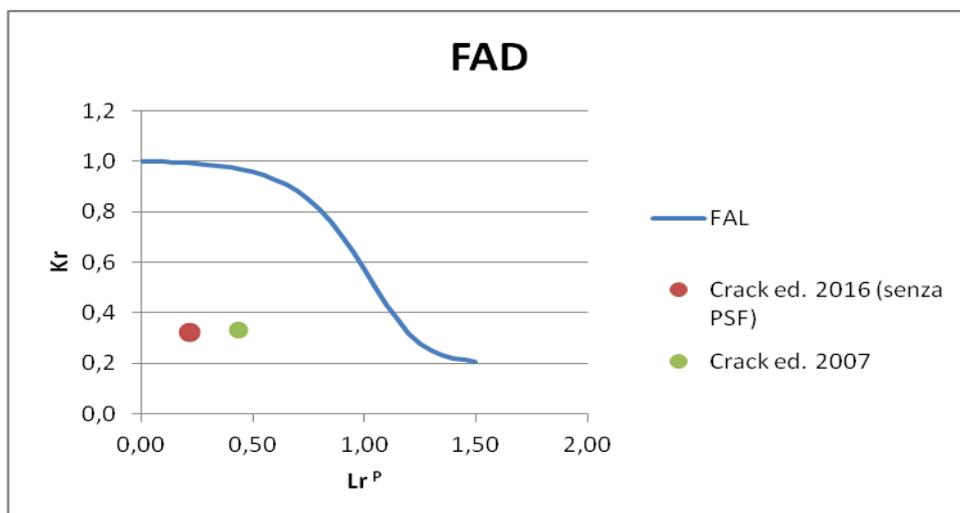


Figura 7. Confronto risultati

3. Conclusioni

La nuova edizione 2016 del codice API 579 ha apportato di fatto molti piccoli cambiamenti nell'intero corpo della norma, alcuni solo editoriali ed altri sostanziali. È consigliabile pertanto rivedere e modificare le procedure ed i fogli di calcolo coerenti alla precedente versione 2007 per renderli conformi all'attuale versione.

4. Bibliografia

- [1] API 579-1/ASME FFS-1 with 2009 Addenda. 2007
- [2] API 579-1/ASME FFS-1 with 2009 Addenda. 2016
- [3] ASME BPVC, Section VIII, Div. 1. 2013
- [4] ASME BPVC, Section VIII, Div. 2. 2013
- [5] D. A. Osage, P. Dong, D. Spring. Fatigue assessment of welded joints in API 579-1/ASME FFS-1 2016 - existing methods and new developments. *Procedia Engineering*, Volume 213, 2018, Pages 497-538

Impiego di tecniche di *Additive Manufacturing* per la realizzazione di attrezzature a pressione

L. Ricciardi¹, A. Tonti¹, A. Ferraro¹, M. Pirozzi¹, L. Campanile¹, R. Sorci²

¹ Inail - Dit

² Rina Consulting - Centro Sviluppo Materiali SpA

Sommario

I recenti sviluppi nei processi di *Additive Manufacturing* (AM) o produzione additiva consentono l'impiego di tale tecnologia nella produzione di attrezzature di lavoro e in particolare di attrezzature a pressione. Tra le diverse tecnologie disponibili si possono citare, ad esempio, quelle che utilizzano il laser, o altre forme di energia, per produrre metalli di fusione, partendo da un letto di polveri metalliche, come la *Selective Laser Melting* – Fusione Laser Selettiva (SLM) e la *Direct Metal Laser Sintering* – Sinterizzazione Laser Diretta su Metallo (DMLS). Esistono, poi, dei processi che prevedono lo stampaggio 3D di leghe, prodotte dal mescolamento di pasta e polvere metalliche, da estrarre e sinterizzare in forno (tecnica denominata *Metal Pasta*). Le suddette tecnologie, tuttavia, presentano allo stato attuale alcuni limiti, quali le ridotte dimensioni dei pezzi realizzabili e i costi di produzione troppo elevati rispetto ai processi di produzione tradizionali.

Recentemente, però, sono allo studio processi meno costosi e più adatti per la fabbricazione di membrane di grandi dimensioni, quali: la tecnologia *Directed Energy Deposition* (DED) o *Laser Cladding*, che prevede la deposizione mediante bracci robotici di strati di materiale strutturale (generalmente polvere metallica) fuso da un laser; oppure la tecnologia *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) che combina processi di saldatura standard (prevalentemente MIG) con sistemi automatici per l'alimentazione del materiale strutturale formato da filo metallico, consentendo la realizzazione di oggetti costituiti da strati di metallo fuso; e, infine, la *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM), utilizzata dal Dipartimento di Difesa americano per realizzare strutture metalliche molto grandi, che presume la fusione per saldatura a fascio di elettroni di filo di titanio.

Lo studio propone una disamina delle tecnologie di produzione additiva utilizzabili per la costruzione e/o riparazione di attrezzature o componentistica a pressione, al fine di evidenziare le principali caratteristiche di processo che interferiscono con le caratteristiche meccaniche e chimiche dei prodotti così realizzati.

1. Introduzione

Il termine di *Additive Manufacturing*, così come altri termini utilizzati storicamente, quali *Additive Fabrication*, *Additive Process*, *Additive Technique*, *Additive Layer Manufacturing* e *Layer Manufacturing*, sono in genere utilizzati per tutte quelle tecnologie che, basate su una rappresentazione geometrica, creano oggetti fisici per successiva aggiunta di materiale e, quindi, in maniera completamente opposta a quanto avviene nei processi sottrattivi che lavorano per asportazione di materiale (ad esempio, lavorazioni per asportazione di truciolo).

Lo standard UNI EN ISO/ASTM 52900:2017 “*Additive Manufacturing -- General Principles – Terminology*” [2] definisce la produzione additiva “un processo di unione di materiali per realizzare oggetti a partire da modelli 3D, solitamente per sovrapposizione di *layer*, procedendo in maniera opposta a quanto avviene nei processi sottrattivi e formativi”.

Tutti i processi di AM hanno l'obiettivo comune di ottenere la produzione di un oggetto la cui funzionalità derivi dalla combinazione delle sue caratteristiche geometriche con le proprietà

del/dei materiali utilizzati. Per raggiungere il risultato auspicato, occorre realizzare, quindi, una serie di operazioni, che prevedano processi fisici, chimici o meccanici. Ad esempio, per conseguire le geometrie desiderate, è prevista l'applicazione di uno dei tre principi base (o loro combinazione) di seguito indicati:

- *Formative Shaping*: la forma viene ottenuta applicando una pressione ad un corpo di materia prima, come ad esempio accade nei processi di forgiatura, piegatura, fusione e stampaggio a iniezione, tipici della convenzionale metallurgia delle polveri o della lavorazione della ceramica;
- *Subtractive Shaping*: la forma viene ottenuta mediante la rimozione selezionata di materiale, come ad esempio nelle lavorazioni di fresatura, tornitura, foratura, EDM, ecc.;
- *Additive Shaping*: la forma viene ottenuta mediante aggiunta progressiva di materiale.

Nel passato le tecnologie additive erano sinonimo di "prototipazione rapida", in quanto venivano impiegate nel settore manifatturiero, soprattutto per creare modelli e prototipi di parti, e i pezzi fabbricati erano destinati ad un breve periodo di utilizzo, pertanto non erano impiegati come componenti finali in applicazioni a lungo termine; oggi lo sviluppo e l'evoluzione delle tecnologie additive consentono il loro utilizzo anche per la fabbricazione diretta di manufatti finiti quali componenti, attrezzature, parti funzionali di macchine e prodotti di vario genere realizzati in materiali polimerici, metallici, ceramici e compositi. Diversi sono, dunque, i materiali che possono essere utilizzati e variano a seconda della tipologia di prodotto da realizzare e dalla relativa applicazione (destinazione d'uso), in quanto ad ogni tipologia di materiale corrisponde un tipo di legame atomico differente con il quale loro stessi sono tenuti insieme, ad esempio i materiali metallici sono tipicamente uniti da legami metallici, mentre i materiali polimerici da legami covalenti. I tipi di legame forniscono le condizioni fondamentali per l'unione del materiale in un processo additivo; inoltre, l'operazione di unione dipende anche dalla forma con cui il materiale viene consegnato al sistema che deve svolgere il processo e da come viene distribuito. L'AM costituisce, di fatto, un'alternativa promettente per la fabbricazione di componenti realizzati attualmente con materiali costosi, come il titanio e il nichel.

La spinta all'utilizzo di suddette tecniche per la fabbricazione dei prodotti è data, in aggiunta, dalla possibilità di ridurre drasticamente il *time-to-market* del prodotto: l'AM infatti permette di avere cicli produttivi composti da un unico passaggio e di eliminare, in molti casi, ogni tipo di lavorazione tradizionale all'utensile. Quest'ultimo aspetto risulta particolarmente interessante nei casi in cui sia necessario fabbricare un componente con un materiale poco lavorabile e una geometria molto complessa, come spesso accade nell'industria automobilistica o aerospaziale o anche nel settore dell'industria biomedica, dove si riesce ad evitare i costi derivanti dall'impiego di stampi per produzioni in piccola serie.

La gamma di prodotti, dunque, si sta rapidamente estendendo, fino a comprendere le attrezzature a pressione; la reingegnerizzazione del processo di costruzione di palette di turbine, filtri, corpi valvola, è ormai una realtà in molti settori quali l'aeronautico e l'*automotive* e si sta diffondendo rapidamente nel settore industriale, soprattutto quello *oil & gas*.

Le caratteristiche dei prodotti realizzabili, dunque, sono fortemente influenzate da diversi parametri del processo adottato, tra cui il tipo di materiale base e la sorgente di energia termica, ma anche dalle caratteristiche di processo, quali ad esempio la direzione e le sequenze di deposizione, la velocità di alimentazione dell'eventuale filo.

La norma UNI EN ISO/ASTM 52900:2017 [2], sulla base dei principi di funzionamento, definisce sette categorie di processo - che non sono e non possono essere esaustive a causa dello sviluppo costante di nuove tecnologie:

- *material extrusion* (estrusione di materiale): il materiale viene distribuito selettivamente mediante un ugello o un orifizio;
- *material jetting* (getto di materiale): le "goccioline" di materiale vengono selettivamente depositate;

- *binder jetting* (getto legante): un agente legante allo stato liquido viene selettivamente depositato per unire materiali in polvere;
- *sheet lamination*: i fogli di materiale sono uniti per formare un oggetto;
- *vat photopolymerization* (fotopolimerizzazione): un fotopolimero liquido presente in una vasca viene selettivamente solidificato mediante una polimerizzazione foto-attivata;
- *powder bed fusion/sintering*: un flusso di energia termica selettivamente fonde regioni di un letto di polvere;
- *direct energy deposition*: un flusso di energia termica focalizzato è usato per fondere materiali quando stanno per essere depositati.

Le suddette categorie di processo possono ulteriormente essere raggruppate in due famiglie: processi AM a deposizione da letto di polveri (*Powder Bed Deposition*) e a deposizione diretta di metallo (*Direct Metal Deposition*); ci sono, poi, i processi ibridi ottenuti dalla combinazione delle due suddette famiglie.

Nella tabella 1 sono elencati i processi AM disponibili per i metalli, raggruppati secondo le categorie di processo fornite dalla norma UNI EN ISO/ASTM 52900:2017 [2].

Categoria	Processo	Materiale
<i>Powder Bed Fusion</i>	<i>Direct metal laser sintering (DMLS)</i> <i>Electron beam melting (EBM)</i> <i>Selective laser sintering (SLS)</i> <i>Selective laser melting (SLM)</i>	<i>Metal powder</i>
<i>Directed energy deposition</i>	<i>Electron beam freeform fabrication (EBF)</i> <i>Laser engineered net shaping (LENS)</i> <i>Laser consolidation (LC)</i> <i>Directed light fabrication (DLF)</i> <i>Wire and arc additive manufacturing (WAAM)</i>	<i>Metal powder, metal wire</i>
<i>Binder jetting</i>	<i>Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)</i>	<i>Metal powder</i>
<i>Sheet lamination</i>	<i>Laminated object manufacturing (LOM)</i> <i>Ultrasonic consolidation (UC)</i>	<i>Metal laminate, metal foil</i>

Tabella 1. Classificazione dei processi AM per metalli

2. Processi di fabbricazione di attrezzature e componenti a pressione con tecniche di AM

I principali materiali metallici disponibili per le produzioni industriali in AM, compresa la fabbricazione di attrezzature e componenti a pressione, sono gli acciai inossidabili per una facile ed economica realizzazione, l'acciaio *Maraging* per applicazioni che richiedono resistenza ma grande malleabilità, le leghe con cromo e cobalto che hanno elevata resistenza specifica (comunemente usate per produrre turbine), l'*Inconel* (per impieghi ad alta temperatura nelle industrie petrolifera e chimica) e, infine, le leghe di alluminio, molto versatili e leggere (indicate per svariate applicazioni).

Per la realizzazione di attrezzature a pressione, in materiale metallico o composito, è possibile utilizzare diverse tipologie di processi di produzione additiva. Si analizzeranno i due processi che attualmente risultano essere i più diffusi per la realizzazione di attrezzature a pressione, oggetto del presente studio.

2.1 Processi a letto di polvere (*Powder Bed Fusion*)

Nel settore oleoidraulico si utilizzano prevalentemente tecnologie di produzione basate sulla fusione a letto di polvere di metallo. La polvere, rilasciata su una piastra in modo uniforme, viene fusa o sinterizzata da una sorgente termica, che può essere costituita da una sorgente laser o da un fascio di elettroni, in modo da realizzare la geometria impostata.

Il processo consente di ottenere prodotti con geometrie più complesse e minore impiego di materiale a parità di caratteristiche meccaniche. Infatti, la tecnologia consente di distribuire il materiale in modo da renderlo più spesso solo dove è necessario debba resistere alle sollecitazioni, riducendo così il peso totale del componente, senza comprometterne l'integrità strutturale.

I principali fattori da considerare nella progettazione del processo di fusione a letto di polvere sono di seguito descritti.

Durante il processo di atomizzazione della polvere, possono formarsi sacche di gas che si trasferiscono nel prodotto finale e potrebbero causare un'eccessiva porosità dello stesso. Per rimuovere la porosità residua talvolta si effettua un post trattamento di pressatura isostatica a caldo (*Hot Isostatic Pressing – HIP*).

In generale per prevenire fenomeni di rottura a fatica o apertura di cricche in presenza di carichi elevati occorre garantire una densità pari o superiore al 99%.

Le caratteristiche di granulometria e purezza delle polveri devono essere mantenute per tutte le fasi del processo produttivo (anche in caso di riuso delle polveri).

Il processo produttivo prevede cicli di riscaldamento e raffreddamento, con conseguenti espansione e contrazione del materiale, che possono comportare la presenza di stress residuo nel prodotto finale. I metodi per ridurre lo stress residuo consistono nel variare, durante il processo, i parametri di lunghezza e direzione del laser, al fine di regolare le fluttuazioni di temperatura. Per evitare eccessive tensioni residue è anche possibile riscaldare la polvere prima dell'inizio della stampa oppure eseguire dei trattamenti termici sul prodotto finale. Le tensioni residue, inoltre, si concentrano in prossimità dei bordi liberi del pezzo da cui potrebbe avviarsi la delaminazione che è un processo di rottura tipico dei materiali stratificati e consiste nello scollamento delle lamine.

Il fenomeno della delaminazione è favorito dalla presenza di zone di polvere non perfettamente fusa nel materiale finale per un disomogeneo riscaldamento del substrato. Anche in questo caso è possibile ridurre il fenomeno controllando opportunamente la temperatura e l'energia della sorgente termica.

La tensione superficiale dello strato di fusione viene adeguatamente mitigata riducendo il rapporto lunghezza-diametro dello strato di metallo fuso a un valore prefissato, evitando che il metallo solidifichi in maniera non omogenea sopra la polvere (*Swelling*), o che il materiale solidifichi in bolle, anziché in strati di solido (*Melt balling*).

Il controllo della temperatura e dei gas presenti nell'ambiente di produzione è effettuato anche al fine di evitare variazioni nella composizione delle leghe metalliche: i metalli di lega con minore punto di fusione possono parzialmente evaporare durante il processo, oppure l'ossigeno e l'umidità presenti nell'aria possono generare reazioni chimiche.

2.2 Processi a deposizione diretta di metallo (DED)

I processi a deposizione diretta di energia (*Laser Metal Deposition* o *Direct Energy Deposition*) consentono la realizzazione di strutture metalliche, anche di discrete volumetrie, mediante la deposizione e la fusione di polveri o di fili di metallo, operata da un flusso di energia termica concentrato. La sorgente termica può essere costituita da un laser, un fascio di elettroni o da plasma trasferito ad arco. Questa tipologia di processi prevede l'utilizzo sia di polveri, prevalentemente metalliche (*Powder Blown Deposition*), sia di fili metallici (*Wire Deposition*). I fili metallici sono più economici e di più facile reperibilità rispetto alle polveri

metalliche, che devono essere di volta in volta prodotte a seconda dell'oggetto da realizzare. La polvere metallica o il filo, il gas di protezione e il laser vengono simultaneamente erogati attraverso un ugello. Per talune applicazioni si realizzano strutture composite a matrice metallica mediante l'aggiunta di particelle ceramiche al materiale metallico di alimentazione. Il prodotto ottenuto può essere, poi, sottoposto a processi di finitura, quali ad esempio la micro sabbatura, la molatura, la lucidatura o altro, al fine di ottenere un'attrezzatura avente determinate caratteristiche.

Il processo DED denominato WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) [1] impiega come sorgente termica la saldatura ad arco GMAW (saldatura ad arco con metallo sotto protezione di gas) con elettrodo di tungsteno (GTAW) o al plasma (PAW). Questa tecnologia è ampiamente utilizzata per la deposizione di più strati di materiale, anche diverso, o per riparazioni, soprattutto in presenza di grossi spessori di metallo. La tecnologia WAAM consente di produrre componenti di grosse dimensioni, anche utilizzando materiali di pregio, come leghe di alluminio e di titanio e altre superleghe, oltre a diversi tipi di acciaio. I vantaggi nell'impiego della tecnologia in oggetto consistono nel minore (spesso nullo) spreco di materiale rispetto ai processi DED che utilizzano polvere metallica e la riduzione di porosità del prodotto realizzato.

In generale le caratteristiche del prodotto ottenuto sono influenzate da parametri quali la temperatura e la composizione della miscela di gas di raffreddamento, le condizioni di flusso dei gas protettivo e la velocità di deposizione del materiale. I gas impiegati per fondere i fili metallici sono inerti verso il materiale saldato ed evitano, così, che si generino distorsioni nel materiale finale dovute alla presenza di gas ossidanti. Le proprietà metallurgiche del componente ottenuto sono preservate e talvolta risultano addirittura migliorate; infatti è possibile controllare l'omogeneità della microstruttura e le dimensioni del grano cristallino mediante l'aggiunta di particolari miscele di gas di raffreddamento, che evitano la concentrazione di calore, soprattutto negli strati superiori del pezzo.

Quando si utilizza l'alimentazione a filo, in sostituzione del materiale polverizzato [4], la velocità di deposizione può aumentare fino a 2.500 cm³/h e si possono realizzare componenti di grandi dimensioni e con maggiore efficienza di utilizzo del materiale (fino a percentuali di utilizzo del 100%), seppure con minore grado di finitura e con inferiore complessità delle realizzazioni possibili.

Per quanto riguarda la microstruttura ottenuta, studi presenti in letteratura [2] riportano che i materiali ottenuti mediante alimentazione a polvere presentano maggiore porosità rispetto a quelli realizzati col filo.

Per i suesposti motivi il processo additivo alimentato a filo risulta, attualmente, la tecnologia di maggiore interesse per la realizzazione di componenti di grandi dimensioni e di limitata complessità geometrica, come ad esempio flange o recipienti.

3. Esempi di attrezzature e componenti a pressione realizzati con tecniche di AM

Dallo studio di articoli presenti in letteratura si evince che, ad oggi, l'impiego di processi AM si è principalmente focalizzato sulla sostituzione di componenti tradizionali, realizzando alternative con caratteristiche meccaniche e dimensionali equivalenti ma con un'importante riduzione del peso. Il primo settore che ha visto l'impiego di tecnologie additive per componenti che lavorano sotto pressione, seppure moderata, è quello della componentistica idraulica. I prodotti idraulici stampati con l'AM hanno caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche paragonabili a quelle dei prodotti fabbricati con metodiche tradizionali. Ad oggi vengono realizzati componenti idraulici con processo a letto di polvere, generalmente in acciaio inossidabile, quali i *manifold* e le valvole di regolazione. Il corpo di tali attrezzature può essere completamente reingegnerizzato, in quanto vi è la possibilità di

ottenere forme più complesse, più efficienti nel gestire il flusso di fluidi e soprattutto più leggere a parità di resistenza meccanica.

Per le valvole idrauliche generalmente vengono impiegati materiali quali acciai (AISI 316L, 17-4 PH, *Maraging*), leghe di alluminio o titanio (Ti6Al4V) e *Inconel* (IN718, IN625). Per quanto riguarda l'acciaio AISI 316L, questo è un tipo di acciaio inossidabile sul quale si ha molta esperienza per quel che riguarda i paramenti per stampaggio additivo [9], mentre il componente originale commercializzato è realizzato in acciaio zincato.

Il processo AM è stato testato anche nella produzione di valvole per motori a combustione interna [10], realizzate in IN718 tramite processo *Selective Laser Melting* (SLM). La riduzione del peso della valvola tramite geometrie cave ha permesso di ottenere valvole con minore inerzia e quindi motori più reattivi e controllabili. Le valvole prodotte con questo studio hanno prestazioni meccaniche ottimali (sforzo minimo di snervamento 1034 MPa) e una riduzione in peso del 20% rispetto alla componente originale e sono state testate per lavorare a 17 MPa (pressione applicata per simulare la pressione durante il processo di combustione). La componente sviluppata è una piastra sottile (0.5 mm) contenente canali per il ricircolo di liquido refrigerante, prodotta in Ti6Al4V tramite *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), progettata per lavorare in pressione (20 min test a 24 MPa). I test condotti hanno verificato ottime caratteristiche fluidodinamiche e meccaniche, oltre alla riduzione del peso (microdurezza 500 HV, porosità 0.28%).

Attualmente sono allo studio, presso il Laboratorio di Fisica Applicata dell'Università americana "*Johns Hopkins*", dei recipienti a pressione fabbricati con tecnologie additive a deposizione di metallo. Sono stati costruiti [7] recipienti di vario spessore in matrice metallica, rinforzata con fibre di carbonio o mediante placature, al fine di ottenere elevati rapporti resistenza/peso; le prove idrauliche, condotte a pressioni via via crescenti, hanno dimostrato capacità di resistenza alla pressione, a parità di spessore, superiori a quelle delle attrezzature metalliche tradizionali.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i valori medi e le deviazioni standard (σ) delle caratteristiche meccaniche, ottenuti su provini realizzati da due produttori di stampanti additive (*EOS e Renishaw*), comparati con quelli realizzati tramite processi tradizionali (forgiatura e fonderia).

Relativamente alla lega IN625 i dati dei prodotti AM si mostrano confortanti se paragonati a quelli ottenuti per casting, mentre le caratteristiche meccaniche ottenibili mediante forgiatura restano al momento superiori.

IN625														
As-built														
	EOS				Renishaw (30 μm)				Renishaw (60 μm)				Forged	Cast
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ		
Tensile strength [Mpa]	990	50	900	50	1055	3	964	2	922	9	770	56	1576	710
Yield strength [Mpa]	725	50	615	50	767	9	676	7	667	11	536	34	1400	350
Elongation at break [%]	35	5	42	5	34	1	42	1	18	2	11	4	4	48
Modulus of elasticity [Gpa]	170	20	140	20	205	10	186	11	175	16	176	9	214	218
Hardness HV	302				331	8	332	8	302	13	308	6	442	
Surface roughness [μm]	4-6		20-50		2-3		6-7							
Density (min) [g/cm^3]	8,4								8,04					
Heat Treated														
	EOS ⁽⁴⁾				Renishaw (30 μm) ⁽⁵⁾				Renishaw (60 μm) ⁽⁵⁾					
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ		
Tensile strength [Mpa]	1040	100	930	100	1020	1	955	2	1005	6	985	10		
Yield strength [Mpa]	720	100	650	100	633	1	598	2	600	4	583	2		
Elongation at break [%]	170	20	160	20	39	1	43	1	31	2	32	4		
Modulus of elasticity [Gpa]	35	5	44	5	206	3	200	2	208	4	209	6		
Hardness HV	298				251	13	254	16	279	7	290	8		

Tabella 2. IN625 (Caratteristiche meccaniche).

In Tabella 3 il confronto ottenuto sulla lega IN718 mostra che le caratteristiche meccaniche ottenute con processo AM sono comparabili a quelle ottenute sui processi tradizionali e addirittura risultano superiori a valle di un trattamento termico ottimizzato.

IN718																
As-built																
	EOS				Renishaw (30 μm)				Renishaw (60 μm)				Forged	Cast		
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ		σ		
Tensile strength [Mpa]	1060	50	980	50	1041	7	791	3	1057	11	943	38	1380	809	51	
Yield strength [Mpa]	780	50	634	50	758	4	636	19	753	8	639	13	1192	516	34	
Elongation at break [%]	27	5	31	5	30	1	36	1	25	3	19	8	25	8	2	
Modulus of elasticity [Gpa]	160	20			186	5	158	18	203	10	191	9	185	205		
Hardness HV	302				277	9	302	8	275	14	295	11	340	40	266	
Surface roughness [μm]	4-6,5		20-50		1,28-1,36		1,72-1,96		1,14-1,7		2,36-3					
Density (min) [g/cm^3]	8.15								8.19							
Heat Treated																
	EOS AMS 5662 ⁽¹⁾				EOS AMS 5664 ⁽²⁾				Renishaw (30 μm) ⁽³⁾				Renishaw (60 μm) ⁽³⁾			
Direction	Z	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ
Tensile strength [Mpa]	1400	100	1380	100	1467	6	1391	9	1504	3	1439	11				
Yield strength [Mpa]	1150	100	1240	100	1259	5	1202	15	1306	10	1231	10				
Elongation at break [%]	15	3	18	5	17	1	17	1	16	2	16	2				
Modulus of elasticity [Gpa]	170	20	170	20	195	13	186	15	202	4	198	11				
Hardness HV	472				424				418	9	488	11	465	28	467	20
HIP																
	Renishaw (30 μm)				Renishaw (60 μm)											
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ								
Tensile strength [Mpa]	1379	3	1346	5	1289	4	1228	24								
Yield strength [Mpa]	1088	26	1052	4	958	8	929	10								
Elongation at break [%]	25	1	24	1	23	2	17	4								
Modulus of elasticity [Gpa]	207	4	201	3	219	6	214	7								
Hardness HV	456	11	468	7	408	11	418	16								

Tabella 3. IN718 (Caratteristiche meccaniche)

AISI316L												
	As-built											
	EOS				Renishaw				Forged	Cast		
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ				
Tensile strength [Mpa]	640	50	540	55	676	2	624	17	515	483-586		
Yield strength [Mpa]	530	60	470	90	574	3	494	14	205	207-345		
Elongation at break [%]	40	15	50	20	43	2	35	8	30	30-50		
Modulus of elasticity [Gpa]	185		180		197	4	190	10	226	184		
Hardness HV				180	198	8	208	6				
Surface roughness [μm]	13	5	80	20	5	1	5	1				
Density (min) [g/cm^3]				7,9				7,99				
Melting range [$^{\circ}\text{C}$]				1371 $^{\circ}\text{C}$ to 1399 $^{\circ}\text{C}$								

Tabella 2. AISI316L (Caratteristiche meccaniche)

Ti6Al4V										
	As-built									
	EOS				Renishaw				Forged	Cast
Direction	XY	σ	Z	σ	XY	σ	Z	σ		
Tensile strength [Mpa]	1290	50	1240	50	1091	6	1084	8	931	860
Yield strength [Mpa]	1140	50	1120	80	1020	25	987	22	855	758
Elongation at break [%]	7	3	10	3	16	1	17	1	10	8
Modulus of elasticity [Gpa]	1110	15	1110	15	132	9	128	7	104	120
Hardness HV				312	363	11	363	13	342	311
Surface roughness [μm]	9	2	60	20	3	1	6	1		
Density (min) [g/cm^3]				4,41				4,42		
Melting range [$^{\circ}\text{C}$]	1635-1665									

Tabella 3. Ti6Al4V (Caratteristiche meccaniche).

Le prove condotte su 316L e Ti6Al4V, in ultimo, mostrano risultati leggermente migliorativi se processati tramite AM.

Di seguito vengono riportati i riferimenti dei Trattamenti Termici effettuati sui provini *Renishaw* e *EOS* di cui sopra.

Trattamenti Termici:	
1	Heat treatment procedure per AMS 5662: 1. Solution Anneal at 980 $^{\circ}\text{C}$ (1800 $^{\circ}\text{F}$) for 1 hour, air (/argon) cool. 2. Ageing treatment; hold at 720 $^{\circ}\text{C}$ (1330 $^{\circ}\text{F}$) 8 hours, furnace cool to 620 $^{\circ}\text{C}$ (1150 $^{\circ}\text{F}$) in 2 hours, hold at 620 $^{\circ}\text{C}$ (1150 $^{\circ}\text{F}$) 8 hours, air (/argon) cool.
2	Heat treatment procedure per AMS 5664: 1. Solution Anneal at 1065 $^{\circ}\text{C}$ (1950 $^{\circ}\text{F}$) for 1 hour, air (/argon) cool. 2. Ageing treatment; hold at 760 $^{\circ}\text{C}$ (1400 $^{\circ}\text{F}$) 10 h
3	Heat treated conditions: 1. Solution treated at 980 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$ for 1 hr 2. Aged at 720 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$ for 8 hr, and further aged at 620 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$ for 8 hr.
4	Stress relieve: anneal at 870 $^{\circ}\text{C}$ (1600 $^{\circ}\text{F}$) for 1 hour, rapid cooling
5	Annealed at 1048 $^{\circ}\text{C}$ for 1 hr followed by furnace cool.

Tabella 4. Trattamenti Termici su provini Renishaw e EOS

I risultati illustrati sembrano, pertanto, essere promettenti e per alcune applicazioni specifiche aprono la possibilità all'utilizzo di componenti AM in sostituzione di quelli realizzati con tecnologie standard.

4. Principali riferimenti normativi per la progettazione e la costruzione di attrezzature a pressione realizzate con tecnologia AM

Il riferimento di legge per la costruzione di tutte le attrezzature che ricadono nel campo di applicazione delle attrezzature a pressione la Direttiva 2014/68/UE (PED). Per la progettazione e la costruzione di recipienti a pressione non esposti a fiamma è possibile riferirsi alle norme tecniche armonizzate alla PED appartenenti alla serie UNI EN 13445.

Per la progettazione di recipienti a pressione realizzati con tecniche di AM, sarà possibile far riferimento alla norma *pr*EN 13446-14 (ancora in fase di stesura) che definisce dei requisiti aggiuntivi per attrezzature e componenti a pressione realizzati con processi di produzione additiva.

Per l'ammissione all'utilizzo di tutte le attrezzature a pressione, e quindi anche per quelle realizzate con tecniche AM, che risultano escluse dal campo di applicazione della direttiva PED (come ad es. attrezzature di cui al d.m. 1° dicembre 1980 o prodotte da fabbricanti extra UE), è necessario far riferimento alle specifiche tecniche applicative del d.m. 21.11.1972. Analogamente per l'esecuzione di riparazioni con componenti prodotti in AM da effettuarsi su attrezzature costruite prima dell'emanazione della PED.

Altri standard di riferimento per l'utilizzo di processi additivi, ma che non forniscono presunzione di conformità alla PED, sono rintracciabili nella serie di norme ISO/TC 261 e negli standard ASTM, redatti dalla commissione specifica F42. Quest'ultima ha già pubblicato una decina di standard, tra cui lo standard F3122 per la valutazione delle proprietà meccaniche di materiali metallici realizzati con processi AM. Di recente pubblicazione la ISO/ASTM 52910:2018 riguardante requisiti e raccomandazioni per la progettazione di attrezzature in AM.

5. Il processo di validazione per l'utilizzo di componenti a pressione realizzati con tecniche di AM

La norma tecnica che descrive le principali caratteristiche di qualità e i test da effettuare sui componenti realizzati con processi additivi è la norma UNI EN ISO 17296-3:2017 [3]. Questa risulta un valido riferimento per la stesura degli accordi di fornitura delle materie prime (polveri e filo) e di esecuzione del processo di stampa.

La qualifica e la certificazione di prodotti e parti realizzati mediante additive manufacturing (AM) devono essere trattate caso per caso, in funzione del campo di applicazione effettivo. La certificazione può riguardare una fase selezionata del processo di fabbricazione additiva fino all'intero processo, compresa l'omologazione dei prodotti fabbricati.

Inizialmente si parte da un percorso di qualifica che deve inoltre essere distinto in base al livello di maturità della tecnologia utilizzata, a seconda se si parla di tecnologia matura o tecnologia innovativa; in quest'ultimo caso, se le procedure e/o gli standard utilizzati non coprono materiali, processi o prodotti AM, il produttore deve dimostrare che il metodo utilizzato ha un livello equivalente di sicurezza o che il processo deve essere tale da garantire prodotti fabbricati in modo ripetibile, tracciabile e conformi alle specifiche tecniche applicabili.

6. Conclusioni

La disamina delle tecnologie di produzione additiva, attualmente utilizzabili o allo studio, per la costruzione e/o riparazione di attrezzature o componentistica a pressione, ha consentito di operare una prima valutazione dei fattori che possono influenzare le caratteristiche delle suddette attrezzature.

Per quanto riguarda la fase progettuale, si può beneficiare di una prototipazione molto rapida, con maggiore varietà di design rispetto ai processi tradizionali.

Alla fase progettuale segue un ridotto tempo di fabbricazione (pochi giorni), scarsamente influenzato dalla complessità geometrica del prodotto da realizzare.

Il consumo di materiale risulta minimo e, pertanto, è possibile anche impiegare materiali, che per alcune applicazioni non sono di utilizzo comune, quali il titanio e l'*Inconel* per la stampa di componenti idraulici.

Sono realizzabili strutture più leggere, grazie all'adozione di soluzioni trabecolari e di spessori variabili con utilizzo di surplus di materiale solo dove necessario ai fini della resistenza, e nuove geometrie che consentono di migliorare processi e flussi dei fluidi, mediante l'impiego di canali interni e di parti pre-assemblate o in monoblocco.

È necessario, tuttavia, esaminare anche gli aspetti meno favorevoli associati alla fabbricazione additiva.

La dimensione del prodotto è limitata, per i processi a letto di polvere, dalla dimensione della camera e, per la deposizione diretta, dallo spessore del singolo strato di metallo.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche, bisogna rilevare le criticità dovute alla gestione dell'anisotropia del materiale, alle disomogeneità e alle densità inferiori al valore teorico, alla presenza di rilevanti tensioni residue.

Sebbene il settore della produzione additiva nel manifatturiero-meccanico occupi già un ruolo complementare a quello delle tradizionali macchine utensili per asportazione e deformazione, il suo utilizzo nel settore delle attrezzature a pressione è ancora limitato.

Tuttavia i risultati ottenuti finora dagli studi condotti sono estremamente promettenti e lasciano intendere che, per alcune applicazioni specifiche, i componenti AM possono sostituire quelli realizzati con tecnologie standard.

7. Bibliografia

- [1] Donghong D., Zengxi P., Dominic C., Huijun L. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J Adv. Manufat. Technol.* 2015
- [2] UNI EN ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing - Principi generali – Terminologia;
- [3] UNI EN ISO 17296:3 Additive manufacturing - Principi generali - Parte 3: Caratteristiche principali e corrispondenti metodi di test
- [4] UNI EN ISO 17296:2 Additive manufacturing - Principi generali - Parte 2: Quadro generale delle categorie di processo e delle materie prime
- [5] Syed WUH et al. A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping. *Appl. Surf. Sci.* 2005; 247:268–276
- [6] ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing -- Design -- Requirements, guidelines and recommendations
- [7] McNelly B., Hooks R., Setzler W., Hughes C. Additive Manufacturing of Pressure Vessels (With Plating); ASME 2017 *Pressure Vessels and Piping Conference, Waikoloa, Hawaii, USA, July 16–20, 2017*
- [8] <http://www.valvemagazine.com/web-only/categories/technical-topics/9242-metal-additive-manufacturing-in-the-valve-industry.html>
- [9] <https://www.aidro.it/am-in-hydraulics-2.html>
- [10] Cooper D. Design and manufacture of high performance hollow engine valves by Additive Layer Manufacturing. *Science Direct Materials and Design.* 2015; 69:44–55.
- [11] Cooper, D.E., Stanford, M., Kibble, K.A., Gibbons, G.J. Additive Manufacturing for Product Improvement at Red Bull Technology, *Materials and Design.* 2012.

Analisi delle proprietà ad alta temperatura dell'acciaio T91, in aria e in piombo liquido

A. Strafella¹, A. Coglitore¹, E. Salernitano¹, F. Bezzi¹, P. Fabbri¹, A. Tonti²

¹ Enea- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile - Laboratorio tecnologie dei materiali Faenza

² Inail - Dit

Sommario

L'acciaio T91 è attualmente fra i più promettenti per applicazioni negli impianti di produzione di energia, dai sistemi a concentrazione solare ai reattori veloci di IV Generazione, come ad esempio gli LFR (Lead-cooled Fast Reactor). È, infatti, un acciaio ferritico/martensitico 9Cr-1Mo, modificato con Niobio e Vanadio per ottenerne il miglioramento delle proprietà termiche.

Nel presente lavoro, sono discussi i risultati della caratterizzazione del T91 esposto a 550°C in due condizioni di ambiente corrosivo/ossidante, quali aria statica e Piombo liquido. In particolare, sono state simulate le condizioni operative a cui l'acciaio è sottoposto negli impianti reali di produzione di energia, approfondendo lo studio della deformazione a creep. Sono state sperimentalmente acquisite le curve di deformazione, dalla cui elaborazione è stata ottenuta la curva caratteristica di creep in aria, a tutti i livelli di carico.

Ne è seguita l'analisi del comportamento ossidativo del materiale e la valutazione della sua influenza sulle proprietà termomeccaniche, anche in presenza di Pb. I risultati ottenuti sono coerenti con l'ipotesi della concomitanza di due meccanismi che si innescano ad alte temperature, quando il T91 è immerso in Pb liquido: si ha sia la formazione di uno strato di ossido superficiale che tende a proteggere l'acciaio, sia la corrosione che è favorita quando lo stato protettivo è assente o presenta delle microcricche, ripristinando così il contatto Pb liquido/acciaio. L'ipotesi dell'esistenza di questo doppio meccanismo e la sensibilità dell'acciaio all'infragilimento da metallo liquido (LME, Liquid Metal Embrittlement) sono stati confermati dall'analisi della microstruttura, morfologia e composizione chimica del materiale.

1. Introduzione

La ricerca in ambito nucleare è, attualmente, mirata allo sviluppo di componenti per reattori nucleari di IV generazione, fra i quali si trova LFR, reattore che ha come liquido di raffreddamento il piombo liquido.

Lo sviluppo di componenti per LFR (quali cladding e vessel) presenta, però, dei requisiti stringenti, fra i quali:

- Resistenza alle radiazioni, in particolare lo **swelling** da irraggiamento deve essere inferiore al 6%
- Elevate proprietà meccaniche in alta temperatura, in particolare **resistenza al creep**
- Elevata **resistenza alla corrosione**, ossia compatibilità con il liquido di raffreddamento, espressa come bassa suscettibilità all'infragilimento da Pb (LME, Liquid Metal Embrittlement)

Per la sua composizione (Tabella 1), l'acciaio T91 è ritenuto un acciaio potenzialmente ottimale per l'applicazione in ambito nucleare: l'aggiunta di Nb e V in lega 9Cr1Mo conferisce basso swelling ed elevate proprietà meccaniche ad elevate temperature[1].

ELEMENTI PRESENTI [%]															
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	Zr	V	Ti	B	N
0.114	0.415	0.019	0.0003	0.228	0.075	0.294	9.10	0.898	0.017	0.077	0.006	0.201	0.004	0.0005	0.0465

Tabella 1. Composizione chimica dell'acciaio T91 utilizzato (percentuali come da scheda tecnica stilata dal fornitore ArcelorMittal)

L'analisi delle proprietà a creep dell'acciaio e dell'interazione con il metallo liquido refrigerante risulta, quindi, imprescindibile per la reale applicazione del T91 in ambito nucleare e costituisce l'oggetto del presente lavoro [2,3,4].

In questo lavoro, si intende approfondire e proseguire lo studio effettuato in due altri lavori sul T91 [5,6], i quali hanno messo in evidenza la suscettibilità del T91 alla corrosione da Pb liquido, l'importanza del contatto Pb liquido/acciaio, la formazione di ossido protettivo sulla superficie dell'acciaio, che sotto carico di creep può rompersi, e l'esistenza di un doppio meccanismo corrosione/protezione, influenzato dal contenuto di O₂.

L'obiettivo è stato, quindi, quello di proseguire lo studio delle proprietà alle alte temperature del T91, in particolare il comportamento a creep in aria e Pb liquido e l'ossidazione a caldo; approfondire lo studio della suscettibilità al Pb liquido e la conseguente variazione delle proprietà meccaniche e individuare i meccanismi che inducono/ostacolano il LME.

2. Materiali e metodi

L'acciaio T91 (A 387 Grade 91 Class 2 / K90901, in accordo con l'ASTM A 387/M ED.2011), oggetto del presente studio, è un ferritico-martensitico, appartenente alla famiglia degli acciai 9Cr-1Mo, prodotto dalla ArcelorMittal Industeel. La sua composizione è stata riportata in tabella 1 ed è caratterizzata dall'aggiunta nell'acciaio di partenza di elementi in lega, come Nb e V, al fine di ottenere un incremento delle proprietà meccaniche, specialmente alle alte temperature. È, infatti, adoperato in ambito nucleare per l'elevata resistenza al creep, allo swelling e alla corrosione, dovuta alla particolare microstruttura costituita da martensite, e alla precipitazione di carburi e carbonitruri finemente dispersi.

Per i test di resistenza al creep, sono stati adoperati campioni cilindrici, con diametro 6mm e lunghezza utile 70mm. Per le prove di ossidazione, mediante STA, sono state utilizzate sezioni dei campioni precedenti.

Il piombo utilizzato per le prove è prodotto dalla Sigma-Aldrich ed è in forma di particelle con purezza $\geq 99.9\%$, dimensione ≤ 2 mm e temperatura di fusione di 327.4°C.

I precedenti lavori effettuati sul T91, avevano avuto come obiettivo la caratterizzazione a creep del T91 in aria¹ e Pb liquido a 550°C, ossia la tipica temperatura di lavoro del LFR, e carico applicato uniaxialmente compreso fra 210-280 MPa, quindi lontano dallo snervamento teorico ($330\text{MPa} \leq R_{p0.002} \leq 400$ MPa) (MAYES machine 20 kN) [5,6]. I risultati ottenuti dalle prove di creep in aria e in Pb sono stati analizzati ed ulteriormente approfonditi attraverso l'utilizzo di equazioni e parametri matematici e di metodologie di caratterizzazione quali SEM –EDS e TGA/DSC. Le prove di ossidazione sono state effettuate con l'Analizzatore Termico Simultaneo (STA 409C Netzsch) sul materiale tal quale, che ha permesso di monitorare in continuo l'acquisto di peso e le trasformazioni del campione. I termogrammi TGA/DSC sono stati acquisiti in condizioni dinamiche fino a 1000°C (velocità di riscaldamento 20°C/min; flusso d'aria 100ml/min) e in condizioni statiche a 550°C e 750°C (stasi pari a 600min; flusso d'aria 100ml/min).

¹ In condizioni di saturazione di Ossigeno

La morfologia e la microstruttura della superficie longitudinale dei campioni sottoposti a creep e di quelli ossidati termicamente (TGA/DSC) sono state osservate con il microscopio elettronico a scansione (SEM Leo 438 VP) nella modalità vuoto parziale per i primi ed alto vuoto per i secondi, utilizzando il rivelatore degli elettroni secondari.

Le composizioni elementali sono state valutate tramite microanalisi semi-quantitativa energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX).

3. Risultati e discussione

3.1 Creep in aria

I punti sperimentali delle prove di creep in aria hanno permesso di ricavare importanti parametri, quali la sscr (steady strain creep rate, velocità costante del secondario) e i tempi di rottura a creep. Il comportamento del T91 è stato quindi sintetizzato con le curve caratteristiche sscr-stress e tempo rottura-stress (log-log plot); tali curve permettono di prevedere e calcolare i parametri sscr e tr, per ogni carico [5,6].

Sulla base dei risultati ottenuti dai precedenti test, è stato, inoltre, possibile calcolare il Parametro di Larson Miller ad ogni carico, utilizzando l'equazione seguente:

$$PLM(f(s) = T[\log tr + C_{LM}] \quad (1)$$

con $C_{LM} = 20$, per i materiali metallici.

La figura 1 mette in evidenza come i punti così calcolati collassino su un'unica retta, detta **master curve**, utile alla previsione del comportamento a creep. In particolare, dato un tempo di rottura per il quale si auspica che un componente di interesse resista, espresso come PLM, il grafico è in grado di fornire il massimo stress di creep applicabile.

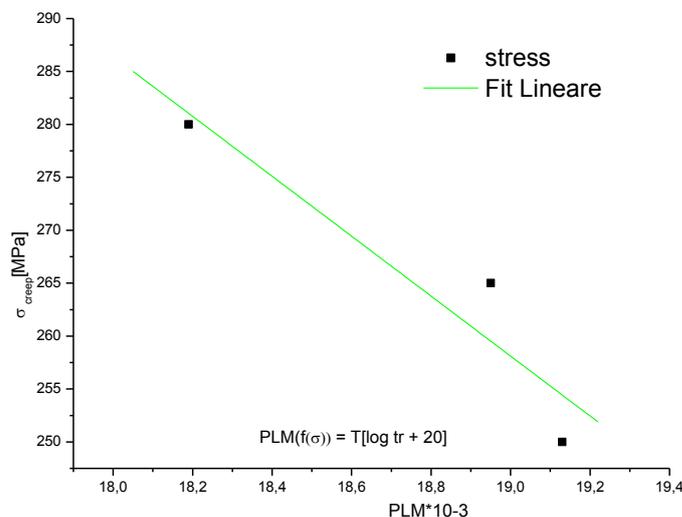


Figura 1. Master curve del T91

L'importanza della curva è dovuta al fatto che i risultati dei test di creep a temperature diverse da quella considerata dovrebbero appartenere alla retta calcolata, mantenendo la stessa pendenza. La retta, in definitiva, non è solo predittiva per i test a 550°C, ma costituisce il punto di partenza per successive prove a creep da effettuare per temperature diverse da quella in esame. I punti sperimentali acquisiti a temperature diverse, seguiranno l'andamento della curva ottenuta, raggruppandosi però in un intervallo di PLM diverso per ciascuna temperatura in esame.

I punti sperimentali acquisiti sono in linea con quanto riportato nei datasheet di ECCO, a titolo di esempio per una temperatura pari a 550°C, per durate nel range 10000 ÷ 200000 h, sono indicate tensioni di rottura da 200MPa fino a 150MPa [17].

3.2 Creep in Piombo

I test di creep in Pb effettuati nei precedenti lavori, avevano evidenziato la suscettibilità dell'acciaio T91 alla corrosione da piombo (LME)², ma al contempo l'esistenza di un doppio meccanismo corrosione/protezione, dovuto al formarsi dello strato di ossido superficiale che impediva il contatto acciaio/Pb liquido [5,6].

L'evidenza di quanto ipotizzato, è chiara dal confronto fra il secondario del campione testato in aria, completamente lineare, e del campione testato in Pb, lineare a tratti (Figura2).

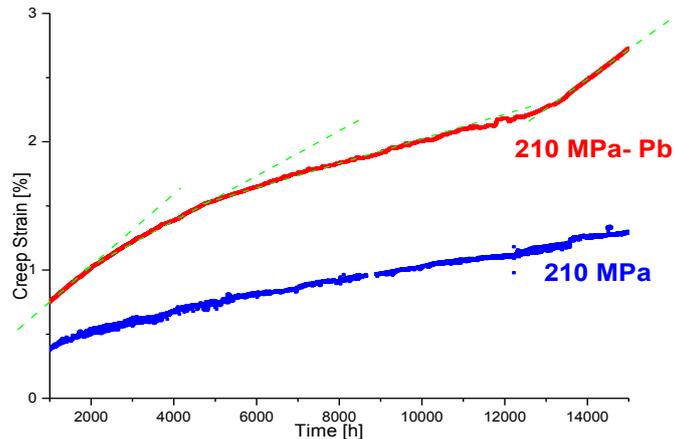


Figura 2. Confronto fra il creep secondario a 210MPa, in aria (blu) e Pb liquido (rosso); cambio di pendenza del secondario (verde)

Questo andamento si giustifica con il contrapporsi della corrosione da Pb liquido, che fa decrescere le proprietà a creep (es.: la deformazione maggiore) fino a quando il piombo è in contatto con l'acciaio, e della formazione e crescita dell'ossido, che interponendosi fra metallo liquido ed acciaio, ostacola l'infragilimento dell'acciaio e ne rallenta l'effetto. Questo meccanismo si manifesta con un rallentamento della sscr, visibile nella curva come una riduzione della pendenza. L'ossido è, però, un materiale fragile che tende a formare delle cricche, se sottoposto a carico. Si hanno, perciò, due fenomeni che giustificano il secondario lineare a tratti [2,3,5-12]:

- Se le cricche nello strato di ossido sono passanti e di dimensioni maggiori del diametro del Pb, si ripristina il contatto metallo liquido/acciaio, quindi la corrosione da metallo liquido che si manifesta con il LME
- Se le cricche nello strato di ossido non sono passanti e/o di dimensioni minori del diametro del Pb, la cricca impedisce il passaggio di Pb; se vi è sufficiente O₂ per la crescita dell'ossido, la cricca viene chiusa

I fenomeni legati al doppio meccanismo, ossia infragilimento e presenza di cricche, sono stati osservati anche mediante l'analisi SEM sulle superfici di frattura e laterale del campione testato in Pb [5,6]. Il presente lavoro ha previsto un approfondimento sulla microstruttura dell'ossido e della parte infragilita del campione. Per evidenziare le differenze microstrutturali, è stata interrotta la prova sul campione analizzato a creep in aria, dopo un numero di ore analogo al tempo di rottura del rispettivo test in Pb. Il campione testato in aria è stato, quindi, tagliato in prossimità della zona di maggiore strizione, per poi essere inglobato e lucidato longitudinalmente così come il campione testato in Pb.

² Il LME viene definito come la perdita di duttilità di un metallo o di una lega metallica normalmente duttile, quando viene sottoposto a stress meccanico in ambiente corrosivo da metallo liquido che può indurre l'infragilimento. Si ha dunque un cambiamento della tipologia di rottura da duttile a fragile [7].

Il confronto fra le due micrografie allo stesso ingrandimento, prima dell'attacco chimico, rileva importanti differenze (Figura 3).

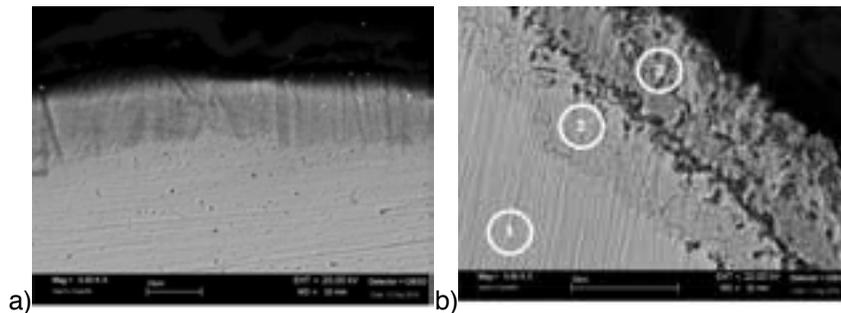


Figura 3. Confronto fra campione analizzato a creep a 210MPa e 16000h: a) in aria (non giunto a rottura; b) in Pb liquido: 1-metallo bulk, 2-IOZ; 3 multi-strato complesso dell'ossido

Il campione testato in aria presenta uno strato di ossido superficiale, dalla struttura porosa, che appare nella micrografia con contorni sfumati. Lo strato di ossido nel campione testato in Pb mostra una dimensione maggiore e una struttura più complessa, costituita essenzialmente da due strati: uno interno più compatto e uno esterno più poroso. In più, la zona dell'acciaio in prossimità dello strato di ossido appare danneggiata, rispetto all'acciaio bulk: sono le IOZ (Internal Oxidation Zone), zone ricche di Cr, in cui si verifica l'ossidazione con conseguente infragilimento dell'acciaio. In particolare, viene definito come un processo in cui l'ossigeno si diffonde in una lega e provoca, sotto la superficie dell'ossido, la precipitazione di uno o più elementi di lega. Il fronte della IOZ avanza con il tempo di permanenza in Pb liquido [14,15].

3.3 Analisi termogravimetrica

Come ulteriore studio sul comportamento ossidativo dell'acciaio, si è voluto svincolare il meccanismo ossidativo dalla corrosione da piombo liquido, effettuando delle prove di ossidazione termica mediante STA.

L'analisi **termogravimetrica** in aria ha permesso di valutare la variazione di peso dovuta all'ossidazione termica dell'acciaio.

L'**analisi dinamica**, condotta da temperatura ambiente fino a 1000°C ha permesso di valutare l'ossidazione e le temperature critiche del materiale. Dalla Figura 4-a si può, infatti, notare come il termogramma DSC presenti due picchi in corrispondenza della T_{Curie} ($\approx 743^\circ\text{C}$) e della temperatura di austenitizzazione che per questo acciaio è di $\approx 850^\circ\text{C}$, coerentemente con quanto si rileva sul diagramma Fe-C per la composizione del T91 (Figura 4-b)[16].

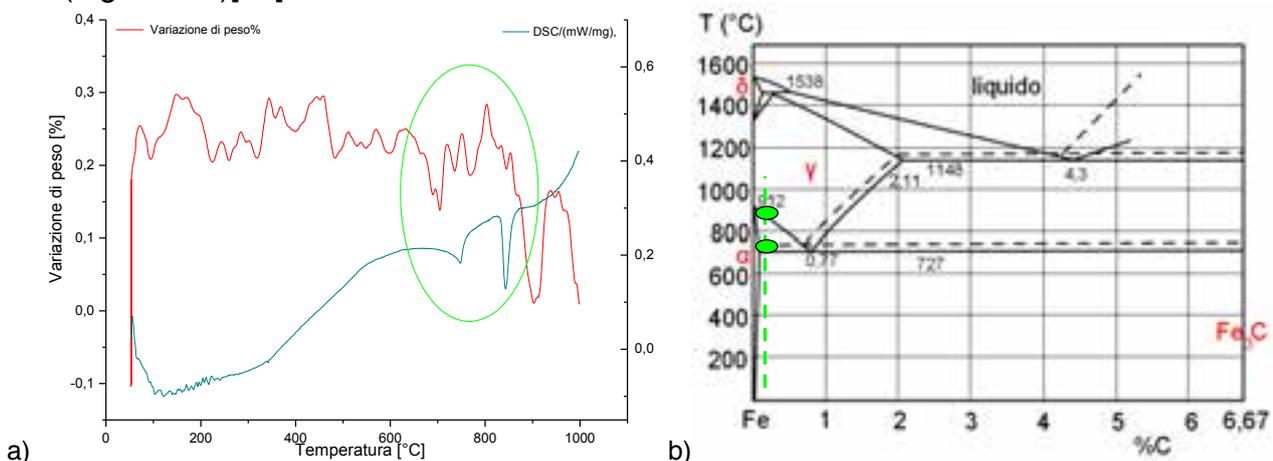
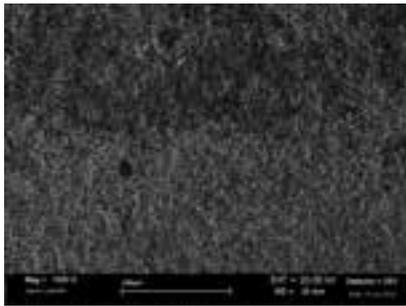


Figura 4. a) analisi TGA/DSC dinamica; b) composizione del T91, sul diagramma Fe-C

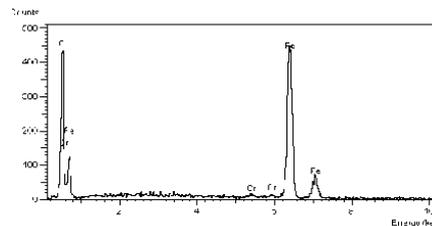
Si ricordi che la trasformazione in austenite ($A_{3, C=0\%}$ (912°C) $\text{Fe } \alpha \rightleftharpoons \text{Fe } \gamma$) comporta un aumento del volume della cella elementare dell'acciaio; questa trasformazione potrebbe comportare la rottura dell'ossido formato, quindi di conseguenza giustificare la perdita di peso riscontrata dopo i 600°C .

L'acquisto totale di peso, confermato anche da pesate effettuate tramite bilancia analitica, è di circa 0,3mg, corrispondente allo 0,2% medio.

Il campione analizzato è stato dunque osservato al SEM, al fine di esaminare la struttura dell'ossido generata (Figura 5).



a)



Element	Average %w	Deviazione standard
O	35,5	0,5
Cr	0,9	0,2
Fe	63,7	0,3

b)

Figura 5. Micrografie SEM del campione ossidato fino a 1000°C : a) x1000: ingrandimento complessivo; b) analisi EDX

Le micrografie hanno evidenziato una morfologia complessa e l'esistenza di due strutture fondamentali: zone a struttura aciculare e zone a struttura globulare (Figura 6- a) e b)). Si può affermare che, con il permanere in temperatura, la prima si è evoluta nella seconda, come dimostra la Figura 6-c).

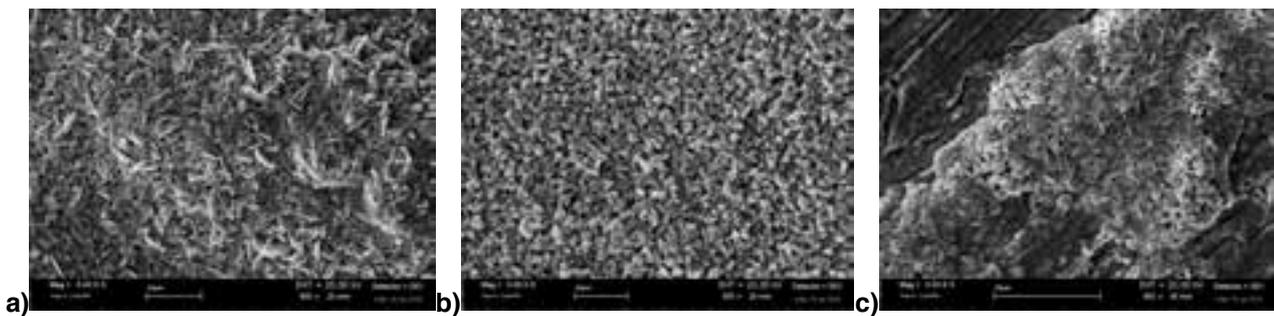


Figura 6. Micrografie SEM del campione ossidato fino a 1000°C : a) zona a struttura aciculare; b) zone a struttura globulare; c) zona di evoluzione dell'ossido: più aghi formano agglomerati

Occorre sottolineare che la durata della prova TGA dinamica è stata di circa 95min totali, tempo insufficiente affinché si potesse costituire uno strato uniforme di ossido, ma utile allo studio della struttura complessa dell'ossido.

Coerentemente con i dati in letteratura, l'analisi EDX ha rilevato una composizione dell'ossido costituita principalmente da Fe, O e Cr; questo in accordo con l'ipotesi di struttura multi-strato dell'ossido che prevede uno strato più esterno di ossido Fe-O, in particolare al di sotto dei 560°C magnetite, e uno strato più interno Fe-Cr /spinello [5,6,8,10,13,14].

È stata anche effettuata l'analisi isoterma alla temperatura di lavoro standard di un reattore LFR, 550°C, alla quale sono stati condotti anche i test a creep (Figura 7).

In accordo con le ipotesi, l'analisi termogravimetrica ha dimostrato l'esistenza di uno strato di ossido che però risulta estremamente sottile. Questo viene evidenziato da un aumento di peso di circa 0,05mg, dopo circa 10h dal raggiungimento della temperatura di analisi. Il dato è stato confermato tramite pesata con bilancia analitica.

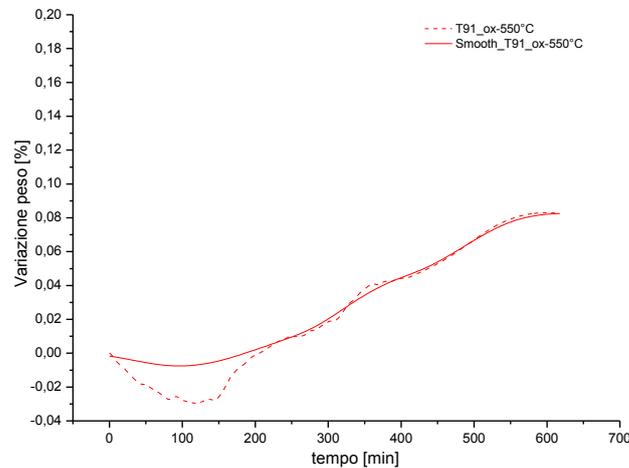


Figura 7. Analisi TGA isoterma a 550°C

Le micrografie ottenute mediante SEM hanno messo in evidenza come, anche a 550°C, la struttura dell'ossido sia stratificata: sullo strato uniforme di ossido sono presenti delle isole di particelle aciculari (Figura 8).

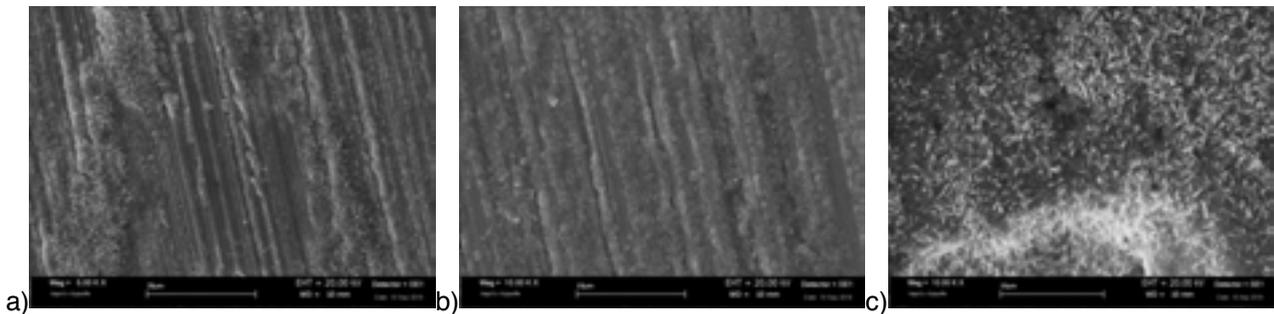


Figura 8. Micrografie SEM del campione ossidato a 550°C: a) x5000: ingrandimento complessivo; b) x10000: zona con strato uniforme di ossido nativo; c) x10000 isole di strutture aciculari

Un'altra temperatura limite di interesse per il reattore LFR è 750°C, alla quale i componenti del reattore possono essere sottoposti in situazioni estreme.

Si è, pertanto, voluto analizzare le proprietà del materiale anche a questa temperatura, effettuando una isoterma (Figura 9).

Come si può notare dalla Figura 9, l'aumento di peso dovuto all'ossidazione a 750°C risulta maggiore rispetto al corrispettivo a 550°C, a parità di tempo di permanenza in forno. Il campione acquista 0,15mg in circa 10h.

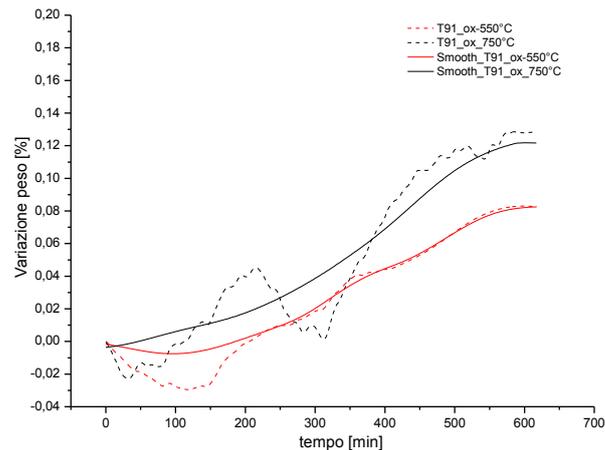


Figura 9. Confronto fra analisi TGA isoterma a 550°C e 750°C

Anche in questo caso, le micrografie ottenute mediante SEM hanno messo in evidenza una struttura dell'ossido complessa: sullo strato uniforme di ossido sono presenti delle isole di particelle che probabilmente costituiscono un'evoluzione delle strutture aciculari; appaiono infatti come sfere irregolari, ricche di cavità, che mantengono una direzionalità preferenziale, probabilmente derivante dall'orientazione delle particelle originarie. A sostegno di quest'ipotesi, sono state evidenziate zone in cui sono presenti delle particelle aciculari ma arrotondate e di dimensioni maggiori rispetto a quelle a 550°C (Figura 10).

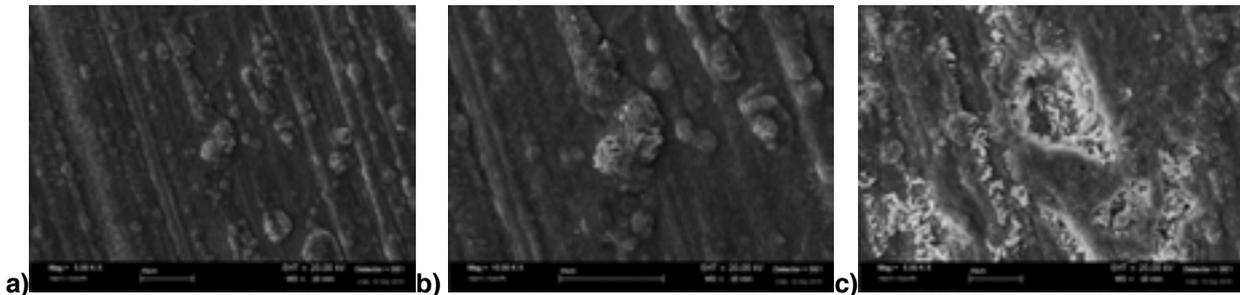


Figura 10. Micrografie SEM del campione ossidato a 750°C: a) x5000: ingrandimento complessivo; b) x10000: zona con strutture globulari cave; c) x10000: particolare di isole con strutture aciculari arrotondate

4. Conclusioni

Nel presente lavoro sono state studiate le proprietà a creep del T91 in aria e Pb liquido, analizzando in particolare i meccanismi inerenti alla corrosione sotto stress e l'ossidazione.

Le prove di creep in aria hanno permesso di ricavare la master curve del T91; le corrispettive in Pb liquido hanno invece permesso di individuare l'esistenza di un doppio meccanismo di corrosione/protezione: il primo dovuto al LME, fenomeno di infragilimento dell'acciaio, il secondo alla formazione di un ossido stratificato che, però, sotto carico tende a creare delle cricche in superficie e ripristinare il contatto acciaio/Pb liquido.

Lo studio delle micrografie relative alle superfici trasversali ha permesso di studiare la struttura dell'ossido, costituita essenzialmente da uno strato interno più compatto e uno esterno più poroso, e di individuare le IOZ, zone dell'acciaio infragilite.

Coerentemente con i dati in letteratura, l'analisi EDX ha rilevato una composizione dell'ossido complessa costituita principalmente da Fe, O e Cr, che prevede uno strato più

esterno di ossido Fe-O, in particolare al di sotto dei 560°C magnetite, e uno strato più interno Fe-Cr /spinello.

Questo è stato confermato anche dalle prove di ossidazione condotte a 550°C e 750°C, dalle quali si evince altresì un'accelerazione dell'ossidazione con la temperatura, associata ad una evoluzione della struttura dell'ossido.

Si può quindi affermare che l'acciaio T91 sia suscettibile alla corrosione da piombo, in particolare all'infragilimento (LME); questo fenomeno è contrastato dalla formazione di un ossido protettivo che si interpone fra acciaio e Pb liquido e impedisce l'avanzare dell'infragilimento del metallo. L'ossido protettivo, inoltre, subisce delle modifiche nel tempo, quali cricche e possibile chiusura delle stesse, in funzione del contenuto di O₂. I due meccanismi corrosione/protezione, quindi, si contrappongono e si alternano.

5. Bibliografia

- [1] IAEA, International Atomic Energy Agency. Nuclear Energy Series Technical Reports Structural Materials for Liquid Metal Cooled Fast Reactor Fuel Assemblies – Operational Behaviour No. NF.T.4.3 Guides
- [2] Weisenburger A., Muller G., Heinzl A., Jianu A., Muscher H., Kieser M. Corrosion Al containing corrosion barriers and mechanical properties of steels foreseen as structural materials in liquid lead alloy cooled nuclear system. Nuclear Engineering and Design. 2011; 241; 1329–1334
- [3] Hojná A., Di Gabriele F., Klecka J., Burda J. Behaviour of the steel T91 under uniaxial and multiaxial slow loading in contact with liquid lead. Journal of Nuclear Materials. 2015; 466; 292-301
- [4] NEA Expert Group on Heavy Liquid Metal Technologies 2015. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties Materials Compatibility Thermalhydraulics and Technologies- Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development 487-570
- [5] Strafella A., Coglitore A., Salernitano E., Alvino A., Antonini A., Ricciardi L., Tonti A. Creep behavior of T91 steel in air and in liquid lead at 550°C. ECCC 2017- 4th International. ECCC Conference- Creep & Fracture in High Temperature, Components Design & Life Assessment. 2017 September 10-14 Düsseldorf, Germania
- [6] Strafella A., Coglitore A., Salernitano E., Alvino A., Antonini A., Ricciardi L., Tonti A. Creep behavior of T91 steel in air and in liquid lead at 550°C. ECCC 2017- 4th International. ECCC Conference- Creep & Fracture in High Temperature, Components Design & Life Assessment. 2017 September 10-14 Düsseldorf, Germania, ISBN: 978-3-514-00832-8
- [7] Jianu A., Müller G., Weisenburger A., Heinzl A., Fazio C., Markov V.G., Kashtanov A.D. Creep-to-rupture tests of T91 steel in flowing Pb–Bi eutectic melt at 550 °C. Journal of Nuclear Materials. 2009; 394; 102–108
- [8] Di Gabriele F., Hojna A. , Chocholousek M., Jakub Klecka J. Behavior of the Steel T91 under Multi Axial Loading in Contact with Liquid and Solid Pb Metals 2017, 7, 342
- [9] Weisenburger A., Jianu A., An W., Fetzer R., Del Giacco M., Heinzl A., Muller G., Markov V.G., Kashtanov A.D. Creep, creep-rupture tests of Al-surface-alloyed T91 steel in liquid lead bismuth at 500 and 550 °C. Journal of Nuclear Materials 2012; 431; 77–84
- [10] Coen G., Van den Bosch J., Almazouzi A., Degrieck J. Investigation of the effect of lead–bismuth eutectic on the fracture properties of T91 and 316L. Journal of Nuclear Materials. 2010; 398; 122–128

- [11] Auger T. , Lorang G., Guérin S., Pastol J.-L., Gorse D. Effect of contact conditions on embrittlement of T91 steel by lead–bismuth Journal of Nuclear Materials 2004; 335; 227–231
- [12] Schmidt B., Guerin S., Pastol J.-L., Plaindoux P., Dallas J.-P., Leroux C., Gorse D. Evaluation of the mechanical properties of T91 steel exposed to Pb and Pb-Bi at high temperature in controlled environment. Journal of Nuclear Materials 2001; 296; 249-255
- [13] Strafella A., Coglitore A., Salernitano E., Alvino A., Antonini A., Ricciardi L., Tonti A. Creep behavior of T91 steel in air and in liquid lead at 550°C. ECCC 2017- 4th International. ECCC Conference- Creep & Fracture in High Temperature, Components Design & Life Assessment. 2017 September 10-14 Düsseldorf, Germania
- [14] Lambrinou K., Koch V., Coen G., Van den Bosch J., Schroer C. Corrosion scales on various steels after exposure to liquid lead–bismuth eutectic. Journal of Nuclear Materials. 2014; 450; 244–255
- [15] Ye Z., Wang P., Dong H., Li D., Zhang Y., Li Y. Oxidation mechanism of T91 steel in liquid lead-bismuth eutectic: with consideration of internal oxidation, www.nature.com/Scientific Reports | 6:35268 | DOI: 10.1038/srep35268, 2016
- [16] Cavallini M., Di Cocco V., Iacoviello F. – Materiali Metallici- ISBN 978-88-909748-0-9 ISBN 978-88-909748-0-9
- [17] ECCC Data Sheets 2017, ECCC Conference- Creep & Fracture in High Temperature, Components Design & Life Assessment. 2017 September 10-14 Düsseldorf, Germania, ISBN: 978-3-514-00832-8

Metodologie avanzate per la valutazione dello stato di efficienza e conservazione delle tubazioni di impianto

E. Latona¹, M. Lisi², O. Borgia³, E. Cherici³

¹ Bureau Veritas Italia SpA

² Bureau Veritas Nexta Srl

³ Saipex Srl

Sommario

Questo articolo ha lo scopo di presentare un progetto, nato nel corso del 2016 e tutt'ora in via di sviluppo, che si è posto l'obiettivo su come affrontare la prima verifica periodica di integrità di un parco tubazioni antecedenti alla Direttiva PED e denunciate in accordo all'art.16 del d.m. n°329/04, caratterizzato da numerosità estremamente importanti delle tubazioni soggette e da una molteplicità dei meccanismi di danno e corrosione presenti.

Il progetto ed in particolare l'approccio utilizzato non si è limitato a concentrarsi sugli aspetti tecnici ma ha posto la propria attenzione anche sugli aspetti organizzativi, gestionali e di comunicazione. Questa scelta è stata guidata sia dalla durata del progetto stesso ma soprattutto per la numerosità degli attori coinvolti: utilizzatori, consulenti esterni, operatori controlli non distruttivi e soggetti abilitati per l'esecuzione delle verifiche.

I diversi attori coinvolti hanno implementato un'apposita procedura utilizzata per lo sviluppo del progetto, il tutto sotto il coordinamento di una piattaforma software *web-based* dedicata, creata per la gestione e condivisione di dati ed informazioni e per l'automatizzazione delle principali procedure di calcolo associate alla valutazione.

Il progetto, tutt'ora in corso, sta vedendo impegnati decine di operatori, ciascuno con il proprio ruolo, con l'obiettivo finale di traguardare entro il 2019 la verifica di integrità di diverse migliaia di tubazioni. Esso stesso, seppur ancora non concluso, rappresenta la testimonianza di come opportuna pianificazione e visione di insieme permettano di traguardare importanti obiettivi operativi al fine di garantire la *compliance* normativa e la sicurezza di impianto.

1. Introduzione al progetto

L'entrata in vigore della Direttiva PED, ha introdotto nel mondo delle apparecchiature ed impianti a pressione, diverse novità tra cui l'assimilazione delle tubazioni ad una vera e propria attrezzatura in pressione, con relativi obblighi di legge da assolvere nel corso del loro esercizio.

Da questo punto di vista, l'anno 2019 rappresenta, un importante appuntamento in quanto si avrà la scadenza della prima verifica periodica di integrità per le tubazioni già in esercizio all'entrata in vigore della Direttiva, e pertanto sottoposte alla denuncia di cui all'art.16 del d.m. n°329/04.

La rilevanza di tale scadenza è data da diversi fattori. Innanzitutto la numerosità delle tubazioni soggette, nel medesimo anno, all'espletamento della verifica. La realizzazione degli insediamenti industriali maggiormente interessati dalla presenza di tali attrezzature risale purtroppo antecedentemente all'uscita della Direttiva Europea, pertanto i parchi tubazioni di tutte le raffinerie ed i siti petrolchimici dovranno svolgere in contemporanea tale verifica.

In seconda battuta, anche gli aspetti tecnici non sono meno sfidanti, in quanto l'attività di verifica dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni rappresenta per certi

aspetti una novità dal punto di vista delle tecniche e metodologie da utilizzare ma anche dal punto di vista procedurale ed organizzativo.

Se infine mettiamo sul piatto delle valutazioni anche la necessaria efficacia che deve caratterizzare tale verifica per le ovvie ragioni di sicurezza allora il quadro può diventare di estrema complessità.

Questo articolo si propone di illustrare una metodologia sviluppata appositamente per affrontare questo tipo di attività. L'approccio messo punto è partito dai requisiti di rigorosità ed efficacia tecnici cercando di coniugare elementi operativi quali tempistiche di svolgimento, gestione della documentazione e reportistica. Il tutto è stato realizzato tramite l'adozione di piattaforme informatiche appositamente sviluppate al fine di integrare efficientemente le diverse fasi del progetto garantendo la condivisione in tempo reale delle informazioni e dello stato di avanzamento.

Quanto appena descritto sarà presentato tramite l'esperienza significativa di alcuni casi di studio, che hanno permesso la validazione della metodologia in ambiti industriali del settore Oil&Gas e petrolchimico caratterizzati da: elevata numerosità delle tubazioni, età avanzata degli impianti e severità di utilizzo.

2. Il contesto operativo

Il progetto trova applicazione e sviluppo nell'ambito dell'esecuzione della verifica periodica di integrità dei parchi tubazioni di impianti di raffineria, petrolchimici ed impianti di processo in genere.

Tale contesto, per sua natura, presenta alcune caratteristiche molto peculiari:

- Prima fra tutti, l'elemento che sicuramente colpisce è il numero di tubazioni soggette a tale verifica (diverse migliaia), ma soprattutto la contemporaneità della scadenza dovuta al contesto normativo che imponeva entro Febbraio 2009 la denuncia delle tubazioni in esercizio prima dell'entrata in vigore del d.lgs. 93/2000 (recepimento della Direttiva Comunitaria 97/23/CE) con conseguente verifica di integrità allo scadere del decimo anno. I siti produttivi, come quello oggetto di studio, realizzati per lo più nel corso dello scorso secolo sono caratterizzati intrinsecamente da un importante e significativo numero di tubazioni che per lo più ricadono in questa categoria.

Questo primo punto ha imposto l'adozione di sistemi informatici che permettessero la gestione della mole di dati ed informazioni corrispondenti ad un numero di tubazioni così elevato.

- La molteplicità e forte diversificazione degli impianti e dei processi presenti impone il confronto con meccanismi di danneggiamento e corrosione estremamente vari. All'atto finale dovendo l'utilizzatore procedere ad una valutazione sullo stato di efficienza e conservazione delle proprie tubazioni e dovendo essere tale valutazione di carattere omogeneo per tutte le tubazioni in analisi è stato necessario individuare una procedura di sintesi che tenesse conto delle specificità di ciascun meccanismo.
- Il progetto per sua natura coinvolge ed ha coinvolto numerosi attori con funzioni molto diverse.
 - o L'utilizzatore: prima di tutti ovviamente c'è stato l'utilizzatore delle tubazioni che ha individuato la necessità di un'attività di tale respiro e che dopo avere appaltato le attività ne deve monitorare lo svolgimento sia in termini temporali che operativi avendo la possibilità di intervenire in presenza di criticità o casi specifici che richiedono immediate azioni correttive.
 - o L'appaltatore: la società a cui si è rivolto l'utilizzatore per l'esecuzione dell'intero progetto e le cui mansioni sono state descritte ed elencate nei documenti di gara. Tale realtà deve essere in grado di gestire il

coordinamento dell'intero progetto ma anche di svolgere specifiche attività operative come la predisposizione dei piani di controllo dettaglio, coordinamento delle attività propedeutiche all'esecuzione dei controlli non distruttivi, esecuzione dei calcoli di verifica qualora si rendessero necessario, predisposizione della valutazione preliminare dello stato di efficienza e conservazione a supporto delle successive dichiarazioni dell'utilizzatore.

Tale realtà dovrà quindi predisporre di personale con diverse competenze specifiche come: ispettori di campo, ingegneri progettisti, corrosionisti, ecc.

- Operatori controlli non distruttivi: coloro i quali sulla base del piano di dettaglio eseguono i controlli non distruttivi da cui scaturiranno i valori sperimentali delle grandezze necessarie per la valutazione dello stato di conservazione ed efficienza.
- Soggetto abilitato: ente incaricato dall'utilizzatore che agisce in accordo al d.m. n°329/04 ed al Decreto dell'11 Aprile 2011 con lo scopo di eseguire la verifica periodica di integrità in accordo agli art.10 e 12 del decreto.

Tutti gli attori sopraelencati con esigenze specifiche e tempi diversi hanno la necessità di accedere alle informazioni ed ai dati relativi alle tubazioni, pertanto l'adozione di un sistema informatico basato su database risulta essere l'unica risposta adeguata.

- Tutti gli imprevisti, contrattempi e ritardi che possono nascere da un'attività del genere all'interno di un contesto produttivo come quello di un'azienda di processo legati alla disponibilità degli impianti, reperimento della documentazione, coordinamento delle attività in campo, necessità produttive, ecc.

Le peculiarità appena descritte sono e devono essere affrontate tramite:

- Riunioni e tavole rotonde per allineamenti tecnici ed operativi e coordinamento delle attività;
- Stesura di una procedura di lavoro condivisa e nota a tutti gli attori;
- Sviluppo di una piattaforma per la condivisione delle informazioni e l'automatizzazione delle principali fasi di calcolo e valutazione.

Nei successivi paragrafi saranno descritte le principali fasi del progetto e poi più nello specifico la modalità di valutazione dello stato di conservazione ed efficienza e la piattaforma sviluppata, che rappresentano gli elementi distintivi e di maggior valore aggiunto del progetto.

3. Il progetto e le sue fasi

Si riporta di seguito una sintetica descrizione delle fasi del progetto:

1. Identificazione di tutte le linee che in accordo agli Allegati A e B del d.m. n°329/2004 devono essere assoggettate alla verifica periodica di integrità, partendo dagli elenchi linee utilizzati all'atto della denuncia in accordo all'art.16;
2. Acquisizione della documentazione per ciascuna linea: P&I, specifiche di linea, sketch assonometrici;
3. Elaborazione di un piano di controllo di dettaglio per ciascuna linea che tenga conto di quanto previsto:
 - a. Dalla norma tecnica di riferimento UNI TS 11325-1;
 - b. Dall'analisi di rischio corrispondente: Risk Based Inspection, che prevede l'individuazione dei meccanismi di danneggiamento principali con le relative indicazioni sui controlli non distruttivi più idonei da eseguire;
 - c. Dal *Routing* della linea e dal suo stato superficiale.

I piani di dettaglio sono realizzati sulla base degli sketch assonometrici di linea che contengono indicazioni su quale TML (*Thickness Management Locations*, sezioni di linea) eseguire il controllo e che tipologia di verifica eseguire e con le necessarie indicazioni preparatorie;

4. Elaborazione di un programma di dettaglio (*scheduling*) delle attività di controlli non distruttivi ed ispezioni;
5. Esecuzione dei controlli da parte degli operatori preposti tramite la supervisione ed il coordinamento delle attività da parte degli ispettori di campo;
6. Determinazione della vita residua tramite la procedura di calcolo che verrà dettagliatamente illustrata nel paragrafo successivo;
7. Nel caso in cui il punto 6 non permetta di soddisfare i parametri della verifica di integrità (vita residua pari o superiore ad almeno 10 anni) identificazione dell'azione di mitigazione: riparazione, sostituzione o riduzione dei parametri operativi;
8. Valutazione stato di conservazione ed efficienza della tubazione con predisposizione della relativa relazione tecnica contenente:
 - a. Report controlli non distruttivi;
 - b. Report esame visivo esterno;
 - c. Risultato del calcolo per la determinazione della vita residua;
 - d. Eventuale calcolo di verifica per la verifica di stabilità.
9. Esecuzione della verifica da parte del soggetto abilitato.

4. L'approccio valutativo

La valutazione dello stato di efficienza e conservazione è stata basata principalmente su due verifiche:

- Lo stato di conservazione esterno della tubazione comprensivo di analisi della coibentazione (se presente) e del sistema di supportazione;
- Verifica numerica che la vita residua della tubazione traguardi il minimo previsto dalla legge (superiore o uguale ad almeno 10 anni).

Per questo secondo passaggio è stato messo a punto una procedura di calcolo automatizzata tramite la piattaforma informatica che una volta inserite la specifica di linea e le sue condizioni di esercizio massime è in grado in base alle risultanze dei controlli non distruttivi ed in particolare alle misure spessimetriche, di determinare il valore di vita residua per ciascuna sezione di analisi della linea presa in considerazione (TML).

La procedura si basa sulla determinazione di un parametro: la velocità di corrosione o *Corrosion Rate* (CR); stimato nel caso si disponga del valore nominale e di un solo valore di confronto (quello attuale) o misurato nel caso si abbia la possibilità di confrontare due valori effettivamente misurati, in quanto la tubazione disponeva già di un ulteriore controllo spessimetrico antecedente all'attuale.

Con questo approccio ciascuna sezione di linea analizzata dispone di un proprio parametro caratteristico relativamente alla velocità di corrosione. Essendo però tutti i TML facenti parte di un'unica tubazione e necessario definire un tasso di corrosione unico per ciascuna linea.

Si ha la possibilità di operare in due modalità:

- La più cautelativa e quindi conservativa che è quella di considerare la maggior velocità di corrosione tra tutti i TML appartenenti ad una linea e di estendere tale valore a tutti i TML della tubazione;
- La seconda opzione è quella di determinare un valore di velocità di corrosione certamente cautelativo ma che tenga conto dell'affidabilità delle misure spessimetriche. Per cui tale valore è calcolato eliminando dalla popolazione delle misure fatte, quelle che possono essere considerati *outlayer* sia superiori che inferiori. Tale procedimento è eseguito andando ad eliminare dalla popolazione dei

tassi di corrosione i valori presenti nelle code della distribuzione normale gaussiana e determinando poi il valore medio nella popolazione dei restanti valori. Il valore di riferimento della velocità di corrosione per la tubazione sarà pari al valore medio più due o tre volte il valore deviazione standard della distribuzione stessa.

Così facendo per ciascun TML, noto lo spessore residuo dalla misura attuale e determinato tramite ulteriore calcolo lo spessore minimo resistente, è possibile determinare la vita residua del componente, applicando la velocità di corrosione precedentemente identificata.

A questo punto qualora la vita residua minore fra tutti i TML di una tubazione fosse superiore o uguale ad almeno 10 anni, allora si potrebbe procedere alla valutazione finale sullo stato di conservazione ed efficienza della linea stessa. Qualora invece ci sia uno o più TML con il valore di vita residua inferiore a 10 anni è necessario procedere ad un approfondimento di calcolo, che permetta di definire con maggior dettaglio lo spessore minimo resistente.

In funzione della tipologia di componente e della tipologia di linea su cui è installato, il calcolo di verifica sviluppato può essere svolto con diversi codici di calcolo (ASME B31.3, FFS, ecc).

Una volta determinato il nuovo spessore minimo resistente, si applica nuovamente al confronto sopra descritto al fine determinare la nuova vita residua.

Tale approccio, nel caso in cui ci siano più componenti che non traggano l'obiettivo di vita residua previsto, può essere considerato iterativo.

Al termine della procedura o tutti i componenti della linea analizzata saranno caratterizzati da un valore di vita residua idoneo oppure sarà necessario procedere all'esecuzione delle misure di mitigazioni necessari come:

- Sostituzione o riparazione del tratto o dei tratti di linea caratterizzati da una vita residua che non riguarda i valori richiesti;
- Riduzione dei parametri massimi di funzionamento al fine di favorire una riduzione dello spessore minimo resistente da calcolo ad incremento della vita residua.

5. La piattaforma

Uno dei maggiori valori aggiunti del progetto è sicuramente lo sviluppo e l'implementazione di una piattaforma *web-based* che rappresenta uno degli strumenti abilitativi fondamentali dell'approccio proposto.

La piattaforma ricopre diversi ruoli tra cui:

- Mappatura ed anagrafica di tutte le tubazioni coinvolte nel processo di verifica periodica di integrità;
- La condivisione di informazioni e dati con l'efficientamento massimo di questa attività in quanto un unico ed univoco input viene poi visualizzato e gestito da tutti gli attori coinvolti;
- La gestione di una mole di informazioni e dati con numerosità significative che altrimenti non avrebbero trovato modo di essere archiviate e condivise correttamente. Questo con la possibilità di dare un accesso selettivo ai diversi utenti che la utilizzano;
- Monitoraggio e verifica dello stato di avanzamento del progetto in tempo reale per tutti gli attori coinvolti con semplice accesso al cruscotto degli indici di avanzamento presente nella piattaforma;
- Mappatura e regimentazione del flusso di lavoro che tramite l'utilizzo della piattaforma si atterra strettamente alla procedura stabilita e condivisa tra le parti;
- La gestione documentale dei principali file e documenti coinvolti nel processo:
 - o Sketch delle tubazioni;

- Piani di controllo di dettaglio;
- Relazione sullo stato di conservazione ed efficienza.
- L'automatizzazione delle fasi di calcolo più critiche relative alla determinazione della vita residua.

Nei casi di studio presi come analisi, lo strumento piattaforma si è rilevato vincente ed elemento distintivo nei confronti dei processi di analisi e degli attori coinvolti.

6. Conclusioni

La proposta avanzata nel presente articolo ha lo scopo di illustrare quella che è stata individuata come una possibile criticità nella gestione della *compliance* normativa degli impianti e la soluzione individuata a valle di alcuni casi di studio che ci hanno visto coinvolti.

La verifica periodica di integrità del parco tubazioni denunciati in accordo all'art 16 del D.M n°329/04 potrebbe rappresentare per gli impianti di processo di medio-grandi dimensione un'attività estremamente dispendiosa in termini di risorse e tempo.

L'approccio proposto, tramite l'adozione della piattaforma appositamente sviluppata e la procedura di valutazione dello stato di efficienza e conservazione, si pone l'obiettivo di efficientare l'intero processo, rappresentando la testimonianza di come opportuna pianificazione e visione di insieme permettano di traguardare importanti obiettivi operativi al fine di garantire la *compliance* normativa e la sicurezza di impianto.

7. Bibliografia

- [1] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106) - Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [2] d.m. 1 Dicembre 2004, n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [3] d.m. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
- [4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 – In attuazione della Direttiva Europea 97/23/CE in materia di attrezzature in pressione come modificato dal d.lgs. n°26 del 15/02/2016.
- [5] Linee guida Ispes: L'esame visivo sulle attrezzature in pressione ai fini delle verifiche in costruzione ed esercizio. Edizione 2006.
- [6] Inail: Esame visivo e spessimetria - Procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione. Disegno di linee guida e strumenti operativi. Edizione 2012.
- [7] UNI/TS 11325-1:2009, Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 1: Valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in esercizio ai fini della riqualificazione periodica d'integrità.
- [8] UNI 11325-12:2018, Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 12: Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione

Impianto termico con corrosione accelerata: cause e interventi attuati per la riduzione dei fenomeni corrosivi

V. Prete¹, L. Vela², G.F. Russo³

¹ Inail - Uot di Alessandria

² Inail - Uot di Genova

³ Libero Professionista, Studio Tecnico Russo

Sommario

La corrosione negli impianti termici è un fenomeno spesso trascurato che può causare danni e malfunzionamenti interessando tutti i componenti impiantistici, dal generatore di calore ai terminali di emissione. La normativa vigente sul trattamento dell'acqua negli impianti termici soggetti alla Raccolta R2009 è contenuta nei d.p.r. 412/1993 e d.p.r. 74/2013 e d.m. 26/06/2015 ai fini del controllo della sola efficienza energetica.

Lo studio riguarda un impianto termico ad uso civile interessato da fenomeni di corrosione. Nella prima fase è stata condotta un'analisi dell'impianto, raccogliendo i dati di progetto, di installazione e di funzionamento; successivamente sono state effettuate misurazioni dei parametri termotecnici principali, misurazioni spessimetriche delle tubazioni e analisi chimiche dell'acqua di alimentazione e di impianto per raffrontare i risultati ottenuti con i valori consigliati dalla norma UNI 8065.

Lo studio ha poi portato alla valutazione delle possibili cause del fenomeno, quali: errate scelte progettuali, caratteristiche chimiche dell'acqua di alimento e di impianto e difetti di installazione.

Nell'ultima parte vengono descritti gli interventi tecnici messi in atto al fine di ridurre i fenomeni di corrosione; tali interventi hanno agito sui parametri termotecnici e hanno portato ad una modifica del layout di impianto, con sostanziale risoluzione delle problematiche presenti.

1. Introduzione

Il presente studio ha preso in esame l'impianto termico di climatizzazione invernale e produzione acqua calda sanitaria soggetto a fenomeni corrosivi di un edificio in stile liberty del 1907, oggetto, a partire dal 2001, di un intervento edilizio che ha portato al frazionamento in 72 unità immobiliari.

Ai fini di accertare l'origine dei fenomeni corrosivi e prevedere soluzioni atte a ridurli è stata effettuata un'analisi preliminare, con raccolta dei dati di progetto, messa in opera e funzionamento dell'impianto, misure termotecniche e meccaniche e analisi chimiche dell'acqua di alimento e di impianto.

2. Analisi preliminare

2.1 Criticità progettuali

Inizialmente è stata effettuata una verifica degli elaborati di progetto dell'impianto realizzato. Nel dettaglio l'impianto era composto da n. 2 circuiti (Scala A e Scala B), con produzione del calore realizzata tramite un generatore ad elementi di ghisa, costituito da 3 moduli, con potenza complessiva al focolare di 676 kW, alimentato a gas metano di rete. Il sistema di espansione a vaso chiuso era ripartito su n° 5 vasi a membrana di cui n° 3 vasi da 50 litri su ciascuno dei moduli del generatore e n° 2 vasi da 300 litri cadauno collegati sul collettore di mandata e sul collettore di ritorno dell'impianto.

Di seguito si evidenziano alcune criticità progettuali riscontrate:

- sottodimensionamento del sistema di espansione che causa un maggior incremento della pressione al variare della temperatura ed una pressione di esercizio molto prossima a quella di sicurezza, ovvero delle sollecitazioni meccaniche maggiori. Considerato il rilevante volume d'acqua dell'impianto e la significativa pressione gravante nell'impianto, anziché impiegare dei semplici vasi chiusi a membrana sarebbe stato più opportuno optare per un sistema di espansione a vaso aperto o quanto meno prevedere un sistema di espansione a volume variabile e pressione costante mediante un espansore, in modo da ridurre la pressione ad un valore minimo dovuto all'altezza idrostatica dell'edificio;
- eccessiva velocità del fluido termovettore (acqua), attestata da salti termici tra le tubazioni di mandata e ritorno dell'impianto nell'ordine di 2-3°C, e calcolata in corrispondenza della tubazione di mandata DN65 con portata pari a 45 m³/h pari a 3,16 m/s. L'eccessiva velocità è un fattore che sollecita le tubazioni originando fenomeni di corrosione per usura;
- nel progetto era inoltre previsto un sistema di trattamento dell'acqua di alimento costituito da un filtro dissabbiatore, un sistema semiautomatico di addolcimento, un contatore dell'acqua trattata, un dosatore di poliammine alifatiche con pompa di iniezione, ma tale sistema non risultava essere installato.

2.2 Misurazioni spessimetriche

Da verifiche effettuate con spessimetro ad ultrasuoni su alcune tubazioni DN40, esternamente in buono stato di conservazione, si è riscontrato uno spessore medio di 2,23 mm minore di circa 0,67 mm rispetto al valore nominale di 2,9 mm che hanno le tubazioni nuove della serie leggera UNI EN 10255 tipicamente utilizzate negli impianti di riscaldamento di tipo civile. Tale valore, supponendo uniformemente distribuita la corrosione interna, corrisponde dopo 6 anni ad una velocità di corrosione di circa 0,11 mm/anno, valore tollerabile se non fosse che i processi corrosivi hanno andamento esponenziale e che quindi una volta innescati è normale aspettarsi, con il perdurare di questa situazione, anche un raddoppio della perdita del metallo in 2-3 anni.



Figura 1. Misurazione con spessimetro ad ultrasuoni

2.3 Analisi chimico fisica dell'acqua

Sono state effettuate dal laboratorio ARPAL di Genova analisi chimiche di due campioni d'acqua: il campione n° 18222 relativo all'acqua fredda di alimento dell'impianto e il campione n° 18223 relativo all'acqua contenuta nell'impianto di riscaldamento.

	Parametro	U.M.	Campione 18222 Acqua fredda	Campione 18223 Acqua riscaldam.	Valore Consigliato (UNI8065)
1	Durezza totale	°F	21	25	<15
2	Concentrazione Ioni Idrogeno	pH	7,3	5	7 – 8,5
3	Conduttività totale	$\mu\text{S}/\text{cm}$	385	485	<1500
4	Alcalinità totale $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	mg/l	213	305	<800
5	Materiali in sospensione	mg/l	0,6	59,8	<10
6	Calcio	mg/l	65	75	<100
7	Magnesio	mg/l	11	5	<100
8	Ferro	$\mu\text{g}/\text{l}$	11	26900	<500
9	Rame	$\mu\text{g}/\text{l}$	15	29	<100
10	Zinco	$\mu\text{g}/\text{l}$	74	163	<100
11	Alluminio	$\mu\text{g}/\text{l}$	41	76	<100

Tabella 1. Risultati analisi chimica ARPAL

Dall'analisi chimica dell'acqua si può notare che la durezza dell'acqua fredda di alimento è di 21°F mentre la durezza dell'acqua dell'impianto risulta essere di 25°F.

In linea di massima si può dire che acque acide comportano un rischio di corrosioni, mentre acque basiche possono dar luogo ad incrostazioni. Su questo presupposto si basa il diagramma di Tillmann riportato dalle norme UNI 9182 "Impianti di distribuzione ad acqua calda" che tiene conto della durezza e del pH. Secondo il diagramma di Tillmann un pH=5, indica un'acqua fortemente corrosiva già a freddo (25°C) al punto che tale valore risulta fuori dalla scala dei valori di pH.

Inoltre si nota che il valore di materiale in sospensione rilevato dalle analisi di 59,8 mg/l è molto elevato, di oltre 5 volte il valore massimo consentito dalla normativa UNI 8065 ed è un'ulteriore conferma della elevata quantità di depositi presenti nell'acqua di impianto.

La presenza di 26900 $\mu\text{g}/\text{l}$ di ferro nell'acqua di impianto è notevolmente alta e supera di oltre 50 volte il valore massimo di 500 $\mu\text{g}/\text{l}$ consentito dalla normativa UNI 8065. E' questo un evidente segnale della azione corrosiva nell'impianto.

3. Riferimenti normativi trattamento acqua impianti termici

L'inizio dello sviluppo normativo italiano in merito a trattamento dell'acqua negli impianti termici di tipo civile si è avuto alla fine degli anni '80 con la norma tecnica UNI 8065:1989 "Trattamento dell'acqua negli impianti termici ad uso civile", norma tutt'ora vigente che pone particolare attenzione ai controlli e agli interventi necessari per la protezione degli impianti termici dalle incrostazioni calcaree.

Qualche anno dopo tali principi furono recepiti come obbligo di legge dal d.p.r. 412/1993. Nell'Art. 5° Requisiti e dimensionamento degli impianti termici al comma 6 si riporta "L'applicazione della norma tecnica UNI 8065, relativa ai sistemi di trattamento dell'acqua, è prescritta, nei limiti e con le specifiche indicate nella norma stessa, per gli impianti termici di nuova installazione con potenza complessiva superiore o uguale a 350 kW."

Il nuovo d.p.r. 74/2013, che ha modificato il citato d.p.r. 412/1993, ha ripreso l'obbligo di controllo della durezza dell'acqua di alimento, prevista dalla norma UNI 8065:1989, aggiungendo anche l'obbligo di registrazione sul "libretto di impianto" dei valori risultanti dall'analisi della durezza dell'acqua di alimento e di registrazione delle quantità di prodotti chimici utilizzati nel corso degli anni. Valori che saranno riscontrabili, agli operatori e alle autorità di controllo, con la compilazione dei libretti di impianto on line direttamente nel "Catasto Territoriale degli Impianti Termici", disposizione prevista dall'art. 10 comma 4 lettera A del citato d.p.r. 74/2013.

Nell' Art. 8 del d.p.r. 74/2013 "Controllo dell'efficienza energetica degli impianti termici si riporta al comma 1 "In occasione degli interventi di controllo ed eventuale manutenzione di cui all'art. 7 su impianti termici di climatizzazione invernale di potenza termica utile nominale maggiore di 10 kW e sugli impianti di climatizzazione estiva di potenza termica utile nominale maggiore di 12 kW, si effettua un controllo di efficienza energetica riguardante: omissis c) la verifica della presenza e della funzionalità dei sistemi di trattamento dell'acqua, dove previsti."

Nel d.m. 26/06/2015, Allegato 1, capitolo 2.3 punto 5 che indica le prescrizioni per edifici di nuova costruzione o oggetto di ristrutturazioni importanti o riqualificazione energetica si riporta che "In relazione alla qualità dell'acqua utilizzata negli impianti termici per la climatizzazione invernale, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, ferma restando l'applicazione della norma tecnica UNI 8065, è sempre obbligatorio un trattamento di condizionamento chimico. Per impianti di potenza termica del focolare maggiore di 100 kW e in presenza di acqua di alimentazione con durezza totale maggiore di 15 gradi francesi, è obbligatorio un trattamento di addolcimento dell'acqua di impianto. Per quanto riguarda i predetti trattamenti si fa riferimento alla norma tecnica UNI 8065. "

In Germania il problema della corrosione degli impianti è stato affrontato in modo approfondito già dal 2009 dall'Associazione degli Ingegneri Tedeschi (Verein Deutscher Ingenieure) che ha elaborato la regola tecnica VDI 2035-2 "Vermeidung von Schäden in Warmwasser Heizungsanlagen – Heizwasser Seitige Korrosion" (Prevenzione dei danni in impianti di riscaldamento ad acqua calda - Corrosione lato acqua), regola che affianca e completa le disposizioni tecniche più recenti della norma DIN 12828:2014 "Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Warmwasser" (Sistemi di riscaldamento negli edifici - Pianificazione dei sistemi di riscaldamento dell'acqua calda), quest'ultima disponibile anche in Italia come norma UNI-EN 12828:2014.

Si osserva che le attuali disposizioni normative sono concepite prevalentemente per salvaguardare l'impianto dalle incrostazioni calcaree dei carbonati, problematica questa tipica degli impianti di produzione dell'acqua calda sanitaria, ma piuttosto rara negli impianti di riscaldamento, i quali invece sono notoriamente interessati da problematiche di corrosione più che di incrostazioni calcaree.

Si nota inoltre che la normativa di cui sopra relativa agli impianti termici, riguarda controlli o interventi finalizzati all'efficienza energetica e non alla sicurezza e richiama come obbligatoria solo la verifica della durezza con l'obbligo nei casi previsti di trattamento secondo la UNI 8065, ad oggi in fase di revisione, trascurando invece il ruolo altrettanto importante che pH, alcalinità, conducibilità e temperatura rivestono nello sviluppo dei fenomeni corrosivi.

4. Corrosione negli impianti termici

4.1 Indicatori di corrosione

I principali fattori chimici che causano fenomeni corrosioni sono: bassa alcalinità, basso pH, elevata temperatura, elevato ossigeno disciolto, elevate sostanze solide. La determinazione dell'ossigeno disciolto è la misura più problematica in quanto il valore varia con il variare della temperatura e della pressione nel punto di prelievo. Per tale motivo si cerca di determinare la qualità incrostante o corrosiva di un acqua utilizzando gli altri indicatori più stabili. Un metodo molto utilizzato è quello basato sull'indice di Langelier che riesce a tener conto contemporaneamente di tutti i sopraelencati fattori, ad eccezione dell'ossigeno disciolto, fornendo una valutazione della caratteristica corrosiva o incrostante dell'acqua.

Indice di Langelier	Proprietà dell'acqua
$L > +2$	Molto incrostante
da +2 a +0,5	Incrostante
da +0,5 a -0,5	Bilanciata
da -0,5 a -2	Corrosiva
$L < -2$	Molto corrosiva

Tabella 2. Proprietà dell'acqua correlata ai valori dell'indice di Langelier

Tenuto conto dei risultati delle analisi chimiche effettuate e utilizzato il diagramma di Langelier, il valore dell'indice ricavato alla temperatura di 65°C (equivalenti a circa 150°F), alcalinità di 305 mg/l, solidi totali (residuo fisso) 323 mg/l e durezza di 250 mg/l (equivalenti a 25°Francesi) è risultato pari a -1,34; questo valore è indice di un acqua corrosiva.

4.2 Tipologie di corrosione

4.2.1 Corrosioni interne per ossigeno

Negli impianti termici i processi di corrosione all'interno delle tubazioni sono in genere correlati alla quantità di ossigeno che entra nell'impianto; inoltre l'azione corrosiva è tanto maggiore quanto è maggiore la temperatura. L'ossigeno può entrare nel circuito idraulico in modi diversi: come ossigeno disciolto nell'acqua di riempimento e di ogni reintegro; dall'atmosfera nel caso di depressione o per diffusione attraverso materiali organici; da sacche d'aria rimaste nel sistema dopo ricariche per manutenzione e/o riparazioni. Un metodo per limitare tale tipologia di corrosione in un circuito chiuso consiste nel mantenere la tenuta all'acqua e all'aria o prevedere rivestimenti protettivi, ad esempio sostanze filmanti come le poliammine alifatiche, che formano sulle pareti delle tubazioni un sottile strato protettivo nei confronti dei processi elettrochimici.

4.2.2 Corrosioni interne per erosione

L'aumento della concentrazione dei prodotti di corrosione costituisce in genere un fattore di autolimitazione di molti processi corrosivi. Alcuni punti del circuito idraulico possono risultare maggiormente sollecitati come le parti con perdite di carico localizzate, tipicamente i cambi di direzione e le valvole, o gli organi in rotazione come le giranti e gli alberi delle pompe. Un metodo per ridurre le corrosioni da erosione è quello di diminuire la velocità dell'acqua e di decantare e filtrare le particelle solide presenti nell'impianto.

4.2.3 Corrosioni localizzate galvaniche

La corrosione galvanica ha luogo quando, similmente a ciò che avviene in una batteria, due metalli diversi sono a contatto in presenza di una soluzione elettrolitica contenente sali disciolti. In questo caso il metallo meno "nobile" (Ferro, Zinco, Alluminio), ovvero più elettronegativo, funge da anodo e perde elettroni (e quindi perde massa) corrodendosi, mentre il metallo più elettropositivo (per esempio rame, ottone, acciaio inox) funge da catodo ed acquista elettroni, ovvero acquista massa.

Per tale motivo dovrà essere il più possibile evitato l'impiego di materiali tra loro lontani nella serie galvanica d'interesse, interponendo eventualmente materiali isolanti o metalli galvanicamente compatibili. Nel processo di corrosione per contatto, in qualche caso può verificarsi un'inversione di polarità della coppia per cui il materiale inizialmente si comporta da catodo e viceversa. Un esempio classico è quello della coppia Zn-Fe in acque a temperatura elevata: lo zinco, metallo meno nobile e inizialmente anodico rispetto al ferro, a seguito della formazione di un film passivante stabile di ZnO dotato di conducibilità elettronica, assumerà nel tempo un comportamento catodico rispetto al ferro. Per tale motivo è sconsigliato utilizzare negli impianti di riscaldamento raccordi zincati per unire tubazioni in ferro nero, ovvero prive di zincatura.

4.2.4 Corrosioni localizzate sotto coibentazione

In presenza di perdite localizzate, come ad esempio da raccordi mal assemblati o da corrosioni galvaniche, l'impiego di un coibente impermeabile (come ad esempio il neoprene) può celare la manifestazione delle perdite e trasportarle anche a lunga distanza dall'origine. Inoltre i componenti chimici del materiale di coibentazione degradato, combinandosi con l'acqua stagnante presente tra la tubazione e la coibentazione formano soluzioni che possono accelerare l'azione di corrosione del ferro.

4.3 Corrosione nel caso in esame

Dai risultati delle analisi chimiche, ma soprattutto dalla morfologia delle corrosioni rilevate sulle parti di impianto danneggiate, si è arrivati alla convinzione che il processo di corrosione abbia avuto 2 distinte fasi. La prima fase è stata caratterizzata da numerose perdite di piccola entità che si sono verificate dalle guarnizioni mal eseguite dei raccordi filettati.



Figura 2. Sezione derivazione tee: visibili corrosione esterna (per perdite dalla filettatura) ed interna

Le perdite hanno inizialmente aggredito la tubazione in ferro circostante il raccordo, favorite anche dal ristagno della soluzione acquosa all'interno della coibentazione in neoprene che ha mantenuto un ambiente termico e chimico favorevole alla corrosione. Inoltre in molti casi la coibentazione ha "trasportato" questa azione a distanza.

In conclusione la prima fase è caratterizzata da azioni corrosive che hanno interessato solo la parte esterna delle tubazioni ed hanno dato luogo sotto coibentazione alle corrosioni localizzate di tipo galvanico precedentemente descritte.



Figura 3. Corrosione esterna della tubazione sotto la coibentazione in neoprene

La seconda fase del processo corrosivo si è avuta successivamente all'azione della prima fase, ovvero in seguito alle perdite dalle tubazioni si è avuta anche una lenta ma continua introduzione di acqua di alimento dall'impianto per compensare il calo di pressione dovuto alle perdite, a cui si sono aggiunti successivamente consistenti svuotamenti e riempimenti di acqua dovuti agli interventi di riparazione. La continua introduzione di acqua ha generato corrosioni distribuite per ossigeno e più successivamente, con la consistente presenza di ossidi in circolazione, si è avuta anche uno sviluppo della corrosione per erosione favorita anche dalla mancanza di filtri e decantatori e del sotto dimensionamento dei vasi di espansione.

Un caso a parte costituisce la rottura di 4 elementi di ghisa grigia lamellare eutettica del generatore di calore. A seguito di taglio con mola diamantata di uno di questi per verificarne lo stato di conservazione interno, si è potuta constatare la presenza tra gli elementi del generatore di una notevole quantità di ossidi ferrosi, che hanno causato una disuniforme distribuzione del calore causando uno shock termico.

La riduzione dello scambio termico ha come conseguenza una anomala sovratemperatura sulla superficie metallica lato fumi del generatore, la quale determina sia una perdita di rendimento del generatore (rilevabile dall'aumento della temperatura dei fumi), sia una sollecitazione termica del generatore che può portare anche alla frattura del metallo per shock termico. In mancanza di una analisi metallografica al SEM del punto di rottura, questa risulta essere la causa più probabile della rottura dei 4 elementi di ghisa del generatore.



Figura 4. Vista elemento in ghisa del generatore di calore con zona di microfratture

5. Interventi tecnici attuati

Gli interventi eseguiti per rallentare l'azione della corrosione localizzata e della corrosione generalizzata all'interno delle tubazioni, sono stati i seguenti:

- sostituzione dei tratti di tubazione a vista oggetto di corrosioni localizzate;
- installazione di valvole di intercettazione e scarico sulle diramazioni di rete al fine di limitare le zone di svuotamento oggetto di intervento;
- svuotamento e lavaggio dell'impianto con soluzioni basiche tamponanti;
- sostituzione del generatore di calore e riqualificazione centrale termica come da schema Fig. 5;
- riduzione della pressione gravante nell'impianto con separazione del circuito primario del generatore di calore (a vaso chiuso) dal circuito secondario (a vaso aperto) tramite interposizione di scambiatore a piastre;
- riduzione della velocità dell'acqua mediante installazione di controllori di frequenza ad inverter per l'alimentazione elettrica delle pompe centrifughe;
- riduzione della temperatura dell'acqua impianto mediante sostituzione del generatore con tipo a bassa temperatura e modulazione di fiamma, regolando la temperatura al minimo necessario per la produzione di ACS (circa 60°C) ed eventualmente aumentandone il valore solo se le condizioni climatiche esterne richiedono una maggiore temperatura per il circuito di riscaldamento;
- installazione tra la mandata dei generatori e l'aspirazione delle pompe di un barilotto disaeratore per la separazione e lo scarico delle microbolle gassose eventualmente presenti nell'acqua dell'impianto;
- installazione sulla tubazione di ritorno impianto di un filtro a grande superficie filtrante provvisto di due manometri indicanti lo stato di intasamento;
- installazione di un dosatore automatico di poliammine alifatiche filmanti;
- installazione di un addolcitore automatico di tipo volumetrico con controllo automatico dello stato di rigenerazione delle resine.

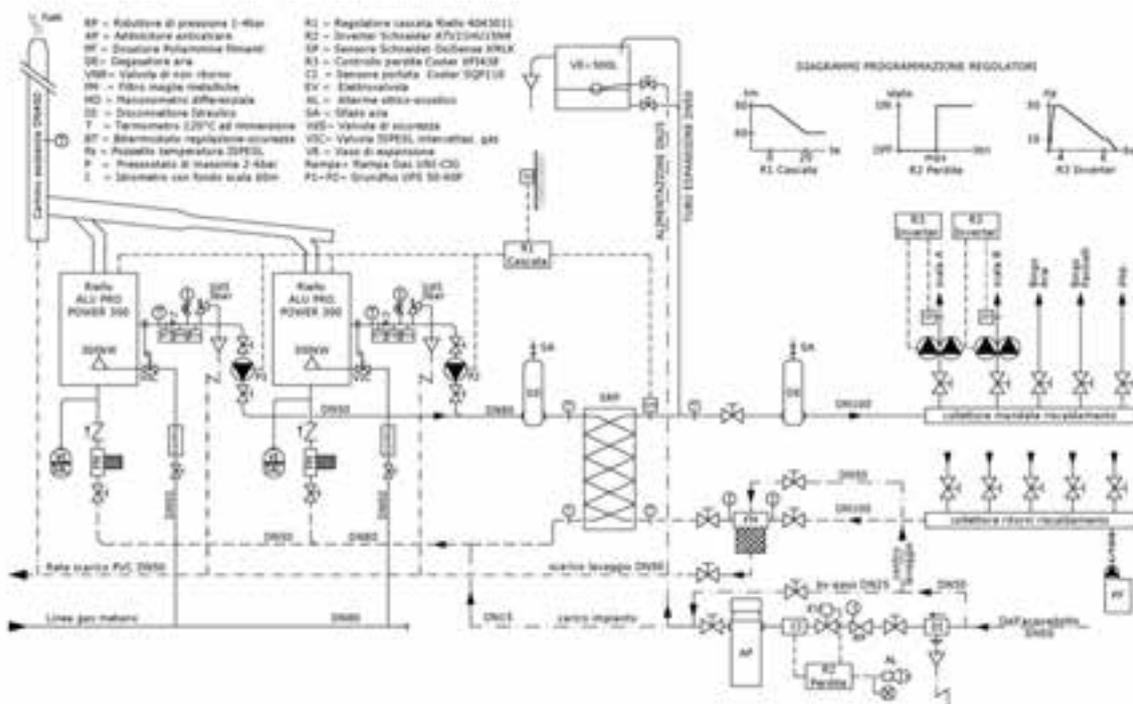


Figura 5. Disegno schematico di centrale termica



Figura 6. A sin.: scambiatore e degasatori circuito caldaie e impianto; a dx.: filtro impianto dotato di controlavaggio e manometri di controllo

6. Conclusioni

Come evidenziato nel presente studio la corrosione negli impianti termici è un fenomeno spesso trascurato che può causare danni e malfunzionamenti interessando tutti i componenti impiantistici, dal generatore di calore ai terminali di emissione.

La situazione impiantistica italiana presenta di frequente una tipologia di impianti ormai obsoleti realizzati negli anni 60-90. Per questo motivo, in fase di riqualificazione di centrale termica si consiglia di considerare in fase di progettazione i seguenti aspetti, al fine di evitare o minimizzare i fenomeni corrosivi:

- effettuare una separazione fisica mediante scambiatore a piastre dei due circuiti caldaia-impianto, al fine di evitare problematiche legate alla qualità dell'acqua e di ridurre al minimo necessario la pressione di esercizio;
- dimensionare correttamente la pressione iniziale nel vaso di espansione;
- evitare l'impiego di materiali con differenti caratteristiche di elettronegatività che produrrebbero un effetto pila;
- montare pompe di circolazione il più vicino possibile al punto neutro ovvero di raccordo al vaso di espansione;
- garantire un efficace sistema di disaerazione dell'acqua di impianto;
- installare un efficace sistema di filtrazione delle sostanze solide in sospensione;
- prevedere un opportuno impianto di trattamento dell'acqua

Non meno importanti sono le fasi di installazione, messa in esercizio e gestione dell'impianto, rispettando quanto indicato nei manuali di uso e manutenzione degli apparecchi/dispositivi installati e verificando la qualità dell'acqua con controlli periodici dei parametri come pH, alcalinità, durezza, conducibilità e temperatura, che rivestono un ruolo importante nello sviluppo dei fenomeni corrosivi.

7. Bibliografia

- [1] Raccolta R edizione 2009, "Specificazioni tecniche applicative del d.m. 1° Dicembre 1975"
- [2] Norma UNI 8065, "Trattamento dell'acqua negli impianti termici ad uso civile";
- [3] Norma UNI 9182, " Impianti di alimentazione e distribuzione d'acqua fredda e calda - Criteri di progettazione, collaudo e gestione";
- [4] Norma UNI EN 14868, "Protezione dei materiali metallici contro la corrosione. Linee guida per la valutazione della probabilità di corrosione in impianti chiusi a circolazione d'acqua";
- [5] Norma UNI EN 12500, "Protezione dei materiali metallici contro la corrosione. Classificazione, determinazione e valutazione della corrosività di ambienti atmosferici";
- [6] Norma UNI 10354-1, "Sistemi di tubazioni multistrato metallo plastici per acqua fredda e calda, Tubi";
- [7] Norma UNI CEN/TR 10345, "Guida per il trattamento statistico dei dati derivanti da prove interlaboratorio per la validazione dei metodi di analisi chimica dei prodotti ferrosi";
- [8] Norma UNI 10354-1, "Sistemi di tubazioni multistrato metallo plastici per acqua fredda e calda, Tubi";
- [9] G. Bianchi e F. Mazza, "Corrosione e protezione dei metalli", AIM, Milano, 2005;
- [10] AA.VV., "Casistica di corrosione negli impianti idrotermosanitari e di riscaldamento domestici: cause dei danneggiamenti, rimedi e soluzioni pratiche", AIM, Milano, 2002;
- [11] R. Roberge, "Handbook of Corrosion Engineering", McGraw Hill, 1999;
- [12] Langelier Saturation Index Calculator, su <http://www.lenntech.com/ro/index/angelier.htm>;
- [13] Water Stabilization and Softening and Langelier Saturation Analysis, su <http://www.ctre.iastate.edu/educweb/ce523/Notes/Stabilization%20&%20Softening.doc>;
- [14] VDI 2035-2 "Vermeidung von Schäden in Warmwasser Heizungsanlagen – Heizwasser Seitige Korrosion" (Prevenzione dei danni in impianti di riscaldamento ad acqua calda - Corrosione lato acqua), 2009;
- [15] G.F. Russo, "Impianto termico con corrosione accelerata: il caso Miramare di Genova", Atti delle Giornate Nazionali sulla Corrosione dell'Associazione Italiana di Metallurgia, Roma, Monte Porzio Catone, 2011;
- [16] Documento n° 025300173 del 18/07/2018, Revisione norma UNI 8065 "Trattamento dell'acqua negli impianti termici ad uso civile", CT253 Comitato Termotecnico Italiano, 2018;
- [17] D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10;
- [18] Decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013, n. 74, Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del d.lgs. 19 agosto 2005, n. 192;
- [19] Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

Implementazione di un sistema strumentato di limitazione della temperatura SIL2 in IV categoria PED in un impianto di cogenerazione a vapore

M. Giacobbo

NECSI Srl

Sommario

I requisiti essenziali di sicurezza della PED prevedono che quando è possibile superare i limiti ammissibili di un'attrezzatura a pressione, essa venga dotata di adeguati dispositivi di protezione, cioè di accessori di sicurezza, indicatori ed allarmi, scelti sulla base di una valutazione dei rischi nell'impianto.

Tra gli accessori di sicurezza, che rientrano nel campo di applicazione della PED e sono soggetti a marcatura CE, oltre ai tradizionali dispositivi per la limitazione diretta della pressione (valvole di sicurezza, dischi di rottura, ...) vi sono i dispositivi di limitazione strumentati, cioè sistemi che al raggiungimento di una soglia limite di pressione, temperatura, livello, ecc. svolgono una funzione di sicurezza. Per essere considerati tali, essi devono essere indipendenti dal controllo di processo e progettati per ottenere una protezione adeguata ed affidabile.

Un sistema strumentato di sicurezza (SIS) è costituito tipicamente da un elemento di input, una logica ed un attuatore. In un contesto di marcatura CE, l'intero loop di sicurezza deve quindi essere sottoposto ad una procedura di valutazione di conformità, poiché la funzione di sicurezza viene svolta dal sistema nella sua interezza.

La memoria vuole evidenziare gli aspetti tecnici e formali rilevanti legati all'iter di fabbricazione di un SIS a protezione di attrezzature PED, tra cui valutazione del rischio, allocazione SIL, progettazione e validazione, Fascicolo Tecnico, manuale di sicurezza e marcatura CE. Come caso di studio verrà illustrata l'implementazione di un dispositivo di limitazione della temperatura a protezione delle nuove attrezzature installate in una cartiera in occasione del revamping dell'impianto di cogenerazione a vapore.

1. Introduzione

La direttiva 2014/68/UE distingue i dispositivi di protezione tra accessori di sicurezza e dispositivi di controllo quali indicatori e allarmi.

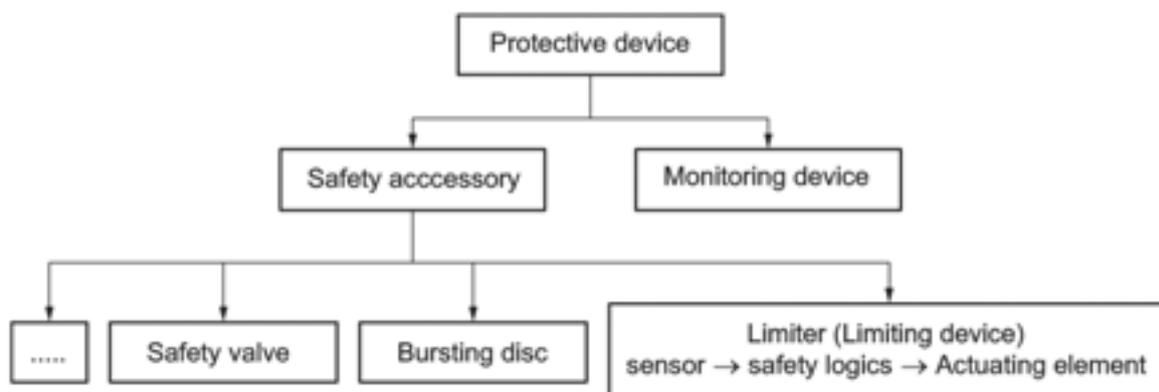


Figura 1. Dispositivi di protezione secondo la PED

Gli accessori di sicurezza sono dispositivi destinati a proteggere le attrezzature a pressione contro il superamento dei limiti ammissibili. È normale pensare ai parametri PS

e TS come parametri standard da non superare, ma a seconda del tipo di attrezzatura, delle condizioni di funzionamento e dei risultati dell'analisi dei rischi, potrebbero essere individuati altri limiti che, qualora superati, potrebbero pregiudicarne la sicurezza di funzionamento (per esempio il livello di acqua in una caldaia, la velocità di agitazione in un reattore che potrebbe innescare una reazione incontrollata, ecc.).

La EN 764-7 fornisce utili indicazioni per la valutazione del rischio di attrezzature a pressione non esposte a fiamma. In particolare, le fonti di rischio sono definite come condizioni o eventi che possono compromettere la sicurezza dell'impianto e per identificarle occorre tenere conto di diversi fattori, dovuti sia ad errori umani, sia a guasti tecnici (tipicamente delle attrezzature e dei sistemi di regolazione e controllo). Tutti questi fattori possono portare al superamento dei limiti ammissibili.

La valutazione del rischio mira, per ciascuna situazione pericolosa individuata, al raggiungimento di un livello di rischio accettabile mediante l'applicazione di una o più misure di protezione indipendenti (o IPL, *Independent Protection Layers*).

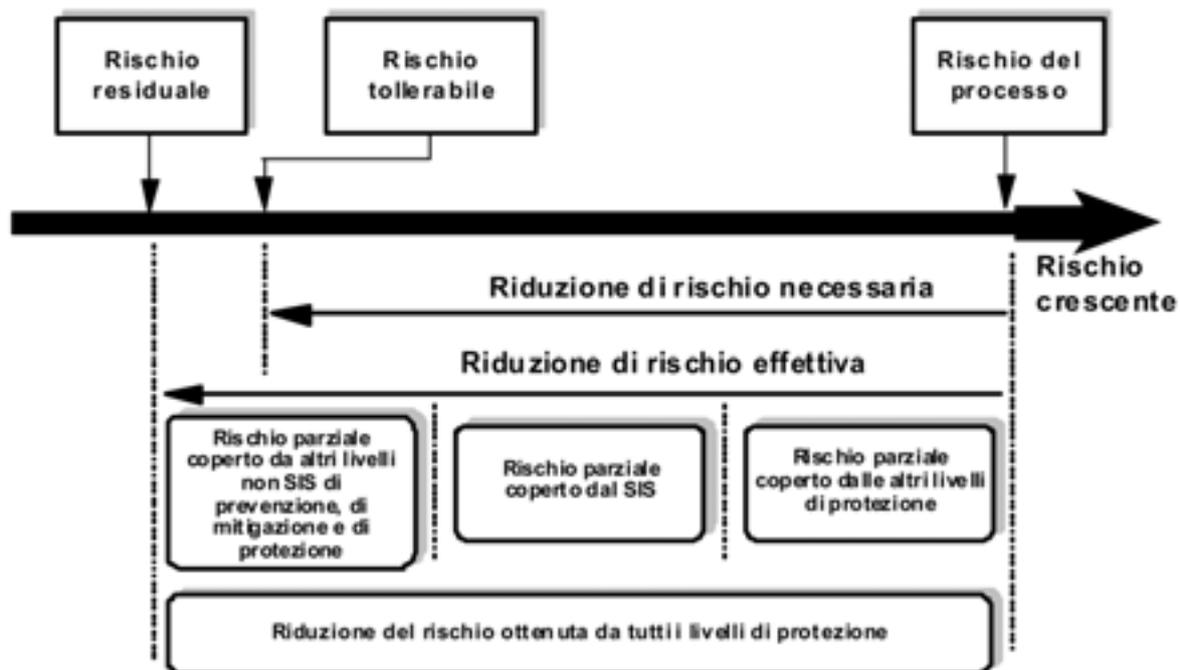


Figura 2. Riduzione del rischio

Per la protezione della maggior parte delle attrezzature a pressione spesso è sufficiente l'installazione di dispositivi di limitazione diretta, come le valvole di sicurezza. Tuttavia, quando occorre garantire che parametri diversi dalla pressione rimangano entro i limiti individuati come sicuri, è preferibile (e talvolta inevitabile) l'impiego di sistemi strumentati di sicurezza, ancor più che, con il progresso dell'elettronica, tali dispositivi permettono oggi maggiore flessibilità, oltre che il raggiungimento di prestazioni ed affidabilità elevate a minor costo.

In generale un SIS (*Safety Instrumented System*) è un sistema che realizza funzioni di sicurezza SIF (*Safety Instrumented Functions*) in grado di mantenere in condizioni sicure un impianto anche in caso di malfunzionamento del sistema di controllo di processo base (BPCS) e del sistema di osservazione e gestione allarmi. Per la PED questi ultimi non possono essere infatti considerati accessori di sicurezza (cfr. PED Guidelines A-20, B-16) e oltretutto non riuscirebbero comunque a garantire un'affidabilità adeguata.

Per stabilire che affidabilità deve avere un dispositivo di sicurezza è indispensabile valutare il "livello di integrità della sicurezza" o SIL (*Safety Integrity Level*) richiesto, e ciò può essere fatto esclusivamente attraverso una valutazione del rischio. Se a una o più

misure di protezione individuate corrisponde una o più SIF, in rapporto alla riduzione del rischio obiettivo viene determinato il SIL⁽¹⁾ richiesto per ciascuna SIF.

Safety Integrity Level (CEI EN 61511 -1, § 9.2)		
SIL	Esercizio in modo SU DOMANDA	
	Probabilità media di guasto su domanda obiettivo	Riduzione di rischio obiettivo
nessuna prescrizione	$\leq 10^{-1}$	≤ 10
1	$[10^{-2} \div 10^{-1}]$	$10 \div 100$
2	$[10^{-3} \div 10^{-2}]$	$100 \div 1.000$
3	$[10^{-4} \div 10^{-3}]$	$1.000 \div 10.000$
4	$[10^{-5} \div 10^{-4}]$	$10.000 \div 100.000$

Tabella 1. Relazione tra SIL, probabilità di guasto e riduzione di rischio obiettivo

Risulta pertanto fondamentale condurre un'adeguata analisi dei rischi al fine di individuare le necessarie misure di riduzione del rischio e definire le specifiche ed i requisiti prestazionali degli eventuali dispositivi di sicurezza da adottare.

Le tecniche di valutazione dei rischi sono diverse, tuttavia si deve adottare un'analisi semi-quantitativa in quanto gli obiettivi di riduzione del rischio (e quindi i SIL) devono essere definiti. Per approfondimenti si rimanda alla norma EN 61511-3, la quale presenta una varietà di metodi per valutare i SIL richiesti, riprendendo i concetti generali sul rischio e chiarendo le relazioni tra rischio e integrità della sicurezza.

I requisiti di sicurezza del SIS derivano dall'allocazione della SIF e dai risultati dell'analisi dei rischi. Devono essere chiari, precisi, realizzabili, verificabili e manutenibili, e devono essere riportati nel Fascicolo Tecnico, per aiutare la comprensione e l'interpretazione da parte di coloro che utilizzeranno tali informazioni.

Oltre ai requisiti minimi sulla base dei quali progettare il SIS (vds. EN 61511-1), occorre considerare:

- comportamento del sistema al rilevamento di una anomalia
- tolleranza ai guasti dell'hardware
- scelta dei dispositivi, componenti e sottosistemi, anche programmabili
- interfacce (operative, manutentive, ecc.)
- manutenzioni e prove
- verifica della probabilità di guasto, che deve essere minore o uguale a quella correlata al SIL richiesto e specificato nei requisiti di sicurezza.

Dopo l'installazione del SIS, lo step finale prevede la validazione della sicurezza del SIS, cioè tutte le verifiche progettuali, funzionali e documentali che, nel caso di un accessorio di sicurezza conforme alla PED, sono svolte sotto sorveglianza di un Organismo Notificato.

La documentazione deve essere raccolta nel Fascicolo Tecnico insieme con tutti gli allegati necessari e i documenti previsti dalla direttiva 2014/68/UE, tra cui il manuale di istruzioni da fornire all'utilizzatore. Quest'ultimo dovrà contenere tra il resto tutte le indicazioni sulla manutenzione, le tarature e i controlli da attuare affinché sia mantenuto il

¹ La norma IEC EN 61508 definisce tre modi operativi dei sistemi di sicurezza:

- *Low Demand Mode*, in cui la funzione di sicurezza interviene indicativamente meno di una volta all'anno
- *High Demand Mode*, tipico del settore macchine
- *Continuous Mode*, nel quale vi è un costante intervento della funzione di sicurezza

L'affidabilità dei sistemi di sicurezza si valuta mediante il SIL o il PL (*Performance Level*). In *Low Demand Mode* il SIL si determina dalla probabilità di guasto PFD (*Probability of Failure on Demand*), che è un numero puro, mentre negli altri due si ricava dalla frequenza di guasto PFH (*Probability of Failure per Hour*). Negli impianti di processo e nelle attrezzature a pressione le SIF operano tipicamente in *Low Demand Mode*, per cui il riferimento è il SIL. Il PL viene utilizzato soprattutto nelle macchine ed è trattato nella norma EN ISO 13849-1, che considera esclusivamente funzioni di sicurezza operanti in *High Demand Mode*.

livello di integrità della sicurezza previsto.

2. Caso di studio

2.1 Descrizione dell'impianto

Nello stabilimento Cartiere Modesto Cardella di San Pietro a Vico (LU) è stato sottoposto a revamping l'impianto vapore della centrale di cogenerazione, costituito essenzialmente da:

- a) generatore di vapore con surriscaldatore
- b) turbina a vapore
- c) circuito di bypass turbina a vapore
- d) desurriscaldatore
- e) saturatore
- f) tubazioni e accessori
- g) pompe, degasatore, circuiti ausiliari, ecc.

Il generatore produce vapore surriscaldato (che in esercizio ha pressione di circa 54 bar e temperatura di circa 440°C) con producibilità massima 40 t/h, PS = 62 bar e TS = 460°C.

In condizioni di funzionamento normali il vapore ad alta pressione viene inviato alla turbina per produrre energia elettrica. Il salto entalpico riduce i parametri allo scarico a circa 5,4 bar e 240°C, quindi il vapore viene desurriscaldato fino a 200°C tramite una valvola desurriscaldatrice inserita lungo la tubazione a valle della turbina, per confluire poi nel saturatore, dove raggiunge la condizione di vapore saturo necessaria per l'utilizzo nei cilindri essiccatori delle macchine continue.

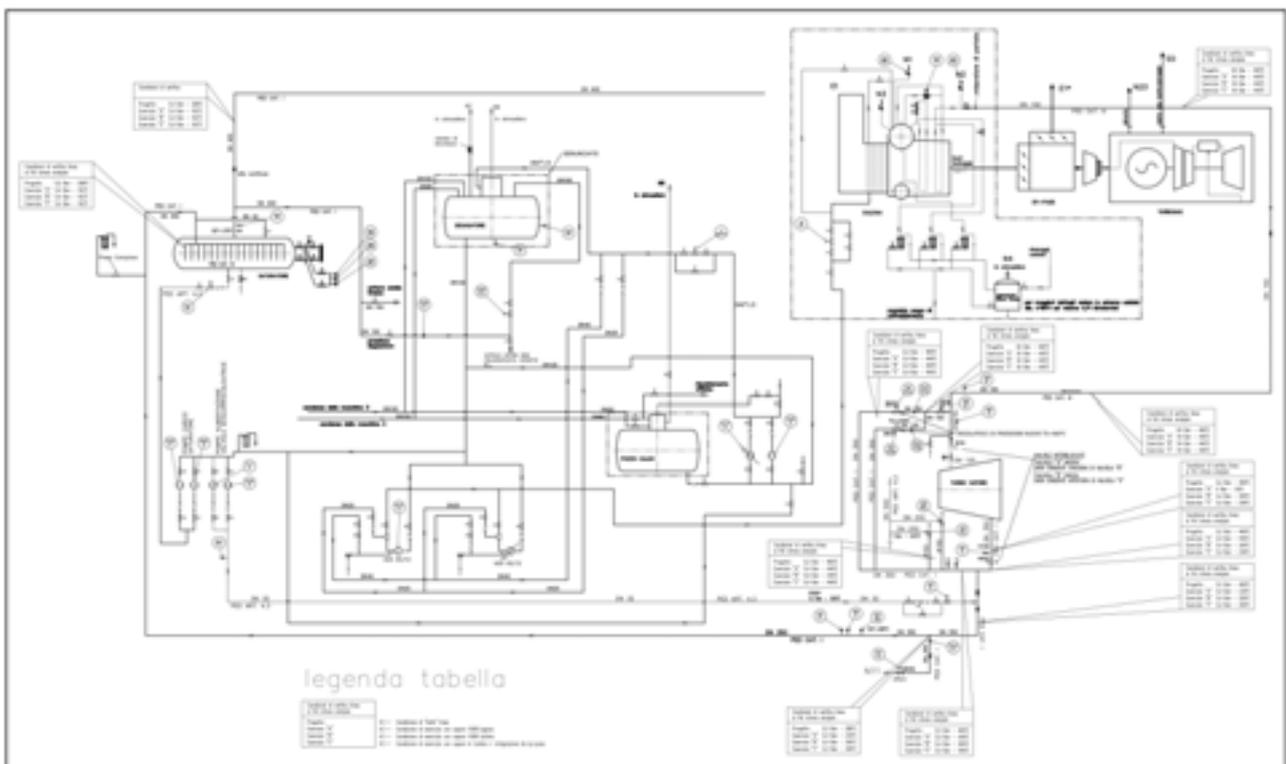


Figura 3. Schema P&ID (su autorizzazione di Cartiere Modesto Cardella S.p.A.)

In caso di manutenzione, o per qualsiasi altra anomalia, la turbina può essere esclusa ed il vapore indirizzato in una tubazione di bypass per garantire la fornitura di vapore ai reparti, previa opportuna riduzione di pressione a 5,4 bar mediante due valvole regolatrici. In questa condizione, peraltro molto rara e indesiderata, il vapore rimane surriscaldato a oltre 400°C, pertanto il desurriscaldatore è necessario affinché la temperatura di esercizio non superi il limite massimo ammissibile delle attrezzature a valle.

L'intervento di revamping ha riguardato la sostituzione del vecchio saturatore e di tutte le tubazioni fino alla linea di distribuzione ai reparti esistente. In fase di progettazione, i calcoli mediante stress analysis sono stati condizionati dalla configurazione impiantistica e dalle caratteristiche del luogo di installazione e pertanto è stato necessario imporre dei vincoli sulle temperature massime ammissibili di alcuni tratti di tubazione (vds. Tabella 2).

Descrizione attrezzatura	Dimensione V [litri] - DN	PS [bar]	TS [°C]	Cat. PED	NOTE
Tratto tubazione da Centrale Termica a turbina vapore	DN 150	64	460	III	Protette da dispositivi di sicurezza in GdV
Tratto tubazione bypass fino a valvole regolatrici	DN 150	64	460	III	
Tratti tubazione bypass da valvole regolatrici fino a TSH504	DN 350	5,5	460	I	
Tratto tubazione scarico turbina fino a valvola intercettazione	DN 350	5,5	460	I	
Tratto tubazione da TSH504 a saturatore	DN 350	5,5	280	I	
Saturatore	L 7700	5,5	340	IV	
Valvola regolatrice bypass PV520/A	DN 350	64	460	III	
Valvola regolatrice bypass PV520/B	DN 250	64	460	III	
Valvola desurriscaldatrice (VAD) TV507	DN 80	6	460	Art. 4.3	
Valvola di sfioro PV524	DN 250	5,5	400	I	Regolata a 5,45 bar
Limitatore di temperatura - Safety Loop.TSH504+PLC+EV538		64	460	IV	Set point 280°C
Valvole sicurezza PSV538 e PSV539		10,5	500	IV	Press. taratura 5,5 bar
Tubazione acqua attemperamento da pompe a innesto VAD	DN 32	12	105	Art. 4.3	
Tubazioni in uscita dal saturatore	DN 400	5,5	280	I	

Tabella 2. Elenco delle nuove attrezzature a pressione

L'impianto è inoltre dotato di opportuni indicatori e dispositivi di controllo (manometri, termometri, trasmettitori di pressione e temperatura, ecc.). I parametri operativi sono registrati nel sistema di supervisione e monitorati dal conduttore, che assicura la sorveglianza 24h/24 e prende opportune contromisure in caso di eventuali anomalie che richiedano l'intervento manuale in seguito ad allarmi sul BPCS, remotati in sala controllo.

2.2 Valutazione del rischio e riduzione del rischio

La metodologia adottata per la valutazione dei rischi si basa su un'analisi HazOp (*HAZard and OPerability*) integrata da una LOPA (*Layer Of Protection Analysis*) con matrice di rischio. L'attività è stata condotta all'interno di un team formato da personale in possesso delle competenze tecniche ed operative sull'impianto e rappresentativo dei vari ambiti di interesse, quali progettazione, HSE, manutenzione, conduzione, ecc.

Fondamentalmente l'analisi considera i seguenti step:

- definizione dei nodi, intesi come sezioni di un impianto, unità logiche o punti di processo specifici da analizzare in dettaglio;
- individuazione delle anomalie di processo, rappresentate dalle deviazioni tipiche dei parametri operativi (alta o bassa pressione, alta o bassa temperatura, no/meno o più portata, flusso contrario, alto o basso livello, ecc.);
- individuazione delle cause di tali anomalie e delle possibili conseguenze;
- valutazione della frequenza di accadimento, espressa in occasioni/anno (*occ/y*);
- stima del livello di "rischio grezzo" per la situazione pericolosa analizzata, senza tener conto delle misure predisposte per controllare il danno o la probabilità di accadimento;
- indicazione delle misure di protezione e/o delle funzioni di sicurezza predisposte;
- stima del "rischio intermedio" con le misure predisposte e relativa ponderazione del rischio (giudizio atto a stabilire se l'obiettivo di riduzione del rischio è stato raggiunto);
- individuazione di eventuali ulteriori misure ritenute necessarie per poter abbassare ulteriormente il rischio o eventuali raccomandazioni;
- stima del "rischio residuo" considerando le misure e raccomandazioni individuate.

Il livello di danno è stato valutato considerando l'eventuale impatto sulla salute delle persone, sull'ambiente e sugli impianti (o danno economico). Le classi di frequenza sono

determinate sulla base di intervalli in occasioni/anno, mentre la frequenza di ciascun evento pericoloso è definita sulla base di dati oggettivi oppure stimata consultando banche dati incidentali riconosciute, per esempio MARS, MHIDAS, OREDA, ecc.

Nella fattispecie l'analisi si raffigura di tipo semi-quantitativo, in quanto il livello di rischio viene determinato sulla base di una matrice di rischio che incrocia 5 livelli di danno con 7 classi di frequenza di accadimento, al fine di ottenere 3 livelli di rischio:

- **B** rischio BASSO, tollerabile
- **M** rischio MEDIO, da ridurre se praticabile (ALARP, *As Low As Reasonably Practicable*)
- **A** rischio ALTO, non tollerabile

La matrice di rischio adottata è stata condivisa nel team ed approvata dall'azienda:

RISK MATRIX			occl/y CF →	< 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ÷ 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	10 ⁻² ÷ 10 ⁻¹	10 ⁻¹ ÷ 1
P: impatto sulle PERSONE ↓	A: impatto sull'AMBIENTE ↓	E: impatto ECONOMICO ↓		CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7
BASSO: ferite lievi, reversibili, che necessitano cure lievi (infermeria)	BASSO: effetti negativi limitati (breve durata) e circoscritti (locali al reparto)	BASSO: impianti / apparecchiature poco danneggiati, funzionamento non compromesso	D1	B	B	B	B	B	M	M
MODERATO: numero limitato di ferite gravi	MODERATO: possibile superamento temporaneo di limiti alle emissioni, ma senza inquinamento permanente	MODERATO: impianti / apparecchiature molto danneggiati, funzionamento compromesso	D2	B	B	B	M	M	M	A
GRAVE: un morto nel sito produttivo; numerose ferite gravi o invalidanti	GRAVE: Superamento prolungato o significativo dei limiti alle emissioni; possibili effetti irreversibili ma all'interno del sito	GRAVE: impianto fuori servizio, necessari interventi di medio periodo (settimane)	D3	B	B	M	M	M	A	A
MOLTO GRAVE: più di un morto all'interno del sito	MOLTO GRAVE: Inquinamento significativo anche all'esterno del sito	MOLTO GRAVE: impianto distrutto o lunga perdita di produzione (mesi)	D4	B	M	M	M	A	A	A
CATASTROFICO: più di un morto all'interno del sito; effetti letali all'esterno del sito	CATASTROFICO: danni ambientali irreversibili con conseguenze immediate e esterne al sito	CATASTROFICO: Impianto distrutto e danni a altri impianti / all'esterno del sito	D5	M	M	A	A	A	A	A

Figura 4. Matrice di rischio

In prima battuta si determina il "rischio grezzo", cioè senza considerare le barriere di protezione presenti, quali allarmi, procedure o sistemi di sicurezza. Viene quindi stimata la riduzione di rischio attraverso i vari strati di protezione (IPL), come il BPCS, le funzioni di sicurezza, le procedure, ecc., che ne riducono la frequenza.

La ponderazione del rischio mira a stabilire se gli obiettivi di riduzione del rischio siano stati raggiunti, cioè se il livello di rischio raggiunto sia tollerabile o meno. Con riferimento alla matrice sopra esposta, l'obiettivo è chiaramente quello di raggiungere sempre un livello basso. Potrebbe ritenersi tuttavia accettabile un rischio medio, quando un ulteriore sforzo per ridurlo comporti interventi dai costi ragionevolmente inadeguati (ALARP).

Quando la frequenza di accadimento viene ridotta mediante un sistema strumentato di sicurezza, al SIL della SIF corrisponde una riduzione della classe di frequenza. Viceversa, nel caso si individui la necessità di implementare una funzione strumentata di sicurezza, la corrispondente riduzione di rischio obiettivo (vds. Tabella 1) in grado di raggiungere il livello ritenuto accettabile determina il SIL richiesto.

DEVIAZIONE	CAUSA [occ/y]	CONSEGUENZE	TIPO IMPATTO (P/A/E)	RISCHIO GREZZO			MISURE DI PROTEZIONE E FUNZIONI DI SICUREZZA [prob]	RISCHIO INTERMEDIO		
				CF	D	R		CF	D	R
1 ALTA TEMPERATURA Tubazioni e saturatore	Malfunzionamento della valvola desurriscaldatrice vapore - con utilizzo del bypass durante il periodo di fermo turbina (ogni 5 anni) $[4,94 \cdot 10^{-3}]$	Superamento TS, rottura tubazioni e saturatore, fuoriuscita di vapore, infortunio grave al personale	P E	5	3	M	- TT505 con allarme a 260°C $[10^{-1}]$ - TSH504 in uscita VAD, con chiusura valvola interc. vapore EV506 a 280°C, SIL2 $[10^{-3}]$	1	3	B

Figura 5. Estratto del foglio di lavoro HazOp-LOPA

2.3 Allocazione SIL

Nella fattispecie, la valutazione del rischio condotta sull'impianto di cogenerazione a vapore ha evidenziato un rischio medio-alto di superamento TS nelle attrezzature in caso di malfunzionamento della valvola desurriscaldatrice, ridotto mediante l'implementazione di una funzione strumentata di sicurezza attraverso un limitatore di temperatura SIL 2.

3. Fabbricazione del sistema strumentato di sicurezza

3.1 Caratterizzazione e specificazione dei requisiti del SIS

Per garantire il SIL richiesto, il sistema strumentato di sicurezza è stato progettato e realizzato in conformità ai requisiti della norma EN 61511-1⁽²⁾.

È composto essenzialmente da un termostato (elemento sensibile), un PLC di Sicurezza (elemento logico, in grado di comunicare con il BPCS) ed una valvola di intercettazione pneumatica (elemento finale), il cui attuatore è comandato da due elettrovalvole.

Poiché il dispositivo limitatore in questione è un accessorio di sicurezza ai sensi della direttiva 2014/68/UE, e poiché la protezione contro il superamento della temperatura TS riguarda anche il saturatore, il SIS è classificato in IV categoria di rischio PED.

Con riferimento alla EN 61511-1, §10.3.1, vengono descritti i requisiti in ingresso del SIS.

- La funzione del SIS è quella di intercettare il vapore nella tubazione di bypass turbina nell'ipotesi che a valle del desurriscaldatore venga raggiunto il limite di temperatura massimo di 280°C, per evitare il superamento della TS delle attrezzature a valle.
- Il SIS è indipendente dal sistema di gestione di processo, per ridurre gli effetti dei guasti di causa comune. In caso di interruzione di qualsiasi alimentazione di energia, il SIS deve porsi in uno stato di sicurezza, "fail safe", intercettando il flusso di vapore.
- Poiché l'evento di utilizzo del bypass durante il periodo di fermo turbina è 1 volta ogni 5 anni, il tasso di domanda pone il SIS in *Low Demand Mode*.
- Il tempo di risposta del SIS deve essere dell'ordine di qualche secondo. Non vi sono infatti conseguenze immediate in caso di manifestazione dell'evento.
- Non è richiesto che una fermata manuale del processo (per es. spegnimento caldaia) faccia intervenire la funzione di sicurezza.
- Le ipotesi sulla frequenza considerano una probabilità di guasto della valvola desurriscaldatrice pari a $2,47 \cdot 10^{-2}$ occ/dem, calcolata tenendo conto di un tempo di riparazione di 60 giorni e di un tasso di guasto $1,5 \cdot 10^{-1}$ occ/y (rif. Rapporto Rijnmond pag. 375 TAB. IX.I). Si ha quindi:⁽³⁾ $2 \cdot 10^{-1} \times 2,47 \cdot 10^{-2} = 4,94 \cdot 10^{-3}$ occ/y
- Il livello di integrità della sicurezza del SIS deve essere almeno SIL 2 con modo di funzionamento "on demand", cioè probabilità di guasto $10^{-3} \leq \text{PFD} < 10^{-2}$.

² La EN 61511 è un'implementazione, nel settore di processo, della EN 61508, richiamata dalla EN 764-7.

³ Sono state considerate trascurabili, in quanto di diversi ordini di grandezza inferiori, le probabilità di avaria della pompa acqua (in quanto presente pompa di scorta) e guasto al regolatore di temperatura

- L'intervento della funzione di sicurezza deve richiedere un intervento di ripristino manuale prima di ristabilire il funzionamento normale. Prima di effettuare tale ripristino, l'operatore addetto alla conduzione dell'impianto dovrà indagare sui motivi per i quali è intervenuta la funzione di sicurezza ed eliminarne le cause.
- Per quanto riguarda le condizioni ambientali, il SIS è installato in una centrale di cogenerazione. La valvola di intercettazione è adeguata alle condizioni di esercizio e coordinata con la tubazione della rete vapore surriscaldato (PS = 64 bar, TS = 460°C).
- Le tubazioni sono coibentate, per cui il SIS può ritenersi idoneo per ambienti con temperature molto inferiori a quelle sopra descritte. Si considera un valore non superiore a 80°C.
- Non sono richiesti requisiti particolari di resistenza all'incendio.

3.2 Progettazione del SIS

La progettazione del SIS rispecchia i requisiti definiti nel paragrafo precedente. Di seguito sono descritte le caratteristiche del sistema, che è costituito dai seguenti componenti:

- 1) Termostato (switch)
- 2) PLC di Sicurezza
- 3) n°2 Teleruttori
- 4) n°2 Elettrovalvole a solenoide
- 5) Attuatore pneumatico
- 6) Valvola di intercettazione pilotata

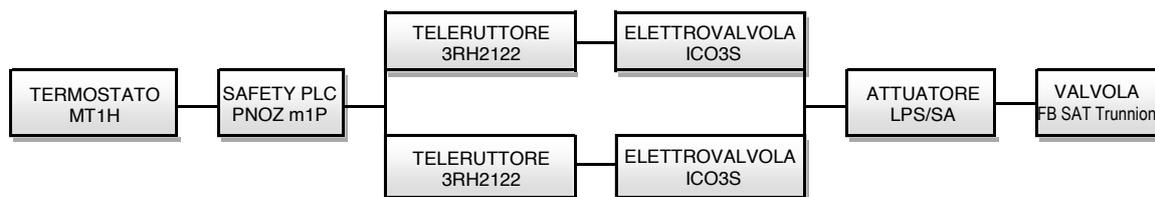


Figura 6. Schema a blocchi del SIS

Il termostato è in grado di trasmettere un segnale di tipo digitale ed è dotato di ghiera di impostazione della temperatura di soglia. Al raggiungimento del valore preimpostato, invia il segnale di sovratemperatura al PLC, il quale comanda l'apertura dei teleruttori, diseccitando così le bobine delle elettrovalvole di comando dell'attuatore pneumatico montato sulla valvola di intercettazione.

Il sistema di comando dell'attuatore (teleruttore + elettrovalvola) è a doppio canale (1oo2). L'attuatore è a semplice effetto ed in caso di mancanza di alimentazione pneumatica o elettrica, chiude la valvola interrompendo il flusso di vapore (sistema *fail-safe*).

Ai fini della verifica del livello di integrità della SIF è necessario accertare che ciascun componente del SIS sia idoneo a raggiungere tale livello. La EN 61508-2 definisce i vincoli architeturali dei sottosistemi di un SIS a seconda del tipo (*Type A* o *Type B*), della frazione dei guasti sicuri SFF (*Safe Failure Fraction*) e della tolleranza minima ai guasti. Per ulteriori dettagli si rimanda al §7.4.4 e alle Tabelle 2 e 3 della norma.

Tutti i componenti utilizzati sono risultati idonei per minimo SIL 2. Tale idoneità si evince dalla certificazione fornita dal rispettivo fabbricante sia in termini espliciti dichiarati (*SIL capability*), sia verificando il livello di integrità sulla base del tipo e della SFF certificata.

Nel Fascicolo Tecnico sono stati inseriti tutti i certificati dei componenti, comprensivi dei dati di affidabilità necessari ai fini del calcolo del SIL della funzione strumentata.

3.4 Verifica del livello di integrità raggiunto

Per il calcolo della PFD_{SIS} del loop di sicurezza è necessario calcolare le PFD dei singoli

componenti (quando non già dichiarata dal costruttore) ricavandole dal tasso di guasto (λ). Il tasso di guasto totale si divide in quattro parti:

- λ_{Sd} (riferito ai guasti non pericolosi rilevati)
- λ_{Su} (riferito ai guasti non pericolosi non rilevati)
- λ_{Dd} (riferito ai guasti pericolosi rilevati)
- λ_{Du} (riferito ai guasti pericolosi non rilevati)

Affinché si possa calcolare l'affidabilità di un componente di sicurezza, noti i tassi di guasto, occorre definire ogni quanto tempo il componente è oggetto di verifica completa del suo funzionamento, cioè l'intervallo TI di *Full Proof Test*, i cui valori tipici variano da uno a tre anni.

Nel caso in cui non venga fatta alcuna diagnostica per rilevare i tassi di guasto pericolosi e senza considerare cause comuni di guasto⁽⁴⁾, la probabilità PFD_{avg} ⁽⁵⁾ di un sistema a singolo canale si può calcolare con l'equazione semplificata:

$$PFD_{1001} = \lambda_D \cdot TI / 2 \quad (1)$$

mentre nel sistema a doppio canale, la formula è la seguente:

$$PFD_{1002} = (\lambda_D \cdot TI)^2 / 3 \quad (2)$$

Nel caso specifico è stato definito un intervallo di *Full Proof Test* pari a 1 anno.

Si procede quindi col determinare le probabilità di guasto dei vari componenti utilizzando i dati di affidabilità rilevabili dalle certificazioni rilasciate dai rispettivi fabbricanti. Si riportano di seguito a titolo di esempio i dati ed i risultati della PFD (calcolata in base al λ_D) per il termostato e per la valvola di intercettazione.

TERMOSTATO		VALVOLA	
Costruttore/Modello:	Barksdale / MT1H	Costruttore/Modello:	Penta / FB SAT Trunnion
Dati di Affidabilità		Dati di Affidabilità	
Full Test Interval	1 anno	Full Proof Test Interval	1 anno
Ore/anno	8760	Ore/anno	8760
HFT	0 (Type A)	HFT	0 (Type A)
SFF	61%	SFF	96%
λ_s	1,39E-07	λ_s	2,255E-07
λ_{su}	1,39E-07	λ_{su}	2,255E-07
λ_D	8,90E-08	λ_D	1,32E-07
λ_{Du}	8,90E-08	λ_{Dd}	1,178E-07
λ_T	2,28E-07	λ_{Du}	1,459E-08
PFD_{λ_D}	3,90E-04	PFD_{λ_D}	5,8E-04

Figura 7. Dati di affidabilità e probabilità di guasto di alcuni componenti

Si procede quindi col determinare la PFD del sottosistema [Teleruttore + Elettrovalvola]:

$$PFD_{Tel+EV} = PFD_{Tel} + PFD_{EV} = 2,03E-4 \quad (3)$$

e la PFD del sottosistema di comando attuatore a doppio canale

$$PFD_{1002} = 4 \cdot (PFD_{Tel+EV})^2 / 3 = 5,48E-8 \quad (4)$$

Per determinare la PFD dell'intero sistema si considera il loop di elementi in serie, quindi la somma delle singole PFD. La figura seguente illustra il calcolo finale.

⁴ Per le altre formule semplificate utilizzabili per le diverse architetture e per quelle non semplificate si veda la norma EN 61508-6, §B.3 e la guida CEI 65-186, Allegato H

⁵ La probabilità di guasto è mediata nell'intervallo TI tra due Full Test, quindi viene definita come PFD media

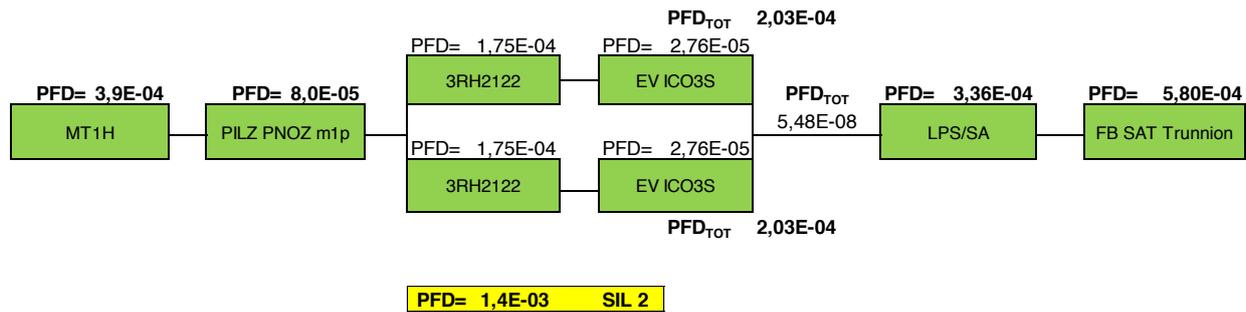


Figura 8. Rappresentazione a blocchi del calcolo della PFD dell'intero loop

Si ha che $PFD_{SIS} = 1,4 \cdot 10^{-3}$, che corrisponde a un livello di integrità per la sicurezza SIL 2.

3.5 Installazione, verifica finale e marcatura CE

Il circuito elettrico è stato realizzato ed installato nel rispetto della EN 50156-1, norma di riferimento per l'equipaggiamento elettrico degli impianti a pressione. Lo schema elettrico costituisce uno degli allegati fondamentali del Fascicolo Tecnico. Il software del PLC è stato realizzato da blocchi certificati messi a disposizione dal produttore del PLC stesso. L'elemento sensibile del limitatore è stato inserito in un pozzetto ricavato nella tubazione. Il quadro elettrico principale è stato posizionato in sala controllo.

L'Organismo Notificato ha provveduto, secondo procedura di valutazione della conformità PED Modulo G, all'esame del Fascicolo Tecnico ed alla verifica finale. La prova è stata condotta tramite simulazione dell'evento sovratemperatura mediante un fornello calibrato.

Il buon esito delle verifiche ha consentito al fabbricante di marcare CE l'accessorio di sicurezza e di emettere la dichiarazione UE di conformità.

All'utilizzatore è stato reso disponibile il manuale d'uso, manutenzione e sicurezza. In esso sono contenute tutte le informazioni per l'utilizzo: i dati tecnici, i limiti d'uso, il significato di spie, pulsanti ed allarmi, le procedure di ripristino, le informazioni sulla manutenzione, i controlli e le prove da effettuare (full test) per mantenere il livello di affidabilità del sistema.



Figura 9. Targa CE (su autorizzazione di SMS Operations S.p.A.)

4. Conclusioni

Spesso negli impianti a pressione le attrezzature devono essere protette contro il superamento di limiti ammissibili diversi dalla pressione massima PS. Se tali condizioni devono essere garantite da un sistema di sicurezza strumentato, esso deve rispettare i requisiti della direttiva 2014/68/UE ed essere marcato CE come accessorio di sicurezza.

Un SIS è rappresentato da una catena di elementi che garantiscono la funzione di sicurezza in modo integrato. La marcatura CE deve quindi interessare tutto il loop di sicurezza e la valutazione di conformità deve riguardare il sistema nella sua interezza.

Nella presente memoria si è voluto illustrare l'iter di fabbricazione di un dispositivo limitatore di temperatura conforme alla PED, realizzato per la protezione di attrezzature a pressione utilizzate in un impianto di cogenerazione di cartiera.

L'attività di revamping ha permesso all'azienda di ammodernare l'impianto, sostituendo vecchie attrezzature e adottando misure di sicurezza efficaci ed affidabili, scelte a fronte di una valutazione dei rischi, certificate e verificate nel rispetto della legislazione vigente.

Bibliografia

- [1] PED 2014/68/EU Guidelines, v4, 12/05/2017, in particolare A-20, A-25, A-43, B-16
- [2] UNI EN 764-7:2004 - Attrezzature a pressione - Sistemi di sicurezza per attrezzature a pressione non esposte a fiamma
- [3] CEI EN 61511 - Sicurezza funzionale - Sistemi strumentali di sicurezza per il settore dell'industria di processo - Parte 1: Struttura, definizioni, sistema, prescrizioni per l'hardware e il software - Parte 3: Guida per la determinazione dei livelli di integrità di sicurezza richiesti”
- [4] CEI EN 61508 - Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici e elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza - Parte 1: Requisiti generali - Parte 2: Requisiti per i sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza - Parte 6: Linee guida per l'applicazione della EN 61508-2 e EN 61508-3
- [5] CEI 65-186:2010 - Linea guida per l'applicazione della Norma serie CEI EN 61511

Gestione delle attrezzature e/o insiemi a pressione (camere iperbariche) a servizio delle TBM (tunnel boring machine). Esperienza operativa di un prolungato intervento di manutenzione straordinaria

G. Sferruzza¹, G. Argento¹, F. Daneri², M. Esposito², M. Godono³

¹ Inail - Uot di Palermo

² Consorzio Stabile SIS

³ Sistemi Iperbarici Srl - Gruppo Sapio

Abstract

Oggi nella realizzazione di gallerie (per metropolitane, strade o servizi di vario tipo) in ambito urbano, dove la densità di occupazione del suolo renderebbe critica la realizzazione di cantieri a cielo aperto, si fa sempre più uso di macchine di scavo a foro cieco rendendo così minimo l'impatto dei cantieri sul tessuto urbano.

Queste macchine sono chiamate TBM (Tunnel Boring Machine) e, qualora lo scavo avvenisse in terreni per i quali è necessario mantenere inalterato lo stato tensionale al contorno per evitare cedimenti in superficie, sono utilizzate con più frequenza le EPB (Earth Pressure Balance), dove l'equilibrio degli stati tensionali è garantito dallo stesso materiale di scavo mantenuto in pressione al fronte, in un'area chiamata "camera di scavo".

Il normale ciclo produttivo e di lavoro di tali macchine comporta dei frangenti operativi nei quali si rende necessario l'accesso a questa particolare area di lavoro, sia per la sostituzione dei cutters (utensili) o per manutenzioni ordinarie e straordinarie.

Tenuto conto che l'area è una zona pressurizzata, queste macchine sono dotate di particolari attrezzature a pressione, "camere iperbariche", per l'accesso al fronte di scavo, che consentono l'accesso del personale specializzato e delle attrezzature necessarie dalla galleria alla camera di scavo pressurizzata.

Presso il cantiere della TBM S-927 di Palermo, committente RFI Spa e gestito dal Consorzio Stabile SIS Società per azioni in veste di General Contractor, si è provveduto alle verifiche necessarie alla messa in servizio del complesso delle attrezzature a pressione e della Camera Iperbarica integrate e a servizio della TBM e, oltre alle disposizioni previste dal D.M. 329/04, sono stati attenzionati anche gli adempimenti dei requisiti particolari applicabili previsti dalla norma UNI EN 12110:2014 "Macchine per scavo meccanizzato di gallerie - Zone di pressione - Requisiti di sicurezza", lo studio sulle portate d'aria necessarie per la pressurizzazione contemporanea del fronte di scavo e della camera iperbarica e la procedura predisposta dalla società per l'accesso del personale specializzato al fronte di scavo tramite la camera iperbarica.

Premessa

La gestione diretta di tutte le attività legate alla sicurezza e alla manutenzione delle attrezzature di lavoro da parte delle Aziende di Servizi risulta spesso complessa e difficoltosa specie se unita, talvolta, alla carenza di personale con profili professionali di specifica competenza ed alla limitata disponibilità di risorse economiche preventivate. L'efficacia e l'efficienza dei risultati che possono essere conseguiti dipendono, anche, dalla sinergia tra attività di indirizzo ed esame effettuata dall'Ente di Controllo con le attività di gestione condotta dalla Azienda stessa.

Il ruolo dell'Inail Settore Ricerca è oggi sempre più orientato verso funzioni di servizio al cittadino e la pianificazione strategica dell'Ente mira a indirizzare le risorse umane disponibili verso l'obiettivo che è quello di raggiungere il soddisfacimento del cliente/utente.

Più in particolare l'attività di verifica può essere realizzata sotto varie forme e con diverse metodologie, ovvero attraverso l'attivazione di un sistema di controllo organico e strutturato che opera in fasi temporali differenti: sia nella fase di installazione e sia nella successiva fase di intervento operativo come ad esempio attraverso la stesura di adeguate procedure. Scopo di questa breve memoria è quello di rappresentare una pratica applicazione di sinergica collaborazione durante la denuncia di messa in servizio per le verifiche obbligatorie sulle singole apparecchiature facenti parte di una "Tunnel Boring Machine" ovvero di una attrezzatura per lo scavo di gallerie in materiali incoerenti (sabbie e ghiaie) per la realizzazione di tunnel ferroviari in ambito urbano dove sono emerse e quindi superate le criticità che un tale sistema di scavo avrebbe innescato durante le varie fasi lavorative di manutenzione. Di seguito sono illustrate le attività eseguite che hanno apportato un'importante contributo preventivo al successivo accesso al fronte di scavo, anche in occasione di un prolungato intervento di manutenzione straordinaria resi necessario nel corso dei lavori.

Tunnel Boring Machine

Le "Tunnel Boring Machine" con tecnologia "Earth pressure balance" (acronimo TBM EPB), sono particolari attrezzature che racchiudono e sintetizzano le attuali conoscenze tecniche e operative nonché lo stato dell'arte per lo scavo di gallerie in materiali incoerenti (sabbie e ghiaie). L'applicazione tipo di tali attrezzature è la realizzazione di tunnel, siano essi ferroviari, stradali o destinati a servizi (acquedotti-fognature-cavidotti) in ambito urbano fortemente antropizzato, in cui lo scavo con metodi tradizionali comporterebbe un inevitabile incremento dell'impatto delle attività di cantiere rispetto al contesto nonché un sostanzialmente aumento dei rischi per le presistenze superficiali.

La fresa meccanica a piena sezione è una macchina che permette la industrializzazione ed automazione del complesso delle operazioni di scavo e rivestimento delle gallerie, garantendo inoltre un maggior grado di controllo della stabilità del fronte di scavo, in condizioni che risulterebbero invece particolarmente gravose nel caso di scavo con sistemi tradizionali.

Tale maggiore sicurezza e stabilità è garantita dal fatto che il fronte di scavo è costantemente mantenuto in pressione rispetto all'ambiente esterno dallo stesso materiale escavato che, permanendo all'interno della camera di scavo, viene estratto in modo graduale e controllato rispetto all'effettivo avanzamento della TBM.

Le operazioni di rivestimento del tunnel appena scavato avvengono in concomitanza con l'avanzamento ed in maniera tale che non si verifichi mai la diretta prossimità degli operatori con lo scavo aperto e non rivestito.

La fresa TBM EPB può lavorare in rocce della più svariata natura, consistenza e grado di aggregazione, anche al di sotto di falde acquifere con portate e pressioni rilevanti, esclusivamente adattando il tipo di equipaggiamento e di taglienti.

In estrema sintesi, una fresa meccanica è sommariamente composta da tre sezioni principali le quali assolvono ciascuna uno specifico scopo nell'attuazione del processo di costruzione del tunnel: la testa fresante (cutterhead), lo scudo (shield), e il Backup.

La testa fresante è la parte di attrezzatura direttamente a contatto con il terreno, ed ha lo scopo di penetrare il terreno, tagliandolo e riducendone in modo omogeneo la pezzatura man mano che lo scavo della galleria avanza.



Figura 1. Particolare testa fresante di una TBM

Sulla testa fresante trovano collocazione gli utensili di scavo (picchi e dischi) che, a seconda della natura del materiale da scavare possono essere scelti e combinati adeguatamente dall'utilizzatore.

A tergo della "testa fresante" e delimitata verso il retro della macchina dal "pressure wall" si trova la "camera di scavo", luogo in cui avvengono le attività di controllo periodico e manutenzione degli utensili di scavo. Tali attività devono obbligatoriamente avvenire in pressione, sostituendo il terreno normalmente presente in fase di avanzamento con aria, al fine di garantire costantemente il sostegno del fronte di scavo e del cavo della galleria evitando di conseguenza assestamenti e cedimenti in superficie. Una volta scavato il materiale viene trasferito dalla parte inferiore della camera di scavo all'esterno del tunnel in prima battuta attraverso una coclea e in seguito per mezzo di appositi nastri trasportatori (Conveyor belts).

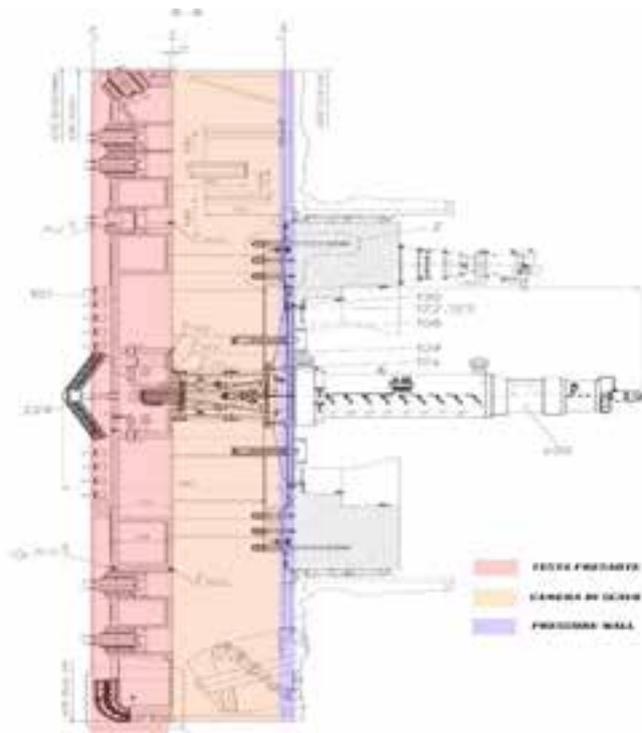
Nel suo percorso verso la superficie il terreno attraversa la seconda sezione principale della TBM, lo scudo (Shield). All'interno di esso, in condizioni di piena sicurezza e separazione rispetto allo scavo aperto, si svolgono le attività di guida e controllo dei parametri macchina nonché di posa in opera del rivestimento definitivo composto da conci prefabbricati in calcestruzzo armato opportunamente sagomati.

Il restante corpo macchina (back-up), della lunghezza di oltre cento metri, costituisce la terza ed ultima sezione principale della TBM che accoglie i numerosi impianti ed attrezzature necessari alla gestione ed operatività della macchina.

Con una semplificazione si può descrivere come segue il processo di lavoro della TBM, che si ripete senza soluzione di continuità fino alla conclusione dello scavo:

FASE 1: La testa fresante inizia gradualmente il suo moto rotatorio e, grazie alla forza generata da 26 Martinetti idraulici (max 105.000 KN) che spingono dallo scudo sul rivestimento definitivo già posto in opera, penetra il terreno. Contemporaneamente vengono immessi in camera di scavo acqua ed additivi in modo da ottenere le condizioni ottimali di consistenza ed omogeneità del terreno scavato.

Pressione, densità e temperatura del materiale vengono costantemente monitorati e quindi si procede progressivamente all'estrazione ed all'invio in superficie.



FASE 2: Raggiunto un avanzamento di scavo prestabilito (spinta), la testa fresante gradualmente rallenta il suo moto rotatorio e infine si ferma, i cilindri di spinta cessano il loro moto di estensione, la coclea ed i nastri smettono di asportare materiale dalla camera di scavo, che permane in sovra-pressione di terra.

FASE 3: A macchina “ferma” e all’interno dello scudo in posizione protetta, operatori specializzati provvedono alla movimentazione e collocazione dei conci prefabbricati costituenti il rivestimento definitivo del tunnel. Una volta posto in opera l’ultimo elemento prefabbricato, di forma

trapezoidale e denominato chiave (Key segment), l’anello di rivestimento è completato, si procede al reset del modulo di comando della TBM e all’avvio della spinta successiva.

Figura 2. Schema sezione in pressione TBM

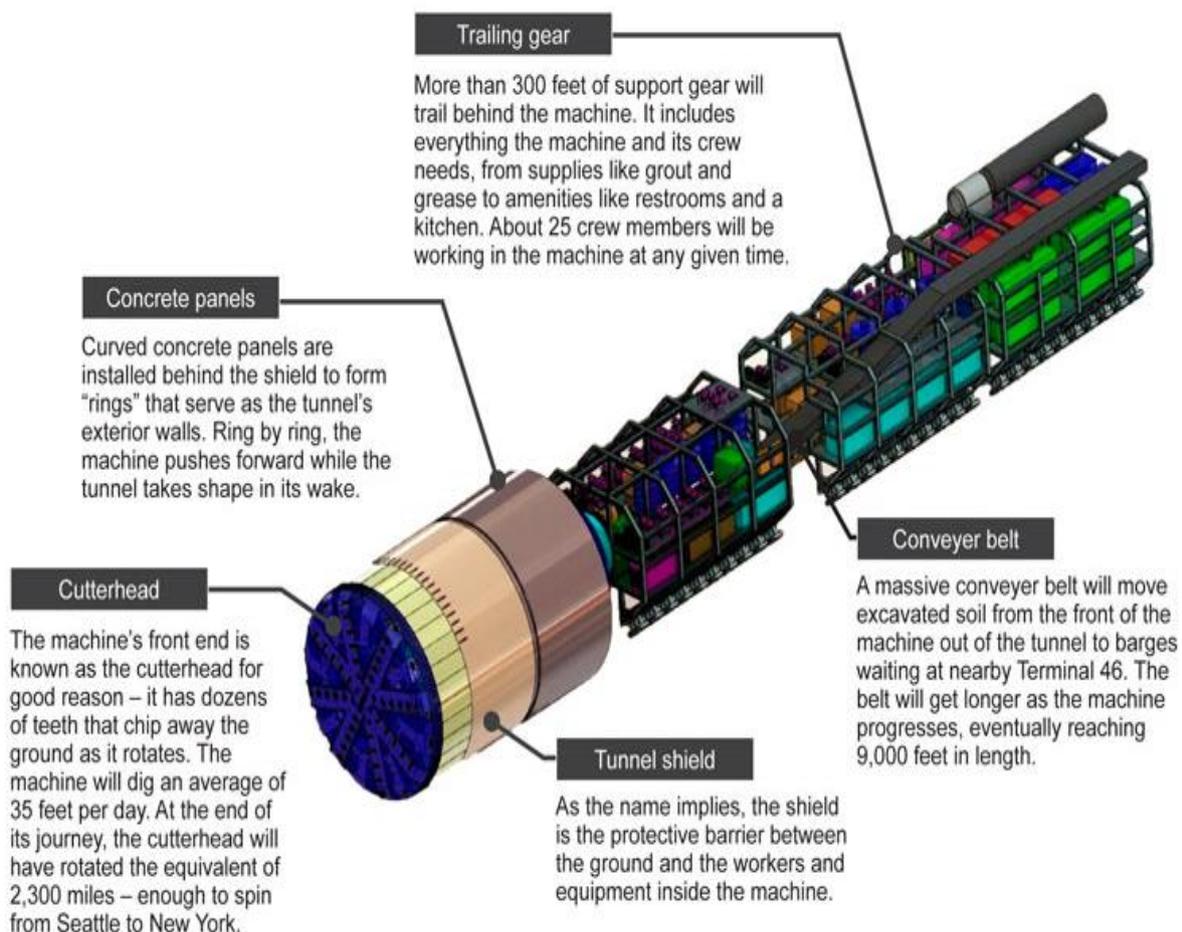


Figura 3. Schema tipo di una TBM EPB



Figura 4. Camera di scavo vista dall'alto

Come esposto in precedenza, tutte le attività di controllo e manutenzione di elementi collocati in corrispondenza dalle testa fresante e della camera di scavo devono avvenire in pressione al fine di garantire la stabilità del cavo della galleria ed evitare cedimenti del terreno circostante. Il passaggio, in camera di scavo, da una pressione di terra (EPB) propria della normale operatività della macchina, ad una pressione di aria è uno dei passaggi estremamente delicati che precedono l'accesso di personale nella zona in pressione e permettono il buon esito e la sicurezza delle successive attività.

Tale conversione del sistema e svuotamento del materiale di scavo deve avvenire gradualmente e con esatta corrispondenza tra terreno estratto ed aria immessa, al fine di garantire il corretto e costante mantenimento delle pressioni di sostegno calcolate dal progettista. Durante l'estrazione del terreno e, gradualmente in funzione del suo progredire, si provvede all'immissione di bentonite al fronte di scavo con la finalità di creare un film impermeabile sull'interfaccia col terreno che consenta la successiva creazione di una bolla d'aria e limiti quanto più possibile le relative perdite di quest'ultima verso il terreno. Il buon esito di questa operazione, che è garanzia del mantenimento di una pressione costante nell'ambiente di lavoro nonché di una accettabile stabilità del fronte di scavo, è la condizione imprescindibile per l'esecuzione dei successivi passaggi che permetteranno l'accesso di personale all'area di lavoro in pressione. L'attività che in condizioni normali richiede dalle 24h alle 48h per essere compiuta si conclude esclusivamente o con il raggiungimento delle condizioni di stabilità attese o, in caso di impossibilità a raggiungere un buon equilibrio del sistema, con l'abbandono dell'intervento programmato e la sua riprogrammazione in posizione differente.



Figura 5. Fronte di scavo trattato con bentonite



Figura 6. Fronte di scavo trattato con bentonite

Una volta completato il processo di sostituzione del terreno con aria compressa, verificata la buona riuscita del trattamento impermeabilizzante e la relativa stabilità della pressione d'aria all'interno della camera di scavo si procede con gli ulteriori passaggi preparatori all'intervento del personale tecnico.

Progettazione del sistema di pressurizzazione a servizio della tbm della metropolitana di Palermo e d.m. 329/04

Nell'ambito del raddoppio ferroviario Palermo Centrale/Brancaccio – Carini nodo di Palermo sono state preliminarmente affrontate le possibili problematiche relative agli interventi per la manutenzione della testa fresante in condizioni iperbariche.

Uno degli aspetti più critici, nell'ambito dell'allestimento dei servizi del cantiere, è la progettazione e la successiva realizzazione dell'intero sistema di attrezzature a pressione che servono per rendere possibile il sistema di scavo sin qui descritto.

Nel corso dell'esame documentale una prima difficoltà riscontrata è stata sulla documentazione tecnica nonché tutti gli allegati e le certificazioni che comprovavano la conformità delle attrezzature che non sempre risultava essere redatta in lingua italiana, e ciò in quanto queste particolari "macchine" sono nella quasi totalità di provenienza estera. Occorre distinguere da questa documentazione però le Certificazioni di Conformità alle Direttive Comunitarie, trattandosi di documenti di natura tecnica molto diffusi e noti sul piano internazionale e di cui gli operatori del settore sono in grado di comprendere la reale consistenza, anche se molto spesso redatte in lingua inglese. Cosa ben diversa dalle istruzioni d'uso che, aldilà degli aspetti legati alle verifiche, dovrebbero essere fornite anche nella lingua del paese dove queste attrezzature risultano installate, ai fini del corretto utilizzo da parte degli operatori.

L'apparente difficoltà per la restante documentazione è stata superata attraverso la traduzione in italiano, con allegate le dichiarazioni sostitutive, dei documenti, dei certificati, e dei fascicoli tecnici posti a corredo. Si è scelto, quindi, di consentire l'utilizzo di attrezzature fabbricate in uno stato differente da quello dove poi verranno utilizzate.

La predisposizione della documentazione in italiano, risponde alla necessità di garantire univocità e chiarezza del contenuto al fine di consentire un corretto esame e rendere più agevole il parere sulle stesse attrezzature.

Dopo diversi incontri preliminari con l'ufficio Inail competente per territorio, è stata sviluppata (in accordo all'art. 6 del d.m. 329/04) una relazione tecnica dettagliata, con lo schema dell'impianto recante le condizioni d'installazione e di esercizio con le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate.

Una volta realizzato il sistema, in conformità al d.m. 329/04, si è provveduto alla denuncia di messa in servizio e alle verifiche obbligatorie sulle singole apparecchiature.

Il sistema di attrezzature è così composto:

Descrizione	Produttore	Attrezzatura					Gruppo	Periodicità Riqualficazione (DM329)
		NF/SN	Volume [lt]	PN [bar]	Cat.			
Camera Iperbarica	Herrnknecht AG	589	6900	4,4	IV	2	A = 3 – B = 10 anni	
Serbatoio aria tecnica	SABAWERK	6953	1000	11	IV	2	A = 3 – B = 10 anni	
Separatore a Vortice HIROSS Denuncia smarrimento.pdf	Parker Hiross	2951640002	52	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Atlas_AFF206035.pdf	Atlas (COVALUM)	APF206035	51,5	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Atlas_AFF205527.pdf	Atlas (COVALUM)	APF205527	51,5	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Separatore a Vortice HIROSS Denuncia smarrimento.pdf	Parker Hiross	2951640001	52	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Atlas_AFF206036.pdf	Atlas (COVALUM)	APF206036	51,5	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Atlas_AFF205528.pdf	Atlas (COVALUM)	APF205528	51,5	16	II	2	A = 3 – B = 10 anni	
Separatore Comprensore 1	PROFERRO N.V.	203749	62	15	2	2	A = 3 – B = 10 anni	
Separatore Comprensore 2	PROFERRO N.V.	204331	62	15	2	2	A = 3 – B = 10 anni	
Separatore compressore cantiere	AR COM	51091-16	175	18	2	2	A = 3 – B = 10 anni	
Serbatoio aria cantiere	SICC	110.534.900.1	1000	11,5	IV	2	A = 3 – B = 10 anni	
	BWB	100169	84	16	III	2	A = 3 – B = 10 anni	
	BWB	100173	84	16	III	2	A = 3 – B = 10 anni	
Colonna CF DONALDSON.pdf	BWB	100175	84	16	III	2	A = 3 – B = 10 anni	

Sono subito emerse le criticità che un tale sistema di scavo avrebbe innescato durante le varie fasi lavorative.

La pressurizzazione delle attrezzature a pressione dell'installazione (attrezzature descritte nella tabella sopra indicata) avviene attraverso due linee di pressurizzazione indicate con Linea 1 e Linea 2 nello schema di installazione allegato.

Linea 1:

La produzione aria si trova in area cantiere (fuori dalla TBM) ed è costituita da:

- Un elettrocompressore con portata di 20 m³/min e pressione max di 10 bar. All'interno del compressore è posto il separatore aria olio avente una pressione massima ammissibile di 16 bar. In uscita dal compressore la pressione di rete è regolata a 7,5 bar.

Lo stoccaggio di cantiere è costituito da:

- Un serbatoio aria da 1000 lt con pressione massima ammissibile di 11,5 bar. L'aria viene però stoccata alla pressione di rete di 7,5 bar. È protetto dalla sovrappressione da una valvola di sicurezza tarata a 11,5 bar, e con una portata max di scarico di 39,5 m³/min.

L'aria nella centrale viene deumidificata attraverso un dry-life esterno e viene trattata con un sistema di filtrazione in grado di assicurare un livello di filtrazione almeno di **Grado 2 in conformità della ISO 8573-1**.

Linea 2:

La produzione aria si trova all'interno della TBM ed è costituita da:

- Due elettrocompressori con portata totale di 18,5 m³/min ad una pressione max di 7,5 bar (valore massimo di pressione di rete). All'interno di ciascun compressore è posto un separatore aria/olio di 62 lt ad una pressione di 15 bar.

Lo stoccaggio in macchina (TBM) è costituito da:

- Un serbatoio aria da 1000 lt con pressione max di 11 bar. L'aria viene però stoccata alla max pressione dei gruppi pompanti (che è poi la pressione di rete) di 7,5 bar. È protetto dalla sovrappressione da una valvola di sicurezza tarata a 10 bar, e con una portata max di scarico di 39,2 m³/min.

L'aria nella centrale macchina viene deumidificata attraverso un dry-life esterno e viene trattata con un sistema di filtrazione in grado di assicurare un livello di filtrazione almeno di **Grado 2 in conformità della ISO 8573-1**.

Prima che l'aria venga distribuita alle diverse utenze (di vario utilizzo) l'aria viene ulteriormente trattata con dei filtri di linea costituiti da una sistema di linea della ATLAS COPCO costituito da un separatore a vortice e due filtri aventi, ciascuno, una pressione massima ammissibile di 16 bar e capacità di circa 52 litri.

Un sistema di filtrazione di questo tipo assicura il soddisfacimento dei requisiti della classe di purezza di **Grado 1 in conformità della ISO 8573-1**.

Questo sistema di produzione e trattamento dell'aria, è stato realizzato per i grandi volumi di aria richiesti dalla relazione di calcolo "*Studio delle perdite di aria del sistema ad aria compressa per interventi di manutenzione della testa fresante in modalità iperbarica*" realizzata dalla Tunnel Consult per la definizione delle portate necessarie alla pressurizzazione del fronte di scavo.

L'aria prodotta, stoccata e filtrata ha lo scopo primario di:

- Pressurizzare il fronte di scavo, denominato camera di lavoro (WC);
- Pressurizzare la camera iperbarica.

Ma occorre tenere presente che le grandi portate in gioco sono necessarie in quanto oltre a pressurizzare i volumi di scavo e la camera iperbarica, una parte dell'aria prodotta andrà persa in quanto il terreno non è perfettamente stagno e pertanto è stato necessario valutare queste portate:

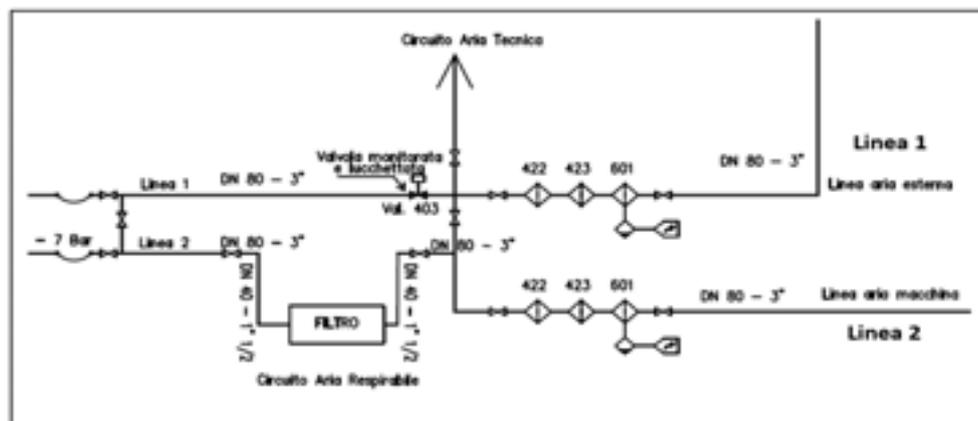
Perdite aria TBM (da relazione) - valori determinati alla massima pressione del fronte di scavo di 2 bar		
Design Approach 1 (DA1) =	2,1 m ³ /min	pressurizzazione della camera di lavoro con buona riuscita dell'iniezione di coda
Design Approach 2 (DA2) =	4,3 m ³ /min	pressurizzazione della camera di lavoro con scarsa riuscita dell'iniezione di coda
Consumo aria per persona =	50 lt/min x p	Previsto dalla UNI EN 12110
Consumo aria per 3 persone a 2 bar =	450 lt/min	= 0,45 m ³ /min
Pressurizzazione camera iperbarica =	3450 lt/min	= 3,45 m ³ /min
(si considera una velocità di immersione di massimo 5 m/min)		

I due diversi approcci, per la determinazione delle portate di perdita aria, rappresentano le condizioni limiti per l'intervento dell'uomo al fronte di scavo, di è scelto di operare in massima condizione di sicurezza, e quindi con una buona riuscita dell'iniezione di coda (modeste perdite di aria), e pertanto si è valutata la portata necessaria per gli utilizzi iperbarici nelle due condizioni operative:

- in fase di pressurizzazione;
- in fase di mantenimento;

Validazione portate :			
In fase di pressurizzazione della camera iperbarica:			
$Q_{T,sp,sc} =$	2,1 m ³ /min	Portata aria necessaria per gli usi iperbarici	= 6,0 m ³ /min
$Q_{L,sp,sc} =$	3,9 m ³ /min		
In fase di mantenimento della camera iperbarica:			
$Q_{T,sp,sc} =$	2,1 m ³ /min	Portata aria necessaria per gli usi iperbarici	= 2,6 m ³ /min
$Q_{L,sp,sc} =$	0,45 m ³ /min		
			Portata richiesta al sistema nelle condizioni ordinarie (sempre approccio DA1)

Ovviamente quando è necessaria la presenza dell'uomo nella zona in pressione non si è potuto prescindere dai requisiti imposti dalla **UNI EN 12021 "aria respirabile"**, e pertanto si è provveduto ad aumentare i livelli qualitativi dell'aria inserendo un ulteriore sistema di filtraggio. Pertanto è stato realizzato un impianto come quello descritto nel seguito:



Come si può vedere sulla Linea 2 (in by-pass) è stato inserito il "Filtro aria respirabile" che assicura la filtrazione dell'aria ai requisiti della UNI EN 12021 (aria respirabile).

Procedura operativa

Poiché la Camera di Lavoro e la Camera Iperbarica nelle fasi di ispezione al fronte contengono persone, si deve assicurare che l'aria che li pressurizzi sia filtrata per usi respirabili. Poiché il filtro è stato inserito solo sulla linea 2, si è assicurato che l'aria non filtrata fosse bloccata a mezzo di una valvola (indicata nello schema con 403) lucchettabile in modo da metterla in chiusura qualora sia necessario l'intervento sul fronte, inoltre la sua

posizione è stata remotata al quadro di controllo della camera iperbarica in modo da dare riscontro all'operatore dell'avvenuta chiusura.



Per migliorare il livello di sicurezza dei dispositivi di controllo è stata predisposta un'apposita procedura per la gestione della valvola in fase di pressurizzazione del sistema fronte in caso di presenza interna di personale. Questa procedura (procedimento per l'intervento iperbarico) vede coinvolti sia il personale della galleria che il personale abilitato alla condotta della Camera Iperbarica

Dei due ambienti pressurizzati, sin qui descritti, solo la Camera Iperbarica è configurabile come un apparecchio a pressione, di costruzione Herrenknecht AG, volume 6900 lt (a due ambienti) pressione max di 4,4 bar. La camera iperbarica è protetta dal rischio sovrappressione dalle VDS della Honeywell GmbH installate, rispettivamente, in camera principale e in camera di equilibrio, con pressione di taratura di 4,4 bar con una portata max di scarico (desumibile dal calcolo condotto rilevando i dati della valvola dalla scheda tecnica) di 44,14 m³/min.

Le verifiche condotte sulla camera iperbarica hanno potuto constatare che la stessa è stata dotata di tutti i dispositivi di regolazione e controllo necessari allo specifico funzionamento i cui dettagli sono stati elencati nella check list di verifica, redatta in accordo alla **UNI EN 12110**; questo grande lavoro ha consentito alla squadra dei tecnici di cantiere, tecnici iperbarici e progettisti di definire delle proprie check list in modo da garantire la piena funzionalità ed efficienza delle installazioni di cantiere e la disponibilità dei presidi di sicurezza ed emergenza collettivi. Le verifiche vengono ripetute a titolo cautelativo all'inizio di ogni giornata di attività iperbarica, anche qualora venisse svolto un intervento della durata di più giorni senza la ripresa delle attività di scavo.

La check list e le procedure operative ad essa riferite sono documenti che hanno una applicabilità riferita esclusivamente allo specifico cantiere per cui vengono redatte essendo strettamente correlate alla installazione a bordo TBM ed in esterno. Vengono elaborate in fase preventiva rispetto ai lavori con la partecipazione ed il contributo di tutti i soggetti interessati (*progettisti, tecnici specializzati di cantiere, tecnici iperbarici, medici iperbarici, enti di controllo*) ed hanno come scopo principale la verifica puntuale e ripetuta della sussistenza delle massime condizioni di sicurezza assunte a base dell'intervento iperbarico nonché la presa in carico delle relative responsabilità di verifica da parte dei soggetti coinvolti.

Il coordinatore di cantiere, considerate le condizioni generali di esecuzione delle attività (posizione macchina, situazione geologica, efficacia del trattamento impermeabilizzante, eventuali criticità, finalità dell'intervento, etc.) ed avuta cognizione dell'esito delle verifiche condotte tramite check list dai responsabili di settore, autorizza o meno l'avvio delle attività e l'accesso del personale al fronte di scavo.

Una volta autorizzato l'accesso del personale alla camera di scavo, il responsabile operativo provvede all'organizzazione dello stesso in squadre di lavoro ed alla programmazione della turnazione delle squadre, impartendo al contempo le direttive operative per l'esecuzione delle attività.

Le squadre così designate sono sempre composte da un numero di operatori non inferiore a 3. In ogni squadra è sempre presente un capo squadra in grado di organizzare lo

svolgimento del lavoro in camera di scavo, di mantenere le comunicazioni con l'esterno e di coordinare eventuali interventi in condizioni di emergenza.

All'atto dell'accesso in camera iperbarica e prima della pressurizzazione, tutto il personale viene visionato al fine di verificare la completezza dei DPI in dotazione ed intervistato al fine di raccogliere informazioni sulle condizioni generali di salute e lucidità.

Qualora sussistano dubbi circa le ottimali condizioni del lavoratore, l'accesso del singolo viene interdetto.

Mentre una squadra è al lavoro in camera di scavo, almeno un'altra squadra completa e pronta a operare staziona nei pressi dell'accesso alla camera iperbarica, con il duplice fine di raccogliere informazioni sull'evoluzione delle operazioni e condizioni nell'ambiente di lavoro e di *prestare pronto supporto qualora si presentassero situazioni di emergenza*.

Durante lo svolgimento delle attività viene costantemente mantenuto il presidio da parte dei responsabili operativi e iperbarici delle aree ubicate nell'immediatezza dell'accesso alla camera iperbarica e delle installazioni di cantiere, vengono monitorati e registrati i parametri macchina e intervento mediante apposita *working station* e viene inoltre mantenuto il contatto visivo e radio con il personale al lavoro per tramite di appositi impianti AV (*telecamere fisse e mobili, ricetrasmittenti, interfono, telefoni interni*).



Figura 7. Stazione di controllo in prossimità della camera iperbarica

I parametri salienti, le tempistiche di discesa, permanenza e risalita vengono registrati per ogni immersione dal responsabile iperbarico su apposita modulistica.

Tutta la documentazione (check list, interviste al personale, rapportini di immersione, parametri di intervento e parametri macchina, registrazioni video, ecc.) viene raccolta su supporto digitale e archiviata nei server di cantiere per la successiva back analysis.

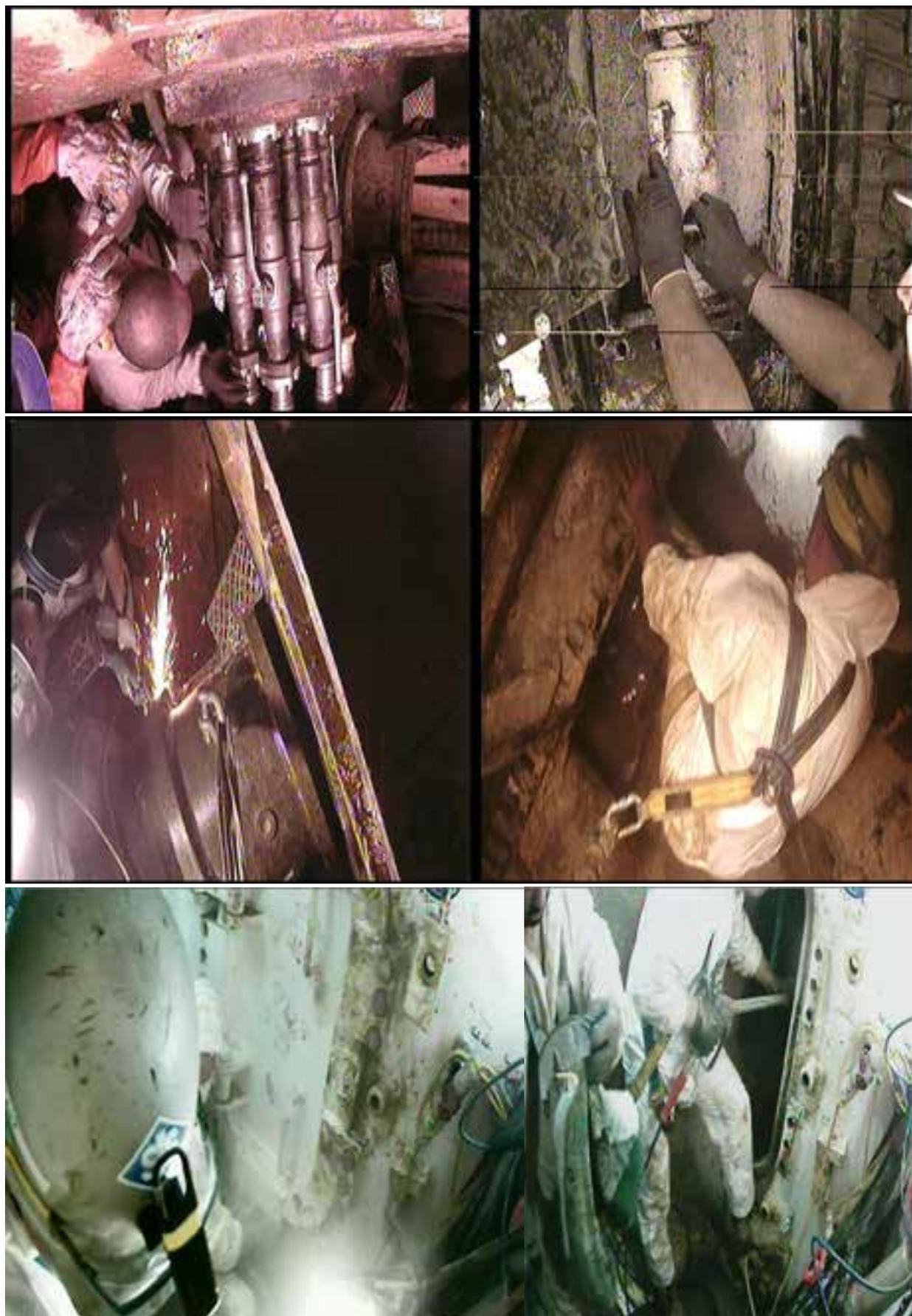


Figura 8. Alcuni scatti delle fasi operative

Conclusioni

Una delle principali cause di insuccesso per le Aziende di Servizi dipende dalla inefficacia delle attività progettuali e gestionali collegata alla complessa gestione diretta di tutte le attività da parte delle stesse aziende con la conseguenza di determinare una ridotta ottimizzazione degli investimenti.

L'efficacia e l'efficienza dei risultati che possono realizzarli dipendono, anche, dalla azione combinata e contemporanea tra attività di esame e di indirizzo effettuata dall'Ente di Controllo con le attività di gestione condotta dalla Società.

Il sistema di controllo deve risultare organico e strutturato ovvero deve operare in fasi temporali differenti sia nella fase di installazione e sia nella successiva fase di intervento operativo, anche attraverso la stesura e l'utilizzo di adeguate procedure utili per la gestione delle attività critiche per la sicurezza.

Conduzione dei generatori di vapore

A. Bizioli¹, M. Musesti¹

¹ Gavardo Caldaie

1. Introduzione

L'obiettivo di questa trattazione è quello di individuare delle procedure per esercire e condurre in sicurezza i generatori di vapore e di acqua surriscaldata di limitata potenzialità rientranti nelle seguenti famiglie:

- a) generatori ad attraversamento meccanico di limitata potenzialità aventi $PS \times V \leq 3000$ bar x litri e $PS \leq 12$ bar;
- b) generatori di vapore a bassa pressione aventi $PS \leq 1$ bar, Superficie di riscaldamento ≤ 100 m² e Potenzialità ≤ 2 t/h;
- c) generatori di acqua surriscaldata a bassa pressione aventi $PS \leq 5$ bar, Temperatura massima dell'acqua $\leq 120^\circ\text{C}$, Superficie di riscaldamento ≤ 100 m² e Potenzialità ≤ 2 t/h, considerando convenzionalmente la potenza di 0,69 kW (600 kCal/h) di acqua surriscaldata equivalente alla producibilità di 1 kg/h di vapore d'acqua;
- d) generatori a sorgente termica diversa dal fuoco le cui membrane soggette a pressione, a contatto con il fluido riscaldante, sono progettate per una temperatura uguale o maggiore di quella del fluido di riscaldamento;
- e) generatori di piccola potenzialità aventi $PS \cdot V \leq 300$ bar·L e $PS \leq 10$ bar.

2. Caratteristiche generali

I sopracitati generatori sono attualmente conformi alle disposizioni della Direttiva PED e vengono marcati CE come insieme o come facenti parte di insieme e i principali motivi per cui presentano un basso rischio per la sicurezza degli operatori sono:

- a) la limitata pressione di progetto che è di massimo 12 bar;
- b) i volumi di acqua contenuti sono limitati (in alcuni casi anche inferiori ai 25 litri) e in caso di assenza di acqua vi è solo un remoto rischio di surriscaldamento della camera di combustione che peraltro non comporta rischi di scoppio ma se mai di "cottura" del serpentino o del fascio tubiero.

Si tratta in pratica di una tipologia di generatori di limitate dimensioni e potenze che trova il suo principale impiego presso aziende artigianali o piccole e medie imprese attive in vari settori: lavanderie e stirerie artigianali o industriali, industrie della lavorazione dei prodotti agricoli (industria conserviera ed affini), caseifici ed altre industrie del settore lattiero caseario, industria alimentare quali pastifici ed altri prodotti per l'alimentazione umana od animale, processi di lavorazione del settore edile, del settore della gomma e della plastica, industrie farmaceutiche e, ultimo ma non meno importante, tutte le applicazioni relative all'utilizzo del settore per esigenze di pulizia ed igienico-sanitarie (ad esempio impianti di lavaggio di cisterne e carrelli ferroviari).

Si tratta in tutti i casi di produzione di vapore necessario ai fini delle lavorazioni ed in alcuni casi indispensabili per il normale svolgimento dell'attività aziendale.

Il limitato consumo di vapore e le dimensioni aziendali giustificano, sotto l'aspetto operativo, la necessità di individuare delle procedure di conduzione efficaci ma semplici che, alla luce della semplicità di utilizzo e della bassa pericolosità di questi generatori, siano economicamente sostenibili.

Lo sviluppo dal dopoguerra ad oggi di questo tipo di generatori di vapore e/o acqua surriscaldata si è appunto basato sulla semplicità e rapidità di utilizzo che li hanno resi essenziali ed insostituibili per la maggior parte dei loro utilizzatori.

Ovviamente da allora ad oggi il modo di costruire e di accessoriare i generatori di vapore e/o acqua surriscaldata è cambiato, subendo una naturale evoluzione tecnologica a favore della sicurezza e dell'affidabilità.

Cosa ancora più importante, sono cambiate le modalità di funzionamento del generatore che oggi sono costruiti ed accessoriati con il preciso scopo di poter funzionare in maniera totalmente autonoma ed automatica. L'utilizzatore deve solamente limitarsi ad avviare o fermare la macchina agendo nella stragrande maggioranza dei casi su un solo selettore. In passato invece le automazioni erano molto limitate ed il conduttore aveva la necessità di agire manualmente sull'alimentazione dell'acqua, sul bruciatore, sugli spurghi, ecc.

Sostanzialmente possiamo affermare, senza tema di smentita, che questi generatori di vapore e/o acqua surriscaldata, che già in origine rispondevano a criteri di sicurezza ottimali, hanno ulteriormente incrementato i livelli di sicurezza.

Oltretutto il concetto di "insieme" introdotto dalla PED ha spinto i fabbricanti a realizzare generatori di vapore e/o acqua surriscaldata che siano in grado di funzionare in autonomia senza eseguire particolari o difficili manovre da parte dell'utente; questo limita di fatto il rischio che un'errata conduzione possa creare condizioni di pericolo.

Infine, lo standard oggi raggiunto dai fabbricanti di bruciatori denota anch'esso un'importante evoluzione tecnologica. Nella pratica, non esistono più bruciatori con accensione manuale; ad oggi i moderni bruciatori prevedono un'accensione automatizzata. Il programmatore di fiamma è in grado, una volta ricevuto lo start all'avviamento, di realizzare il controllo di tutti i componenti principali del bruciatore (ventilatore, combustibile, fiamma) ed avviare in maniera totalmente autonoma il bruciatore stesso. In caso rilevi una qualche tipologia di anomalia, l'apporto termico viene subito interrotto a favore della sicurezza.

Perciò, ad oggi, grazie al grado di automazione raggiunto, i generatori di vapore e/o acqua surriscaldata in questione, sono esercibili in maniera automatica senza l'intervento dell'operatore, se non nelle limitate e semplici operazioni di avviamento/fermata, e verifiche dei sistemi di sicurezza.

3. Inquadramento normativo

I generatori descritti sono normati per quanto riguarda la progettazione dalla Direttiva PED 2014/68/UE. In fase di messa in servizio si fa riferimento al Decreto Ministeriale n. 329 del 01/12/2004. Per quanto riguarda la conduzione è in fase di inchiesta pubblica finale il progetto di norma UNI/TS 11325-10 che una volta approvata definirà le modalità di sorveglianza delle attrezzature a pressione rientranti nel campo di applicazione del DM 329/2004 ed esclusi dalla esistente UNI/TS 11325-3. In sostanza saranno interessati proprio i generatori oggetto della presente trattazione.

Per quanto riguarda la persona addetta alla conduzione/sorveglianza del generatore è attualmente in fase di preparazione una nuova normativa che disciplinerà i gradi dei certificati di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore, i requisiti per l'ammissione agli esami, le modalità di svolgimento delle prove e di rilascio e rinnovo dei certificati nonché l'equipollenza dei certificati e dei titoli rilasciati in base alla normativa vigente. All'interno dello stesso saranno anche individuati i generatori per cui sarà possibile applicare l'esonero dalla conduzione abilitata e che dovrebbero proprio coincidere con le tipologie che stiamo trattando.

4. Sorveglianza e manutenzione dei generatori

Il progetto di norma UNI/TS 11325-10 riprende i dettami delle norme europee riguardanti i generatori di vapore a tubi d'acqua e a tubi di fumo semplificando l'applicazione degli stessi ai generatori di limitata potenziale. Questo risulta pienamente in linea con quanto descritto nel capitolo 1 relativamente alla bassa pericolosità e al livello di sicurezza raggiunto da questi generatori.

All'interno della norma sono presenti i controlli da eseguire per verificare la permanenza delle condizioni di idoneità al funzionamento dell'impianto del generatore e in particolare in Appendice A delle tabelle che descrivono i controlli e prove da eseguire periodicamente per la verifica del funzionamento dei dispositivi di controllo, regolazione e sicurezza dei generatori a sorveglianza senza assistenza continua fino alle 24 e fino alle 72 ore.

Le tabelle prendono in considerazione i dispositivi previsti dalle norme armonizzate (UNI EN 12952 e UNI EN 12953).

Le riportiamo di seguito per completezza di trattazione.

Prospetto A.1 Generatori a sorgente termica diversa dal fuoco a tubi d'acqua

Controlli e prove	24 ore*	72 ore**	1 mese	3 mesi	6 mesi	12 mesi	Note
Valvole di sicurezza	O	O			T		Vedere NOTA 1 e NOTA 2
Indicatori di livello	C	C					
Dispositivi di scarico e spurgo	C	C					
Valvolame	O	O			C		Come da manuale di istruzioni del fabbricante
Sistema di regolazione del livello	O	O			T		
Livellostato di blocco (minimo livello)	O	O	C		T		Controllo funzionale con abbassamento del livello dell'acqua al punto di intervento
Manometri e termometri	O	O			T ⁽¹⁾		⁽¹⁾ Se inclusi nei dispositivi di protezione
Pressostato di blocco	O	O	C		T		Controllo funzionale con incremento della pressione al punto di intervento
Termostato di blocco	O	O	C		T		Può essere eseguito per simulazione
Dispositivi per la protezione della qualità dell'acqua	O	O	C ⁽²⁾		T		⁽²⁾ Comparazione dei valori riscontrati con campioni di acqua affidabili
Sistemi di protezione	O	O	C		T		
Parti in pressione (tubi, aperture di ispezione, giunti, ecc...)			O				
Sistemi di regolazione della pressione e della temperatura	O	O			T		
Erogazione dell'acqua di alimento	O	O		C			
Qualità dell'acqua	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾				⁽³⁾ Per i parametri da controllare alle diverse frequenze vedere punto 6.2.2
Produzione di calore	O	O				T ⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ Controllo effettuato come da istruzioni del fabbricante ma non meno di una volta l'anno
Flussostato di blocco	O	O	C		T		

* Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 24 ore
 ** Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 72 ore
 Legenda
 (O) Osservazione di rumori o odori anomali o altri fattori degni di nota
 (C) Controlli e/o prove del corretto funzionamento, compresa l'osservazione
 (T) Controlli e/o prove del corretto funzionamento mediante la comparazione dei valori misurati con campioni di misura riferibili. Questi controlli devono essere effettuati da persona qualificata e competente

Prospetto A.2 Generatori a sorgente termica diversa dal fuoco (inclusi i generatori a riscaldamento elettrico) a tubi da fumo (inclusi gli scambiatori con fluido scaldante all'interno dei tubi) e generatori di vapore a bassa pressione

Controlli e prove	24 ore*	72 ore**	1 mese	3 mesi	6 mesi	12 mesi	Note
Valvole di sicurezza	O	O			T		Vedere NOTA 1 e NOTA 2
Indicatori di livello	C	C					
Dispositivi di scarico e spurgo	C	C					
Valvolame	O	O			C		Come da manuale di istruzioni del fabbricante
Sistema di regolazione dei livello	O	O			T		
Livellostato di blocco (minimo livello)	O	O	C		T		Controllo funzionale con abbassamento del livello dell'acqua al punto di intervento
Manometri e termometri	O	O			T ⁽¹⁾		⁽¹⁾ Se inclusi nei dispositivi di protezione
Pressostato di blocco	O	O	C		T		Controllo funzionale con incremento della pressione al punto di intervento
Termostato di blocco	O	O	C		T		Può essere eseguito per simulazione
Dispositivi per la protezione della qualità dell'acqua	O	O	C ⁽²⁾		T		⁽²⁾ Comparazione dei valori riscontrati con campioni di acqua affidabili
Sistemi di protezione	O	O	C		T		
Parti in pressione (tubi, aperture di ispezione, giunti, ecc...)			O				
Sistemi di regolazione della pressione e della temperatura	O	O			T		
Erogazione dell'acqua di alimento	O	O		C			
Qualità dell'acqua	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾				⁽³⁾ Per i parametri da controllare alle diverse frequenze vedere punto 6.2.2
Produzione di calore	O	O				T ⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ Controllo effettuato come da istruzioni del fabbricante ma non meno di una volta l'anno
Flussostato di blocco	O	O	C		T		

* Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 24 ore
 ** Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 72 ore
 Legenda
 (O) Osservazione di rumori o odori anomali o altri fattori degni di nota
 (C) Controlli e/o prove del corretto funzionamento, compresa l'osservazione
 (T) Controlli e/o prove del corretto funzionamento mediante la comparazione dei valori misurati con campioni di misura riferibili. Questi controlli devono essere effettuati da persona qualificata e competente

Prospetto A.3 Generatori ad attraversamento meccanico

Controlli e prove	24 ore*	72 ore**	1 mese	3 mesi	6 mesi	12 mesi	Note
Valvole di sicurezza	O	O			T		Vedere NOTA 1 e NOTA 2
Dispositivi di scarico e spurgo	C	C					
Valvolame	O	O			C		Come da manuale di istruzioni del fabbricante
Manometri e termometri	O	O			T ⁽¹⁾		⁽¹⁾ Se inclusi nei dispositivi di protezione
Pressostato di blocco	O	O	C		T		Controllo funzionale con incremento della pressione al punto di intervento
Termostato di blocco	O	O	C		T		Può essere eseguito per simulazione
Dispositivi per la protezione della qualità dell'acqua	O	O	C ⁽²⁾		T		⁽²⁾ Comparazione dei valori riscontrati con campioni di acqua affidabili
Sistemi di protezione	O	O	C		T		
Parti in pressione (tubi, aperture di ispezione, giunti, ecc.)			O				
Sistemi di regolazione della pressione e della temperatura	O	O			T		
Pressostato di minima	C	C			T		
Qualità dell'acqua	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾	C ⁽³⁾				⁽³⁾ Per i parametri da controllare alle diverse frequenze vedere punto 6.2.2
Produzione di calore	O	O				T ⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ Controllo effettuato come da istruzioni del fabbricante ma non meno di una volta l'anno
Flussostato di blocco	C	C			T		

* Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 24 ore
** Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 72 ore
Legenda
(O) Osservazione di rumori o odori anomali o altri fattori degni di nota
(C) Controlli e/o prove del corretto funzionamento, compresa l'osservazione
(T) Controlli e/o prove del corretto funzionamento mediante la comparazione dei valori misurati con campioni di misura riferibili. Questi controlli devono essere effettuati da persona qualificata e competente

Prospetto A.4 Generatori di acqua surriscaldata a bassa pressione

Controlli e prove	24 ore*	72 ore**	1 mese	3 mesi	6 mesi	12 mesi	Note
Valvole di sicurezza	O	O			T		Vedere NOTA 1 e NOTA 2
Indicatori di livello	O	O	C				
Dispositivi di scarico e spurgo	O	O					
Valvole di sfiato	O	O			C		Come da manuale di istruzioni del fabbricante
Flussostato di blocco	O	O	C		T		
Livellostato di blocco (minimo livello)	O	O		C	T		Può essere eseguito per simulazione
Manometri e termometri	O	O			T ⁽¹⁾		⁽¹⁾ Se inclusi nei dispositivi di protezione
Pressostato di blocco	O	O		C	T		Può essere eseguito per simulazione
Termostato di blocco	O	O		C	T		Può essere eseguito per simulazione
Dispositivi per la protezione della qualità dell'acqua	O	O	C ⁽²⁾		T		⁽²⁾ Comparazione dei valori riscontrati con campioni di acqua affidabili
Sistemi di protezione	O	O		C	T		
Parti in pressione (tubi, aperture di ispezione, giunti, ecc...)			O				
Sistemi di regolazione della pressione e della temperatura	O	O			T		
Erogazione dell'acqua di alimento	O	O		C			
Qualità dell'acqua			C ⁽³⁾				⁽³⁾ Vedere UNI EN 12953-10
Produzione di calore	O	O				T ⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ Controllo effettuato come da istruzioni del fabbricante ma non meno di una volta l'anno

* Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 24 ore
** Controlli da effettuare sui soli generatori senza assistenza continua fino alle 72 ore
Legenda
(O) Osservazione di rumori o odori anomali o altri fattori degni di nota
(C) Controlli e/o prove del corretto funzionamento, compresa l'osservazione
(T) Controlli e/o prove del corretto funzionamento mediante la comparazione dei valori misurati con campioni di misura riferibili. Questi controlli devono essere effettuati da persona qualificata e competente

Prendendo spunto da queste tabelle si nota che il legislatore indica che con una periodicità semestrale i controlli siano effettuati da persona qualificata e competente, ciò implica che i controlli debbano essere eseguiti da personale del fabbricante o da lui incaricato.

Ad oggi invece rileviamo spesso che la manutenzione periodica dei generatori viene affidata a "tecnici" che non hanno conoscenze sufficienti per poterla eseguire non garantendo pertanto un adeguato livello di conoscenza delle caratteristiche della macchina e dei relativi sistemi di sicurezza.

Talvolta non viene preso in considerazione nemmeno quanto indicato sul manuale uso e manutenzione che riporta tutte le operazioni per un corretto esercizio e controllo periodico del generatore.

Stesso discorso vale per la ricambistica; capita spesso che i componenti del generatore vengano sostituiti con parti non originali che alterano il "sistema" originario e non garantiscono un uguale livello di sicurezza della macchina mettendo pertanto a rischio l'utilizzatore finale.

5. Proposte

Il fenomeno appena descritto pone sulla bilancia il tema del mantenimento di un adeguato livello di sicurezza dei generatori che, pur avendo sistemi di controllo ridondanti, lo subiscono talvolta senza la piena consapevolezza da parte degli utilizzatori finali.

Pertanto riteniamo sia opportuno prevedere un forte coinvolgimento nella gestione post-vendita del generatore del fabbricante stesso, o di soggetto abilitato certificato dallo stesso, che risulta essere l'unico in grado di poter indicare univocamente le procedure corrette per mantenere un adeguato livello di sicurezza della macchina.

Ovviamente il manuale uso e manutenzione deve riportare tutte le indicazioni del caso ma servirebbe uno strumento che permetta di tenere maggiormente sotto controllo lo stato manutentivo dei generatori. Opportuno quindi individuare, oltre al manuale, un "libretto di gestione" del macchinario (come per le normali caldaie ad uso domestico) che riporti i dati di ogni singolo intervento manutentivo/sostitutivo.

Il DM 329/2004 impone le verifiche periodiche biennali che devono essere eseguite da INAIL e ASL di competenza ma riteniamo che semestralmente (come indicato dalle tabelle della UNI/TS 11325-10) o altrimenti annualmente, sia necessario che il controllo manutentivo venga eseguito da personale certificato. Si pensa quindi a personale formato e addestrato in accordo con il produttore della macchina; personale in grado di rilasciare una certificazione di corretta esecuzione e conformità del controllo manutentivo volto alla verifica della permanenza dei requisiti di sicurezza della macchina e che quindi certifichi la corrispondenza dei controlli con le indicazioni del fabbricante.

Va da sé che sarebbero pertanto utilizzati eventuali ricambi originali che garantirebbero il mantenimento dello stesso livello di sicurezza evitando così incompatibilità tra strumentazione di bordo non originale e il livello minimo di sicurezza da mantenere. Troppo spesso l'insieme "generatore di vapore" subisce degli anni una serie di interventi manutentivi/sostitutivi che stravolgono di fatto l'insieme stesso.

Va da sé che questi interventi di manutenzione dovrebbero integrare, proprio perché certificati dal produttore, dei corsi di formazione sulla sicurezza sul lavoro rivolti non solo ai responsabili della gestione del generatore ma anche a tutti gli operatori, presenti sul luogo di lavoro, che devono avere una conoscenza base delle eventuali azioni da effettuare in caso di criticità gestionali.

6. Conclusioni

Alla luce di tutte queste considerazioni proponiamo l'apertura di un dibattito tra le parti interessate (Inail, Ministero del Lavoro, Anima – Ucc) che affronti queste tematiche con lo scopo di ridurre al minimo il rischio derivante dall'utilizzo dei generatori oggetto della presente.

7. Bibliografia

[1] progetto di norma UNI/TS 11325-10

Ottimizzazione delle strategie manutentive delle apparecchiature datate mediante l'applicazione dell'analisi decisionale dinamica integrata

M. Demichela¹, G. Baldissoni¹, C. Leva², P. Agnello³

¹ Politecnico di Torino

² Dublin Institute of Technology

³ Inail - Dit

Sommario

Oggigiorno nel panorama industriale si possono rintracciare sia realtà produttive con impianti all'avanguardia che realtà con impianti la cui età ha già sorpassato la vita utile ipotizzata in fase di progetto, ma per diversi motivi (es. economici, burocratici,...) non sono stati sostituiti con alternative più moderne. In questi ultimi casi gli impianti iniziano a manifestare gli effetti dell'usura. Questi impianti risultano avere problemi di produttività e di sicurezza. Una delle vie per gestire gli impianti che stanno invecchiando è un'oculata manutenzione.

In questo intervento, nell'ambito del progetto Safera PROAGE, finanziato da Inail, si propone una metodologia per la pianificazione della manutenzione di tipo proattivo e basato sulla stima dei valori di rischio. Questa metodologia è basata sulla tecnica IDDA (Integrated Dynamic Decision Analysis) che attraverso la combinazione di un'analisi logico – probabilistica e di una modellazione fenomenologica, permette di avere l'intero spettro di possibili condizioni che si possono riscontrare a valle della manutenzione, corredate con la loro probabilità e le relative conseguenze, sia in termini infortunistici sia di costo.

Questa metodologia è stata testata per confrontare diverse strategie per la manutenzione di una turbina in un impianto turbogas, tenendo conto dei fenomeni legati all'invecchiamento.

1. Introduzione

Oggigiorno diversi impianti industriali hanno superato la durata prevista durante la fase di progettazione. Ciò si verifica perché vi sono diverse difficoltà nel rinnovo degli impianti, tra cui vincoli economici, normativi e ambientali.

L'invecchiamento degli impianti, se gestito in modo non corretto, può causare gravi incidenti. Tra il 1980 e il 2006, l'Health and Safety Executive (UK) ha identificato nella banca dati MARS 96 incidenti legati all'invecchiamento d'impianti e attrezzature, corrispondenti al 23% dei principali incidenti verificatisi nello stesso periodo [1]. Questi incidenti hanno comportato costi elevati sia in termini economici (oltre 170.000.000 €) che in termini di vittime (11 morti, 183 feriti) e di impatti ambientali.

L'utilizzo di attrezzature oltre il loro periodo di vita utile riduce la competitività dell'azienda, poiché di solito queste richiedono più energia, più manutenzione e materie prime, spesso, costose. Invece l'adozione di impianti moderni, sviluppati con nuove filosofie, come la Process Intensification [2] [3], e con una maggiore attenzione alla sostenibilità, possono utilizzare meno energia, e possono aumentare la flessibilità dell'impianto sia per quanto riguarda i volumi prodotti che per la tipologia di prodotti ottenuti [4]. Un forte impatto è stato anche rilevato per quanto concerne la sicurezza sia di processo che degli operatori, infatti, il guasto di un'attrezzatura o impianto può essere un precursore o una causa diretta di infortuni, incidenti e impatti ambientali [5].

Ma l'adozione delle nuove tecnologie e il rinnovo degli impianti richiedono elevati costi di investimento, il che porta insieme ad altri vincoli, ad utilizzare gli impianti oltre la loro vita utile nonostante le potenziali criticità.

Per minimizzare le criticità sopra citate è gestire l'invecchiamento degli impianti e attrezzature anche attraverso la manutenzione.

Solitamente la strategia di manutenzione è scelta tra la manutenzione reattiva e la manutenzione preventiva, mentre, lo sviluppo tecnologico consente ora di sviluppare strategie manutentive basate sulle reali condizioni delle apparecchiature, con un approccio proattivo.

Nella manutenzione reattiva l'attrezzatura è utilizzata fino al suo guasto. Le fermate dell'impianto non programmate per consentire la riparazione delle apparecchiature guaste, però, possono portare a costi elevati (ad es. per lunghe perdite di produzione, riduzione della reputazione, etc.) [6]. Per ridurre al minimo i costi elencati in precedenza, l'azienda necessita di un ampio magazzino di pezzi di ricambio.

Nella manutenzione preventiva l'attività di manutenzione è effettuata con una periodicità programmata al fine di evitare il guasto delle apparecchiature [7]. Questo tipo di manutenzione riduce le fermate indesiderate dell'impianto e le conseguenze del guasto sulle altre apparecchiature. Ma la manutenzione è eseguita su apparecchiature non ancora guaste e non è quindi sfruttata l'intera vita utile dell'attrezzatura.

Diversi studi hanno mostrato il beneficio della manutenzione preventiva, come ad esempio espresso da Lee [8].

Sia la pianificazione degli intervalli di manutenzione, che la tipologia di interventi, può essere basata su: le indicazioni del produttore, l'analisi delle condizioni di funzionamento delle apparecchiature al fine di valutare il loro reale degrado o i dati storici dell'azienda.

In questo scritto è proposto e discusso un approccio basato su dati di rischio al fine di operare una scelta tra diverse strategie manutentive concorrenti per l'ottimizzazione della produttività, e in futuri sviluppi, della sicurezza. La metodologia discussa analizza il rischio associato alle diverse strategie manutentive in base alle possibili condizioni dell'apparecchiatura al momento di inizio delle attività di manutenzione.

La valutazione del rischio è effettuata tramite l'Integrated Dynamic Decision Analysis (IDDA).

L'approccio proposto è applicato al caso di studio della manutenzione delle palette di una turbina a gas.

2. Integrated Dynamic Decision Analysis

IDDA, sviluppato da Remo Galvagni [9] [10], è stato applicato a diversi casi studio al fine di supportare processi decisionali basati sui dati di rischio, tra cui: la progettazione di un impianto di produzione di cloruro di allile ([11] e [12]), l'ottimizzazione della procedura di test delle tenute alla pressione dei serbatoi di GPL [13], le condizioni di traboccamento di un serbatoio [14], la gestione delle modifiche di un impianto di produzione della formaldeide [15].

La metodologia IDDA accoppia un modello logico - probabilistico e un modello fenomenologico; la struttura di funzionamento della metodologia IDDA è schematizzata in Figura 1.

Il modello logico-probabilistico è basato su regole logiche generali. Esso è costruito secondo una propria sintassi al fine di definire una struttura ad albero degli eventi avanzata. La modellazione logico - probabilistica procede attraverso i seguenti passaggi:

1. L'analisi funzionale del sistema e la costruzione di un elenco di livelli, attraverso una serie di domande e affermazioni sulla funzionalità di ciascun elemento; ogni

- livello rappresenta l'elemento base del modello logico, il quale in un albero degli eventi corrisponderebbe a un nodo,
2. La costruzione di una struttura reticolare attraverso gli indirizzamenti (livelli successivi) di uscita in ogni livello.
 3. Caratterizzazione di ogni livello e ogni possibile alternativa di uscita dei livelli con una stringa di testo che consente all'utente di leggere lo sviluppo logico di ogni sequenza di eventi;
 4. L'associazione a ciascun livello di un dato probabilistico, che rappresenta il grado previsto di probabilità di occorrenza di ogni evento analizzato e di un dato d'incertezza della probabilità di accadimento, che rappresenta la distribuzione statistica della probabilità.
 5. La definizione di vincoli logici e probabilistici, che consentono di tenere in considerazione le interdipendenze esistenti fra i vari eventi analizzati.

Il modello logico - probabilistico è costruito secondo un'apposita sintassi, e modellato tramite il software IDDA, il quale elabora tutte le possibili sequenze di eventi che possono occorrere nel caso descritto dal modello. Ogni sequenza di eventi è correlata alla sua probabilità di accadimento.

Assieme al modello logico – probabilistico viene preparato un modello fenomenologico il quale descrive il comportamento fisico del sistema. Il modello fenomenologico può partecipare all'aggiornamento delle risultanze del modello logico – probabilistico al fine di avvicinare i risultati dell'analisi alla realtà, cioè, ad esempio, se dopo il guasto di un'apparecchiatura le altre apparecchiature sono in grado di compensare il guasto, o se possono comparire effetti cumulativi e divergenti portando ad eventi potenzialmente pericolosi. Il modello fenomenologico può fornire anche una stima delle conseguenze per ogni singola sequenza di eventi individuata in modo da ottenere una stima del rischio, la valutazione del rischio complessivo del sistema e il valore atteso delle conseguenze. Quest'ultimo è calcolato come media ponderata delle conseguenze, in base alla loro probabilità.

3. Caso applicativo

Lo strumento di supporto alle decisioni è stato applicato all'ottimizzazione della manutenzione di una turbina a gas, nell'ottica di valutare gli effetti potenziali di un ritardo nella manutenzione legato alla disponibilità di parti di ricambio. Una fase importante della manutenzione della turbina a gas è il controllo e la sostituzione delle palette della turbina a bassa pressione (LP). Questo passaggio è importante sia per i costi, che per il tempo di fermata della turbina per la manutenzione stessa.

Un problema nella pianificazione di questa attività manutentiva è che per individuare il numero esatto di palette guaste da sostituire è necessario procedere con l'apertura della turbina. Ma le palette di ricambio sono parti costose e per ridurre i costi di gestione in genere il numero di palette di ricambio stoccate è ridotto al minimo.

D'altra parte, se il numero di palette di ricambio stoccate non è sufficiente, l'acquisto di altre palette può richiedere molto tempo, con un conseguente ritardo nel riavvio della macchina, e una perdita di produzione estremamente costosa.

In questo testo è proposto un approccio basato sui dati di rischio per discriminare le diverse soluzioni di manutenzione alternative, le alternative sono:

- Opzione 1: apertura della turbina per l'ispezione e la manutenzione, senza palette di ricambio stoccate;
- Opzione 2: apertura della turbina per l'ispezione e la manutenzione, avendo immagazzinato uno stock di palette (in base all'esperienza aziendale, di prassi sono stoccate 7 palette);

- Opzione 3: eseguire la manutenzione sostituendo l'intero set delle palette;
- Opzione 4: sostituire l'intero set di palette (sia del rotore che del distributore) con palette di nuova generazione più efficienti;

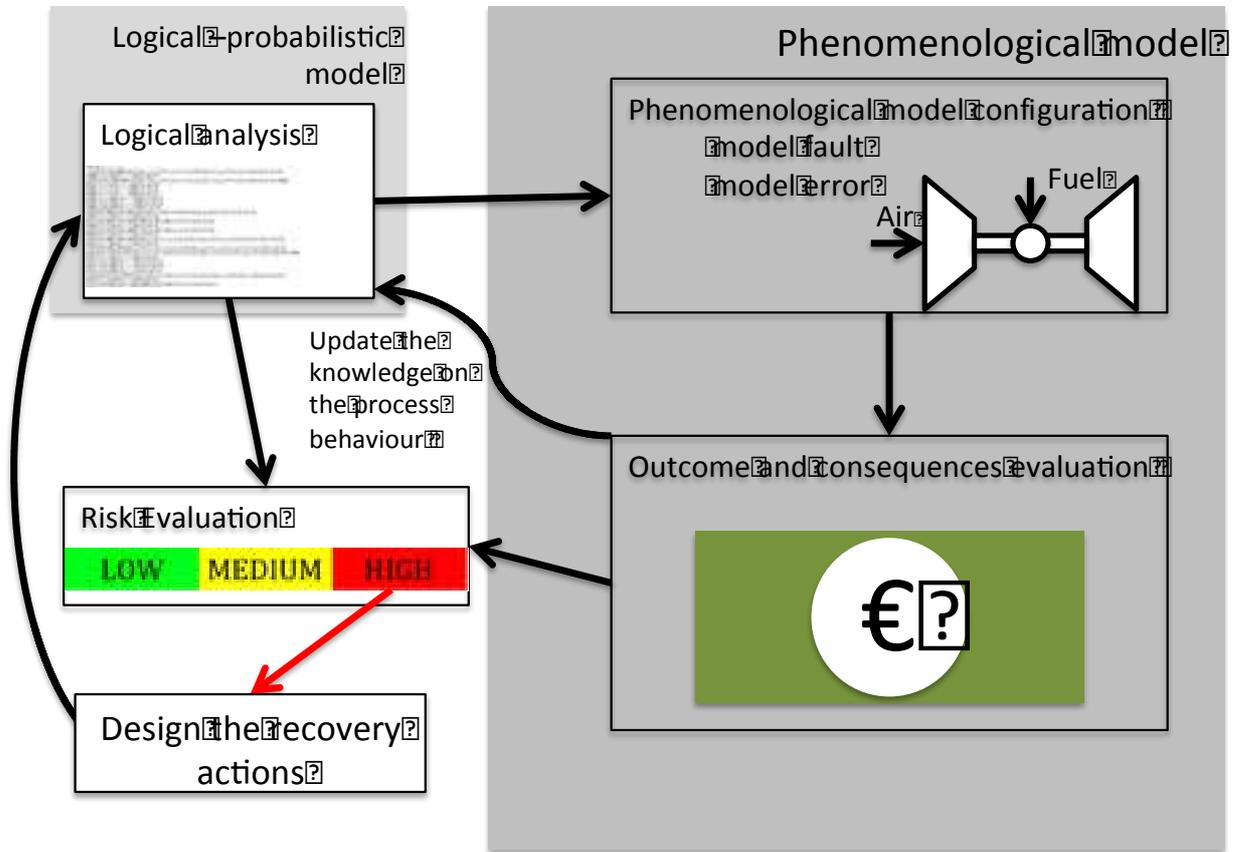


Figura 1. Integrazione fra modello logico – probabilistico e modello logico

Il modello logico - probabilistico, della metodologia IDDA, descrive tutta la possibile configurazione in cui può trovarsi la turbina all'inizio dell'operazione di manutenzione, con riferimento al numero di pale guaste.

Nella figura 2 è illustrato un esempio di analisi logico - probabilistica rappresentata come albero degli eventi. La probabilità di guasto della palette è stimata secondo Millwater e Wu [16].

Invece, nel modello fenomenologico, sono stimati i costi e la durata delle operazioni di manutenzione, in base la configurazione descritta nel modello probabilistico logico. I dati di costo e durata sono stati forniti dalla direzione aziendale.

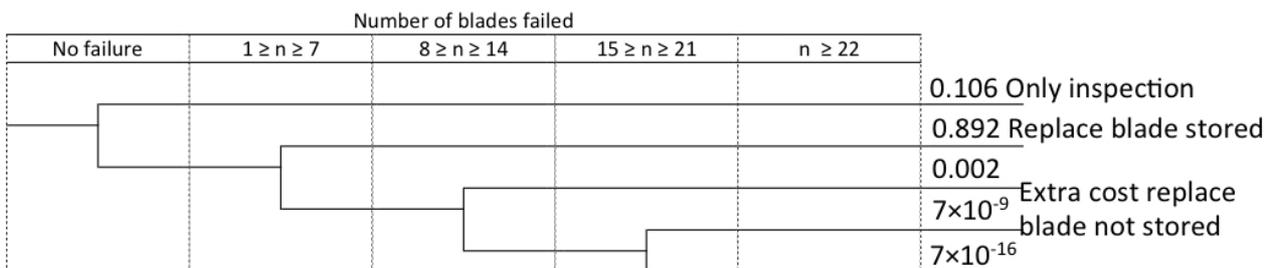


Figura 2. Rappresentazione mediante albero degli eventi del modello logico - probabilistico dell'opzione 2.

4. Risultati

Le 4 strategie di manutenzione proposte per la turbina a bassa pressione sono state analizzate in modo da stimare valore di rischio in termini di costi e tempi richiesti per la manutenzione, in base alle condizioni delle palette della turbina rintracciate durante la manutenzione.

La tabella 1 mostra i risultati dell'analisi.

L'Opzione 1 (nessun pezzo di ricambio immagazzinato) ha un rischio di 2023k€, che diminuisce fino a 1845k€ per l'Opzione 2 (7 palette stoccate), in quest'ultimo caso poiché i pezzi di ricambio sono disponibili, e non è necessario un fermo dell'impianto prolungato oltre quanto previsto. I risultati dell'Opzione 1 confermano anche la decisione dell'azienda sul numero di palette da stoccare, poiché il guasto di almeno 7 o meno palette è il caso largamente più probabile, in quanto la probabilità di accadimento è di circa il 99%.

Il rischio aumenta per gli altri due casi: l'Opzione 3 presenta un rischio di 3399k€ e l'Opzione 4 un rischio di 5799k€, questi dati sono giustificati in quanto in entrambi i casi è previsto sostituire tutte le palette (Opzione 3) e dei rotori e distributori (Opzione 4), comportando costi più alti. D'altra parte, queste ultime due opzioni consentono un'estensione del tempo intercorso prima della prossima manutenzione: 8 anni per le Opzioni 3 e 4 contro 4 anni per le Opzioni 1 e 2. Pertanto, attualizzando i valori di rischio in base gli anni di funzione prima della prossima manutenzione, si può osservare che: l'opzione 3 ha un valore di rischio di 425 k€/anno che è la più conveniente, contro i 461 k€/anno dell'Opzione 2, 506 k€/anno per l'Opzione 1 e 725 k€/anno per l'Opzione 2.

	Rischio economico (k€)	Intervallo tra due fermate per manutenzione (y)	Rischio annualizzato (k€/y)	Rischio relativo alla durata della manutenzione (d)
Opzione 1	2023	4	506	85
Opzione 2	1845	4	461	54
Opzione 3	3399	8	425	60
Opzione 4	5799	8	725	38

Tabella 1. Valori di rischio per le diverse strategie manutentive

L'Opzione 4 appare in entrambi i casi come il meno conveniente, ma è opportuno considerare che la completa ristrutturazione delle parti interne della turbina dovrebbe portare anche a un miglioramento della produttività dell'impianto, che dovrebbe compensare i maggiori costi di investimento. Sfortunatamente, i dati sulla produttività non erano ancora disponibili quando questo documento è stato esteso, quindi il modello al momento non considera questo aspetto.

Si è anche analizzato il rischio legato alla durata delle attività di manutenzione, poiché questo parametro è fondamentale per una accurata programmazione delle attività dell'impianto e per la sua redditività.

In termini di rischi, si è ottenuto che: l'Opzione 1 ha un rischio di 85 giorni, l'Opzione 2 di 58 giorni, l'Opzione 3 di 60 giorni e l'Opzione 4 di 40 d.

In questo caso l'Opzione 4 sarebbe la più opportuna, poiché presenta il rischio inferiore, però è caratterizzata dai costi più elevati. Le Opzioni 2 e 3 hanno risultati simili in termini di durata della manutenzione e costi annualizzati, ma il costo dell'Opzione 3 è superiore all'Opzione 2. L'Opzione 1 presenta un valore di rischio elevato in termini di durata ma inferiore in termini di costi.

5. Conclusioni

Oggigiorno in diversi stabilimenti industriali l'invecchiamento dell'apparecchiatura sta diventando un problema pressante. In quanto può causare incidenti, aumentare il dispendio energetico e generare costi aggiuntivi.

Uno dei modi per controllare l'invecchiamento delle attrezzature è una corretta manutenzione. Questo testo propone un approccio per valutare i pro e i contro di diverse strategie manutentive attraverso la stima dei dati di rischio delle diverse scelte proposte. Ottenendo un quadro completo di tutti gli scenari possibili, sia nel caso in cui le attività procedano come previsto sia nel caso in cui si presentino degli imprevisti, di manutenzione grazie all'adozione della metodologia l'Integrated Dynamic Decision Analysis (IDDA).

L'approccio proposto è testato nel caso della pianificazione della manutenzione delle palette di una turbina a bassa pressione. In questo caso di studio sono analizzate 4 diverse strategie di manutenzione.

Dal risultato ottenuto risulta che l'opzione di stoccare un certo numero di palette come parti di ricambio è un buon compromesso tra il rischio economico e rischio della durata della manutenzione. Lo stoccaggio di 7 palette, come fatto al momento dall'azienda sulla base della precedente esperienza operativa, è stata confermata come il numero ottimale all'interno delle caratteristiche e dei vincoli dell'azienda. Generalizzando l'approccio proposto, la direzione dovrebbe disporre di dati sufficienti per scegliere la soluzione migliore in base alle proprie priorità. Futuri sviluppi permetteranno di tenere in considerazione anche aspetti legati al potenziale rischio di incidente.

Riconoscimenti

I risultati descritti nel presente articolo sono stati raggiunti nell'ambito del progetto PROAGE, finanziato da Inail nell'ambito del 3° Bando SAF€RA

Bibliografia

- [1] Horrocks P, Mansfield D., Thomson J., Parker K., Winter P., 2010, Plant Ageing Study. Phase 1 Report, Health and Safety Executive, Warrington, UK.
- [2] Baldissone, G., Fissore, D., Demichela, M., 2016, Catalytic after-treatment of lean VOC-air streams: Process intensification vs. plant reliability. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 208-209.
- [3] Baldissone, G., Demichela, M., Fissore, D., 2017, Lean VOC-Air Mixtures Catalytic Treatment: Cost-Benefit Analysis of Competing Technologies. *Environments*, 4(3), 1-18.
- [4] Reay D., Ramshaw C., Harvey A., 2013, Process intensification. *Engineerin for efficiency, sustainability and flexibility*, Elsevier, Oxford, UK.
- [5] Gallimore K.F., Penlesky R.J., 1988, Framework for developing maintenance strategies, *Production and Inventory Management Journal*, 29(1), 16-22.
- [6] Weil N.A., 1998, Make the most of maintenance, *Manufacturing Engineering*, 120(5), 118-120.
- [7] Gits C.W., 1992, Design of maintenance concepts, *International Journal of Production Economics*, 24(3), 217-226.
- [8] Lee H.H., 2005, A cost/benefit model for investments in inventory and preventive maintenance in an imperfect production system, *Computers & Industrial Engineering* 48, 55-68.
- [9] Clementel, S., Galvagni, R., 1984, The use of the event tree in the design of nuclear power plants. *Environment international*, 10(5), 377-382.

- [10] Galvagni, R., Clementel, S., 1989 Risk analysis as an instrument of design. Chapter In: Safety design criteria for industrial plants, Cumo, M., Naviglio, A., CRC Press, Boca Raton, USA, Volume 1.
- [11] Turja, A., Demichela, M., 2011, Risk based design of allyl chloride production plant. Chemical Engineering Transactions 24, 1087-1092
- [12] Demichela, M., Camuncoli, G., 2014, Risk based decision making. Discussion on two methodological milestones. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 28, 101-108.
- [13] Gerbec, M., Baldissone, G., Demichela, M., 2017, Design of procedures for rare, new or complex processes: Part 2 – Comparative risk assessment and CEA of the case study. Safety Science, 100(B), 203-215.
- [14] Demichela, M., Piccinini, N., 2008, Integrated dynamic decision analysis: a method for PSA in dynamic process system. Proceedings of CISAP 3, Rome, Italy, 11-14 May 2008; AIDIC: Milano, Italy.
- [15] Demichela, M., Baldissone, G., Camuncoli, G., 2017, Risk-Based Decision Making for the Management of Change in Process Plants: Benefits of Integrating Probabilistic and Phenomenological Analysis. Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(50), 14873–14887
- [16] Millwater H. R., Wu Y.-T., 1993, Computational Structural Reliability Analysis of a turbine blade. In: Proceedings of the international gas turbine and aeroengine congress and exposition, Cincinnati, OH, 24–27 May 1993

Processi previsionali attraverso analisi probabilistiche di tipo deterministico e stocastico

F. Giacobbe¹, G. Tortorici¹, G. Zuccarello²

¹ Inail - Uot di Messina

² Inail - Uot di Bologna

Sommario

Il miglior metodo di previsione per l'andamento futuro di alcune variabili consiste nel verificare come si sono comportate dette variabili nel tempo. Sulla base di questa considerazione nasce la necessità di sviluppare metodologie che consentano l'analisi delle cosiddette serie storiche, o serie temporali.

Lo scopo dell'analisi delle serie storiche consiste nello studio dell'evoluzione passata del fenomeno rispetto al tempo; la previsione viene ottenuta ipotizzando che tali regolarità di comportamento di ripetano nel futuro. E' quindi importante stimare il trend della serie storica riguardante un processo di interesse impiegando i cosiddetti metodi analitici, cioè specificando il trend con una funzione del tempo da poter poi utilizzare a fini previsivi (estrapolativi). Per poter effettuare delle previsioni sull'andamento futuro della serie oggetto di indagine è necessario dunque avere informazioni tanto sull'andamento di fondo della stessa, detto trend, tanto sulle variazioni cicliche.

Nel presente studio vengono messi a confronto i metodi di analisi statistica di tipo deterministico e stocastico utilizzando dati reali correlati al monitoraggio delle attrezzature a pressione. L'argomento è particolarmente interessante in quanto la mole di dati storici, ad esempio spessimetrie delle membrature, valori di temperatura e pressione, cicli di avviamento/spengimento, ecc. non vengono di norma utilizzati per determinare proiezioni future ma bensì per rappresentare esclusivamente gli andamenti storici limitando le potenzialità di analisi e valutazione.

1. Introduzione

In molti contesti lavorativi emerge la necessità di pianificare le azioni future. La previsione è uno strumento fondamentale per una pianificazione efficiente. A tale scopo sono state sviluppate numerose tecniche di previsione che vengono classificate in due categorie generali: tecniche quantitative, basate su metodi statistici, e tecniche qualitative, basate prevalentemente su giudizi.

I metodi di tipo quantitativo possono essere impiegati quando:

- a) si dispone di informazioni sufficienti circa l'evoluzione passata del fenomeno;
- b) tali informazioni sono quantificabili;
- c) si può evincere che le caratteristiche dell'evoluzione passata continuano a sussistere nel futuro, ciò per poter effettuare la previsione.

Metodi quantitativi:

Analisi delle serie storiche: prevede la ripetizione, nel futuro, dell'andamento storico (es. andamento delle vendite tenendo conto dell'effetto del periodo dei saldi, ecc.).

Metodi esplicativi: impiegano modelli di regressione per misurare quanto una variabile esplicativa influenzi la variabile da prevedere (es. effetti sulle vendite della promozione pubblicitaria e/o del prezzo).

Metodi qualitativi: limitata o nessuna informazione quantitativa ma esiste sufficiente informazione di tipo qualitativo.

Avendo la necessità di effettuare delle previsioni, la metodologia statistica più adatta è il modello di Regressione che, tuttavia, si basa sul fatto che la variabile di cui si intende prevedere l'andamento futuro dipenda da una o più variabili indipendenti, delle quali lo stesso andamento futuro potrebbe essere incerto.

Dunque il miglior metodo di previsione per l'andamento futuro di alcune variabili consiste nel verificare come si siano comportate nel tempo, prevedendo la continuazione della loro evoluzione passata. Sulla base di questa considerazione nasce la necessità di sviluppare metodologie che consentano l'analisi delle cosiddette serie storiche, o serie temporali.

1.1 Serie storiche

Si parla di serie storiche (o serie temporali) quando si considera un fenomeno in relazione alla sua evoluzione nel tempo ovvero una successione di dati osservati su un determinato fenomeno ordinati secondo la variabile tempo t (per $t = 1, 2, \dots, N$).

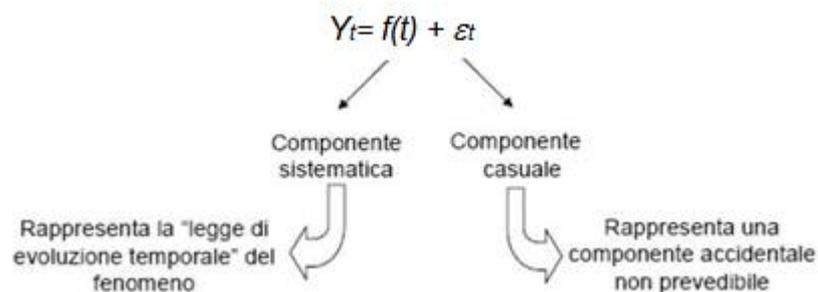


Figura 1. Componenti della serie storica

Finalità dello studio di una serie storica è quello di descrivere ed interpretare il fenomeno fisico da essa rappresentato in modo da poter effettuare delle previsioni sulla dinamica temporale del fenomeno stesso, o delle generazioni di serie sintetiche con estensione molto maggiore del periodo di osservazione.

Si possono schematizzare diverse categorie di serie temporali, riferibili ad altrettante categorie di processi stocastici:

- processi a fenomeno discreto ed a parametro discreto (n. di giorni piovosi in un mese)
- processi a fenomeno discreto ed a parametro continuo (particelle radioattive registrate da contatore geiger)
- processi a fenomeno continuo ed a parametro discreto (caso più diffuso)
- processi a fenomeno continuo ed a parametro continuo (elettroencefalogramma)

Il concetto di composizione di più andamenti di tipo diverso costituisce un importante aspetto della teoria delle serie temporali. Quando si osservano sequenze temporali si riscontrano evoluzioni che sembrano non avere caratteristiche di similitudine. Ad un'analisi più attenta, però, ci si accorge che ci sono dei comportamenti elementari che si ripetono frequentemente sia da soli, sia accompagnati ad altri. In una serie temporale empirica $z(t)$ si possono osservare i seguenti andamenti elementari, tutti funzione del tempo t :

- 1) un trend (tendenza) - $T(t)$
- 2) una componente ciclica - $C(t)$
- 3) una componente stagionale - $S(t)$
- 4) un residuo o componente casuale $a(t)$

Con il nome di trend si intende un andamento non stazionario privo di irregolarità accidentali, che si evidenzia quando si considerano serie lunghe. Il trend viene generalmente rappresentato con una funzione matematica di tipo semplice, come, ad esempio, un polinomio o una funzione esponenziale nel tempo.

1.2 Serie deterministiche e serie probabilistiche

Quando si studia una serie temporale ci si può trovare in presenza di due comportamenti, concettualmente ben distinti, indicati, rispettivamente, come andamento deterministico ed andamento stocastico o probabilistico.

Si dice che un andamento temporale è di tipo deterministico quando si può prevedere il suo sviluppo futuro senza errore. Tali andamenti temporali sono rappresentati da funzioni matematiche che consentono di determinare, in modo certo, il loro valore in qualunque istante t . Molti comportamenti temporali sono invece caratterizzati da andamenti erratici, con oscillazioni irregolari di segno positivo e negativo. Sono queste le caratteristiche degli andamenti di tipo stocastico il cui nome deriva dal fatto che essi si possono spiegare come manifestazioni di eventi casuali. Rispetto al problema della previsione, questi fenomeni si presentano in modo esattamente opposto a quelli deterministici, in quanto la previsione delle loro future manifestazioni è sempre affetta da errori.

E' opportuno ricordare, però, che gli eventi casuali non sono prevedibili nelle loro singole manifestazioni, ma si possono fare previsioni (in termini probabilistici) quando si considerano "masse di casi". L'esame statistico delle serie temporali di tipo non deterministico può fornire utili informazioni tali da consentire di scoprire il "*meccanismo*" che governa la serie stessa consentendo, così, una previsione abbastanza precisa del futuro andamento del fenomeno temporale.

La gran parte degli andamenti temporali che è possibile osservare sembrano ottenuti dalla sovrapposizione di un andamento deterministico con uno probabilistico. In questo caso si parla di andamento misto che si suppone sia ottenuto dalla somma di due andamenti elementari.

Il modello che rappresenta un andamento temporale misto può essere scritto, in generale, come segue:

$$z(t) = f(t) + a(t)$$

dove:
 $f(t)$ è la componente deterministica del modello;
 $a(t)$ è la componente probabilistica del modello;
 $z(t)$ è l'andamento risultante, cioè la serie temporale generata dal modello.

1.3 Approccio classico e moderno

Considerando la possibile esistenza di componenti sistematiche e di disturbo, si ricordano due approcci all'analisi delle serie storiche: uno, cosiddetto classico e l'altro, cosiddetto moderno.

L'analisi delle serie storiche consiste in una serie di metodologie che permettono di scomporre l'andamento, solitamente irregolare di questa serie, nelle sue componenti più importanti, alcune deterministiche, altre accidentali, nell'ottica di individuare con la maggiore esattezza possibile l'andamento di fondo e di poter effettuare delle previsioni sul comportamento futuro che siano realistiche ed efficienti.

L'approccio classico, sopra descritto, considera la serie storica come deterministica, affermando che attraverso lo studio della stessa è possibile prevedere i suoi valori futuri in base ai valori passati mentre la componente aleatoria viene calcolata per differenza o rapporto e viene considerata come parte residuale non spiegabile (imputata al caso e assimilata ad errori accidentali).

La componente accidentale si ritiene sia generata da un processo white noise, ossia da una successione di variabili casuali indipendenti, identicamente distribuite con media nulla e varianza costante e componenti incorrelate. In sostanza, con l'approccio classico, si concentra l'attenzione sulla componente deterministica (sistematica) $f(t)$ in quanto $u(t)$ è un processo a componenti incorrelate e dunque trascurabile.

Nell'approccio moderno invece si ipotizza che $f(t)$ sia stata già eliminata (stimandola con altri metodi) e l'attenzione viene posta sulla componente stocastica $u(t)$ che si ipotizza essere un processo a componenti correlate che, quindi, va trattato con opportune tecniche statistiche.

In questo caso possiamo guardare alle osservazioni di una serie storica come a un pezzettino di realizzazione di un processo stocastico e utilizzare questi dati per capire la legge probabilistica sottostante.

Infatti i processi stocastici sono dei modelli matematici utili per descrivere la legge probabilistica con cui un certo fenomeno si evolve nel tempo.

Un processo stocastico (Y_t) è una famiglia di variabili casuali continue (Y_1, Y_2, \dots). Esso è completamente noto se si conoscono:

Le densità univariate $f_1(y_1), f_2(y_2), \dots$

Le densità congiunte $f_{12}(y_1, y_2), f_{23}(y_2, y_3), f_{13}(y_1, y_3), \dots$

Etc, etc

Essendo un processo stocastico (Y_t) una famiglia di variabili casuali continue, ne consegue che esistono infinite possibili realizzazioni, mentre di fatto, se ne osserva una sola: la serie storica.

1.3.1 Approccio classico

Le componenti di una serie storica Y_t :

Trend(T): movimento tendenziale monotono di fondo, di lungo periodo, che mette in evidenza una evoluzione strutturale del fenomeno dovuta a cause che agiscono in modo sistematico sullo stesso;

Ciclo(C): originato dal presentarsi di condizioni più o meno favorevoli, di espansione e contrazione, del contesto economico nel quale si colloca il fenomeno in esame;

Stagionalità(S): oscillazioni originate da fattori climatici (alternanza delle stagioni) e/o di organizzazione sociale;

Accidentalità(e): è data da movimenti irregolari o accidentali provocati da una serie di circostanze ciascuna di entità trascurabile.

L'approccio classico ritiene che le serie storiche presentino, in genere, oscillazioni intorno alle loro componenti sistematiche.

Molti metodi di previsione si basano sul fatto che, se esiste un pattern sistematico (rispetto al tempo), questo possa essere individuato e separato da eventuali oscillazioni accidentali, mediante metodi di perequazione o smussamento dei dati della serie storica.

L'effetto dello smussamento è quello di eliminare disturbi casuali cosicché, una volta individuato il pattern sistematico, questo possa essere proiettato nel futuro per produrre la previsione.

I metodi detti di scomposizione tendono, di norma, a individuare due pattern: il trend-ciclo e la stagionalità.

Il trend-ciclo può essere scomposto, a sua volta, in componente di fondo (trend) e oscillazioni congiunturali (ciclo).

Un metodo di scomposizione, di per sé, produce una descrizione dei dati storici (passati) e non una previsione.

1.3.2 Approccio moderno

Si è dunque detto di considerare la serie storica come una parte finita di una realizzazione di un processo stocastico al quale però devono essere imposte delle limitazioni per individuare una classe ristretta di processo stocastico nella quale sia lecita, agevole e corretta una inferenza statistica che permetta di conoscere le caratteristiche del processo a partire dalla serie storica.

Per tale motivo è indispensabile conoscere alcune importanti proprietà dei processi stocastici:

Stazionarietà in senso stretto. Le distribuzioni congiunte di $(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_n})$ e di $(Y_{t_1+k}, \dots, Y_{t_n+k})$ per ogni insieme di istanti t_1, \dots, t_n e per ogni k sono uguali. Ne consegue che tutti i momenti sono costanti. Quindi anche la media e la varianza di Y_t sono costanti: μ e σ^2 e non dipendono da t . La autocovarianza invece dipende solo dal lag temporale fra le due componenti del processo.

Stazionarietà in senso debole. Condizione meno restrittiva, si riferisce solo ai momenti media e varianza e alla autocorrelazione. Un processo stocastico è stazionario in senso debole se ha media e varianza costanti e l'autocovarianza dipende dal lag temporale fra le due componenti.

Invertibilità. Capacità di un p.s. di essere esprimibile in funzione di sé stesso al passato.

La nozione di stazionarietà in senso debole è quella più utilizzata nella pratica.

I processi ARMA nascono per sopperire alle carenze dei principali processi AR (autoregressivi) sempre invertibili e MA (a media mobile) sempre stazionari.

1.4 Statistica dei valori estremi

Una tipologia di distribuzioni statistiche di grande interesse per l'analisi di fenomeni rari sono le distribuzioni del valore estremo o EV (extreme value), studiate prevalentemente da Gumbel.

La teoria dei valori estremi enunciata da Gumbel è basata sulle seguenti ipotesi: a) le condizioni prevalenti nel passato devono essere valide anche nel futuro; b) i fenomeni cui si riferiscono i dati sperimentali disponibili sono indipendenti; c) il comportamento dei fenomeni estremi di quelli in studio in un dato periodo sarà nel futuro simile a quello del passato.

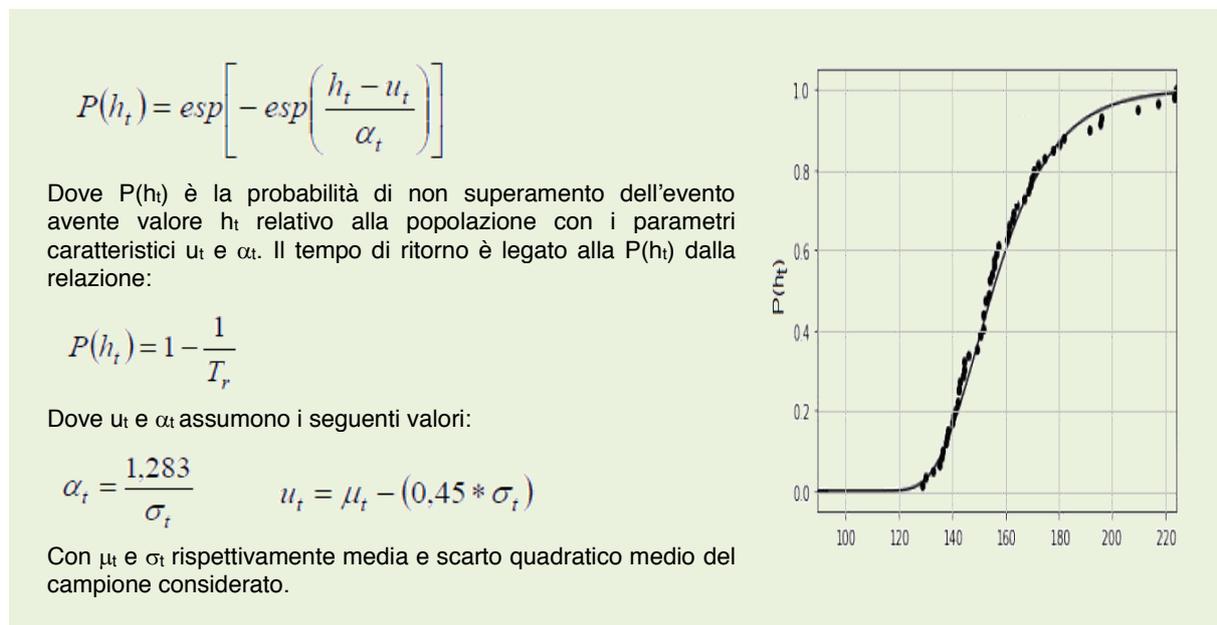


Figura 2. Curva di Gumber

Con il termine eventi “estremi” o “rari” ci si riferisce a quei fenomeni che accadono di rado o con bassa frequenza come ad esempio i terremoti, le alluvioni, il crollo dei mercati finanziari, ecc. La teoria probabilistica che si occupa di questi fenomeni ha lo scopo di sviluppare metodi e modelli matematici per l'analisi e la descrizione dell’ “insolito” piuttosto che del “solito”. Utilizzando i dati storici si vuole quindi determinare una stima della

probabilità con cui fenomeni inconsueti possono verificarsi. La comunità scientifica ha iniziato a studiare gli eventi estremi a causa degli enormi impatti che alcuni fenomeni naturali avversi possono avere sulla società. La teoria dei valori estremi si è affermata nel tempo e ha conseguito un notevole successo proprio in campo ingegneristico.

Uno degli obiettivi primari della teoria dei valori estremi è la quantificazione del comportamento di un fenomeno aleatorio quando questo assume dei valori insolitamente grandi o piccoli, e stimare quindi la probabilità di eventi ancora più grandi (o piccoli) di quelli che sono già stati osservati.

2. Statistica stocastica nei processi industriali

In tutte le serie temporali che non siano di tipo deterministico sono sempre presenti delle irregolarità, di segno positivo e negativo rispetto alla media del fenomeno, che sembrano prodotte da un comportamento di tipo aleatorio. Tale componente si chiama casuale (o accidentale) ed assomma in sé gli elementi di incertezza (o aleatorietà) che caratterizzano fenomeni naturali, sociali, economici, processi produttivi, etc.

Le serie temporali osservate o reali sono date dalle successioni delle misurazioni dei valori assunti da un certo fenomeno. E' però possibile costruire artificialmente delle serie temporali mediante l'uso di appositi metodi matematici. La simulazione di serie sintetiche consente di valutare le prestazioni del modello stocastico utilizzato, mediante confronto tra serie generate ed osservate. Consente inoltre di effettuare previsioni, sia dirette, a breve termine, che probabilistiche, intese come valutazioni del livello di criticità di una certa configurazione dei dati.

In particolare i fenomeni corrosivi sono soggetti ai suddetti fenomeni. Nello stadio di innesco intervengono vari fattori; oltre a quelli menzionati si citano: la presenza di inclusioni e di fasi precipitate nel metallo, il grado di incrudimento del metallo, la composizione chimica dell'ambiente, il potenziale di corrosione. Il tempo di innesco assume pertanto carattere di variabile stocastica e i dati sperimentali sono spesso interpretati con metodi statistici. Le velocità di corrosione in funzione del livello di criticità si possono suddividere in: – trascurabile: $< 50 \mu\text{m}/\text{anno}$; – bassa: $< 50 \div 100 \mu\text{m}/\text{anno}$; – modesta: $100 \div 500 \mu\text{m}/\text{anno}$; – severa: $500 \div 1000 \mu\text{m}/\text{anno}$; – molto severa: $> 1000 \mu\text{m}/\text{anno}$.

La velocità di corrosione in realtà non assume valori costanti nel tempo ma variabili in funzione di molteplici fattori pertanto i valori presenti in letteratura sono orientativi e possono subire evoluzioni. Di seguito alcuni esempi di variazione della velocità di corrosione.

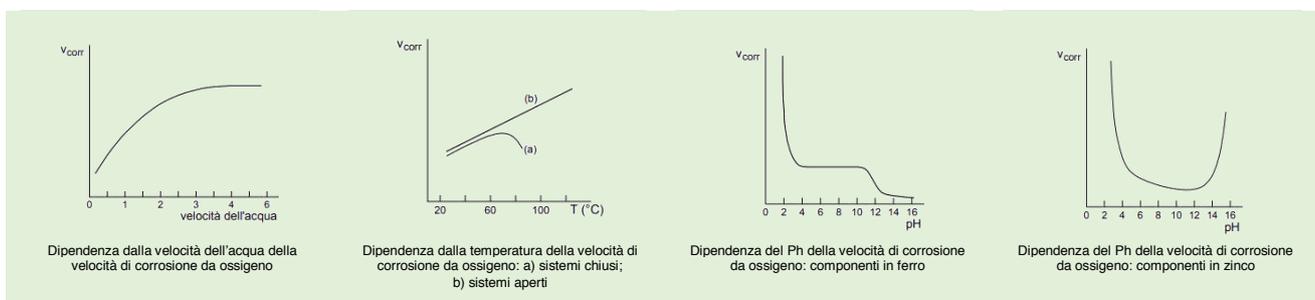
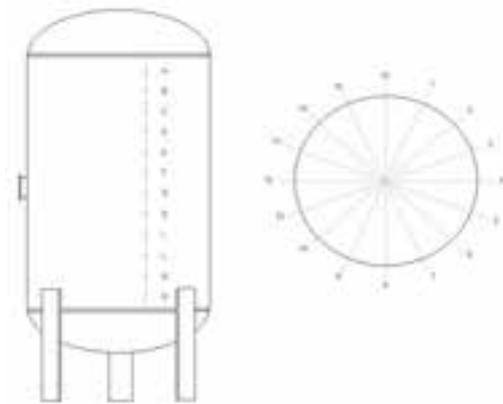


Figura 3. Andamento della velocità di corrosione al variare dei fattori velocità dell'acqua, temperatura e Ph

3. Simulazione con dati reali

Di seguito si riportano le considerazioni relative all'applicazione della metodica di Gumbel nel caso di esame ultrasonoro spessimetrico delle virole di un recipiente a pressione.



Recipiente a pressione

Materiale: acciaio P 355 NH
 Anno di costruzione: 2004
 Spessore nominale: 5 mm
 Diametro interno: 1800 mm
 Temperatura: -10 / 250°C
 Pressione: 7 bar
 Fluido: gruppo 1
 Stato: gas
 Natura: idrocarburo
 Categoria PED: IV
 Note: coibentazione esterna

Figura 4. Caratteristiche del recipiente a pressione e della maglia utilizzata per il controllo ultrasonoro spessimetrico

Il controllo spessimetrico è esteso a tutta la superficie delle virole con 16 punti circolarmente ripetuti 12 volte lungo la direzione longitudinale.

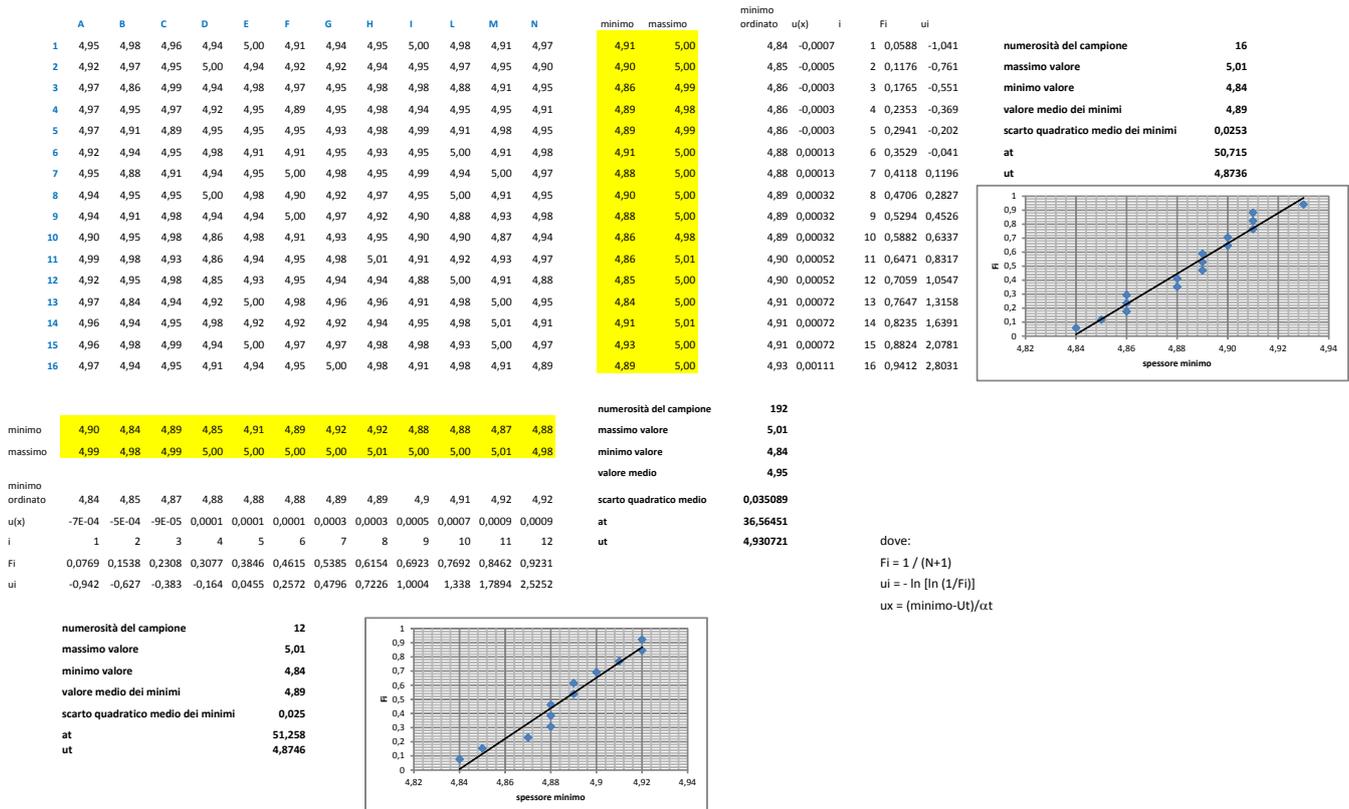


Figura 5. Determinazione delle curve di Gumber

Dalla analisi della sperimentazione è possibile notare che i valori minimi emersi dal controllo spessimetrico non hanno una specifica caratterizzazione di localizzazione ma sono fondamentalmente distribuiti sulla superficie delle virole. Questo risultato conferma

che il fenomeno di corrosione sotto coibente è prevalentemente di tipo uniforme sulla superficie.

4. Conclusioni

Si ritiene significativo, nelle valutazioni di ulteriore esercibilità di attrezzature a pressione, ricorrere anche ad approcci di tipo prestazionali, basati su serie storiche. Questi approcci prevedono di modellare gli effetti delle azioni aventi influenza sulla struttura e individuare i tempi entro cui questi effetti determineranno il raggiungimento di determinati stati limite, ai quali il progettista associa il raggiungimento del termine della vita utile della struttura. A tale scopo è necessario un modello che descriva l'evoluzione nel tempo del degrado. Nella letteratura scientifica sono stati proposti molti modelli più o meno empirici o rigorosi; tuttavia, per tenere conto dell'elevato numero di fattori che influiscono sulla vita di servizio di una struttura e della loro variabilità, è necessario affrontare il problema in termini probabilistici.

5. Bibliografia

- [1] D. Piccolo, Statistica per le decisioni, Il Mulino, 2004
- [2] R.H. Shumway, D.S. Stoffer, Time series analysis and its applications, Springer, 2006
- [3] PJ Brockwell, R. Davis, Introduction to time series and forecasting, Springer, 2002
- [4] P. Claps, Serie storiche, processi e modelli stocastici per l'idrologia e la gestione delle risorse idriche, appunti corso Politecnico di Torino, 2002
- [5] F. Bolzoni, P. Fassina, G. Fumagalli, L. Lazzari, E. Mazzola, Applicazione dei modelli probabilistici allo studio della corrosione localizzata, la metallurgia italiana vol. 6/2006
- [6] L. Klimberg, Fundamentals of forecasting using excel, Industrial Press inc., 2008
- [7] B. Bazzoni, Corrosione e protezione dei materiali metallici, dispense del corso presso università di Bergamo, 2006
- [8] I. Guerra, Appunti per il corso di Geodinamica e Rischi Ambientali – Parte II,
- [9] T. Shibata, Corrosion probability and statistical evaluation of corrosion data, ISBN: 0471157775, 2000
- [10] P. Huang, F. Hu, F. Dong, Parameter estimation of Gumbel distribution and its application to pitting corrosion depth of concrete girder bridges, Springer US, Online ISSN1573-7543, 2018
- [11] R. E. Melchers, Statistical Characterization of Pitting Corrosion - Part 1: Data Analysis, CORROSION, volume 61, issue 7, 2005
- [12] S.G.Coles, An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, 2001

Criticità operative nella produzione di siloveicoli

G. Battista¹, A. De Cristofaro¹, F. Viola¹, E. Montone²

¹ Inail - Uot di Avellino

² O.ME.P.S. Srl

Sommario

Lo studio si propone di elencare, partendo dalla presentazione del ciclo di produzione dell'apparecchio/insieme e del relativo funzionamento, i pericoli principali e l'afferente analisi dei rischi.

Vengono analizzate le soluzioni adottate nella fase progettuale con particolare attenzione al materiale (alluminio), alle saldature automatiche e manuali, alle valvole di sicurezza ed al sistema di compressione.

Nelle conclusioni vengono individuati i margini di miglioramento progettuali e costruttivi.

1. I siloveicoli

Un siloveicolo è una cisterna per il trasporto di prodotti sfusi. In produzione si possono trovare quelle generiche e quelle per utilizzi specifici; ci sono modelli destinati al trasporto di alimenti, altri a quello di prodotti chimici, altri ancora ai carburanti.



Figura 1. Esempi di siloveicoli

Si va così dal trasporto di prodotti sfusi a quello dei prodotti chimici e delle merci pericolose, da quello degli oli combustibili e carburanti a quello del Gpl, del metano e dei gas in genere, per finire al trasporto di prodotti alimentari, primo fra tutti il latte.

Ogni anno oltre 1100 autocisterne (circa il 4% del mercato autocarri over 3,5 ton) vengono immatricolate in Italia; il 30% di esse sono "generiche", il 20% sono adibite al trasporto di oli minerali e carburanti. Analogamente a quanto avviene in altri settori dell'autotrasporto medio e pesante, anche nel caso delle autocisterne esistono autocarri tradizionali, autotreni e trattori con semirimorchio.

1.1 Ciclo di produzione di un siloveicolo

Di particolare rilievo nella costruzione di un siloveicolo è la gestione dell'intera fase della progettazione. Opportuni software per la modellazione 3D e innovativi programmi di calcolo consentono di realizzare i volumi di carico richiesti. Tale procedura è finalizzata a calibrare con precisione l'affidabilità del veicolo attraverso il ricorso a simulazioni delle condizioni di carico, nel tentativo di prevenire errori di progettazione. Valutate le richieste

dell'acquirente, prende il via un preciso iter progettuale, che si articola in diverse fasi, studiate in maniera consequenziale.

Il primo step include la realizzazione di un modello 3D del contenitore in base al volume di carico desiderato, cui segue poi la verifica della distribuzione dei carichi su perno ralla e assali. Successivamente si avvia la fase della modellazione 3D del telaio, accompagnata da un'accurata analisi strutturale del modello, per poter individuare soluzioni tecniche tali da ridurre le sollecitazioni e ottimizzare i tempi di scarico.

In 3D vengono modellati il contenitore, il telaio e tutti gli altri componenti fino ad arrivare ad una modellazione completa del veicolo. L'articolazione di questa fase è finalizzata alla prevenzione di eventuali problemi di assemblaggio.

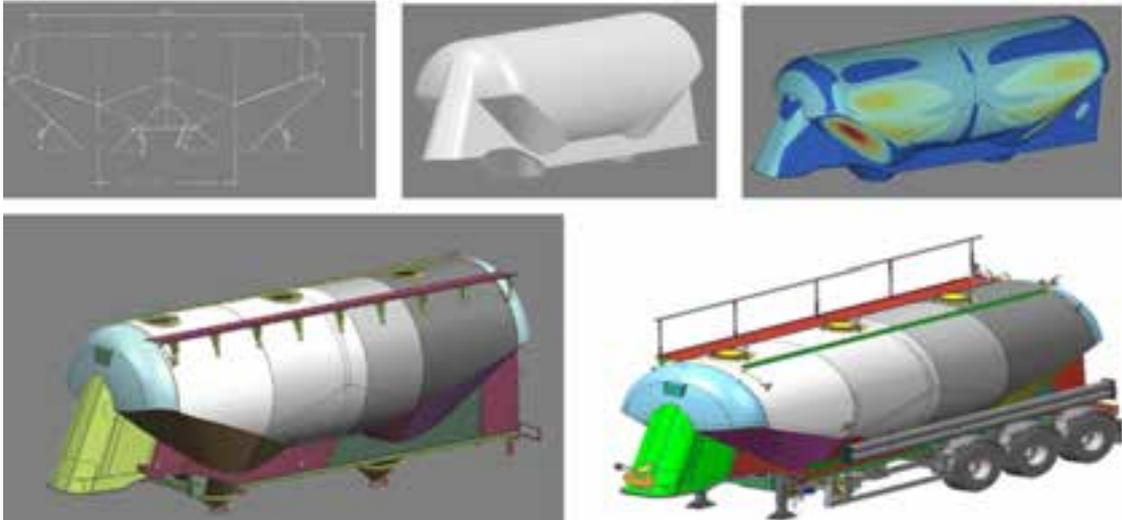


Figura 2. Sviluppo disegni CAD fino al siloveicolo completo
(Fonte: www.omeps.it)

Conclusasi la fase del progetto in 3D, si passa allo sviluppo della superficie piana di ogni componente, che culmina nella realizzazione dei disegni esecutivi, per poi procedere alla realizzazione effettiva del veicolo.

Il procedimento parte con la trasposizione su foglio di alluminio di ogni singolo componente del veicolo, successivamente si passa al taglio computerizzato al plasma, quindi alla piega dei pezzi e all'assemblaggio delle virole e del telaio attraverso saldatura MIG e TIG.

Nell'ambito del procedimento GMAW (Gas Metal Arc Welding), la saldatura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) è un processo di saldatura che utilizza l'energia fornita dall'arco elettrico che si stabilisce tra un elettrodo metallico fusibile (filo di saldatura) ed i pezzi da saldare, il tutto sotto un flusso di gas o miscele gassose la cui natura determina la tipologia di processo: inerte (MIG) o attivo (MAG).

Nel procedimento TIG (Tungsten Inert Gas) l'arco elettrico scocca e si mantiene fra un elettrodo di tungsteno infusibile e il pezzo da saldare. Il filo viene fatto avanzare con continuità da un traina-filo attraverso la torcia fino al bagno di fusione.

Lo stadio successivo è quello della verniciatura, seguito immediatamente dalla fase di montaggio finale e di collaudo di fine linea, il quale comprende il controllo dei componenti destinati alla marcia su strada (assali, impianto freni, impianto luci, ecc.) e la messa in pressione dell'insieme per la verifica delle tenute e degli accessori di sicurezza.



Figura 3. Fasi di lavorazione
(Fonte: www.omeps.it)

1.2 Soluzioni operative della fase progettuale.

Ognuno dei passaggi sopraelencati prevede una serie di controlli e verifiche, dal momento che l'obiettivo è senz'altro quello di produrre un semirimorchio che sia, in primis, sicura e che ovviamente risponda alle richieste dell'utenza. Il fatto che nella produzione dei siloveicoli in oggetto venga utilizzato esclusivamente alluminio comporta notevoli vantaggi, quali l'aumento del carico pagante per ogni viaggio effettuato con la conseguente riduzione dei costi di carburante per tonnellata trasportata e una minore emissione di CO nell'ambiente.

Il telaio dei siloveicoli ribaltabili, prodotto in lega di alluminio ad alta resistenza e interamente imbullonato, garantisce un netto miglioramento in termini di rigidità torsionale e flessionale. Tali soluzioni sono rese possibili grazie all'utilizzo di nuovi profili per i longheroni e grazie a un'ottimizzazione della conformazione della zona del perno ralla.

Altro accorgimento tecnico consiste nel fatto che nei semirimorchi autoportanti è stata approntata una bordatura nella zona di collegamento fra i fondi e i coni di scarico che ha portato una riduzione della tara e una migliore risposta alle sollecitazioni meccaniche. Su qualche modello sono state modificate le flange delle coppe di scarico, passando così da una forma circolare a una ovale con conseguente miglioramento della velocità di scarico e della volumetria. La maggiorazione del cassetto posteriore porta-attrezzi per aumentarne la capienza, un nuovo profilo passerella per preservarne nel tempo la linearità, un coperchio di carico dotato di un doppio sistema di apertura per agevolarne le operazioni di apertura e chiusura sono ulteriori dispositivi che consentono un notevole miglioramento delle prestazioni delle autocisterne.

2. Le attività dell'Inail

2.1 L' "insieme" siloveicolo della O.ME.P.S.

La O.ME.P.S. Srl commercializza il siloveicolo come "insieme".

Per "insieme" la Direttiva PED definisce *"varie attrezzature a pressione montate da un Fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale"*.

Un Fabbricante (il soggetto che assume la responsabilità della progettazione e della costruzione di un insieme immesso sul mercato a suo nome), che può essere anche una società d'ingegneria, per poter commercializzare un insieme, lo deve sottoporre alla

procedura globale di valutazione della conformità ed apporre la marcatura CE con l'avallo di un Organismo Notificato.

Le attrezzature che compongono un insieme debbono essere:

- montate da un Fabbricante che intende commercializzare l'insieme per esercirlo così come assemblato. Non importa se il completamento avviene nell'opificio del Fabbricante o sul luogo d'impianto; l'importante è che l'insieme sia completo;
- in grado di costituire un tutto, cioè debbono esserci tutti i componenti necessari all'insieme per poter funzionare ed essere sicuro; non è consentito marcare CE, come insieme, un impianto carente, anche parzialmente, dei dispositivi a protezione di quelle grandezze per le quali possa esserci il rischio di superare i limiti ammissibili;
- integrate, cioè collegate ed aventi le condizioni di progetto compatibili tra loro;
- funzionali, cioè se messe in servizio debbono essere in grado di svolgere una certa funzione.

Gli insiemi devono essere sottoposti ad una procedura globale di valutazione di conformità, nella quale bisogna tener conto di tutte le attrezzature a pressione che lo compongono e della loro integrazione.

Tale procedura, come richiesto dal par. 6 dell'art. 10 del d.lgs. 93/2000, comprende:

- a) La valutazione di conformità di ciascuna delle attrezzature a pressione costituente l'insieme che non sia stata oggetto di una distinta procedura di valutazione di conformità, né di una separata marcatura CE.* La procedura di valutazione di conformità è determinata in base alla categoria di ciascuna attrezzatura, che dipende dal volume V (oppure dal DN) dell'attrezzatura, dal gruppo del fluido e dai valori di PS e TS di progetto dell'insieme. La categoria così determinata può essere più bassa di quella intrinseca dell'attrezzatura;
- b) La valutazione dell'integrazione dei diversi componenti dell'insieme.* Gli elementi da assemblare devono essere idonei per l'applicazione prevista, nonché correttamente integrati ed adeguatamente collegati. Tale valutazione sarà effettuata in funzione della categoria dell'insieme, corrispondente alla categoria più elevata;
- c) La valutazione della protezione dell'insieme,* conseguente ad una adeguata analisi dei rischi per evitare il superamento dei limiti di esercizio ammissibili, deve essere condotta in funzione della più alta categoria delle singole attrezzature PED da proteggere, ma deve anche tener conto delle caratteristiche delle attrezzature non PED dell'insieme.

La scelta del tipo ed il dimensionamento di tali dispositivi deve essere effettuata dal Fabbricante tenendo conto delle varie condizioni di installazione e di esercizio.

2.2 Le attività di INAL ON 100

I siloveicoli della O.ME.P.S. Srl sono commercializzati come detto come "insiemi" e provvisti di dichiarazione di conformità ai sensi dell'Allegato VII della Direttiva 2014/68/UE. Di seguito si riportano le informazioni contenute nella Dichiarazione di Conformità:

A

Definizione: Cisterna autoportante per trasporto polverulenti			
Numero di fabbrica OS 2836	N. progetto o disegno 103	Famiglia CM	Tipo CM 35

B

CAMERA		Pressione max di esercizio	TS	Fluido contenuto	Capacità	Numero di boccaporti
N	DESCRIZIONE					
1	Principale	2 bar	-40+80	Aria	35.000 lt	2

B1

Tubazione rigida		
Descrizione	Materiale	Dimensioni
Tubo collettore	Acciaio inox	De 76,1 mm – Di 72,1
Tubazione di scarico	Acciaio	De 101,6 mm – Di 94,4 mm
Tubo immissione aria	Gomma	De 77 – Di 60
Tubo fluidificazione coppe	Gomma	De 77 – Di 60
Tubo supplemento aria	Gomma	De 62 – Di 45
Tubo di collegamento al compressore	Gomma	

B2

Elenco componenti in pressione	Riferimenti	Materiale
Tubo collettore	Range 0-2,5	Acciaio inox
Valvola pneumatica	Ps 6,5 bar	Alluminio
Valvole di non ritorno	D 2" – 1"1/2	Ottone

B3

VALVOLA DI SICUREZZA	Pressione max di taratura	Capacità di sfogo	Temperatura di esercizio
Matricola			
02122298	2 bar	1123 mc/h	-40°C/+200°C

C

Procedura/e di valutazione di conformità utilizzata/e	Modulo H secondo la procedura dell'allegato III della Direttiva 2014/68/UE
--	--

D

Numero, nome ed indirizzo dell'Organismo Notificato incaricato della valutazione di conformità della sorveglianza del sistema di qualità	0100 INAIL Via R. Ferruzzi, 38/40 – ROMA
---	---

Nell'informazione sull'insieme fornita con la Dichiarazione di conformità CE, secondo l'allegato I punto 3.3 della Direttiva 97/23/CE viene specificata la Categoria di Rischio:

“Le attrezzature appartenenti alla famiglia di cui sopra sono inquadrabili nella Categoria di Rischio III”.

In merito alla possibilità di utilizzo dell'insieme con compressore esterno, nella dichiarazione di conformità si specifica che l'insieme è marcato CE con i dati di pressione e di volume indicati e che può essere collegato ad un compressore con portata massima di aria inferiore alla capacità di sfogo della valvola di sicurezza, come riportato sul libretto di uso e manutenzione.

2.3 La denuncia di messa in servizio e le verifiche periodiche

In relazione a quanto previsto dell'art. 5 comma 1 del d.m. 329/2004 (**Esclusioni dal controllo della messa in servizio**), non sono soggette alla verifica della messa in servizio di cui all'art. 4 le seguenti categorie di attrezzature ed insiemi:

... omissis ...

d) gli insiemi per i quali da parte del competente organismo notificato o di un ispettorato degli utilizzatori risultano effettuate per quanto di propria competenza le verifiche di accessori di sicurezza o dei dispositivi di controllo. L'efficienza dei citati accessori o dispositivi devono risultare dalle documentazioni trasmesse all'atto della presentazione della dichiarazione di messa in servizio.

Per tali insiemi occorre procedere pertanto alla denuncia di messa in servizio di cui all'art. 6 del d.m. 329/2004 (**Obblighi da osservare per la messa in servizio e l'utilizzazione, dichiarazione di messa in servizio**):

1. All'atto della messa in servizio l'utilizzatore delle attrezzature e degli insiemi soggetti a controllo o a verifica invia all'ISPESL e all'Unità Sanitaria Locale (USL) o all'Azienda Sanitaria Locale (ASL) competente, una dichiarazione di messa in servizio, contenente:
 - a. l'elenco delle singole attrezzature, con i rispettivi valori di pressione, temperatura, capacità e fluido di esercizio;
 - b. una relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate;
 - c. una espressa dichiarazione, redatta ai sensi dell'art. 2 del DPR 20 ottobre 1998, n. 403, attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale d'uso.
- ... omissis ...
3. Per le attrezzature a pressione e insiemi esclusi dal controllo della messa in servizio ai sensi dell'art. 5, la dichiarazione di messa in servizio di cui al comma 1 consente di attivare l'attrezzatura o l'insieme a condizione che l'utilizzatore attesti che le predette attrezzature o insiemi siano stati debitamente installati, mantenuti in efficienza e utilizzati conformemente alla loro destinazione e non pregiudichino la salute e la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni.

Inoltre, in relazione alla classificazione in categoria di rischio III di tali attrezzature e/o insiemi, come visto in precedenza, per i disposti normativi di cui all'allegato VII del d.lgs. 81/08 e del d.m. 11 aprile 2011 le stesse saranno assoggettate a Verifiche Periodiche secondo la seguente periodicità:

Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.Lgs. 93/2000 art. 3). <i>Recipienti/insiemi contenenti gas compressi, liquefatti e disciolti o vapori diversi dal vapor d'acqua classificati in III e IV categoria e recipienti di vapore d'acqua surriscaldata appartenenti alle categorie dalla I alla IV</i>	Verifiche di funzionamento: TRIENNALE Verifica di integrità: DECENNALE
--	---

3. Rischi residui nell'utilizzo dei siloveicoli

3.1 Un mancato infortunio

Di seguito si riporta una scheda estratta da uno studio [1] predisposto dal Gruppo di Lavoro Apparecchi a Pressione della Regione Emilia Romagna.

L'analisi dell'infortunio evidenzia il rischio residuo connesso all'utilizzo delle attrezzature a pressione, seppur con valori di esercizio non superiori a 2 bar.

Scheda 22 RECIPIENTI A PRESSIONE PER GAS E VAPORE D'ACQUA	
Descrizione categoria utente	Azienda trasporti
Tipologia attrezzatura	Recipiente per gas (siloveicolo)
Descrizione dell'attrezzatura	Cisterna per trasporto di materiale polverulento
Descrizione del sito/focale di installazione	Cantiera stradale
Descrizione ciclo produttivo in cui è inserita l'attrezzatura	Scorcio gesso per la stabilizzazione del fondo stradale in costruzione
DATI TECNICI	
Anno costruzione	1995
P pressione	2,0 bar
P temperatura	ambiente
Capacità	35.000 lt
Descrizione del sito/focale di installazione	Cantiera stradale
Descrizione dell'anomalia riscontrata	Distacco e proiezione del portello di carico per deterioramento dei filetti delle chiavande di chiusura
Studio della causa che ha prodotto l'anomalia In fase di pressurizzazione della cisterna per lo scorcio del prodotto veniva avvertita una consistente perdita di aria da uno dei coperchi superiori di carico. Tali coperchi sono realizzati con la chiusura a sportello incernierato da un lato e trattenuti in posizione di chiusura da chiavande filettate. I perni di uno sportello presentavano marcata usura delle filetture generate dal prolungato utilizzo e mancanza di adeguata pulizia e lubrificazione. Mentre un addetto era salito sulla cisterna per verificare la provenienza della perdita avveniva l'improvviso cedimento in sequenza dei perni di chiusura con apertura violenta del portello che provocava la caduta a terra dell'addetto con il verificarsi di un serio infortunio.	
Intervento correttivo proposto e relativo esito Sostituzione dei perni filettati e delle chiavande, procedura di manutenzione e di verifica periodica dello stato di conservazione dello stesso.	
Note Recipiente attivo	
Documentazione fotografica allegata	
	
Deterioramento dei filetti delle chiavande di chiusura	

In relazione a quanto sopra descritto, si riportano le modalità operative riportate nella relazione tecnica a corredo del siloveicolo definito dal Costruttore tipo CM 39.

Tale modello di siloveicolo è composto da una cisterna autoportante avente una capacità di 39.000 lt e diametro esterno da 2550 mm. È progettata per il trasporto di materiali solidi sfusi, granulari, o polverulenti, non pericolosi ai fini dell'ADR. Il semirimorchio comprende inoltre l'impianto per la distribuzione dell'aria compressa, l'impianto per lo scarico del materiale e per il sistema frenante.

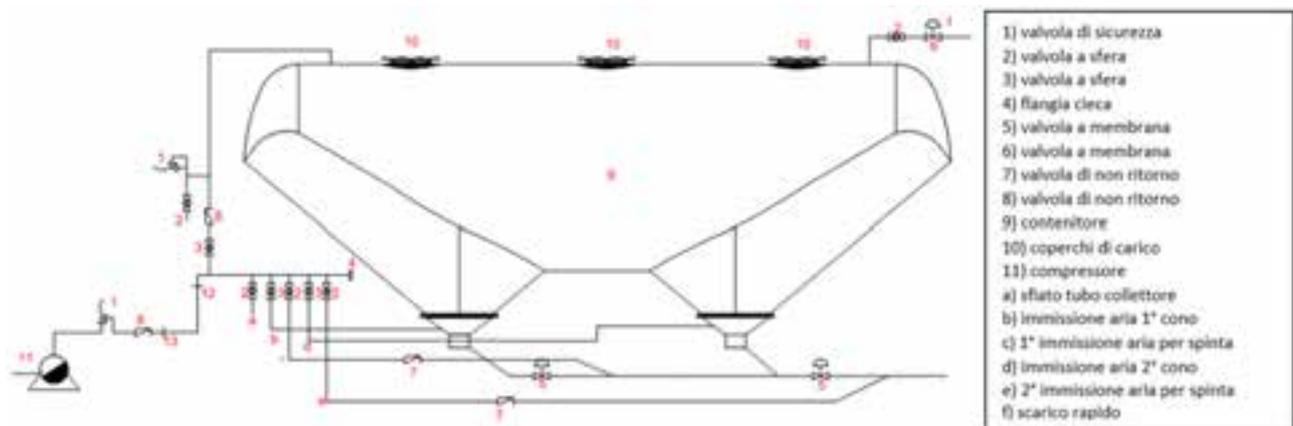
Il sistema di carico del materiale è costituito da due o tre aperture per passi d'uomo, situati sulla generatrice superiore del contenitore. I suddetti passi d'uomo sono realizzati con un collare avente un diametro esterno $D_e = 514$ mm, diametro interno $D_i = 450$ mm ed altezza di 43 mm. Per l'apertura e chiusura dei suddetti passi d'uomo vengono utilizzati coperchi con quattro punti di chiusura.

I coperchi sono del tipo "a manovra multipla" in quanto l'apertura prevede due fasi ben distinte:

- 1) rotazione dei volantini (dopo tale manovra il coperchio non è ancora sollevabile);
- 2) ribaltamento dei volantini, che libera il coperchio per la rotazione o per il ribaltamento.

Questa doppia manovra (ed il sistema di ribaltamento del volantino) coincide con quella descritta al punto 3.1 del capitolo E.4.A.4 della Raccolta E relativamente ai sistemi di sicurezza per la chiusura e l'apertura di coperchi del tipo "a manovra multipla". Inoltre, prima della fase di apertura del coperchio, l'operatore può controllare la pressione interna all'apparecchio, leggendola sul manometro posto in prossimità della parte terminale della scaletta posteriore.

Il ribaltamento del volantino di comando può avvenire solo dopo che il volantino stesso sia stato completamente svitato, realizzando in tal modo un blocco meccanico del gruppo volantino nella posizione di chiusura (E.4.A.4.4.5). Sui coperchi del recipiente a pressione sono applicati adesivi indicanti le modalità d'uso e le segnalazioni del rischio.



(Fonte: www.omeps.it)

3.2 Criticità operative: la valvola di sicurezza

L'impianto per la messa a pressione della cisterna è costituito da un compressore attivato dal motore del trattore su cui è installato. Sempre con riferimento al modello CM 39, l'aria prodotta dal compressore arriva al tubo collettore della cisterna per mezzo di un tubo costituito da un primo tratto in gomma, cui segue il restante tratto in acciaio inox; quest'ultimo tratto è dotato di valvola di sicurezza (marca HEROSE, tipo 06505, che intercetta pressioni superiori a quella di funzionamento della cisterna), attacchi per la fluidificazione della coppa di lancio (per l'immissione dell'aria nel contenitore e l'alimentazione della spinta) e attacco per lo sfiato del tubo collettore.

Tutti i sopracitati attacchi sono azionati tramite valvole a sfera.

La valvola di sicurezza è un accessorio destinato a prevenire possibili sovrappressioni all'interno del contenitore. Tale valvola è posizionata sul tubo di immissione dell'aria, in modo tale da intercettare l'aria che proviene dal compressore e che entra all'interno del

contenitore. In caso di necessità, l'intervento di tale valvola fa scaricare in atmosfera l'aria proveniente dal compressore, evitando così che la pressione all'interno del contenitore possa aumentare. Affinché ciò si verifichi, la portata di tale valvola deve ovviamente essere superiore a quella prodotta dal compressore.

Di seguito si riporta, sempre per il modello CM 39, un esempio di dimensionamento eseguito per calcolare la portata di scarico della valvola di sicurezza (di cui si riportano di seguito le caratteristiche) in modo tale da poterla confrontare con la portata prodotta dal compressore a vite.

La valvola di sicurezza e i compressori a vite considerati nel calcolo hanno le seguenti caratteristiche:

VALVOLA DI SICUREZZA		Marca	HEROSE
Tipo	06505	Diametro orifizio	31 mm
Diametro nominale	31 mm	Coefficiente di efflusso (K)	0,68
Area orifizio (A)	754 mmq	Pressione di taratura	2 bar
Temperatura di calcolo	20 °C	Portata di aria scaricata (Qv)	1123 mc/h

COMPRESSORI A VITE	GHH-RAND	BLACKMER
Tipo	CG 80	MISTRAL 2C
Velocità di rotazione	2000 [rpm/min]	2000 [rpm/min]
Pressione di esercizio	2 [bar]	2,5 [bar]
Portata (Qc)	560 [mc/h]	630 [mc/h]
Portata (Qc)	9334 [lt/min]	10500 [lt/min]

A conferma della bontà del calcolo, si verifica che la portata di scarico della valvola di sicurezza ($Q_v = 1123 \text{ mc/h}$) è maggiore di quella del compressore ($Q_c = 630 \text{ mc/h}$).

In relazione invece al posizionamento di detta valvola, sono state apportate nel tempo modifiche progettuali a seguito di criticità operative riscontrate nel corso delle operazioni di scarico della cisterna. Nelle immagini seguenti è visibile la differente posizione della valvola nella precedente versione progettuale (situazione A) rispetto a quella attuale (situazione B).



Situazione A – Posizione della valvola prima della modifica



Situazione B – Posizione della valvola dopo la modifica

L'esperienza accumulata nel tempo con l'adozione della vecchia soluzione ha evidenziato rischi per l'operatore nel corso delle operazioni di scarico in quanto l'ubicazione della valvola non consentiva a quest'ultima di "leggere" eventuali anomalie di pressione su un tratto di tubazione che restava al di fuori del suo raggio d'azione; lo spostamento dunque della valvola nella posizione dell'attuale soluzione progettuale dà invece la possibilità di valutare tali anomalie sull'intero sviluppo della tubazione, consentendo l'intervento e lo scarico della pressione in eccesso a garanzia della sicurezza dell'operatore.

3.3 L'analisi dei rischi

Per completezza espositiva si riporta l'analisi dei rischi effettuata dall'Azienda, anche in considerazione del fatto che il siloveicolo è regolamentato da altre Direttive per quanto riguarda l'utilizzo come veicolo stradale. In tale analisi sono evidenziati i rischi che possono insorgere durante l'utilizzo e la manutenzione, propriamente correlati al recipiente a pressione.

La classificazione delle soluzioni adottate è la seguente:

- a) Soluzioni per eliminare e/o ridurre il rischio
- b) Applicazione delle opportune misure di protezione contro i rischi che non possono essere eliminati
- c) Informazioni agli utilizzatori circa i rischi residui

CAUSA	Sovrapressione oltre la massima pressione di servizio
EFFETTO	Esplosione, rottura del serbatoio, cricche, deformazioni permanenti
PERICOLO	Proiezione di parti metalliche, fuoriuscita di aria e prodotto, inquinamento, danni a persone o cose
SOLUZIONE	a) Il serbatoio è progettato con opportuni margini di sicurezza b) L'impianto sarà dotato della prescritta valvola di sicurezza c) In targhetta e nel manuale d'uso è riportata la massima pressione di esercizio

CAUSA	Temperatura del prodotto oltre i limiti di progetto
EFFETTO	Esplosione, rottura del serbatoio, cricche, deformazioni permanenti
PERICOLO	Proiezione di parti metalliche, fuoriuscita di aria e prodotto, inquinamento, danni a persone o cose
SOLUZIONE	a) Il serbatoio è progettato con opportuni margini di sicurezza b) In targhetta e nel manuale d'uso sono riportati i limiti della temperatura

CAUSA	Modalità di apertura o chiusura dei passi d'uomo non conforme, utilizzando martelli od attrezzi impropri, senza aver sfiato il recipiente
EFFETTO	Rottura elementi passo d'uomo, esplosione o rottura del serbatoio o del coperchio
PERICOLO	Proiezione di parti metalliche, fuoriuscita di aria e prodotto, inquinamento, danni a persone o cose
SOLUZIONE	a) Adozione di sistemi a chiusura multipla b) Adozione di valvola di sfiato e manometro per accertare la pressione interna c) Nel manuale d'uso e negli adesivi sono riportati le modalità e le avvertenze

CAUSA	Adduzione di eccessiva portata di fluido
EFFETTO	Sovrapressione con conseguenti cricche, deformazioni permanenti, incisioni nelle lamiere, esplosione o rottura del serbatoio
PERICOLO	Proiezione di parti metalliche, fuoriuscita di aria e prodotto, inquinamento, danni a persone o cose
SOLUZIONE	a) Il serbatoio è progettato con opportuni margini di sicurezza b) L'impianto sarà dotato della prescritta valvola di sicurezza c) Nel manuale d'uso è riportata la massima portata di fluido correlata alla valvola di sicurezza

CAUSA	Manomissione dispositivi di sicurezza
EFFETTO	Possibile caduta al suolo o violento distacco di parti accessorie
PERICOLO	Capovolgimento, caduta al suolo o violento distacco di parti accessorie, fuoriuscita del prodotto e aria o olio idraulico inquinamento e danni a persone o cose
SOLUZIONE	a) L'attrezzatura è stata concepita con comandi definiti "uomo presente" per evitare manovre accidentali anche in caso di manomissione dei dispositivi di sicurezza (micro e pressostati) b) I dispositivi sono applicati in posti non accessibili c) Nel manuale d'uso sono riportate le prescrizioni e le avvertenze

4. Conclusioni

In questo articolo ci si è soffermati tanto sulle caratteristiche proprie dei siloveicoli quanto, più in generale, sulla tematica della sicurezza degli apparecchi e impianti a pressione, nella consapevolezza che investire in sicurezza resta, ad oggi, l'impegno più proficuo e produttivo per gli addetti ai lavori e per quanti gravitano intorno alla produzione ed alla fruizione dei mezzi di cui si è finora parlato.

Un'ultima osservazione, in esito al lavoro svolto, è la messa in evidenza dell'importanza dei controlli e delle verifiche che permettono una reale e tempestiva valutazione degli effetti anomali e della ricerca, a volte difficoltosa, delle cause che li hanno determinati.

Bibliografia

[1] Regione Emilia Romagna: Anomalie attrezzature a pressione. Gruppo Regionale Attrezzature a pressione - III ed. Anno 2016

[2] Ing. De Lucia – Uot Milano: Apparecchi e recipienti a pressione (PED). Punto su aspetti normativi e gestionali

Dichiarazione dell'Autore

Le foto inserite nella memoria sono ad uso libero.

Studio sulle emissioni di gas e polveri pericolosi per la sicurezza dei lavoratori in ambiente cartario

E. Becherini¹, M. Gatto¹, N. Bravi², M. Franchi², L. Bini³, D. Calamari³

¹ Ener Consulting Srl

² Inail - Uot di Lucca

³ Lucart SpA

Sommario

L'articolo si propone di esporre problematiche ingegneristiche e quindi dare spunti di riflessione su tematiche inerenti la emissioni di gas combustibili e polveri nelle cartiere industriali produttrici di carta *Tissue*.

Nella fattispecie saranno esaminate su vari parti di un classico impianto (cappe monolucido, aspirazione polveri, abbattimento polveri), di proprietà di Lucart S.p.A. sito a Porcari (LU), denominato linea PM4, le problematiche potenzialmente nocive agli operatori, inerenti a:

- emissione CO, NO_x, CO₂, SO_x come sottoprodotti della combustione;
- emissioni gas H₂S nelle tine di preparazione della carta;
- emissioni di polveri di carta.

Per brevità abbiamo ommesso lo studio dell'emissione di altri gas che potrebbero essere emessi dalle tine come ad esempio il cloro gassoso Cl₂ (che sarà effettuato nel breve futuro). Lo studio è stato così strutturato:

- analisi dei parametri inquinanti tramite normative europee ed internazionali;
- studio dell'emissione e concentrazioni attese degli agenti inquinanti;
- corrette classificazioni ATEX delle polveri di cartiera tramite norme nazionali.

1. Definizioni rilevanti

Si danno qui le principali definizioni di termini utilizzati nel presente articolo:

Acronimo	Definizione
ACGIH [15]	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
TLV-TWA [15]	È la concentrazione media (relativa ad una giornata lavorativa di 8 ore, ovvero ad una settimana lavorativa di 40 ore) alla quale, quasi tutti i lavoratori possono essere esposti, ripetutamente, giorno dopo giorno, senza subire effetti dannosi alla salute.
TLV-STEL [15]	È la concentrazione massima alla quale i lavoratori possono essere esposti per un breve periodo di tempo (pari al massimo a 15 minuti nell'arco delle 8 ore lavorative) senza che si producano irritazioni, alterazioni croniche o irreversibili ai tessuti, narcosi di intensità sufficiente ad aumentare il rischio di danni accidentali. Le escursioni giornaliere non possono essere più di quattro, deve intercorrere un intervallo di almeno 60 minuti e il TLV-TWA giornaliero non deve essere superato.
LEL	Limite inferiore di esplosibilità. Rappresenta il limite inferiore della concentrazione di una miscela aria-polvere combustibile per cui, in presenza di un opportuno innesco, si ha la combustione della miscela stessa.

Tabella 1. Definizioni

2. Introduzione

Il problema delle emissioni di inquinanti e polveri da impianti di produzione della carta richiede un approccio multidisciplinare, al fine di comprendere bene la fenomenologia che porta alle suddette emissioni. Dall'osservazione del processo produttivo si possono individuare tre categorie di emissioni:

- Emissioni dei prodotti di combustione nei luoghi di lavoro: i gas combustibili sono necessari per produrre il calore necessario all'essiccazione della carta sul monolucido. Questi prodotti sono di interesse per gli effetti avversi che possono avere sull'organismo umano in caso di esposizioni accidentali e/o prolungate.
- Rilasci di idrogeno solforato (H₂S) all'interno dalle "tine" e vasche di processo: questi prodotti sono di interesse per gli effetti avversi che possono avere sull'organismo umano in caso di esposizioni accidentali.
- Emissione di polveri carta durante il processo produttivo: riguardo il presente punto lo studio sarà focalizzato sulle problematiche connesse all'esplosività delle polveri di carta.

A titolo informativo si riporta la configurazione tipica di una macchina continua ripreso dall'articolo del SAFAP 2014 [16]: tali macchine sono contenute in capannoni industriali con la/e tine di macchina.

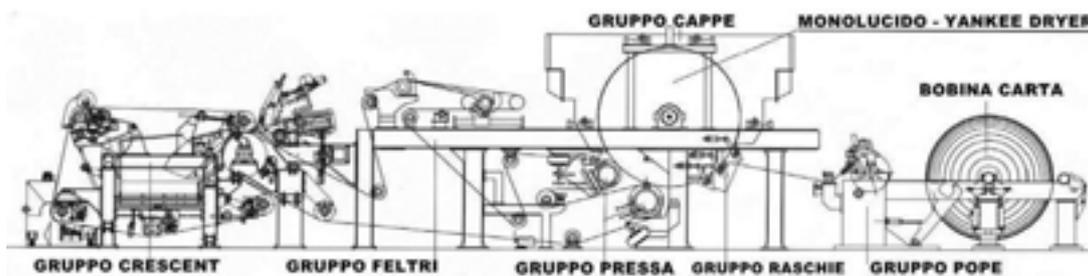


Figura 1. Macchina continua [16]

3. Analisi dei parametri inquinanti tramite normative europee ed internazionali

Di seguito sono definiti i principali inquinanti ambientali identificati sulla linea produttiva PM4 di Lucart con particolare riferimento ai prodotti dalla combustione del gas naturale (utilizzato come alimentazione per i bruciatori installati a monte delle cappe del cilindro monolucido) e alla sezione ad umido "wet" del processo di produzione della carta.

Inquinante	Descrizione	Luogo di generazione in cartiera	Effetti sulla salute umana
Monossido di carbonio (CO)	Gas tossico incolore, insapore, non irritante, inodore; si mescola liberamente con aria in qualsiasi proporzione e può formare miscele esplosive con l'aria in determinate concentrazioni.	La principale sorgente di emissione in ambiente cartario si ha durante la combustione incompleta del gas naturale utilizzato per alimentare i bruciatori delle cappe del monolucido.	Nel corpo umano reagisce con l'emoglobina per formare carbossiemoglobina (COHb). La progressiva formazione di COHb dipende dalla durata di esposizione, dalla concentrazione del gas inalato, e dalla ventilazione alveolare. Una volta formatasi l'emoglobina non è più in grado di captare e trasportare l'ossigeno: il risultato è il manifestarsi dell'ipossia anemica.

Inquinante	Descrizione	Luogo di generazione in cartiera	Effetti sulla salute umana
Biossido di carbonio (CO ₂)	Gas inodore, incolore e più pesante dell'aria.	La principale sorgente di emissione in ambiente cartario si ha durante la combustione completa del metano.	Il principale rischio connesso con la presenza di CO ₂ è il rischio asfissia: quando la concentrazione di anidride carbonica nell'aria ambiente incrementa, la capacità polmonare viene compromessa.
Ossidi di azoto (NO _x)	La sigla NO _x identifica in modo generico gli ossidi di azoto che si producono come sottoprodotti durante una combustione che avvenga utilizzando aria. L'ossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO ₂) sono le specie presenti in concentrazioni più elevate e sono quelle maggiormente studiate e insieme vengono generalmente indicati come NO _x .	Emissioni di ossidi di azoto sono date dai processi di combustione da combustibili fossili, per lo più in forma di monossido di azoto (NO) e alcuni sotto forma di biossido di azoto (NO ₂). Le concentrazioni di NO _x riscontrate in ambienti chiusi dipenderanno dalle specifiche dal tipo di combustione e dalla ventilazione.	L'NO ₂ è, tra i vari ossidi di azoto, il più importante per la salute umana: questo gas è 4 volte più pericoloso dell'NO ma, va ricordato che quest'ultimo è in grado di ossidarsi facilmente in NO ₂ una volta in aria. L'NO ₂ provoca irritazione delle vie aeree fino al broncospasmo negli asmatici e mantenimento dello stato di infiammazione cronica. Gli effetti a lungo termine includono alterazioni polmonari a livello cellulare e tissutale, e aumento della suscettibilità alle infezioni polmonari batteriche e virali.
Idrogeno solforato (H ₂ S)	Gas incolore che presenta un forte odore tipico a basse concentrazioni, ma inodore in caso di alte concentrazioni.	Si sviluppa spesso nelle immediate vicinanze degli spappolatori e soprattutto delle vasche di accumulo delle acque di ricircolo, canalizzazioni e relative serrande. La sua formazione è più probabile durante il periodo estivo ed il problema si evidenzia in particolar modo dopo il fermo degli impianti. Il problema si intensifica quando la materia prima utilizzata è la carta da macero, ma questo processo può avvenire anche quando si utilizza la cellulosa pura.	Un'esposizione a bassi livelli produce irritazione agli occhi ed alla gola, tosse, accelerazione del respiro e formazione di fluido nelle vie respiratorie. Ad alte concentrazioni uccide il nervo olfattivo rendendo impossibile la percezione del suo sgradevole odore e può causare incoscienza nell'arco di pochi minuti.

Tabella 2. Principali inquinanti gassosi

L' H₂S si può rintracciare per processi chimici che avvengono nelle tine e vasche, mentre gli altri, sono i gas di combustione che servono per l'asciugatura della carta ed immessi nelle cappe sopra il cilindro monolucido.

Si fa presente inoltre, che anche se Lucart non usa gas metano con tracce di zolfo, questo potrebbe essere comunque presente in altre cartiere e quindi tra i gas provenienti dalla combustione potrebbe esserci anche gli SO_x.

Inquinante	Descrizione	Luogo di generazione in cartiera	Effetti sulla salute umana
Ossidi di zolfo (SO _x)	Con il termine SO _x si indicano diversi composti gassosi dello zolfo: tra questi ossidi, i più importanti e i più diffusi per la loro alta concentrazione sono l'SO ₃ e l'SO ₂ . Quest'ultimo è un gas incolore, dall'odore soffocante, estremamente solubile in acqua ed è circa due volte più pesante dell'aria. Reagisce con l'O ₂ formando SO ₃ e per successiva umidificazione può portare alla formazione di H ₂ SO ₄ .	Emissioni di ossidi di zolfo sono date dai processi di combustione del metano contenente basse concentrazioni di traccianti a base sulfurea. Dalla combustione vengono prodotti ossidi di questo elemento: anidride solforosa o biossido di zolfo (SO ₂) e anidride solforica o triossido di zolfo (SO ₃).	A causa dell'elevata solubilità in acqua il biossido di zolfo viene facilmente assorbito dalle mucose del naso e del tratto superiore dell'apparato respiratorio. Brevi esposizioni di 10 min a concentrazioni di 3 mg/m ³ provocano un aumento del ritmo respiratorio e del battito cardiaco; concentrazioni di 25 mg/m ³ provocano irritazioni agli occhi, al naso ed alla gola, oltre ad un aumento della frequenza cardiaca. Concentrazioni maggiori di 5 g/m ³ producono asfissia tossica con morte per collasso cardiocircolatorio.

Tabella 3. Inquinanti gassosi contenenti zolfo

I gas provenienti dalla combustione, se i flussi sono ben bilanciati nelle cappe, come nel caso di Lucart, dovrebbero essere assenti: tuttavia in mancanza di sistemi di rilevazione affidabili non se ne può escludere la presenza.

Nella tabella seguente sono riassunti i limiti di esposizione per ogni inquinante identificato:

Inquinante	Limite italiano D.Lgs. 81/08		Limite ACGIH TLV® [1]		Valori limiti di esposizione
	8 h [ppm]	15 min [ppm]	TWA [ppm]	STEL [ppm]	
CO	---	---	25	---	100 mg/m ³ (87 ppm) per 15 min 60 mg/m ³ (52 ppm) per 30 min 30 mg/m ³ (26 ppm) per 1 h 10 mg/m ³ (9ppm) per 8 h
CO ₂	5000	---	5000	30000	TVL-TWA 5000 ppm TVL-STEL 30000 ppm
NO ₂	---	---	3	5	TVL-TWA 3 ppm TVL-STEL 5 ppm
NO	---	---	25	---	TVL-TWA 25 ppm
SO ₂	---	---	2	5	TVL-TWA 2 ppm TVL-STEL 5 ppm
H ₂ S	---	---	10	15	TVL-TWA 10 ppm TVL-STEL 15 ppm

Tabella 4. Limiti di esposizione

Come si rileva dalla tabella 4, il TUSL norma solamente la presenza di biossido di carbonio (CO₂), quindi per determinare il rischio di esposizione degli operatori agli altri gas si è fatto uso di normative internazionalmente riconosciute di uso comune in altri settori industriali.

3.1 Stato attuale e sviluppi futuri sulla messa in sicurezza dei luoghi di lavoro

Per la rilevazione degli inquinanti, in funzione delle concentrazioni studiate per via teorica (attualmente tramite il software di simulazione ALOHA® [13] e a breve tramite specifici software CFD), si è valutato la possibilità, in futuro, di posizionare degli adatti rilevatori di gas per ogni tipologia di gas tossico identificato, dei dati ambientali e della posizione dei lavoratori.

Perché i rilevatori di gas siano intrinsecamente sicuri, si farà uso della norma EN 60079-29-3 [9] che, anche se specificatamente sviluppate per problematiche ATEX, è stata ritenuta applicabile. In particolare quest'ultima permette di progettare in logica SIL i sistemi di rilevazione di gas declassando il rischio a livelli voluti e definiti tramite l'applicazione dei concetti SIL come da norme IEC 61511 [10] e IEC 61508 [11].

4. Studio delle problematiche connesse alla polvere di carta

Nel settore Tissue, oltre al ben noto rischio incendio connesso all'impiego delle materie prime e alla natura stessa del prodotto finito, è nota la problematica connessa alle esplosioni delle polveri di carta che, inevitabilmente, sono generate dal processo produttivo.

Il primo passo per poter effettuare una corretta classificazione dei luoghi è la determinazione delle proprietà chimico-fisiche della polvere combustibile. Sarebbe infatti opportuno che le cartiere, in funzione della tipologia di carta Tissue che devono produrre, riuscissero ad individuare le proprietà della polvere generata, almeno per famiglie di carta con caratteristiche simili. In assenza di specifiche analisi sulle polveri tipiche presenti in cartiera, è stata condotta una stima cautelativa e preliminare basata sulle informazioni contenute nel Report BIA 13/97 [12], il cui estratto è riportato nella Tabella 5.

Proprietà	Valore
Classe di combustibilità	BZ5
Sovrappressione massima dell'esplosione, p_{max}	8,6 bar
Indice di esplosione, K_{St}	52 bar·m·s ⁻¹
Classe di esplosione	St2
Distribuzione granulometrica	100 % < 63 μm 15 % < 32 μm
Dimensione media delle particelle di polvere, φ_m	54 μm
Contenuto di umidità e di altre sostanze inertizzanti, U	< 12 %
Temperatura minima di accensione dello strato, $T_{5\text{mm}}$ (o $T_{12,5\text{mm}}$)	$T_{5\text{mm}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura minima di accensione della nube, T_{cl}	540 $^\circ\text{C}$
Classe di temperatura o temperatura massima superficiale, T_{max}	$T_{\text{max}} \leq 225^\circ\text{C}$
Gruppo di appartenenza della polvere, III	IIIB
Energia minima di accensione di una nube di polvere, MIE	1000 mJ
Limite inferiore di esplodibilità, LEL	30 g/m ³
Densità assoluta, ρ	900 kg/m ³

Tabella 5. Caratteristiche di esplosività della polvere di carta Tissue

Dai dati sopra riportati è possibile osservare che la polvere di carta, così caratterizzata, risulta essere di difficile innesco in relazione alle sole sorgenti di natura elettrostatica a causa dell'elevato valore della MIE. Nonostante ciò, con riferimento alla Norma EN 1127-1 [14], non possono essere trascurate tutte le altre sorgenti di innesco come ad esempio le superfici calde, le fiamme e i gas caldi, le scintille di origine meccanica, etc.

Il secondo passo verso una corretta classificazione è costituito dalla determinazione delle sorgenti di emissione delle polveri di carta. Tali sorgenti possono essere suddivise in due categorie: nubi di polveri prodotte dalle macchine e formazione di strati di polvere combustibile. Ad oggi le prime sono generalmente contenute a estensioni trascurabili tramite l'impiego di sistemi di aspirazione localizzati, mentre i depositi sono eliminati periodicamente tramite idonei programmi di pulizia delle superfici.

Occorre precisare che la cartiera in studio lavora in piena conformità ai dettami del d.lgs. 81/08 (TUSL) [1] e quindi anche in applicazione delle misure di prevenzione precedente esposte.

Per la determinazione della corretta estensione e della tipologia delle zone classificate si rimanda agli esempi specifici riportati all'interno della Norma CEI EN 60079-10-2 [5] e della Guida CEI 31-56 [7]; mentre di seguito saranno esposte alcune considerazioni basilari relative all'applicazione della Direttiva ATEX 99/92/CE [2].

Le emissioni più significative di polveri di carta avvengono nel momento del distacco della carta attraverso il coltello rasatore del monolucido e nelle macchine ribobinatrici. Con riferimento all'impianto di Lucart, la macchina continua presa in considerazione per lo studio (denominata PM4 - Figura 2), è dotata di un impianto di abbattimento polveri di tipo a ciclone-scrubber, il cui funzionamento può essere così brevemente riassunto: il ciclone permette una prima purificazione dell'aria carica di particelle di carta sfruttando il principio della forza centrifuga, infine lo scrubber provvede all'abbattimento delle particelle inquinanti rimanti tramite l'impiego di acqua nebulizzata che cattura e rimuove quasi totalmente la frazione restante di inquinanti. Una volta uscita dal filtro ad umido l'aria attraversa un elettroventilatore centrifugo e viene reimpressa in atmosfera.



Figura 2. Impianto di aspirazione macchina continua

La macchina ribobinatrice possiede un impianto di abbattimento per polveri con filtro a maniche il cui funzionamento si può così riassumere: l'aria carica di particelle di polveri di carta viene aspirata da adatte tubazioni di captazione (Figura 3), inviata ad un collettore e fatta passare attraverso un ventilatore centrifugo che la indirizza verso un filtro a maniche a scuotimento pneumatico; l'aria così depurata viene restituita in atmosfera. Per quanto riguarda gli aspetti di sicurezza anti-esplosione si precisa che l'elettroventilatore è opportunamente marcato CE , sul filtro a maniche sono installati 4 portelli antiscoppio e sulla linea di aspirazione sono presenti dei rivelatori di scintille.

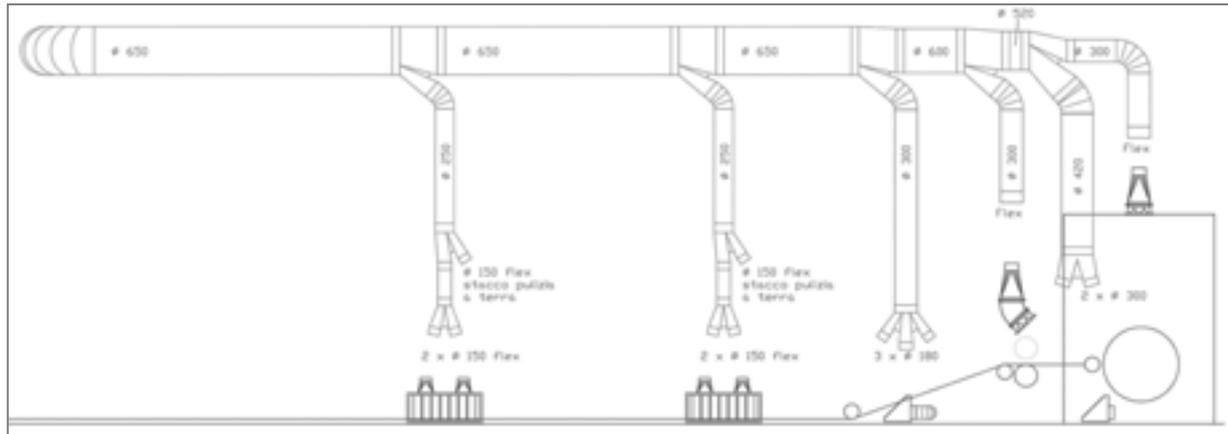


Figura 3. Impianto di aspirazione macchina ribobinatrice

I sistemi di aspirazione localizzati in prossimità delle macchine di produzione, se utilizzati al fine di abbattere le zone ATEX che si potrebbero generare, considerato il ciclo continuo di produzione della carta, devono soddisfare i seguenti requisiti, come è nel caso di Lucart: grado della captazione e asportazione della polvere alto e disponibilità della captazione e asportazione della polvere buono.

In presenza di questi requisiti, in riferimento alla Tabella GC.3.2-A della Guida CEI 31-56 [7], è possibile declassare la zona 20 originaria a zona 20 NE, ovvero a zona di estensione trascurabile. Per assicurarsi che i requisiti siano rispettati occorre accertarsi che il sistema di aspirazione artificiale riduca *“la concentrazione di polvere nell’aria in modo praticamente istantaneo al di sotto del LEL nell’immediato intorno della SE e all’interno del sistema di aspirazione”* e che l’asportazione sia *“presente in pratica con continuità”*.

Nell’impianto di produzione relativo alla macchina PM4 di Lucart la polvere accumulata viene rimossa in modo periodico. In particolare, per quanto riguarda il sistema di aspirazione della macchina ribobinatrice, si ha la pulizia delle cappe e delle pareti una volta al mese. Anche nell’impianto di aspirazione su macchina continua, si ha la pulizia delle cappe di aspirazione con cadenza mensile.

Il calcolo delle superfici di sfogo di un’eventuale esplosione all’interno dei condotti delle polveri può essere approntato facendo uso di diverse norme tecniche; tuttavia, l’uso della normativa EN 14491 [8], consente l’armonizzazione alla Direttiva 2014/34/UE [3]. In Figura 4 è possibile osservare la presenza di un portello antiscoppio su una curva del condotto di aspirazione del filtro a maniche.



Figura 4. Portello antiscoppio

5. Conclusioni

Inquinanti gassosi

L'occasione è proficua per sensibilizzare il settore cartario sul rischio derivante dall'emissione di gas inquinanti delle vasche e dalle cappe installate sulle macchine continue.

Nei capitoli precedenti sono stati identificati e descritti i principali inquinanti gassosi e sono stati definiti i valori limiti di esposizione per l'uomo, sono state analizzate le tecniche di calcolo da noi utilizzate per la determinazione del gradiente di concentrazione spaziale ed infine sono state considerate le norme ad oggi applicabili per una corretta progettazione e realizzazione di sistemi affidabili per la rilevazione dei gas.

In ultima istanza, si fa notare che pur essendo il nostro studio preliminare e sicuramente da approfondire, una maggior ventilazione dei luoghi potrà essere un utile metodo per favorire la dispersione dei gas. A questo proposito, la disposizione dei locali e le aperture nella struttura sono fondamentali per favorire il processo di cui sopra; in particolare, l'utilizzo di sistemi di apertura appositamente studiati sui tetti del sito di produzione favorisce il ricambio d'aria all'interno dei capannoni (un esempio pratico potrebbe essere la tipologia di tetto Robertson utilizzato con efficacia nelle vetrerie industriali).

Polveri combustibili

In Lucart S.p.A., in assenza di specifiche analisi sulle polveri è stata condotta una stima cautelativa e preliminare basata sulle informazioni contenute nel Report BIA 13/97 [12], è stato studiato il processo di formazione delle polveri e la conseguente dispersione nell'ambiente di lavoro. Sono stati analizzati i sistemi di ventilazione artificiale presenti sulle macchine e le procedure per la rimozione degli strati di polvere.

Gli impianti presenti in Lucart S.p.A. – sede di Porcari (LU) sulla linea PM4 appaiono conformi a quanto richiesto dalle Leggi vigenti in materia di ATEX polveri.

Altresì, visto lo scopo divulgativo dell'articolo, che vuol essere uno strumento di miglioramento in termini di sicurezza, si consiglia ad i produttori cartari di tenere sempre sotto controllo e verificare lo stato dell'arte riferito all'impatto che le polveri di carta generate nel proprio stabilimento produttivo potrebbero avere sulle tematiche ATEX.

Infatti, se non studiato in maniera scrupolosa, il rischio esplosione potrebbe comunque essere presente, specialmente nella parte finale del sistema di aspirazione delle polveri costituito essenzialmente dal sistema di filtrazione (generalmente filtri a maniche) perché la classificazione potrebbe essere grossolana o perché i sistemi di aspirazione potrebbero avere un grado della captazione e asportazione della polvere insufficienti e disponibilità della captazione e asportazione della polvere di bassa affidabilità. Inoltre, anche tramite l'impiego di sistemi di aspirazione, una importante quantità di polvere potrebbe venire a depositarsi sulle superfici interne dei capannoni contenti le macchine: tale polvere potrebbe essere soggetta a perturbazioni che ne potrebbero determinare la risospensione con la conseguente formazione di una nube esplosiva che, in presenza di attrezzature sia elettriche che meccaniche costituenti probabili fonti di innesco efficaci, potrebbero determinare una severa esplosione.

6. Bibliografia

[1] d.lgs. 81/08 e s.m.i. - Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro

[2] Direttiva ATEX 99/92/CE - Direttiva relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive

- [3] Direttiva 2014/34/UE - Direttiva concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva
- [4] CEI EN 60079-10-1 - Atmosfere esplosive. Parte 10-1: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas
- [5] CEI EN 60079-10-2 - Atmosfere esplosive. Parte 10-2: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili
- [6] Guida CEI 31-35 - Atmosfere esplosive. Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87): esempi di applicazione
- [7] Guida CEI 31-56 - Guida all'applicazione della Norma CEI EN 61241-10 (CEI 31-66) "Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri esplosive"
- [8] UNI EN 14491 - Sistemi di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri
- [9] EN 60079-29-3 - Atmosfere esplosive
Parte 29-3: Rilevatori di gas – Guida relativa alla sicurezza funzionale dei sistemi fissi di rilevazione gas
- [10] IEC 61511 - Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector
- [11] IEC 61508 - Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
- [12] BIA-Report 13/97 - Combustion and explosion characteristics of dusts
- [13] ALOHA® (AREAL LOCATIONS OF HAZARDOUS ATMOSPHERES) 5.4.4 – Technical documentation
- [14] UNI EN 1127-1:2011 - Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia
- [15] 2018 TLVs and BEIs, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2018.
- [16] Atti del convegno SAFAP 2014 N.Bravi, E.Franchi. "Monolucido – Yankee Dryer. L'esercizio in sicurezza", 2014.

Attrezzature con parti a pressione che presentano anche rischi trattati da altre direttive di prodotto

E. Bemporad¹, E. Carducci¹, L. Di Donato¹, A. Ferraro¹, A. Fortuni¹, L. Tomassini¹

¹ Inail - Dit

Sommario

Il d.lgs. 81/2008, all'art. 69 c. 1 lett. a), definisce attrezzatura di lavoro "qualsiasi macchina, apparecchio, utensile o impianto¹ destinato ad essere usato durante il lavoro e, al successivo art. 70 c. 1, prescrive per le attrezzature di lavoro messe a disposizione dei lavoratori la conformità alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto in presenza delle quali sono state costruite. Tali direttive comunitarie non si applicano solo alle attrezzature di lavoro ma in generale ai prodotti che ricadono nel loro campo di applicazione, secondo le definizioni date".

La Guida all'attuazione della normativa UE sui prodotti [1 pag. 23] ribadisce che un "prodotto" commercializzato sul territorio comunitario deve essere progettato e fabbricato conformemente a tutta la normativa di armonizzazione dell'UE applicabile ed essere sottoposto alle procedure di valutazione della conformità ai sensi di tutta la legislazione applicabile, se non disposto altrimenti. Viene inoltre precisato che, laddove lo stesso "prodotto" sia disciplinato da due o più atti di armonizzazione dell'UE, l'applicazione di alcuni di essi può a volte essere esclusa adottando un approccio che preveda un'analisi dei rischi del prodotto, tenuto conto dell'uso previsto definito dal fabbricante.

Vi sono pertanto direttive/regolamenti comunitari che, in caso di pericoli interamente o parzialmente trattati in modo più specifico, si applicano o possono applicarsi in luogo od in aggiunta di altri.

In questa casistica, con riferimento al pericolo "pressione", rientrano la direttiva 2014/68/UE (di seguito Ped), relativa agli apparecchi a pressione e anche la direttiva 2014/29/UE (di seguito Spvd), relativa ai recipienti semplici a pressione.

In particolare, la Ped esclude dal proprio campo di applicazione le attrezzature appartenenti alla categoria I a norma dell'art. 13 della stessa direttiva, qualora contemplate da una delle altre direttive/regolamenti di prodotto da essa elencati nell'art. 1, comma 2 lettera f) (macchine, ascensori, bassa tensione, dispositivi medici, apparecchi a gas, atex). L'art. 1, comma 2 della Ped prevede inoltre e ulteriori esclusioni di attrezzature riconducibili ad altre direttive di prodotto o di omologazione.

La Spvd non prevede invece analoghe esclusioni e pertanto, così come nel caso delle attrezzature in pressione di categoria superiore alla I, la direttiva specifica sulla pressione, Spvd o Ped, può applicarsi in aggiunta alle direttive/regolamenti che trattano gli altri rischi.

Tali indicazioni generali sui campi di applicazione e sulla gestione delle loro potenziali sovrapposizioni, sono più o meno ribadite in ciascuna delle direttive/regolamenti citati, nonché trattate nelle rispettive Guide della Commissione Europea. Ciò non toglie tuttavia che, seppur chiara in termini generali e di principio, l'individuazione della o delle direttive/regolamenti applicabili, non sempre risulta immediata dal punto di vista tecnico/operativo. In alcuni casi i fabbricanti, cui è demandata la responsabilità di verificare se il loro prodotto rientri o no nel campo di applicazione di un determinato atto di armonizzazione dell'UE, potrebbero avere delle incertezze.

La presente memoria, dopo una disamina del contesto normativo e delle interpretazioni ufficiali ad oggi disponibili, sulla base dell'esperienza maturata dall'Organismo Notificato

¹ Inteso come il complesso di macchine, attrezzature e componenti necessari all'attuazione di un processo produttivo

Inail 0100 per la direttiva Ped e dal Laboratorio II Macchine e attrezzature di lavoro del Dit, intende fornire un contributo per la corretta scelta della o delle direttive/regolamenti da applicare, attraverso la trattazione di alcuni casi specifici.

1. Introduzione

Nel caso di applicazione simultanea di più atti di armonizzazione dell'UE, un “prodotto” commercializzato sul territorio comunitario deve essere progettato e fabbricato conformemente a tutta la normativa di armonizzazione dell'UE applicabile al momento dell'immissione sul mercato ed essere sottoposto alle procedure di valutazione della conformità da essa previste, se non disposto altrimenti [1]. Alcuni atti di armonizzazione UE escludono infatti dal proprio campo di applicazione i prodotti contemplati da altri atti o incorporano i requisiti essenziali di altri atti, evitando così la “duplicazione” di requisiti o di procedure di valutazione della conformità. In altri casi non è invece così, ma vale comunque il principio generale dell'applicazione simultanea quando i requisiti sono complementari tra loro. Il caso di sovrapposizione rispetto allo stesso prodotto, rischio o impatto può essere risolto privilegiando l'atto di armonizzazione più specifico. A tal fine è di solito necessaria un'analisi dei rischi del prodotto, o talvolta un'analisi della sua destinazione, che determina quale sia la legislazione applicabile; nello specificare i rischi connessi a un prodotto, il fabbricante può anche ricorrere alle pertinenti norme armonizzate applicabili al prodotto in questione [1 pag. 23-24].

Talune attrezzature a pressione ricadenti nel campo di applicazione della Ped possono essere oggetto di altre direttive/regolamenti adottati dall'UE, le cui disposizioni riguardano anche il rischio derivante dalla pressione e, ove il loro livello di rischio sia modesto (categoria I della direttiva Ped) rispetto ad altri rischi presenti, dette direttive sono considerate sufficienti per un'adeguata prevenzione dei rischi derivanti anche dalla pressione.

La Spvd invece non esclude dal suo campo di applicazione quei recipienti semplici a pressione che ricadono o potrebbero ricadere nel campo di applicazione di altre direttive/regolamenti, in ragione delle loro caratteristiche funzionali, oppure di ulteriori rischi presenti oltre alla pressione, oppure del fatto che siano destinati ad essere impiegati per costituire o per allestire un “prodotto” di altra natura (macchine, ascensori, ecc.).

A rendere più difficile il compito del fabbricante che deve individuare la o le direttive/regolamenti di riferimento, si aggiunge la notevole variazione del concetto di “prodotti finiti” tra i diversi atti di armonizzazione. Gli oggetti disciplinati dalla normativa vengono definiti, da caso a caso, prodotti, attrezzature, apparati, dispositivi, apparecchiature, strumenti, materiali, insiemi, componenti o componenti di sicurezza, unità, accessori, sistemi, macchine, quasi-macchine, ecc. Ad esempio, la Ped introduce la definizione di “accessori di sicurezza”, mentre la Direttiva Macchine quella di “dispositivi di sicurezza” e la Direttiva Ascensori di “componenti di sicurezza”, con elenchi/definizioni differenti; il Regolamento Apparecchi a Gas inserisce i “dispositivi di sicurezza” nella definizione di “accessori” mentre la Direttiva Atex privilegia il termine “dispositivi di sicurezza” pur distinguendo tra “sistemi di protezione” e “componenti” in base alla dotazione o meno di funzioni autonome. Il concetto di “insieme” è presente invece nella Ped e nella Direttiva Macchine, anche se con connotazioni differenti.

La necessità di decidere qual è la normativa da applicare ad un prodotto, può intervenire in diversi momenti, dall'immissione sul mercato, alla messa in servizio, così come in caso di modifiche o trasformazioni consistenti del prodotto, destinate a cambiarne le prestazioni, la finalità o il tipo originari, al punto di doverli considerare alla stregua di prodotti nuovi ovvero da sottoporre nuovamente a valutazione di conformità, in particolare se dalla valutazione del rischio si giunge alla conclusione che la natura del pericolo è cambiata o che il livello del rischio è aumentato.

Spetta sempre al fabbricante valutare se una combinazione di prodotti e parti debba essere considerata alla stregua di un prodotto finito in rapporto al campo di applicazione del o degli atti di armonizzazione UE pertinenti.

La complessità delle procedure previste dalle direttive/regolamenti, le differenze tra gli oneri che la valutazione di conformità può comportare (ad es. non sempre è richiesta una valutazione di conformità di terza parte), ma anche il differente lessico utilizzato dalla Ped rispetto alle altre direttive citate dall'art. 1, comma 2 della stessa Ped, possono costituire elementi di confusione per i fabbricanti. La presente memoria è dunque concepita nell'ottica di estrapolare, sia dalle interpretazioni ufficiali che da casi pratici affrontati, elementi utili a valutare quali siano la o le direttive/regolamenti effettivamente applicabili. Inoltre, nel caso in cui non si applichi la Ped, si intende evidenziare come possa essere gestito il rischio derivante dalla pressione pur se non ritenuto prevalente rispetto ad altri rischi.

2. Il quadro normativo: la Ped, la Spvd e le altre direttive di prodotto potenzialmente “interferenti”

La Ped, applicabile alla progettazione, fabbricazione e valutazione di conformità delle attrezzature a pressione e degli insiemi² sottoposti ad una pressione massima ammissibile PS superiore a 0,5 bar, al comma 2 dell'art. 1 prevede una serie di esclusioni fra cui, alla lettera f), le attrezzature appartenenti al massimo alla categoria I a norma dell'art. 13 della direttiva, qualora contemplate da una delle seguenti direttive/regolamenti di prodotto:

- direttiva 2006/42/CE³ (di seguito “Direttiva Macchine”),
- direttiva 2014/33/UE⁴ (di seguito “Direttiva Ascensori”),
- direttiva 2014/35/UE⁵ (di seguito “Direttiva Bassa Tensione”),
- direttiva 93/42/CEE⁶ (di seguito “Direttiva Dispositivi Medici”),
- regolamento UE 2016/426⁷ (di seguito “Regolamento Apparecchi a Gas”),
- direttiva 2014/34/UE⁸ (di seguito “Direttiva Atex”).

Altre esclusioni dal campo di applicazione della Ped che interessano direttive di prodotto o di omologazione di prodotti, sono previste sempre al comma 2 dell'art.1, alle lett. e) e j). In particolare la lett. e) esclude le attrezzature destinate al funzionamento dei seguenti veicoli:

- veicoli a motore e loro rimorchi, nonché sistemi, componenti ed entità tecniche ad essi destinati (direttiva 2007/46/CE),
- veicoli agricoli e forestali (regolamento UE 167/2013),
- veicoli a motore a due o tre ruote e quadricicli (regolamento UE 168/2013).

La lett. j) esclude invece le attrezzature di cui fanno parte alloggiamenti o meccanismi in cui il dimensionamento, la scelta dei materiali, le norme di costruzione sono motivati essenzialmente da criteri di resistenza, rigidità e stabilità nei confronti degli effetti operativi statici e dinamici o per altri criteri legati al loro funzionamento e per le quali la pressione non costituisce un fattore significativo a livello di progettazione, quali:

- i) motori, comprese turbine e motori a combustione interna;

² Definiti dalla direttiva rispettivamente:

- «attrezzature a pressione»: recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza ed accessori a pressione, compresi, se del caso, elementi annessi a parti pressurizzate, quali flange, raccordi, manicotti, supporti, alette mobili;
 - «insiemi»: varie attrezzature a pressione montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale.

³ che ha sostituito la direttiva 89/392/CEE e s.m.i., il cui testo è stato consolidato nella 98/37/CE

⁴ che ha sostituito la direttiva 95/16/CE,

⁵ che ha sostituito la direttiva 73/23/CEE e s.m.i., il cui testo è stato consolidato nella 2006/95/CE

⁶ in via di sostituzione con il regolamento UE 2017/745

⁷ che ha recentemente sostituito la direttiva 2009/142/CE,

⁸ che ha sostituito la direttiva 94/9/CE

- ii) macchine a vapore, turbine a gas o a vapore, turbogeneratori, compressori, pompe ed attuatori.

Come già accennato, la Spvd non esplicita invece alcuna esclusione dal proprio campo di applicazione in caso di sovrapposizione con altre direttive di prodotto.

La Direttiva Macchine si applica, con alcune esclusioni non rilevanti ai fini della presente trattazione, a macchine, attrezzature intercambiabili, componenti di sicurezza, accessori di sollevamento, catene funi e cinghie, dispositivi amovibili di trasmissione meccanica e introduce il concetto di quasi-macchine. Tuttavia, l'art. 3 della direttiva precisa che essa non si applica ai suddetti prodotti per quei rischi coperti in maniera più specifica da altre normative di armonizzazione UE (ad esempio la Direttiva Bassa Tensione, la Direttiva Dispositivi Medici o la Direttiva Ascensori). Chiarisce inoltre che quando queste specifiche direttive/regolamenti coprono tutti i rischi associati ai prodotti trattati, tali prodotti sono interamente esclusi dallo scopo della direttiva macchine. Al contrario, quando le specifiche direttive/regolamenti coprono solo alcuni dei rischi associati ai prodotti trattati (ad esempio le sorgenti di innesco, nel caso della Direttiva Atex oppure la pressione nel caso della Ped e Spvd), tali prodotti rimangono nel campo di applicazione della Direttiva Macchine per gli altri rischi non trattati. La sovrapposizione con le direttive Ped e Spvd, che si occupano solo dello specifico rischio associato alla pressione, va pertanto affrontata alla luce di tale chiarimento.

In particolare, nelle indicazioni fornite dalla Guida della Commissione Europea [2], con riferimento alla sovrapposizione fra Direttiva Macchine e Spvd, si trova la conferma del fatto che, nel caso di recipienti semplici a pressione prodotti in serie e destinati ad essere incorporati o connessi a macchine, la Spvd si applica per coprire i soli rischi associati alla pressione, mentre la Direttiva Macchine copre in generale il rischio di rottura durante il funzionamento secondo quanto previsto in allegato I, Res 1.3.2. Con riferimento invece alla sovrapposizione fra Direttiva Macchine e Ped, cioè nel caso di apparecchi a pressione destinati ad essere incorporati o connessi a macchine, viene fatta una distinzione. Se l'attrezzatura a pressione è stata già immessa sul mercato, il fascicolo tecnico predisposto dal fabbricante della macchina deve includere la dichiarazione di conformità CE alla Ped rilasciata per l'attrezzatura a pressione e, in tal modo, il RES 1.3.2 relativo al rischio di rottura durante il funzionamento risulta soddisfatto per la parte inerente la pressione. Al contrario, se l'attrezzatura a pressione è fabbricata insieme al resto della macchina, la valutazione di conformità del prodotto dovrà essere condotta sia con riferimento alla Ped, per il rischio legato alla pressione, che alla Direttiva Macchine, per tutti gli altri rischi, e la sua dichiarazione di conformità CE dovrà fare riferimento ad entrambe le direttive.

In virtù dell'esclusione prevista dalla lettera f) suddetta, fanno però eccezione a tale regola generale gli apparecchi a pressione classificati in categoria non superiore alla I, incorporati in una macchina ricadente nello scopo della Direttiva Macchine, i quali, essendo esclusi dal campo di applicazione della Ped, sono coperti dalla Direttiva Macchine anche per i rischi legati alla rottura che può essere indotta dalla pressione durante il funzionamento; il loro fascicolo tecnico dovrà quindi contenere anche la valutazione di quest'ultimo rischio e la loro dichiarazione di conformità CE farà riferimento alla sola Direttiva Macchine.

Si ritiene utile richiamare l'attenzione sul fatto che l'incorporazione o la connessione di un'attrezzatura a pressione all'interno di una macchina, ancorché il rischio specifico legato alla pressione sia già stato valutato (nell'ambito della Ped o del RES 1.3.2 dell'allegato I della Direttiva Macchine), comporta anche la necessità di valutare le conseguenze che la presenza di tale apparecchio a pressione può introdurre rispetto alla sicurezza durante il funzionamento della macchina, anche in relazione alla specifica funzione dell'attrezzatura in pressione e alle sue modalità di interfacciamento con gli altri componenti della macchina.

La Direttiva Macchine tratta infatti gli aspetti di salute e sicurezza relativi al funzionamento globale della macchina stessa applicabili a tutti gli elementi che costituiscono la macchina e quindi anche le attrezzature a pressione. Alcuni dei RES che possono avere un impatto rilevante in relazione alla presenza di queste ultime sono ad esempio il Res 1.2.2 che richiede che la macchina sia munita degli indicatori necessari per un funzionamento sicuro e il Res 1.2.6 che richiede che in caso di avaria al circuito di alimentazione dell'energia (es. vapore, aria compressa, fluido) non si creino situazioni pericolose.

Un'ulteriore precisazione può essere utile per quanto riguarda l'approccio alla gestione del rischio legato alla pressione da parte della direttiva Ped e della Direttiva Macchine. Il Res 1.3.2 della Direttiva Macchine fornisce i principi generali di progettazione, costruzione e assemblaggio indicando di tenere conto di tutti gli aspetti che possono determinare delle rotture, quali ad esempio la resistenza alle sollecitazioni nonché l'ambiente di utilizzo; esso non fornisce alcuna indicazione specifica alla pressione, che può essere gestita utilizzando le norme armonizzate alla Direttiva Macchine di tipo B (che trattano un aspetto di sicurezza o un tipo di mezzo di protezione che può essere utilizzato su un'ampia gamma di materiali) o C (che trattano i requisiti di sicurezza per una particolare macchina o gruppo di macchine). Al contrario, la direttiva Ped fornisce indicazioni quantitative relativamente alle caratteristiche di resistenza dei materiali, indicazioni sul tipo di sforzi/sollecitazioni interne ed esterne cui devono resistere e sui metodi di calcolo per la progettazione con specifico riferimento alla pressione (Res di cui ai punti 2 - Progettazione e 4 - Materiali); anch'essa è supportata da norme armonizzate. Alcune delle norme armonizzate disponibili sono armonizzate sia alla Direttiva Macchine che alla Ped e pertanto la loro applicazione volontaria fornisce la rispondenza ai Res di entrambe le direttive⁹.

Al di là di alcuni aspetti specifici strettamente attinenti alla Direttiva Macchine, l'approccio e i principi generali sopra esposti sono trasferibili anche ai casi di sovrapposizione fra la Ped e la Spvd e le altre direttive di prodotto citate nella lettera f) di cui sopra. Di seguito sono accennate alcune precisazioni e specificità legate a tali altre direttive.

La Direttiva Ascensori si applica agli ascensori in servizio permanente negli edifici e nelle costruzioni destinati al trasporto di persone e/o cose, anch'essa con alcune esclusioni. Essa si applica inoltre ai componenti di sicurezza utilizzati negli ascensori (elencati nell'allegato III della direttiva), fra essi anche alcune valvole di sicurezza utilizzate negli ascensori oleodinamici.

Anche la Direttiva Ascensori, come la Direttiva Macchine, al comma 3 dello stesso art. 1, precisa che: *“Se per un ascensore o per un componente di sicurezza per ascensori i rischi di cui alla presente direttiva sono previsti, in tutto o in parte, da una normativa specifica dell'Unione, la presente direttiva non si applica o cessa di applicarsi a questi ascensori o componenti di sicurezza per ascensori e a questi rischi non appena diventa applicabile tale normativa specifica dell'Unione”*.

L'allegato I della Direttiva Ascensori non contiene un Res specifico che riguarda il rischio dovuto alla pressione o alla rottura durante il funzionamento ma rimanda ai Res dell'allegato I della direttiva macchine¹⁰ per tutti i rischi non esplicitamente trattati nel proprio allegato I, ivi compreso il Res 1.3.2 relativo al rischio di rottura durante il funzionamento.

⁹ Ad esempio la EN 378-2:2016 Impianti di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza ed ambientali - Parte 2: Progettazione, costruzione, prove, marcatura e documentazione e la EN 676:2003+A2:2008 Bruciatori automatici di combustibili gassosi ad aria soffiata sono armonizzate ad entrambe le direttive.

¹⁰ NB il rimando è ai soli Res della direttiva macchine, laddove non presente un Res specifico nella direttiva ascensori, e non anche alle procedure di valutazione della conformità; per queste ultime è infatti richiesta la sola applicazione di quelle previste dalla direttiva ascensori

La Direttiva Bassa Tensione si applica al materiale elettrico destinato ad essere adoperato ad una tensione nominale compresa fra 50 e 1000 V in corrente alternata e fra 75 e 1 500 V in corrente continua¹¹, fatta eccezione per alcuni materiali e fenomeni (di cui all'allegato II).

Nella Direttiva Bassa Tensione, così come nella sua Guida della Commissione Europea [3], non viene esplicitamente trattata la possibilità di sovrapposizione con le direttive Ped e Spvd. Al comma 3 dell'art. 15, infatti, viene semplicemente ribadito il concetto generico che, se al materiale elettrico si applicano più atti dell'UE che prescrivono una dichiarazione di conformità UE, per esso viene compilata un'unica dichiarazione di conformità UE in rapporto a tutti questi atti. Nelle indicazioni generali della Commissione Europea viene invece precisato che la direttiva è una "total harmonised safety Directive" nel senso che copre tutti gli aspetti di sicurezza delle attrezzature elettriche, non solo il rischio elettrico.

La Direttiva Dispositivi Medici si applica ai dispositivi medici per uso umano e ai relativi accessori¹². Anche in essa non viene esplicitamente trattata la possibilità di sovrapposizione con le direttive Ped e Spvd. Al comma 5 dell'art. 4, infatti, viene semplicemente ribadito il concetto generico che, "qualora i dispositivi siano disciplinati da altre direttive comunitarie relative a differenti aspetti e che prevedono la marcatura CE, questa indica che i dispositivi soddisfano anche le prescrizioni di queste altre direttive. Tuttavia, se una o più di tali direttive consentono al fabbricante, durante un periodo transitorio, di scegliere le disposizioni da applicare, la marcatura CE indica che i dispositivi soddisfano solo le disposizioni delle direttive applicate dal fabbricante. In tal caso, i riferimenti di queste direttive, quali pubblicati nella Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, devono essere riportati nei documenti, nelle avvertenze o nei fogli illustrativi che, conformemente a queste direttive, accompagnano tali dispositivi...".

Il Regolamento Apparecchi a Gas si applica sia agli apparecchi¹³ che agli accessori¹⁴ destinati a bruciare carburanti gassosi. Nell'articolo 1 comma 2 è previsto che essi

¹¹ NB. Le tensioni si riferiscono all'ingresso elettrico o all'uscita, e non alle tensioni che possono generarsi all'interno della attrezzature

¹² Regolamento 2017/745/UE - Articolo 2 Definizioni

«dispositivo medico»: qualunque strumento, apparecchio, apparecchiatura, software, impianto, reagente, materiale o altro articolo, destinato dal fabbricante a essere impiegato sull'uomo, da solo o in combinazione, per una o più delle seguenti destinazioni d'uso mediche specifiche:

- diagnosi, prevenzione, monitoraggio, previsione, prognosi, trattamento o attenuazione di malattie,
- diagnosi, monitoraggio, trattamento, attenuazione o compensazione di una lesione o di una disabilità,
- studio, sostituzione o modifica dell'anatomia oppure di un processo o stato fisiologico o patologico,
- fornire informazioni attraverso l'esame in vitro di campioni provenienti dal corpo umano, inclusi sangue e tessuti donati,

e che non esercita nel o sul corpo umano l'azione principale cui è destinato mediante mezzi farmacologici, immunologici o metabolici, ma la cui funzione può essere coadiuvata da tali mezzi.

Si considerano dispositivi medici anche i seguenti prodotti:

- dispositivi per il controllo del concepimento o il supporto al concepimento,
- i prodotti specificamente destinati alla pulizia, disinfezione o sterilizzazione dei dispositivi [...]

«accessorio di un dispositivo medico»: un prodotto che, pur non essendo esso stesso un dispositivo medico, è destinato dal fabbricante a essere utilizzato con uno o più dispositivi medici specifici, per permettere in particolare che questi ultimi siano impiegati conformemente alla loro destinazione d'uso, oppure per assistere specificamente e direttamente la funzionalità sul piano medico del dispositivo o dei dispositivi medici in relazione alla loro destinazione d'uso

¹³ Regolamento 2016/426/UE - Articolo 2 Definizioni

"Ai fini del presente regolamento si intende per:

1) «apparecchi», apparecchi che bruciano carburanti gassosi usati per cuocere, refrigerare, climatizzare, riscaldare ambienti, produrre acqua calda, illuminare o lavare, nonché apparecchi come bruciatori ad aria soffiata e caloriferi che devono essere muniti di tali bruciatori;

debbano essere usati nell'ambito della normale gamma di variazioni della qualità del gas e della pressione di alimentazione come stabilito dagli Stati membri. Nell'art. 1 comma 3 è inoltre precisato che il regolamento non si applica all'uso in processi che si svolgono in stabilimenti industriali. Ed infine, anche in questo caso, nell'art. 1 comma 4 è precisato che: "Se gli aspetti trattati dal presente regolamento per apparecchi o accessori sono trattati in modo più specifico da altri atti della normativa di armonizzazione UE, il presente regolamento non si applica o cessa di essere applicato a tali apparecchi o accessori per quanto riguarda i suddetti aspetti." Dunque, in relazione al rischio pressione, anche in questo caso nel caso di apparecchi di categoria superiore alla I si ricade nel campo di applicazione della Ped, mentre per quelli di categoria I si applica il Regolamento Apparecchi a Gas il cui Res 3.1.9 prevede che "Tutte le parti sotto pressione di un apparecchio devono resistere alle sollecitazioni meccaniche e termiche cui sono sottoposte senza dar luogo a deformazioni che pregiudichino la sicurezza".

La Direttiva Atex si applica a tutti i tipi di apparecchi, sistemi di protezione e componenti destinati a essere utilizzati in o in relazione ad atmosfere potenzialmente esplosive, ma riguarda anche dispositivi destinati a essere utilizzati al di fuori di atmosfere potenzialmente esplosive ma necessari o utili per il funzionamento sicuro degli apparecchi e sistemi di protezione rispetto ai rischi di esplosione. Nella maggioranza dei casi si presume che un'attrezzatura a pressione non abbia fonti proprie di innesco quando è correttamente installata secondo le indicazioni del fabbricante; se l'attrezzatura presenta la possibilità di riscaldamento delle superfici durante l'esercizio, causato esclusivamente dalla temperatura del suo contenuto, la Direttiva Atex non si considera applicabile. La valutazione dei rischi correlati alle superfici calde e alle cariche elettrostatiche, tra gli altri rischi possibili, deve essere condotta dall'utilizzatore finale per assicurare che non si inneschi alcuna atmosfera esplosiva. Un'attrezzatura Atex potrebbe anche integrare un apparecchio semplice a pressione (Spvd) in un insieme, ma si considera generalmente che le occasioni in cui si applicano entrambe le direttive siano rare [4]. La direttiva Atex, analogamente alla Ped, può invece applicarsi ai singoli apparecchi o ad una combinazione di essi, ovvero ad "insiemi" di apparecchi, qualora nella fase di integrazione si introduca un rischio di innesco non valutato per ciascuno di essi.

Nel contesto normativo appena descritto, contenente i principi generali oltre ad eccezioni specifiche per ciascuna direttiva, deve sapersi orientare il fabbricante di prodotti contenenti serbatoi o attrezzature in pressione che voglia immettere sul mercato o mettere in servizio correttamente tali prodotti, in termini di Res, di procedure di valutazione della conformità, di documentazione da produrre, ecc.

3. Casi studio e criteri per l'individuazione della direttiva applicabile

Dall'analisi del quadro normativo condotta ne consegue che, al di là dei principi generali, la situazione va valutata di volta in volta, anche in relazione alla necessità di stabilire, per taluni casi specifici, quanto il rischio "pressione" sia importante ed eventualmente se possa essere ridotto adeguatamente nell'ambito dell'applicazione di direttive non specifiche per il rischio pressione. E' per tale ragione che verranno affrontati di seguito alcuni casi pratici esemplificativi, la maggior parte di essi tratti dalle indicazioni fornite dalle Linee Guida della Commissione Europea sull'applicazione della Ped [5] e delle altre direttive in argomento. L'obiettivo è quello di chiarire meglio l'approccio da adottare ed eventualmente estenderlo a casi assimilabili.

¹⁴ Regolamento 2016/426/UE - Articolo 2 Definizioni

"Ai fini del presente regolamento si intende per: <omissis>

2) «accessori», i dispositivi di sicurezza, di controllo o di regolazione e i loro sottogruppi, destinati a essere incorporati in un apparecchio o montati per costituire un apparecchio;

L'esclusione dal campo di applicazione della Ped prevista dall'art.1, c. 2, lett. f) riguarda tutte le attrezzature **appartenenti al massimo alla categoria I** contemplate da una delle direttive di prodotto sopra elencate e di seguito trattate. Essa si applica anche agli insiemi¹⁵ della medesima categoria I in quanto le categorie definite dall'articolo 13 per le attrezzature a pressione, vengono confermate tal quali, nell'art. 14 della Ped, anche per gli insiemi a pressione.

Con riferimento a tali attrezzature e insiemi a pressione, la Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped e le Guide alle altre direttive forniscono varie indicazioni per la gestione delle interferenze, sia di principio che di dettaglio, fra cui le seguenti.

Con riferimento alla Direttiva Macchine, l'esclusione dalla direttiva Ped si riferisce all'immissione sul mercato o messa in servizio di tutte quelle attrezzature in pressione, di categoria non superiore alla I, che sono contemplate anche dalla Direttiva Macchine. Essa si applica anche a tutte le attrezzature in pressione, sempre di categoria non superiore alla I, che fanno parte di macchine, anche qualora esse siano immesse sul mercato separatamente al fine di essere installate su una macchina; in tale ultimo caso, la destinazione d'uso deve essere chiaramente indicata nelle istruzioni d'uso¹⁶.

Per tutti i casi sopra elencati, quindi, la Ped non si applica né per quanto riguarda i Res né per quanto riguarda le procedure di valutazione della conformità né per quant'altro disposto dalla stessa. Il rischio legato alla presenza della pressione viene ridotto applicando i Res previsti dalla Direttiva Macchine, primo fra tutti il Res 1.3.2 che si occupa del rischio di rottura di componenti.

Le Guide della Commissione Europea non contengono tale precisazione ma sembra logico supporre che un approccio analogo possa ritenersi valido anche per eventuali sovrapposizioni con le altre direttive che trattano tutti i rischi sopra elencate (ascensori, bassa tensione, dispositivi medici).

I **recipienti semplici a pressione** destinati ad essere impiegati per costituire una macchina o un insieme di macchine possono essere invece sempre soggetti sia alla Spvd che alla Direttiva Macchine in quanto la Spvd non prevede alcuna esclusione dal proprio campo di applicazione. Anche in questo caso, qualora il recipiente semplice a pressione sia stato immesso sul mercato separatamente, la documentazione a suo corredo rilasciata ai sensi della Spvd (istruzioni e dalle informazioni sulla sicurezza di cui all'allegato III, punto 2, ecc.) sarà acquisita dal fabbricante della macchina di cui è destinata a costituire parte integrante e inserita all'interno del fascicolo tecnico della stessa.

Ciò detto, vengono proposti di seguito alcuni esempi di attrezzature che ricadono nella casistica sopra esposta.

Ai sensi della lettera f) di cui trattasi risultano esclusi dalla Ped tutti i **compressori di categoria non superiore alla I** in quanto dotati di organi in movimento e rientranti nella definizione di "macchina". I compressori di categoria superiore alla I, non rientrano in questa esclusione e dovrebbero essere soggetti anche alla Ped, tuttavia potrebbero essere anch'essi esclusi, e quindi rientrare unicamente nel campo di applicazione della Direttiva Macchine, ai sensi dall'art.1, c. 2, lett. j) qualora la pressione non costituisca un fattore significativo a livello di progettazione. Questo può accadere per alcuni **compressori semi-ermetici**, per i quali, nella progettazione dell'involucro, prevalga l'aspetto termico/meccanico su quello di pressione¹⁷.

Gli ascensori con **sistema di azionamento oleodinamico** possono avere diverse configurazioni (pistone diretto centrale, pistone diretto laterale, pistone in taglia); e

¹⁵ parere A39 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

¹⁶ parere A26 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

¹⁷ pareri A11 e A12 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

soprattutto differenti valori della pressione e del volume di olio in relazione ai parametri di progettazione (capienza, portata, ecc.), variabili dall'ordine di grandezza di poche centinaia di chilogrammi fino a quello di alcune tonnellate. Generalmente questi ultimi sono realizzati con pistone a spinta diretta oppure con più pistoni a spinta diretta che operano "accoppiati". Il sistema di azionamento dell'ascensore oleodinamico è costituito essenzialmente da un serbatoio di olio, da una pompa comandata da un motore elettrico, da un gruppo cilindro e pistone collegato alla centralina oleodinamica (serbatoio e pompa) da tubazioni rigide o flessibili, da un gruppo di valvole per la regolazione della velocità di salita e di discesa, da componenti di sicurezza (valvola di blocco, valvola limitatrice di flusso, ecc.). Al comando di salita, il motore elettrico fa girare la pompa che invia l'olio in pressione dal serbatoio al cilindro attraverso il tubo. Il pistone posto all'interno del cilindro scorre verso l'alto determinando così il movimento della cabina.

Anche in questo caso, per stabilire se per l'immissione sul mercato è sufficiente l'applicazione della sola Direttiva Ascensori o se deve essere applicata anche la Ped, occorrerà valutare le caratteristiche di progettazione del sistema di azionamento oleodinamico per stabilire se ricade o meno nella categoria I della Ped.

Si sottolinea che, mentre il sistema di azionamento oleodinamico è un componente semplice dell'impianto, e quindi segue le regole di immissione sul mercato dell'ascensore nel suo complesso in quanto parte di esso, i "componenti di sicurezza" sono essi stessi ricadenti nel campo di applicazione della Direttiva Ascensori e quindi la loro immissione sul mercato è subordinata al rispetto delle procedure da essa previste (ivi compresa la marcatura CE e il rilascio della dichiarazione di conformità CE).

I componenti per ascensore fin qui trattati trovano le indicazioni tecniche necessarie al rispetto dei Res della Direttiva Ascensori, ivi compreso il rischio legato alla pressione, nella norma armonizzata EN 81-20, applicabile ad ascensori con valvola di sovrappressione regolata a valori non superiori a 50 MPa.

Gli ascensori con velocità inferiore a 0,15 m/s, così come i montacarichi per il solo trasporto di materiali, sono esclusi invece dalla Direttiva Ascensori e rientrano nella Direttiva Macchine. La logica sopra esposta, opportunamente ricondotta ai dettati della Direttiva Macchine, risulta applicabile anche al loro caso. A tal proposito, si precisa che le valvole di blocco destinate ad essere installate in ascensori/montacarichi ricadenti in Direttiva Macchine rientrano nell'elenco dei "dispositivi di sicurezza", mentre i sistemi di azionamento (idraulici/oleodinamici) destinati ad essere installati in una macchina possono essere riconducibili alla definizione di quasi-macchine¹⁸ data dalla direttiva macchine stessa e, in tal caso, qualora immessi sul mercato separatamente, sarebbero soggetti a quanto previsto per queste ultime (predisposizione della documentazione di cui all'allegato VII parte B della direttiva macchine, delle istruzioni per l'assemblaggio e della dichiarazione di incorporazione).

Sistemi di azionamento oleodinamico, di dimensioni ampiamente variabili a seconda del tipo di impiego, vengono utilizzati anche per svariate altre tipologie di macchine (altre macchine di sollevamento, presse, paratoie per scarichi di fondo e di superficie di dighe, ecc.) e pertanto le riflessioni fin qui fatte possono essere estese anche a tali casi.

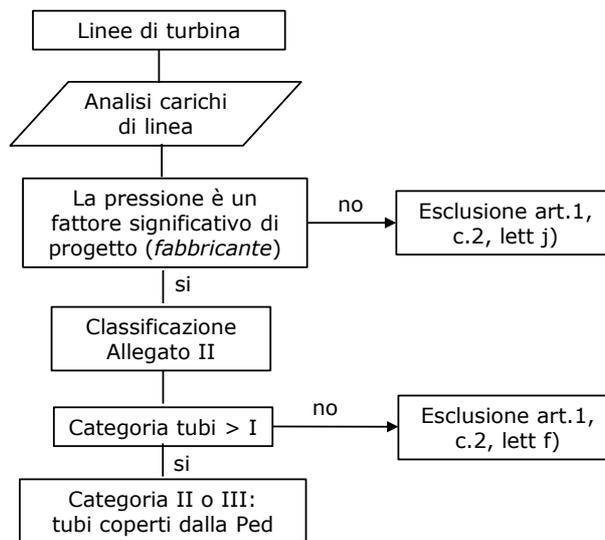
Con riferimento alle **tubazioni delle turbine**¹⁹ viene evidenziato²⁰ come l'esclusione dalla Ped possa essere in alcuni casi ricondotta alla lettera j) del c. 2 dell'art. 1), perché dovuta al fatto che la pressione non costituisce un fattore significativo di progetto, mentre in altri

¹⁸ insiememente che costituiscono quasi una macchina, ma che, da soli, non sono in grado di garantire un'applicazione ben determinata. Un sistema di azionamento è una quasi-macchina. Le quasi-macchine sono unicamente destinate ad essere incorporate o assemblate ad altre macchine o ad altre quasi-macchine o apparecchi per costituire una macchina disciplinata dalla presente direttiva.

¹⁹ definite come "linee di connessione tra differenti alloggiamenti del treno di turbina e linea di connessione tra due posizioni in un singolo alloggiamento di turbina e le tubazioni interne"

²⁰ parere A55 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

casi alla lettera f) del medesimo comma, qualora la categoria non sia superiore alla I. Di seguito è riportato il prospetto riepilogativo, tratto dalla Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped, riferito alla casistica appena descritta.



Tutte le **pentole a pressione elettriche** con PS >0,5 bar sono incluse nel campo di applicazione della Ped indipendentemente dal loro prodotto PxV^{21} . Il rischio pressione per tali pentole è comunque considerato elevato. Per questa ragione è richiesto che il loro progetto sia sottoposto a valutazione di conformità almeno secondo uno dei moduli relativi alla categoria III. Ciò si applica alle pentole a pressione alimentate da fiamma esterna così come alle pentole a pressione elettriche. Per queste ultime, oltre ad applicarsi la direttiva Ped per la pressione, si applica anche la Direttiva Bassa Tensione.

La maggior parte delle caldaie per **macchine da caffè espresso** riscaldate elettricamente sono invece escluse dall'ambito di applicazione della Ped in quanto producono acqua calda a temperature inferiori a 100°C (90-95°C) oppure, se piccole, in quanto non superano la categoria I [6].

Nelle **apparecchiature a risonanza magnetica** facenti uso di magneti superconduttori, l'avvolgimento superconduttivo è "immerso" in elio liquido a circa -269°C. Per questa tipologia d'installazione, l'apparecchiatura, oltre ad essere un dispositivo medico destinato ad indagini cliniche, è di fatto anche un dewar contenente all'interno elio liquido in tensione di vapore con la sua fase gassosa [7]. I fabbricanti di tali apparecchiature sono quindi tenuti ad effettuare una valutazione del rischio specifica e, per ogni tipologia di magneti e di attrezzature utilizzate, a dichiarare il regime di appartenenza secondo le indicazioni fornite dalla Ped. Gli organi di vigilanza e la comunità scientifica hanno preso coscienza della situazione solo a seguito di un incidente nel 2007, a valle del quale tali indicazioni sono state introdotte nelle linee guida di settore. Peraltro la richiesta di campi statici sempre più alti nella pratica clinica RM sta comportando l'utilizzo di magneti superconduttori con contenuti di criogeno sempre più elevati e dunque i fattori di rischio legati all'impianto a pressione andranno nel tempo aumentando [8]. Fanno parte dell'insieme a pressione le valvole di boil off, il disco di rottura ed il tubo di quench (tubo di espulsione dedicato per lo scarico del criogeno all'esterno in caso di rottura del disco) che rientra generalmente nell'art. 4, comma 3 della Ped e dunque è necessario soltanto che sia progettato secondo una delle corrette prassi costruttive in uso negli Stati membri. La

²¹ parere A52 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

potenziale sovrapposibilità per questa tipologia di attrezzatura riguarda naturalmente il campo di applicazione della Ped e della Direttiva Dispositivi Medici.

Le **camere iperbariche terapeutiche** possono essere considerate attrezzature a pressione 'singolari', in quanto destinate a contenere persone, peraltro spesso vulnerabili quali i pazienti, e in quanto attrezzature il cui rischio pressione risulta essere marginale rispetto ad una serie di problematiche di installazione, impiantistiche e di gestione e controllo dei parametri di esercizio [9]. Alle camere iperbariche di categoria I si applica quindi la Direttiva Dispositivi Medici mentre, a quelle di categoria superiore, anche la Ped per le parti in pressione. La norma EN 14931:2006, armonizzata alla Direttiva Dispositivi Medici, fornisce i requisiti di sicurezza e i metodi di prova associati delle camere iperbariche multiposto per terapia iperbarica.

Gli **arrestatori di fiamma e scaricatori di sovratensione**²² rientrano nel campo di applicazione della Ped quando $PS > 0,5$ bar e dovrebbero essere considerati accessori a pressione. Alcuni arrestatori di fiamma sono però coperti anche dalla Direttiva Atex e, in tal caso, sono esclusi dalla Ped se non superano la categoria I.

Si evidenzia che, in accordo alla definizione di cui all'articolo 2 comma 8, come PS è da considerarsi la pressione massima per cui l'alloggiamento dell'arrestatore è progettato. La PS non è necessariamente la pressione di esplosione che deve comunque essere considerata tra i carichi in esito all'analisi dei rischi (Res 2.2.1).

La norma EN 14460, armonizzata alla Direttiva Atex, stabilisce i requisiti costruttivi che gli apparecchi devono possedere per resistere alle pressioni di esplosione, senza deformazioni e a shock dovuti a esplosioni, con deformazioni ma senza rottura. La norma definisce inoltre i limiti di pressione e temperatura di esercizio dell'apparecchiatura potenzialmente soggetta ad esplosione. La norma EN 14460 rimanda alla norma EN 13445, nelle sue varie parti, armonizzata alla direttiva Ped, per quanto riguarda la progettazione della resistenza alla pressione di esplosione, senza deformazioni.

In generale si distingue tra due tipologie di progettazione [10]:

- progettazione per la massima pressione di esplosione. In questo caso il parametro preso a riferimento per il dimensionamento dei componenti del sistema è la massima pressione raggiungibile dall'atmosfera esplosiva;
- progettazione per pressioni di esplosioni ridotte dovute all'utilizzo di sistemi di protezione.

Con riferimento ai **sistemi e componenti oleoidraulici e pneumatici**, viene chiarito che i fluidi oleoidraulici classificati secondo la norma ISO 6743-4 "Lubrificanti olii industriali e prodotti connessi (Classe L) – Classificazione – Parte 4: Famiglia H (Sistemi oleoidraulici)" non rientrano nella definizione dell'art. 13, comma 1, lett. a) e, di conseguenza, non vengono classificati come fluidi di gruppo 1 (è comunque sempre opportuno fare riferimento alla scheda dati di sicurezza del materiale, tenendo in considerazione quanto riportato nella Linea Guida della Commissione Europea all'applicazione della PED B-41) [11].

Con riferimento ai sistemi oleoidraulici e pneumatici, quindi di gruppo 2²³ viene invece chiarito che:

1. sono esclusi dalla Ped:

1.1. A causa dell'**esclusione** ex art.1, c. 2, **lett. f)**:

- tubazioni e connessioni per liquidi di gruppo 2 per $DN \leq 200$ e pressione qualsiasi e $DN > 200$ e $PS \leq 500$ bar;
- tubazioni e connessioni per gas di gruppo 2 per $DN \leq 100$ o $PS \cdot DN \leq 3500$ bar;

²² parere A48 della Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

²³ parere A19 Guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped

- accessori a pressione (es. alloggiamento di filtri) di categoria \leq I;
 - attuatori di potenza di fluidi, pompe e valvole di controllo di categoria \leq I.
- 1.2. A causa dell'esclusione ex art.1, c. 2, **lett. j)**:
- attuatori di potenza dei fluidi (es. motori, cilindri);
 - pompe per fluidi;
 - valvole di controllo della potenza dei fluidi (distributori).

2. Sono inclusi nella Ped:

- tutti gli accumulatori (del tipo a vescica, pistone e diaframma);
- attrezzature non incluse al punto 1) di cui sopra, nello specifico:
 - o tubazioni e dispositivi di connessione per liquidi (gruppo 2) quando $DN > 200$ e $PS > 500$ bar
 - o tubazioni e dispositivi di connessione per gas (gruppo 2) quando $DN > 100$ e $PS \cdot DN > 3500$
 - o accessori a pressione (es. alloggiamento di filtri) di categoria $> I$

I **Cilindri essiccatori per l'industria cartaria**²⁴ generalmente sono di categoria superiore alla I e quindi non esclusi dalla Ped. Infatti, anche se i carichi termici, dinamici ed altri diversi dalla pressione sono importanti nel progetto dei cilindri essiccatori, nella maggior parte dei casi la pressione è un fattore di progetto significativo nel dimensionamento dell'attrezzatura. Inoltre, essendo destinati ad integrare una macchina che movimentata la carta da essiccare, qualora immessi sul mercato separatamente, la loro documentazione, rilasciata ai sensi della Ped, dovrà andare a far parte del fascicolo tecnico della macchina, altrimenti la dichiarazione di conformità CE della macchina integrante i cilindri essiccatori farà riferimento sia alla Direttiva Macchine che alla Ped, quest'ultima per i soli cilindri in pressione.

Ai sensi dell'art.1, comma 2, lett. e), se un'**attrezzatura a pressione contribuisce direttamente al funzionamento di un veicolo** e il veicolo è definito nella direttiva 2007/46/CE o nei regolamenti UE n. 167/2013 e 168/2013 e la parte dell'attrezzatura a pressione è omologata con valutazione del tipo da una di queste direttive o da una singola omologazione del veicolo in base a una legge nazionale, questa è esclusa dalla Ped a prescindere dalla categoria di appartenenza. Rientrano ad esempio nell'esclusione i seguenti elementi che contribuiscono direttamente al funzionamento del veicolo²⁵: serbatoi come i serbatoi ausiliari per i sistemi di frenatura pneumatica (che possono essere coperti dalla Spvd che non contiene invece un'esclusione per le apparecchiature installate nei veicoli), serbatoi a GPL, a metano o ad idrogeno, quei sistemi idraulici che contribuiscono al funzionamento del veicolo come gli ammortizzatori.

Non contribuiscono direttamente al funzionamento dei veicoli e sono dunque soggetti alla Ped, altri elementi come ad esempio il sistema di climatizzazione, l'estintore, i serbatoi di GPL fissi in camper per riscaldamento o cucina.

4. Considerazioni conclusive

Come si è potuto evincere dall'analisi normativa e dalla lettura degli esempi forniti, l'individuazione della o delle direttive/regolamenti di riferimento non sempre è immediata e, nei casi in cui si ipotizza la possibilità di una sovrapposizione fra più direttive/regolamenti, questa richiede una attenta e specifica valutazione dei campi di applicazione, con le relative esclusioni, e delle definizioni che ciascuna direttiva/regolamento fornisce. Non è escluso tuttavia che, nonostante tale attenta lettura, possano permanere delle incertezze. In caso di dubbio, si raccomanda vivamente di

²⁴ Linea guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped parere A53

²⁵ Linea guida della Commissione Europea all'applicazione della Ped parere A46

verificare se i principi generali forniti dalle Guide della Commissione europea all'applicazione delle specifiche direttive/regolamenti di ipotetico interesse possano fornire criteri o chiarimenti risolutivi per lo specifico caso oppure se il caso stesso, o uno in qualche misura assimilabile, sia già stato affrontato nell'ambito di tali Guide per estrapolarne, in caso affermativo, informazioni utili, anche per analogia o per deduzione. Qualora così non fosse, non rimane altro che procedere mediante valutazione dei rischi, anche attraverso la consultazione delle norme armonizzate, qualora esistenti, oppure, in casi particolarmente incerti, riferirsi all'Autorità di sorveglianza del mercato per le direttive/regolamenti di interesse.

5. Bibliografia

- [1] La Guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2016 della Commissione Europea - GUUE 2016/C 272/01
- [2] Guide to application of the Machinery Directive 2006/42/EC Edition 2.1 – July 2017
- [3] Low voltage directive 2014/35/UE guidelines on Electrical equipment designed for use within certain voltage limits – v. 1 agosto 2018
- [4] Guide to application of the Atex Directive 2006/42/EC Edition 2.1 – July 2017
- [5] Guida della Commissione Europea all'applicazione della direttiva Ped v. 4 2017
- [6] Safety Assessment Federation (SAFed) Pressure guidelines, Guidelines for the examination of electrically heated café boilers (Espresso Machines), PSG8 Issue 2 dated 29 June 2016
- [7] Campanella F., Mattozzi M. Installazione di dispositivi medici dotati d'impianti a pressione: aspetti normativi, tecnici e procedurali correlati alla verifica della conformità di fabbricazione e d'installazione secondo la "regola d'arte" per le apparecchiature a Risonanza Magnetica che utilizzano magneti superconduttori, disponibile on line (consultato il 22/08/2018):
https://www.inail.it/cs/internet/docs/all_rit_installazione_dispositivi_medici.pdf
- [8] Reolon A., Perron A., Poggialini G. Gestione della sicurezza di un sito di diagnostica con risonanza magnetica, XVI Convegno Nazionale AIIC (Associazione Italiana Ingegneri Clinici), Bari 7-9 aprile 2016
- [9] De Gennaro G., Di Palma G., Godono M. e Nardelli Valutazione e gestione del rischio delle camere iperbariche nelle Strutture Sanitarie, Atti del Convegno "Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione. La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio", Venezia, 13-14 maggio 2010 (SAFAP 2010)
- [10] Pera F., Giuffrida M. Il rischio di esplosione, misure di protezione ed implementazione delle direttive Atex 94/9/CE e 99/92/CE, INAIL Ricerca, Edizione 2013
- [11] Assofluid Posizione ufficiale CETOP (Comitato Europeo delle Trasmissioni Oleoidrauliche e Pneumatiche) sulla Nuova Direttiva "Attrezzature a pressione" (2014/68/UE)

Tra direttiva PED e direttiva macchine: i confini

S. Anastasi¹, E. Carducci¹, L. Monica¹

¹ Inail - Dit

Sommario

È frequente trovare sul mercato o negli ambienti di lavoro prodotti per i quali non risulti immediata l'attribuzione della direttiva di riferimento, così come attrezzature a pressione, ai sensi della direttiva 2014/68/EU, incorporate in macchine di cui alla direttiva 2006/42/CE.

In questi casi il problema che fabbricanti e utilizzatori si trovano ad affrontare riguarda la definizione dell'approccio da seguire per trattare questi prodotti, sia dal punto di vista della fabbricazione che della corretta gestione in sicurezza.

Il fabbricante, infatti, ha l'esigenza di determinare con certezza il riferimento legislativo da adottare per consentire l'immissione sul mercato e quindi, nello specifico, stabilire se quel determinato prodotto debba trattarsi come un'attrezzatura a pressione, applicando i dettami della PED, ovvero come una macchina, rifacendosi quindi alla Direttiva Macchine.

Allo stesso tempo il datore di lavoro/utilizzatore si trova a dover chiaramente individuare gli obblighi ai quali deve sottostare in termini di gestione dell'attrezzatura di lavoro e quindi a definire le azioni da intraprendere per quanto attiene controlli, manutenzioni ed eventuali verifiche, sempre con riferimento alla classificazione attribuita all'esemplare in questione.

Il presente lavoro si propone di illustrare alcuni casi applicativi, portati anche all'attenzione della comunità europea, dai quali sia possibile desumere indicazioni tecniche di carattere generale che individuino un approccio univoco alla trattazione di tali prodotti.

1. Il quadro legislativo di riferimento

Le Direttive Comunitarie rappresentano la principale fonte del diritto da cui deriva la legislazione che ha sostituito, in determinate materie e in particolare nella sicurezza del prodotto, quella preesistente degli stati membri dell'Unione Europea.

Questi atti legislativi si prefiggono di armonizzare le legislazioni nazionali, prevedendo l'obbligatorietà del recepimento: tutti gli stati membri sono obbligati, infatti, ad adottare i contenuti delle direttive, senza alcuna modifica, entro un periodo transitorio (variabile in ogni direttiva), uniformando la legislazione previgente al dettato del nuovo testo legislativo. In particolare si impegnano ad abrogare tutte le eventuali disposizioni legislative esistenti in contrasto con la Direttiva stessa.

Il Trattato di Roma del 1957, che istituiva le Comunità Economiche Europee, poneva una fondamentale distinzione tra le "direttive di prodotto" e le "direttive sociali".

Le prime regolamentano la libera circolazione dei prodotti nel mercato comunitario sulla base del principio per cui ciò che circola liberamente in sicurezza in uno Stato membro deve essere considerato sicuro anche dagli altri Stati.

Esse costituiscono così il minimo comune denominatore per i prodotti rientranti nel relativo campo di applicazione, dettando i requisiti essenziali di sicurezza che i fabbricanti sono tenuti a garantire quando immettono sul mercato comunitario i prodotti coperti da queste Direttive, ma senza in tal modo porre limiti alla crescita del livello tecnologico in un mercato in continuo avanzamento [1].

Le direttive di prodotto, in sostanza, individuano i requisiti essenziali di sicurezza che i prodotti devono rispettare per poter liberamente circolare nel mercato comunitario, definendo anche le corrette procedure di immissione sul mercato che il fabbricante è tenuto ad adottare (come ad es. la redazione di una dichiarazione di conformità o l'apposizione di una marcatura).

La direttiva 2014/68/UE e la direttiva 2006/42/CE sono un esempio di questo nuovo approccio legislativo ed in particolare:

- la direttiva 2014/68/UE del 15 maggio 2014 (comunemente detta direttiva PED), recepita in Italia dal d.lgs. 26/2016, concerne l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione e disciplina la progettazione, la costruzione, l'equipaggiamento e l'installazione in sicurezza di attrezzature e insiemi a pressione ricadenti nel campo di applicazione della direttiva stessa. L'allegato I alla PED definisce i requisiti essenziali di sicurezza che le attrezzature/insiemi a pressione devono soddisfare per la libera circolazione nel mercato comunitario, allo scopo di armonizzare le legislazioni nazionali degli Stati Membri relative alla valutazione del progetto, della produzione, del collaudo e della conformità delle attrezzature e degli insiemi a pressione, individuando nei cosiddetti operatori economici (fabbricante, rappresentante autorizzato, importatore e distributore) i responsabili della loro messa a disposizione;
- la direttiva comunitaria 2006/42/CE (nota come direttiva Macchine), recepita in Italia dal d.lgs. 17/2010, concerne l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla progettazione e costruzione di una macchina. Questa direttiva rappresenta l'atto che gli Stati dell'UE hanno deciso di adottare per stabilire i requisiti essenziali di sicurezza che le macchine e le quasi macchine devono possedere per poter essere immesse nel Mercato Comunitario.

Le "Direttive sociali", basate sull'articolo 137 del trattato CE (ora articolo 153 del Trattato sul funzionamento dell'Unione europea), invece, costituiscono il fondamento giuridico della legislazione comunitaria in materia di salute e sicurezza sul luogo di lavoro, mediante la quale gli Stati membri sono tenuti a promuovere il progresso delle condizioni e dell'ambiente di lavoro. Esse stabiliscono i requisiti di sicurezza, salute e igiene sui luoghi di lavoro a cui tutti gli Stati membri devono uniformarsi. Trattandosi di prescrizioni minime, non ostacolano la determinazione e il mantenimento di misure nazionali più severe. Queste regolamentazioni sono indirizzate non tanto al fabbricante dei prodotti, ma piuttosto al datore di lavoro/utilizzatore, riferendosi esclusivamente a tutto quanto orbita intorno all'ambiente lavorativo¹.

Le Direttive sociali di riferimento sull'uso delle attrezzature di lavoro sono:

1. la Direttiva 89/391/CEE concernente l'attuazione di misure volte a promuovere il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori durante il lavoro, che disciplina gli obblighi fondamentali del datore di lavoro e dei lavoratori in materia di salute e sicurezza sul lavoro;
2. la Direttiva 2009/104/CE² del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 settembre 2009, relativa ai requisiti minimi di sicurezza e di salute per l'uso delle attrezzature di lavoro da parte dei lavoratori (seconda direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1 della direttiva 89/391/CEE).

In Italia le direttive sociali relative alla sicurezza e salute dei lavoratori sul luogo di lavoro sono state recepite dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. "Testo Unico in materia di salute e sicurezza sul lavoro", prevedendo in alcuni casi prescrizioni più stringenti rispetto al panorama europeo (come per esempio relativamente alle verifiche a cui un'attrezzatura deve essere sottoposta).

¹ Ad esempio un trapano, utilizzato a fini hobbistici, non configurandosi come attrezzatura di lavoro ai sensi dell'art. 69 del d.lgs. 81/08 e s.m.i., non è assoggettato agli obblighi prescritti dal titolo III del medesimo decreto, ma ovviamente deve rispettare, per l'immissione sul mercato, i requisiti essenziali di sicurezza previsti dalla direttiva macchine.

² La direttiva 2009/104/CE è una versione codificata della direttiva 89/655/CEE e modifica le direttive 95/63/CEE, 2001/45/CE e 2007/30/CE.

La distinzione fondamentale è dunque che le direttive di prodotto si rivolgono in primo luogo ai fabbricanti, responsabili dell'immissione sul mercato di prodotti sicuri, si applicano principalmente a prodotti nuovi e riguardano aspetti costruttivi; mentre le direttive sociali sono rivolte principalmente ai datori di lavoro e impongono a loro carico obblighi volti a garantire la sicurezza e la salute dei lavoratori in tutti gli aspetti connessi con il lavoro e, pertanto, riguardano esclusivamente, o quasi, il parco macchine già in uso.

In base a quanto sopra esposto, da un lato il fabbricante ha la necessità, prima dell'immissione sul mercato, di definire con certezza la normativa di armonizzazione dell'Unione da adottare per consentire il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza pertinenti in fase di progettazione e realizzazione del prodotto; dall'altro il datore di lavoro/utilizzatore si trova a dover chiaramente identificare le prescrizioni cui deve sottostare, per quanto attiene invece la gestione dell'attrezzatura di lavoro, e quindi a definire le attività di controllo, manutenzione ed eventualmente verifica da condurre, sempre con riferimento alla classificazione attribuita all'esemplare in questione.

2. Applicazione simultanea di più atti di armonizzazione dell'unione

La normativa di armonizzazione dell'Unione copre un'ampia gamma di prodotti, rischi e impatti, che possono sovrapporsi o integrarsi a vicenda e questo capita con maggiore frequenza quando si parla di attrezzature di lavoro, data l'eterogeneità e l'estensione di tale categoria. Ne consegue che non sempre per un prodotto è sufficiente rifarsi ad un solo precetto legislativo, bensì può essere necessario prendere in esame diverse direttive, per poter immettere il prodotto nel mercato comunitario. Questo, in particolare, si verifica in caso di rischi specifici, come quelli legati, ad esempio, alla pressione del fluido utilizzato o al rischio di esplosione nell'ambiente di destinazione. In tali evenienze il prodotto può essere reso disponibile o messo in servizio solo se risulta conforme a tutte le disposizioni applicabili ed è stata effettuata la valutazione di conformità ai sensi di tutta la vigente normativa di armonizzazione dell'Unione.

I casi che possono presentarsi sono però diversi tra di loro: alcuni atti di armonizzazione, infatti, escludono dal proprio campo di applicazione i prodotti contemplati da altre regolamentazioni o incorporano i requisiti essenziali di questi altri atti, evitando così l'applicazione simultanea di requisiti superflui.

Queste direttive di prodotto sono direttive cosiddette *globali (ndr. comprehensive)* e disciplinano tutti i pericoli più significativi relativi ai prodotti che rientrano nel loro campo di applicazione, per cui si applicano in modo esclusivo per quanto attiene gli obblighi di immissione sul mercato, ivi compresa la procedura di valutazione di conformità. Tra queste direttive possiamo annoverare la Direttiva 2009/48/CE sulla sicurezza dei giocattoli, la Direttiva 93/42/CEE, modificata da ultimo dalla direttiva 2007/47/CE, concernente i dispositivi medici, la Direttiva 95/16/CE sugli ascensori e la Direttiva 2000/9/CE relativa agli impianti a fune adibiti al trasporto di persone. In pratica per tutti i prodotti afferenti alle direttive sopra richiamate, per l'immissione sul mercato, è sufficiente il rispetto del solo precetto legislativo di riferimento.

In altri casi, invece, può risultare necessaria l'applicazione congiunta di vari riferimenti legislativi, per una trattazione completa di tutti i rischi che il prodotto presenta.

In particolare sono state emanate direttive che trattano specifici aspetti e si applicano in aggiunta per i pericoli non disciplinati dalla direttiva pertinente al prodotto; ne sono un esempio la Direttiva 89/106/CE sui prodotti da costruzione, la Direttiva 2000/14/CE, modificata dalla Direttiva 2005/88/CE, concernente l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto e la Direttiva 2004/108/CE relativa alla compatibilità elettromagnetica.

Altre direttive, invece, affrontano aspetti specifici di pericoli già affrontati da differenti atti legislativi, per cui si presenta anche in questo caso la necessità dell'applicazione congiunta

di tutti i precetti legislativi pertinenti, per garantire una trattazione esaustiva del particolare pericolo.

È il caso, ad esempio, di quello che accade tra la direttiva PED e quella Macchine: la PED, infatti, relativamente ai pericoli derivanti dalla pressione, si applica anche alle attrezzature a pressione rientranti nel suo campo di applicazione che sono incorporate nelle macchine o collegate ad esse.

Se un'attrezzatura a pressione è incorporata in una macchina, il fascicolo tecnico fornito dal fabbricante della macchina deve includere la dichiarazione CE di conformità dell'attrezzatura a pressione alla PED, se quest'ultima è immessa sul mercato separatamente, ovvero prevedere la trattazione dei pertinenti requisiti essenziali di sicurezza secondo la direttiva PED, trattandosi di un componente della macchina comunque in ultimo coperto dalla dichiarazione CE di conformità della macchina tutta.

Le attrezzature a pressione appartenenti al massimo alla categoria 1, incorporate nelle macchine e oggetto della direttiva Macchine, sono escluse dal campo di applicazione della PED, per cui risulta sufficiente l'applicazione della sola direttiva 2006/42/CE.

In conclusione nel caso di simultanea applicazione di più direttive, il fabbricante dovrà progettare e fabbricare il prodotto conformemente a tutta la normativa di armonizzazione applicabile e rispettare la procedura di valutazione della conformità richiesta da ciascuna direttiva, per quanto concerne gli aspetti disciplinati nello specifico da quella direttiva.

Qualora, oltre alla direttiva macchine, siano applicabili una o più altre direttive che prescrivono una dichiarazione CE di conformità, il fabbricante può stilare una singola dichiarazione CE di conformità per tutte le relative direttive, purché questa contenga tutte le informazioni previste da ciascun disposto legislativo [2].

3. Esempi di applicazione simultanea di più direttive di prodotto

Chiarito il quadro legislativo di riferimento, nel prosieguo si intende presentare una rassegna esemplificativa di alcuni casi che si sono incontrati nell'espletamento dell'attività di accertamento tecnico per la sorveglianza del mercato.

L'obiettivo è quello di provare ad estrapolare delle considerazioni di carattere generale, partendo dalle esperienze affrontate.

In particolare si vorrebbero indicare dei principi che possano indirizzare i fabbricanti nella corretta procedura di valutazione della conformità dei prodotti, in riferimento all'individuazione delle direttive applicabili e le conseguenti procedure da adottare per l'immissione sul mercato.

Il quadro giuridico di sicurezza applicabile alle valvole

Nel 2014, il CEIR (Comité Européen de l'Industrie de la Robinetterie) ha presentato in un contesto europeo e in particolare al Working Group Machinery ai sensi della direttiva 2006/42/CE (numero di riferimento WG-2014.2) la propria posizione per quanto riguarda la classificazione delle valvole e la legislazione applicabile a questi prodotti, affermando che, secondo il principio del rischio prevalente, le valvole, a meno di qualche eccezione, non debbano essere considerate prodotti rientranti nel campo di applicazione della direttiva macchine [3].

In quel consesso diversi Stati membri hanno manifestato il bisogno che la Commissione Europea definisse in un documento il quadro giuridico applicabile alle valvole.

Di seguito, quindi, si riporterà, in sintesi, la posizione della Commissione in merito alla normativa UE in materia di sicurezza applicabile alle valvole [4], rimandando alla tabella sotto riportata per una più estensiva rappresentazione dei casi che possono presentarsi e della relativa legislazione di riferimento per le procedure da adottare per l'immissione sul mercato (tabella 1).

Si deve partire innanzitutto dalla definizione di valvola, in modo da comprendere chiaramente quale siano la sua funzione e le caratteristiche tecniche che presenta.

Le valvole devono intendersi come prodotti in senso lato (figura 1) ovvero dispositivi che regolano, dirigono o controllano flussi di materiale gassoso, liquido o solido, aprendo, chiudendo od ostruendo parzialmente i vari passaggi. I sistemi di azionamento di una valvola possono essere manuali o alimentati e dotati di cilindri pneumatici o idraulici per l'azionamento dell'elemento di trasmissione per il comando della parte mobile interna.

Le valvole con attuatore, o destinate ad essere dotate di attuatori, sono dispositivi per la chiusura, il controllo e la regolazione di un flusso di materiale e in quanto tali rientrano nel campo di applicazione della direttiva macchine.

Allo stesso tempo, però, è indubbio che questi dispositivi, laddove presentino un rischio dovuto alla pressione, debbono essere progettati e costruiti secondo le specifiche prescrizioni definite nella direttiva PED.

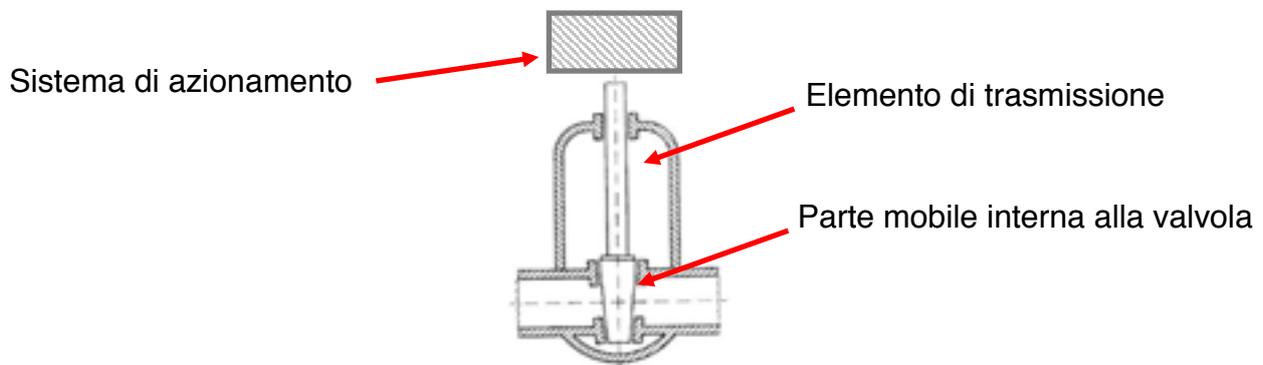


Figura 1. Rappresentazione schematica di una valvola tipo

Caratteristiche della valvola	Legislazione applicabile ³
Valvole Manuali (figura 2)	Le valvole azionate manualmente sono escluse dalla Direttiva Macchine. Tuttavia, quelle valvole che, seppure azionate manualmente, funzionano per mezzo di energia immagazzinata, possono rientrare nell'ambito di applicazione della Direttiva Macchine.
Valvole con attuatori	Direttiva 2006/42/CE
Valvole non attuate, ma progettate per esserlo	Direttiva 2006/42/CE
Valvole per applicazioni speciali (es. componenti di sicurezza ai sensi della direttiva macchine e valvole come accessori di sicurezza ai sensi della Direttiva PED)	Direttiva 2006/42/CE se componenti di sicurezza o quasi macchine, destinati ad essere incorporati in una macchina. Direttiva 2014/68/UE se accessori di sicurezza e l'unico rischio deriva dalla pressione

Tabella 1

³ Per quanto attiene il rischio pressione, i requisiti di sicurezza da rispettare sono in ogni caso quelli individuati nella Direttiva PED, laddove la valvola sia di categoria superiore alla 1.

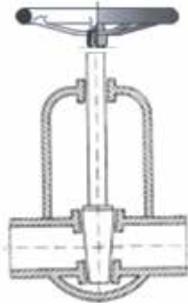


Figura 2. Esempio di valvola manuale con attuazione a volantino

In sostanza le valvole, così come sopra descritte, ricadono nel campo di applicazione della direttiva macchine, ma sono allo stesso tempo comprese anche nella direttiva PED, laddove siano di categoria superiore alla 1⁴ (figura 3); dovrà quindi seguire la direttiva 2014/68/UE esclusivamente per quanto attiene il rischio pressione, mentre la direttiva 2006/42/CE per tutti gli altri requisiti essenziali di sicurezza. Dovrà essere poi rilasciata un'unica dichiarazione di conformità e apposta una sola marcatura CE.



⁴ Si precisa che nel caso in cui dette valvole si qualificano come accessori di sicurezza ai sensi dell'art. 2 punto 4 della direttiva 2014/68/UE, dovranno essere classificate in categoria IV.



Figura 3. Esempi di valvole ricadenti nel campo di applicazione della direttiva 2006/42/CE

Impianti ad aria compressa

Un impianto ad aria compressa può essere schematizzato come in figura 4.

L'aria viene prelevata dall'ambiente e depurata attraverso un apposito filtro (F). Sono poi presenti:

- un polmone smorzatore (PM), che permette di evitare fenomeni di risonanza;
- un compressore (C), che in generale può essere o volumetrico (per piccole portate, alti rapporti di compressione) o rotativo (per grandi portate, bassi rapporti di compressione);
- una valvola di sicurezza (V_s) a valle del compressore;
- una valvola di non ritorno (VNR), per evitare flussi di ritorno;
- un refrigeratore (R), che permette di raffreddare l'aria e riportarla a temperatura ambiente, dato che all'uscita dal compressore può raggiungere temperature anche elevate;
- un serbatoio intermedio (SI);
- uno scaricatore di condensa (S_c);
- una seconda valvola di non ritorno;
- un serbatoio di accumulo (S), da cui l'utenza preleva l'aria.

Il serbatoio a sua volta è munito di manometro, pressostato, valvola di sicurezza e valvole atte allo spurgo di polveri involute presenti nell'aria.

Il pressostato comanda il compressore: qualora avvenga che la pressione nel serbatoio superi o sia inferiore ad una certa soglia, il compressore viene spento (in caso di sovrappressione) per essere poi riavviato, quando la pressione ritorna in un range desiderato (in caso di pressione troppo bassa, invece, il pressostato comanda l'accensione del compressore o, qualora già acceso, il compressore rimane in questo stato).

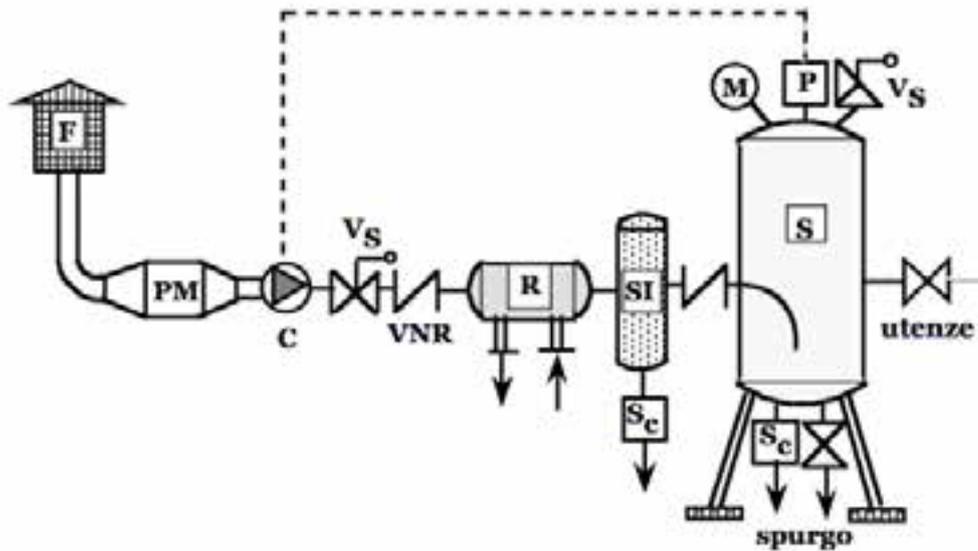


Figura 4. Schema tipo di impianto ad aria compressa

Se gli elementi costituenti l'impianto possono essere considerati singoli componenti immessi sul mercato separatamente, perché già destinati dai singoli fabbricanti a far parte di un impianto ad aria compressa come quello summenzionato, l'impianto nel complesso non necessita di un'ulteriore dichiarazione CE di conformità, in quanto, come detto, i singoli elementi costituenti sono stati progettati e fabbricati per essere assemblati così da realizzare un impianto ad aria compressa e conseguentemente i rischi derivanti da tale installazione sono stati considerati.

Nel caso, invece, fosse immesso sul mercato l'intero impianto, questo sarebbe accompagnato da un'unica dichiarazione di conformità, redatta in conformità alla direttiva 2006/42/CE, quale direttiva applicabile allo specifico prodotto, con l'esplicitazione delle eventuali altre direttive applicate, come la direttiva 2014/68/UE.

Tale ultima circostanza si verificherà anche nel caso in cui i singoli componenti, acquistati separatamente, ma non specificatamente destinati dai fabbricanti a far parte di un impianto ad aria compressa, vengano installati insieme per la realizzazione dell'impianto finale.

Attrezzature a pressione incorporate in macchine ai sensi della direttiva 2006/42/CE

Non di rado in prodotti ricadenti nel campo di applicazione della direttiva macchine sono utilizzati componenti a pressione, che potrebbero essere classificati come attrezzature a pressione ai sensi della 2014/68/UE. Un esempio è rappresentato dalla macchina traccialinee per la realizzazione della segnaletica stradale orizzontale (figura 5) o da alcune tipologie di presse a caldo per il legno, nelle quali può essere previsto un riscaldamento delle piastre con caldaia, pompa di circolazione e vaso di espansione (figura 6).



Figura 5 – Esempio di traccialinee professionale



Figura 6. Esempio di pressa a caldo per il legno con caldaia

In questi casi, conformemente all'articolo 3 della direttiva 2006/42/CE, la direttiva 2014/68/UE risulta applicabile, relativamente ai pericoli derivanti dalla pressione, alle attrezzature a pressione che rientrano nel suo campo di applicazione e che sono incorporate nelle macchine o collegate ad esse. Se, quindi, un'attrezzatura a pressione, già immessa sul mercato, è incorporata in una macchina, il fascicolo tecnico predisposto dal fabbricante della macchina deve includere la dichiarazione UE di conformità dell'attrezzatura a pressione alla direttiva 2014/68/UE, in quanto il soddisfacimento dei requisiti essenziali di sicurezza relativamente ai pericoli derivanti dalla pressione è stato assicurato da un altro soggetto, ovvero il fabbricante dell'attrezzatura a pressione incorporata nella macchina.

Nel caso, invece, in cui il fabbricante della macchina si occupi direttamente anche della progettazione e costruzione dell'elemento a pressione in essa contenuto, spetterà a lui seguire le procedure di valutazione di conformità anche per quest'ultimo, in base alle prescrizione della specifica direttiva di riferimento.

Come già precisato le attrezzature a pressione appartenenti al massimo alla categoria 1 ai sensi della direttiva 2014/68/UE, incorporate nelle macchine, sono escluse da questa direttiva e ricadono esclusivamente nella direttiva 2006/42/CE anche per quanto attiene il soddisfacimento dei requisiti essenziali di sicurezza relativamente ai pericoli derivanti dalla pressione, facendo riferimento allo specifico punto 1.3.2 dell'allegato I alla direttiva 2006/42/CE.

4. Il prodotto come attrezzatura di lavoro

Conclusa la panoramica relativa alle diverse casistiche riferite all'immissione sul mercato dei prodotti e quindi esclusivamente a considerazioni di natura costruttiva, altro aspetto che si vuole considerare nel presente lavoro riguarda la gestione del prodotto, limitatamente ai

casi in cui questo si configura come attrezzatura di lavoro e quindi relativamente all'applicazione della direttiva sociale in materia di salute e sicurezza sul luogo di lavoro ossia del d.lgs. 81/08 e s.m.i..

Occorre innanzitutto chiarire cosa debba intendersi per attrezzatura di lavoro, passaggio fondamentale per individuare le prescrizioni applicabili del sopradetto decreto e quindi gli obblighi in capo al datore di lavoro.

L'art. 69 del d.lgs. 81/08 e s.m.i. ha cercato di chiarire meglio, rispetto all'originaria definizione, cosa vada considerato come attrezzatura di lavoro, ovvero *il complesso di macchine, attrezzature e componenti necessari all'attuazione di un processo produttivo, destinato ad essere usato durante il lavoro.*

La definizione in esame ha cercato di circoscrivere quali prodotti, utilizzati in un ambiente di lavoro, siano da considerarsi effettivamente attrezzature di lavoro (figura 7) e quindi soggette alla gestione sicura prevista dal titolo III del summenzionato decreto, indicando tra di esse qualsiasi tipo di macchina operatrice, impianto di processo e utensile di lavoro indipendentemente dalla forma di energia che li mette in azione.

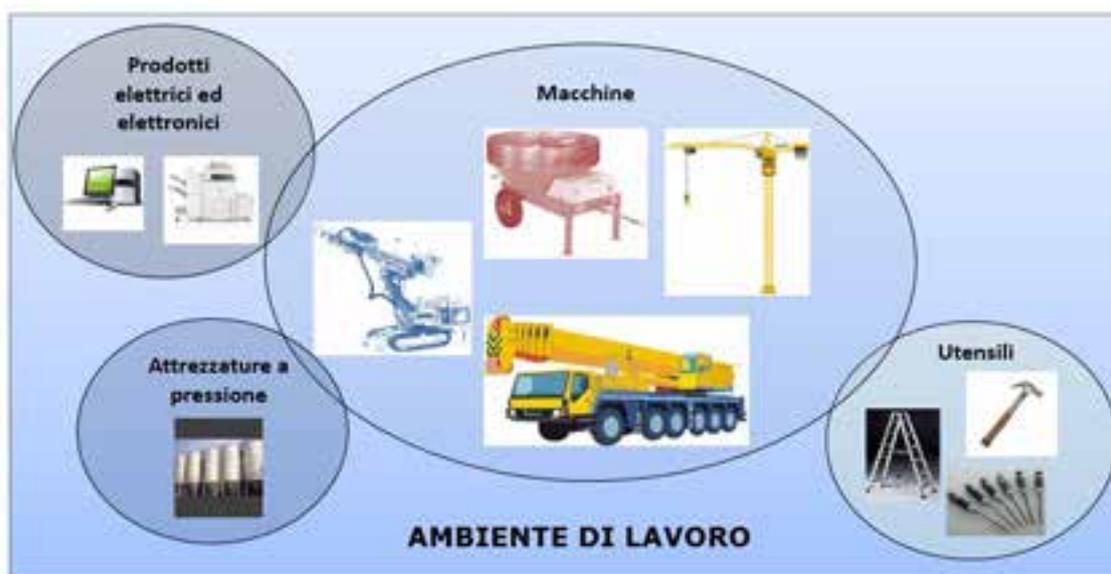


Figura 7. Esempi di attrezzature di lavoro

Nonostante le revisioni tuttora la definizione di attrezzatura di lavoro si presta ancora ad errate interpretazioni e di conseguenza anche gli obblighi del datore di lavoro possono essere fraintesi.

Al fine di offrire ulteriori chiarimenti in merito la Direzione generale delle relazioni industriali e dei rapporti di lavoro del Ministero del lavoro e delle Politiche sociali ha dovuto ribadire il concetto summenzionato all'interno di circolari di chiarimento (circolare n.23 del 13 agosto 2012 e Circolare n. 5 del 3 marzo 2015), con specifico riferimento all'applicazione del d.m. 11 aprile 2011 concernente la "Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'allegato VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81". La precisazione fornita riguarda nello specifico i generatori di calore alimentati da combustibile solido, liquido o gassoso per impianti centrali di riscaldamento utilizzando acqua calda sotto pressione con temperatura dell'acqua non superiore alla temperatura di ebollizione alla pressione atmosferica, aventi potenzialità globale dei focolai superiori a 116 kw e serbatoi di GPL e gli obblighi stabiliti dall'articolo 71, comma 11, del d.lgs. n. 81/2008 e s.m.i. a carico del datore di lavoro.

Le circolari esplicitano che detti obblighi sono riferiti alle attrezzature di lavoro così come definite all'articolo 69, comma 1, lettera a), del d.lgs. 81/08 e s.m.i., e di conseguenza i

generatori di calore non debbano essere assoggettati alle verifiche periodiche di cui al d.m. 11.04.2011, se non sono necessari all'attuazione di un processo produttivo e destinati ad essere usati durante il lavoro. Per quanto sopra si evidenziava che:

- alle centrali termiche non necessarie all'attuazione di un processo produttivo, ad esempio quelle installate nei condomini, anche laddove questi ultimi si dovessero configurare come ambienti di lavoro, non si applicano le disposizioni del d.m. 11.04.2011, ma continua ad applicarsi il d.m. 01.12.1975;
- ai serbatoi di GPL non asserviti a processi produttivi, ad esempio quelli ad uso domestico, non si applicano le disposizioni del d.m. 11.04.2011, ma continuano ad applicarsi il d.m. 01.12.2004, n. 329, il d.m. 29.02.1988, il d.m. 23.09.2004 ed il d.m. 17.01.2005, nei casi previsti dai rispettivi ambiti di applicazione.

Il primo elemento che il datore di lavoro deve, quindi, considerare nell'individuazione degli obblighi da assolvere rispetto al d.lgs. 81/08 e s.m.i. è l'identificazione delle attrezzature di lavoro, in modo da circoscrivere a queste ultime le prescrizioni di cui al titolo III del medesimo decreto.

In particolare il problema che ci si è posti riguarda l'applicazione del regime di verifica periodica alle attrezzature/impianti a pressione.

Una volta individuate le attrezzature di lavoro e quindi attrezzature, impianti o componenti che, usati in un ambiente di lavoro, partecipano ad un processo produttivo, nel caso delle attrezzature/impianti a pressione è necessario distinguere se nello specifico l'elemento a pressione partecipa al processo produttivo o meno.

Sulla base del concetto sopra esposto, relativamente agli esempi di cui al paragrafo precedente si può affermare che sono da considerarsi attrezzature di lavoro i singoli componenti di un impianto ad aria compressa anche laddove accompagnati da una sola dichiarazione di conformità riferita all'intero impianto, in quanto ciascun componente partecipa alla realizzazione del processo produttivo realizzato dall'intero impianto.

Non sono, invece, da considerare attrezzature di lavoro, e quindi assoggettabili agli obblighi di cui al titolo III del d.lgs. 81/08 e s.m.i., le attrezzature a pressione incorporate in macchine con specifica destinazione d'uso; in quest'ultimo caso, infatti, l'elemento a pressione risulta essere una parte della macchina (componente) e di supporto alla realizzazione del processo a completo carico della macchina di cui fa parte. Nel caso, ad esempio, della pressa a caldo per il legno il generatore di calore è compreso nella dichiarazione di conformità della macchina e svolge quindi la sua funzione all'interno della macchina stessa secondo la destinazione d'uso definita dal costruttore di quest'ultima.

5. Conclusioni

L'entrata in vigore delle direttive di prodotto ha messo a disposizione di progettisti e fabbricanti uno strumento che consente di definire il percorso da seguire per poter garantire, in primis, la libera circolazione dei prodotti nel territorio comunitario, e, in maniera indotta, un livello essenziale di sicurezza.

Appare quindi fondamentale, data l'eterogeneità dei disposti legislativi a disposizione, individuare in modo certo quale sia la regolamentazione da seguire. Lo stesso prodotto o rischio può essere, infatti, coperto da due o più atti di armonizzazione. In tal caso, il problema della sovrapposizione si può risolvere privilegiando l'atto di armonizzazione più specifico. In ogni caso è necessaria un'analisi dei rischi che definisca in modo univoco e certo la destinazione d'uso del prodotto, stabilendo i limiti di utilizzo dello stesso e il settore di impiego. Quest'ultimo aspetto, ad esempio, può risultare rilevante nel discriminare una macchina da un dispositivo medico: una pedana vibrante, infatti, ricade appieno nel campo di applicazione della direttiva macchine e quindi, in quanto macchina, dovrebbe essere immessa sul mercato, seguendo le prescrizioni della relativa direttiva, tuttavia, nei casi in

cui il fabbricante destina la stessa ad un uso terapeutico, la pedana si configura come dispositivo medico e pertanto può essere immessa sul mercato adottando le prescrizioni della direttiva specifica.

Sempre attraverso la valutazione dei rischi è possibile individuare i pericoli connessi all'utilizzo del prodotto e da qui gli atti regolamentari da seguire, definendo i rischi specifici e conseguentemente i dispositivi legislativi da adottare.

Quanto definito in fase di progettazione e fabbricazione del prodotto non offre indicazioni sufficienti per quanto attiene l'applicazione della direttiva sociale e quindi le prescrizioni connesse all'utilizzo e alla più complessiva gestione del prodotto; in particolare è fondamentale rilevare come indispensabile sia riconoscere una attrezzatura di lavoro ai sensi dell'art. 69 del d.lgs. 81/08 e s.m.i., per poter definire gli obblighi cui questa deve sottostare in base al sopracitato decreto. In tale ottica la destinazione d'uso del prodotto, non tanto in termini di operazione effettuata, quanto più in relazione alla finalità della stessa (intesa come eventuale partecipazione al processo produttivo), costituisce la discriminante principale, oltre ovviamente al luogo di impiego (ovvero se trattasi o meno di un ambiente di lavoro), per stabilire la legislazione applicabile.

6. Bibliografia

- [1] Commissione Europea. La Guida Blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2014. Versione 1.1 – 15/07/2015
- [2] Commissione europea. Direzione Generale Imprese e industria. Guida all'applicazione della direttiva macchine 2006/42/CE. 2a edizione giugno 2010
- [3] CEIR. Position paper - CEIR's comments regarding the Machinery Directive 2006/42/EC. Directive 2006/42/EC - Machinery Working Group. Doc. WG-2014.02-3-EN
- [4] European Commission. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - Industrial Transformation and Advanced Value Chains - Advanced Engineering and Manufacturing Systems. Clarifications for the applicable EU safety legal framework to valves. Directive 2006/42/EC. Machinery Working Group. Doc. WG-2017.11

Organismo notificato per la direttiva PED. Analisi dei dati

A. Fortuni¹, F. Giacobbe², L. Pugliese¹, F. Buti¹, C. Pierdominici¹, S. Mariani¹

¹ Inail - On 0100

² Inail - Uot di Messina

Sommario

Ai sensi della norma EN 17065 un Organismo Notificato che certifica in accordo alle direttive europee di prodotto deve dotarsi di un sistema di gestione della qualità. In questo contesto al fine di condurre al meglio un sistema bisogna capire ed analizzare come variano nel tempo i fattori caratterizzanti i singoli processi. I processi vanno misurati, analizzati e valutati essenzialmente per monitorare l'andamento nel tempo e verificare la loro stabilità e la loro continuità nel soddisfare i requisiti.

Un dato da analizzare, particolarmente significativo, è quello relativo alla soddisfazione dei clienti che permette di ricavare informazioni sul livello della qualità percepita da parte dei fabbricanti. Queste informazioni si ricavano tramite un questionario. Un'altra tipologia di dati si riferisce alla tipologia e gravità dei rilievi relativi alla conformità dei prodotti. Questi dati sono essere raccolti come registrazioni durante le ispezioni, come risultati di prove condotte sul prodotto, come rapporti di verifica ispettiva.

Nel presente lavoro si analizzano i dati, attraverso elaborazioni statistiche, raccolti durante l'attività di certificazione di attrezzature a pressione secondo la direttiva PED.

In conclusione è possibile affermare che un sistema qualità diventa uno strumento manageriale efficace se è in grado di monitorare e governare i processi.

1. Introduzione

In ambito della direttiva PED per l'applicazione dei moduli D, D1, E, E1, H e H1 il fabbricante deve implementare un sistema di gestione per la qualità idoneo ad assicurare la produzione di Attrezzature a Pressioni ai requisiti stabiliti dalla normativa di riferimento. Il sistema qualità deve includere in particolare un'adeguata descrizione:

- della politica, degli obiettivi di qualità e della struttura organizzativa, delle responsabilità e dei poteri del personale direttivo in materia di progettazione e produzione e controllo del prodotto;
- delle specifiche tecniche di progettazione, comprese le norme che saranno applicate e, qualora le relative norme armonizzate non siano applicate integralmente, dei mezzi per garantire che siano stati rispettati i requisiti essenziali di sicurezza;
- delle procedure e tecniche di controllo e di verifica della progettazione e dei processi produttivi;
- delle procedure/istruzioni operative per la gestione: della rintracciabilità, dei materiali impiegati, delle giunzioni permanenti, dei trattamenti termici e delle prove/controlli da effettuare prima, durante e dopo la fabbricazione;
- delle registrazioni riguardanti il sistema qualità ed in particolare: la gestione della documentazione tecnica e di sistema, i riesami della direzione, le verifiche ispettive interne, la gestione della strumentazione di misura, trattamento delle non conformità ed azioni correttive, la formazione e le competenze del personale coinvolto.

Nell'ambito del triennio di validità della certificazione si attuano i seguenti audit: certificazione stage 1; certificazione stage 2; audit di sorveglianza programmata; audit di sorveglianza non programmata (straordinario); audit senza preavviso per la verifica di prodotto; audit di rinnovo.

2. Analisi sui risultati della soddisfazione cliente

Con cadenza annuale si procede al monitoraggio della soddisfazione dei clienti al fine di conoscere il livello di gradimento da parte di fabbricanti rispetto all'operato dell'organismo notificato. Di seguito si riportano le diverse domande proposte con i diversi livelli di giudizio.

AZIENDA: _____

Compilatore: _____ data: _____

Schema di certificazione/ispezione: FED TPED

A ciascuna caratteristica Vi viene chiesto di rispondere relativamente:
 - all'importanza da voi attribuita (poca-molta)
 - al livello di qualità da voi riscontrato rispetto al vostro valore atteso (scarso-sufficiente-buono-ottimo)

livello di qualità da voi riscontrato rispetto al vostro valore atteso *importanza attribuita*

A Chiarezza del rapporto contrattuale per quanto riguarda i servizi offerti	<input type="radio"/> Scarso	<input type="radio"/> Sufficiente	<input type="radio"/> Buono	<input type="radio"/> Ottimo	<input type="radio"/> Poca	<input type="radio"/> Molta
B Rapporti comunicativi con la Nostra organizzazione	<input type="radio"/> Scarso	<input type="radio"/> Sufficiente	<input type="radio"/> Buono	<input type="radio"/> Ottimo	<input type="radio"/> Poca	<input type="radio"/> Molta
C Livello qualitativo dei nostri servizi - preparazione e competenza dei Ns. ispettori	<input type="radio"/> Scarso	<input type="radio"/> Sufficiente	<input type="radio"/> Buono	<input type="radio"/> Ottimo	<input type="radio"/> Poca	<input type="radio"/> Molta
D Come valutate globalmente il servizio ricevuto rispetto le vostre aspettative	<input type="radio"/> Scarso	<input type="radio"/> Sufficiente	<input type="radio"/> Buono	<input type="radio"/> Ottimo	<input type="radio"/> Poca	<input type="radio"/> Molta

Figura 1. Stralcio del modulo per il monitoraggio della soddisfazione dei clienti

I dati di ritorno sono esaminati ed elaborati al fine di estrapolare dei sintetici grafici che permettono valutazioni sullo stato di soddisfazione.

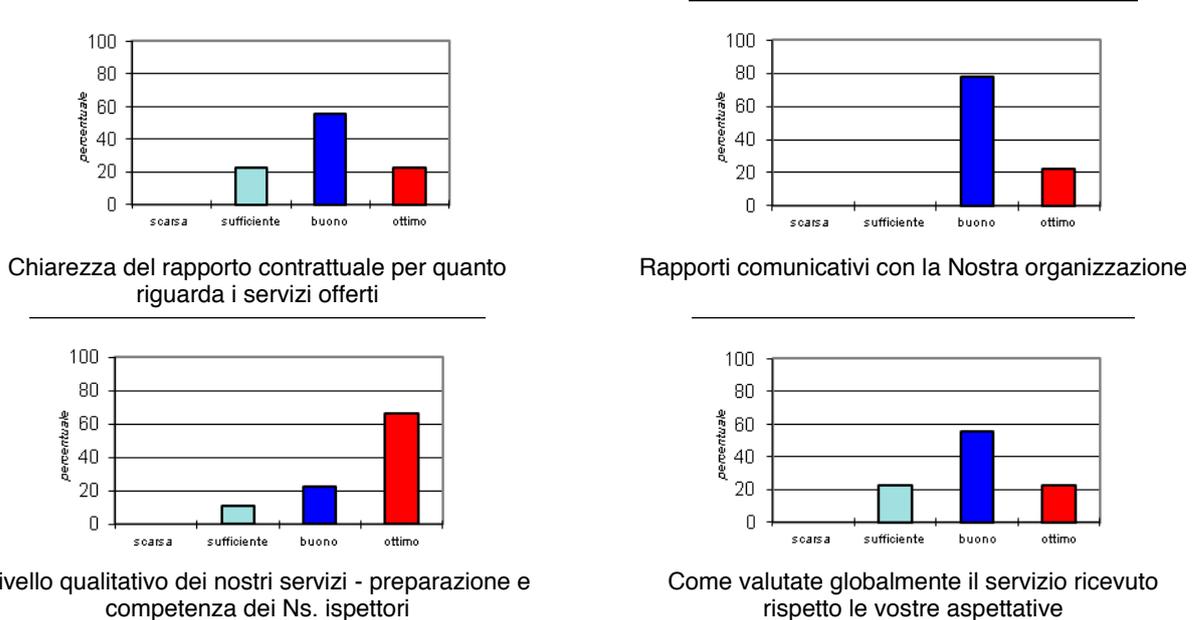


Figura 2. Rappresentazione grafica mediante istogrammi della soddisfazione clienti

Si evince in generale un apprezzamento dell'operato ed un giudizio positivo sul servizio reso.

3. Analisi delle risultanze degli audit sul sistema qualità

Per l'emissione ed il mantenimento della certificazione del sistema qualità, nel caso di adozione da parte del fabbricante dei moduli qualità, vengono eseguite da parte dell'organismo notificato verifiche ispettive. In particolare in fase di emissione si procede con la stage 1 (esame documentale) e successivamente con lo stage 2 (verifica presso il fabbricante). Al fine di definire un peso ai singoli rilievi emersi sono state definite tre tipologie aventi criticità decrescente.

Non Conformità: rilievo/non conformità, di importanza maggiore, che segnala la presenza di una deviazione/mancanza nel processo di valutazione della conformità.

Osservazione: rilievo/non conformità, di importanza minore, il cui risultato non inficia la valutazione finale della conformità del prodotto.

Raccomandazione: nota che si configura come spunto di miglioramento oppure la stessa attualmente non compromette la conformità ma potrebbe comprometterla in futuro.

di seguito si riportano alcune dei rilievi emersi nel corso delle verifiche ispettive presso fabbricanti che adottano il modulo H1.

Al fine di analizzare gli esiti i dati sono stati suddivisi in tre macro condizioni, ovvero in carenze nella formulazione documentale del sistema qualità, in carenze nell'attuazione delle procedure del sistema qualità ed in carenze riscontrate nel fascicolo tecnico. Per ogni singola condizione sono state previste altresì ulteriori suddivisioni per una valutazione maggiormente approfondita.

Di seguito riportiamo alcuni esempi di rilievi emersi nel corso di circa 15 mesi suddivisi per macro condizione e per livello di criticità ed analizziamo mediante delle rappresentazioni statistiche l'incidenza tra i diversi casi di rilievi.

3.1 Carenze nella formulazione documentale del sistema qualità

Non conformità

- La documentazione del Sistema Qualità (Manuale e Procedure) è strutturata seguendo i riferimenti della ISO 9001. Si riscontrano carenze afferenti le problematiche di sistema richieste dalla direttiva PED in riferimento al modulo H1 (rif. gestione della produzione).

Osservazioni

- I criteri operativi adottati per la tracciabilità dell'apparecchio non sono sufficientemente documentati a sistema (rif. Procedura xxx identificazione e rintracciabilità rev.0 del xxx).
- Nella documentazione del sistema qualità non sono presenti riferimenti alla direttiva PED ed ai relativi adempimenti correlati al modulo H1. Si evidenzia altresì che la procedura xxx relativa a "progettazione e sviluppo" non è sempre coerente con i requisiti di cui al modulo H1 prendendo in esame criteri operativi assimilabili maggiormente ai moduli per singolo prodotto.
- La procedura di riferimento pur descrivendo i controlli da effettuare non riporta le estensioni dei CND (rif. xxx, prove, controlli e collaudi del xxx).
- La registrazione delle tarature interne delle saldatrici non evidenzia le singole misurazioni effettuate ed i relativi eventuali scostamenti riscontrati. Non sono state definite le tolleranze ritenute accettabili. Valutare le modalità operative della conduzione della taratura interna dei "manometri operativi", tenendo in considerazione il grado di accuratezza degli stessi, al fine di quantificare l'errore ammesso a sistema.

Raccomandazioni

- Si raccomanda di riesaminare la procedura di riferimento alla rintracciabilità secondo quanto richiesto dalla direttiva PED ed in particolare per le lamiere ed i consumabili.

- Si raccomanda di aggiornare la documentazione di sistema in funzione della nuova direttiva PED (2014/68/UE).
- Tenuto conto della volontà della Direzione di adottare il SQ finalizzato alla produzione di attrezzature a pressione secondo quanto previsto dal modulo H1 della direttiva PED si evidenzia che tale impegno non è chiaramente evidenziato nella politica della qualità (rif. Politica qualità del xxx).
- Nel riesame direzionale non si ha esplicita evidenza dell'analisi dell'efficienza del SQ così come previsto dal par. 3.2 del modulo H1 (rif. Riesame della Direzione del xxx).

CARENZE NELLA FORMULAZIONE DOCUMENTALE DEL SISTEMA QUALITÀ	non-conformità	osservazioni	raccomandazioni	totale rilievi	percentuale
struttura della documentazione	1	8	8	15	19,7 %
struttura organizzativa		2	2	2	2,6 %
responsabilità di gestione della progettazione		2	2	2	2,6 %
responsabilità di gestione della produzione		2	1	3	3,9 %
responsabilità di gestione delle prove e controlli		2	1	3	3,9 %
specifiche tecniche di progettazione che si intendono applicare		8	19	15	21,1 %
specifiche delle tecniche sui materiali impiegati		2	4	6	7,8 %
specifiche delle tecniche sulle giunzioni permanenti		3	6	9	11,8 %
procedure su prove, esami, controlli e verifiche		11	8	20	26,3 %
	1	26	40	71	100 %
	1,3 %	41,1 %	52,6 %		

Tabella 1. Suddivisione del campione delle carenze nella formulazione documentale del Sistema Qualità



Figura 3. Rappresentazione statistica delle carenze nella formulazione documentale del Sistema Qualità

3.2 Carenze nell'attuazione delle procedure del sistema qualità

Non conformità

- I controlli superficiali secondo metodo PT effettuati dall'operatore xxx non sono coperti da certificato CND in corso di validità (certificato xxx).
- Le giunzioni saldate delle lamiere in alluminio effettuate dagli operatori addetti non sono coperte da certificato di qualifica in corso di validità (es. certificato xxx). Si evidenzia altresì che non sono registrate le evidenze semestrali da parte del datore di lavoro in riferimento alla continuità operativa.

Osservazioni

- In riferimento alla produzione del prodotto xxx NF xxx non si hanno evidenze dell'esecuzione dei controlli CND ad esclusione dell'esame visivo.
- Il report dell'esame spessimetrico non sempre riporta il riferimento al numero di fabbrica dell'apparecchio (rif. NF. xxx – capacità xxx l).
- La gestione delle verifiche ispettive interne presenta alcune carenze che ne condizionano l'efficacia. In particolare il piano annuale non evidenzia la valutazione dei singoli requisiti di cui al modulo H1; non risulta valutato e registrato l'esito del possesso dei requisiti definiti a sistema per gli auditor esterni; la conduzione della

verifica non è supportata da dedicate check list; non sono indicate le evidenze oggettive verificate.

- La zona stoccaggio prodotti non conformi non risulta debitamente delimitata.

Raccomandazioni

- Si raccomanda di verificare periodicamente il possesso dei requisiti definiti a sistema per le funzioni aventi mansioni significative nell'ambito PED (es. controllo qualità, progettista, responsabile qualità, addetti CND, saldatori, ecc).
- Si raccomanda di richiedere formalmente in ogni singolo ordine di lamiera che i materiali siano accompagnati da certificato EN 10204 3.1.
- Si rileva che non tutti i disegni di cui ai fascicoli tecnici mantengono la tracciabilità tra la tavola del recipiente ed il relativo fascicolo tecnico della famiglia. Si raccomanda di migliorare la tracciabilità dei disegni (rif. disegno n. xxx e fascicolo tecnico famiglia xxx).
- Si rileva che i valori di fondo scala dei manometri indicati nella procedura di sistema non soddisfano quanto indicato nel punto 10.2.3.11 pressure gauges della norma UNI EN 13445:2014 parte 5 (f.s. 2xPi e comunque tra 1,5 e 4 volte la p.i.); il fondo scala previsto in procedura è 1,2 volte la pressione di prova. Si raccomanda di utilizzare manometri con idoneo fondo scala per l'effettuazione della prova idraulica finale.
- I documenti della: politica della qualità xxx, riesame della direzione del xxx, raccolta dati mensili per il monitoraggio indicatori di prestazione ed obiettivi del xxx non evidenziano considerazioni di obiettivi di qualità ai sensi del par.3.2 del modulo H1 (all. III della direttiva 2014/68/UE).

CARENZE NELL'ATTUAZIONE DELLE PROCEDURE DEL SISTEMA QUALITA'	non-conformità	osservazioni	raccomandazioni	totale (obai)	percentuale
esecuzione di prove, controlli e verifiche	2	3	14	24	22,9 %
lavorazioni di prefabbricazione ed assemblaggio	2	2	6	8	7,6 %
gestione della tracciabilità	1	1	2	4	3,8 %
gestione della strumentazione di misura	1	10	6	17	16,2 %
gestione degli approvvigionamenti dei materiali	4	2	2	6	5,7 %
gestione qualifiche dei procedimenti di saldatura	1	1	2	4	3,8 %
gestione qualifiche dei saldatori	1	2	2	5	4,7 %
gestione delle giunzioni permanenti	1	3	1	5	4,7 %
esecuzione del CND secondo progetto	2	17	3	22	21,0 %
gestione dell'archiviazione documenti	2	2	4	8	7,6 %
gestione dell'efficacia di funzionamento del SQ (rs. riesame della direzione, gestione NC/AC, analisi dei reclami, verifiche ispettive interne, ecc.)	2	2	4	8	7,6 %
Totale	6	51	64	105	100 %

Tabella 2. Suddivisione del campione delle carenze nell'attuazione delle procedure del Sistema Qualità

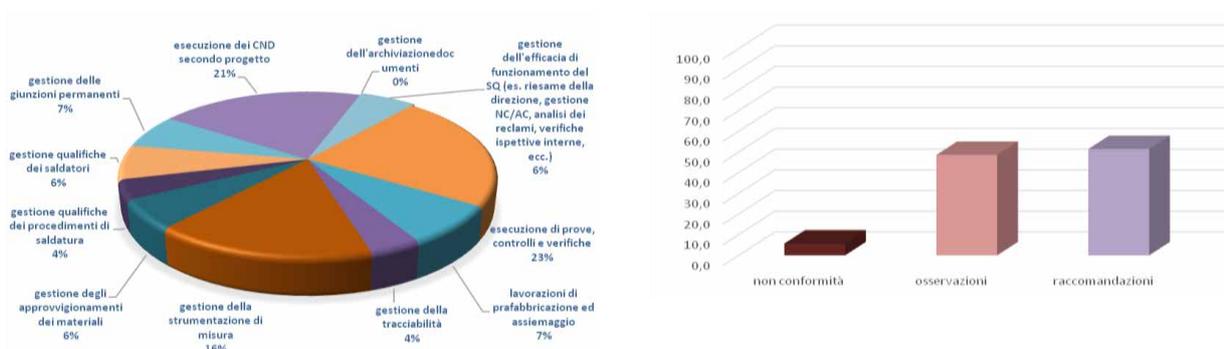


Figura 4. Rappresentazione statistica delle carenze nell'attuazione delle procedure del Sistema Qualità

3.3 Carenze riscontrate nel fascicolo tecnico

Non conformità

- Il Fabbricante effettua controlli non distruttivi in modo difforme da quanto previsto dalla normativa utilizzata per il tipo di materiale impiegato (RT 10% e PT 50%).
- Non risultano emesse le WPS dei nuovi procedimenti di saldatura utilizzati (saldature di sovrapposizione delle lamiere posteriori in corrispondenza del cono – vedi disegno xxx particolare giunto Q).
- Il fascicolo tecnico non documenta in modo sufficiente le valutazioni strutturali per quanto riguarda le aperture presenti sulle membrature. Per le attrezzature aventi $\Phi 1200$ sono presenti tabelle riepilogative dei calcoli degli spessori minimi ma non sono formalizzate le considerazioni by formula. (rif. tavole xxx).

Osservazioni

- Il piano di controllo per il prodotto xxx non documenta correttamente tutti i CND da eseguire. Valutare l'estensione dei controlli distruttivi sui talloni di saldatura secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica utilizzata (es. Raccolta S).
- La marcatura CE non è perfettamente conforme al logo previsto dalla direttiva PED. Inoltre sulla targa viene indicato come contenuto solo l'aria e non anche il materiale pulverulento.
- Nell'apparecchio NF xxx la temperatura riportata nella dichiarazione di conformità è diversa da quella presente nel fascicolo tecnico (rif. temperatura minima $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ anziché $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Si evidenzia che non è presente la part list dei componenti facenti parte dell'insieme.

Raccomandazioni

- L'analisi dei rischi è stata effettuata anche rispondendo puntualmente ai RES previsti dall'allegato I della Direttiva. Si richiede di valutare l'eventuale influenza delle vibrazioni connesse alla percorrenza del veicolo sul manto stradale.
- L'analisi dei rischi è strutturata tenendo conto dei pericoli connessi all'impiego delle attrezzature. Si raccomanda di migliorare le considerazioni di carattere tecnico in riferimento alle attrezzature già marcate secondo la direttiva PED. Migliorare le considerazioni tecniche che indicano e giustificano la marcatura CE secondo insieme.
- Si evidenziano discordanze, in riferimento all'estensione dei CND, tra quanto previsto dalla norma adottata (Raccolta S) e quanto indicato nei disegni (es. disegno n. xxx). Si raccomanda altresì di riportare su tutti i disegni la data di emissione.
- Tenuto conto che il calcolo di stabilità effettuato sul modello xxx è significativo per il range di applicabilità, si raccomanda di riportare comunque nel fascicolo tecnico il campo di validità dei calcoli in funzione dei vari modelli.
- Il disegno xxx riporta i riferimenti non aggiornati ai materiali utilizzati ovvero lamiere in alluminio P-Al- Mg 4.5 R UNI 7790/77 anziché EN 14286.
- Si rileva che l'estensione dei controlli, derivata dalla edizione della EN13445:2002 parte 5 non è aggiornata, comunque la stessa è altresì coerente con la Raccolta S ed. 99. Valutare l'implementazione dell'estensione dei controlli secondo l'ultima revisione della norma EN13445 parte 5.
- In riferimento al RES par. 2.10 (protezione contro il superamento dei limiti ammissibili dell'attrezzatura a pressione) si rileva che il fabbricante, nel Manuale d'uso e manutenzione, segnala che le valvole di sicurezza devono essere adeguatamente dimensionate ma non fornisce una sufficiente informazione circa i limiti associati alle connessioni previste al montaggio del dispositivo di protezione stesso.

CARENZE RISCOTRATE NEL FASCICOLO TECNICO	non conformità	osservazioni	raccomandazioni	totale (n°)	percentuale
Dati di targa	1	2	3	4	3,3 %
Descrizione dell'attrezzatura/insieme	2	4	7	7	5,9 %
Analisi dei rischi e/o dei pericoli	0	8	14	14	11,7 %
Analisi dei RES	0	8	7	11	9,2 %
Disegni e/o schemi di assemblaggio	1	17	8	26	21,7 %
Calcoli dimensionali	1	6	4	11	9,2 %
Coerenza del fascicolo alle norme utilizzate	1	10	8	19	15,8 %
Definizione dei CND	1	15	8	24	19,8 %
Libretto d'uso e manutenzione	0	7	5	12	10,0 %
Totale	4	87	49	120	100 %

Tabella 3. Suddivisione del campione delle carenze riscontrate nel fascicolo tecnico

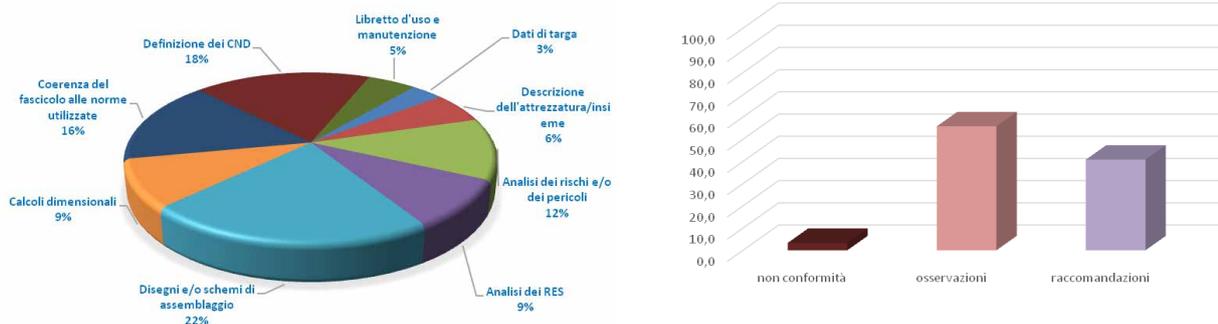


Figura 5. Rappresentazione statistica delle carenze riscontrate nel fascicolo tecnico

4. Conclusioni

In conclusione è possibile affermare, in merito alla soddisfazione cliente, che i fabbricanti manifestano giudizi sostanzialmente positivi sull'operato dell'organismo notificato. Dalle verifiche ispettive presso il fabbricante emergono carenze sia sul sistema qualità che nel fascicolo tecnico in modo equamente distribuito. L'incidenza delle non conformità si mantiene al di sotto del 5% evidenziando un buon livello di maturità e robustezza dell'applicazione dei requisiti della direttiva PED. I rilievi che presentano indici di frequenza maggiore si riscontrano in merito alla gestione della strumentazione di misura, nella definizione e conduzione dei CND e nell'applicazione della normativa tecnica.

CARENZE NELLA FORMULAZIONE DOCUMENTALE DEL SISTEMA QUALITA'	1	36	40	78	25,2 %
CARENZE NELL'ATTUAZIONE DELLE PROCEDURE DEL SISTEMA QUALITA'	6	51	54	105	24,9 %
CARENZE RISCOTRATE NEL FASCICOLO TECNICO	4	67	49	120	39,9 %
Totale	11	153	143	307	100 %

Tabella 4. Suddivisione del campione in funzione della categoria delle carenze



Figura 6. Rappresentazione statistica delle carenze riscontrate suddivise per categoria

5. Bibliografia

- [1] UNI CEI EN ISO/IEC 17000:2005, "Valutazione della conformità - Vocabolario e principi generali"
- [2] UNI CEI EN ISO/IEC 17021-1:2015, "Valutazione della conformità - requisiti per gli organismi che forniscono audit e certificazione di sistemi di gestione"
- [3] UNI CEI EN ISO/IEC 17065:2012, "Requisiti per gli organismi di certificazione di prodotti, processi e servizi"
- [4] ACCREDIA, RG-01 "Regolamento per l'accreditamento degli Organismi di Certificazione e Ispezione - Parte Generale"
- [5] ACCREDIA, RG-01-03 "Regolamento per l'Accreditamento degli Organismi di Certificazione del Prodotto"
- [6] ACCREDIA, RG-01-01 "Regolamento per l'accreditamento degli Organismi di certificazione del Sistema di Gestione"
- [7] ACCREDIA, DT-01-DC "Approccio Accredia agli accreditamenti finalizzati alle notifiche inerenti la marcatura ce e conseguenti prescrizioni per i CAB richiedenti tale tipologia di accreditamento"
- [8] A. Fortuni, F. Giacobbe, "Implementazione di un sistema qualità integrato nell'ambito dell'operatività degli organismi notificati", atti convegno SAFAP, pp. 413-422, Milano, 2016
- [9] Riva E. Aspetti applicativi della UNI CEI EN ISO/IEC 17021, con le prime interpretazioni di EA. UNI / Accredia – slide, 24 Ottobre 2011
- [10] Musa A. La norma ISO/IEC 17065:2012 "Conformity assessment Requirements for bodies certifying products, processes and services" Continuità e novità rispetto alla precedente EN 45011", Accredia – febbraio 2013

Criteria tecnici seguiti nella procedura di valutazione della conformità alla PED di attrezzature fabbricate secondo il regolamento nazionale previgente e oggetto di interventi di modifica

M. Larice¹, I. Mazzarelli², A. Pallano³, F. Zichichi⁴

¹ Inail - Uot di Udine

² Inail - Uot di Milano

³ Inail - Uot di Genova

⁴ Inail – Uot di Bologna

Sommario

Il lavoro desidera illustrare gli elementi e i criteri da adottare nella procedura di valutazione della conformità alla Direttiva 2014/68/UE (di seguito Direttiva) di attrezzature costruite in accordo alla normativa nazionale previgente, qualora su di esse si rendano necessari interventi che configurano una modifica ai sensi dell'art. 14 del d.m. 329/04.

A partire dal quadro giuridico di riferimento, si presenta un possibile approccio alla valutazione di conformità alla Direttiva PED dell'attrezzatura modificata, con particolare riguardo alla definizione del percorso di analisi del rischio e della scelta di esami e prove opportuni e significativi, sulla base della documentazione disponibile, della storia di esercizio dell'attrezzatura, delle nuove condizioni stabilite dal fabbricante e di eventuali altre condizioni specifiche al contorno.

Alcune sintesi di esperienze maturate e ritenute significative verranno proposte per riflettere, in relazione alla normativa vigente, sulla corretta applicazione della Direttiva di prodotto e sulla necessità di disporre di indirizzi comuni a tutti gli attori coinvolti nel processo di modifica, in particolare riguardo la valutazione dello stato di conservazione dell'attrezzatura e del suo futuro esercizio, al fine di dimostrare la sua rispondenza ai requisiti essenziali di sicurezza della Direttiva.

1. Il quadro giuridico e normativo

La fabbricazione delle attrezzature a pressione è stata regolamentata con il r.d. n. 824 del 12.05.1927; in particolare nel Titolo I venivano impartite disposizioni generali per i materiali ed i coefficienti di sicurezza da adottare, per il tipo di verifiche e prove di fabbricazione e per la determinazione dei valori di prova, oltre ad un rinvio a norme di calcolo stabilite dal "Ministero dell'economia nazionale", sentito il parere del Consiglio Tecnico dell'Ancc.

La prima proposta di regolamentazione per il calcolo avvenne nel 1953 a cura dell'Ancc e perdurò fino all'emanazione del d.m. 21.11.1972^[4] con la pubblicazione delle Specifiche Tecniche (edizione 1975) Raccolte VSR e VSG, rispettivamente per il calcolo di recipienti a pressione e generatori di vapore, Raccolte M ed S, relative ai materiali ed alla saldatura.

Con il d.m. 15.01.1998 n. 190 è stato recepito l'aggiornamento delle Raccolte Ispesl suddette revisione 1995 edizione 1999, ed è stato dato mandato all'Ispesl (oggi Inail) di aggiornare periodicamente le schede dei materiali ed i relativi procedimenti di saldatura.

E' importante rilevare quanto disposto dall'art. 4 del d.m. 190/98: "agli apparecchi a pressione, già verificati sulla base delle specificazioni tecniche vigenti prima dell'entrata in vigore del decreto, possono applicarsi le medesime specificazioni, in caso di modifiche o riparazioni denunciate successivamente alla data di entrata in vigore del presente decreto".

Con il d.lgs. 25.02.2000 n. 93^[2] viene infine recepita la prima Direttiva 97/23/CE sul riavvicinamento degli Stati membri in materia di attrezzature a pressione (nota come

PED), successivamente modificata con la Direttiva 2014/68/UE, recepita con il d.lgs. 15/02/2016 n. 26.

Il d.lgs 93/2000 non impartisce regole in caso di modifiche di attrezzature già messe in servizio, facendo un rimando a successivi decreti da adottare; occorre pertanto ricondursi all'art. 14 del d.m. 329/04^[3] con il quale l'Italia ha regolamentato il processo di modifica e di riparazione di attrezzature in pressione. Nella sostanza in caso di riparazione occorre riferirsi al processo di autorizzazione già in vigore mediante approvazione dell'Inail, mentre in caso di modifica occorre attenersi alle disposizioni applicabili per le nuove costruzioni (*ndr PED*) ed assoggettare l'attrezzatura ad una procedura di valutazione della conformità del d.lgs. 93/00.

Per la modifica di un'attrezzatura a pressione, anche se fabbricata secondo le regole previgenti la PED, occorre valutare la rispondenza della stessa a tutti i requisiti essenziali di sicurezza applicabili previsti dalla Direttiva.

2. Il concetto di riparazione e modifica di un'attrezzatura in pressione

La modifica d'uso di un'attrezzatura a pressione era regolamentata dall'art. 63 del r.d. 824/27, che si limitava a modifiche della pressione di bollo e che si configurava come una nuova modalità di impiego da approvarsi secondo le regole già stabilite per le nuove attrezzature.

Con il recepimento della Direttiva PED, ed ancor più con l'emanazione del d.m. 329/2004, il concetto di modifica ha assunto contorni più ampi, anche se per alcuni casi di difficile interpretazione. E' utile riportare testualmente sia la definizione di riparazione che quella di modifica dell'art. 14 del d.m. 329/04:

“La riparazione consiste nella sostituzione di parte di un'attrezzatura a pressione oppure nella riparazione, con o senza saldatura, senza variazione alcuna del progetto originario, mentre la modifica consiste in un intervento tecnico che ha cambiato le caratteristiche originali, la destinazione e il tipo o solamente il tipo, dopo essere stata messa in servizio”.

Data la competenza dell'Inail in materia di riparazione, in assenza, ancora oggi, di specifiche tecniche conformi al processo dell'art. 3 del d.m. 329/04, con la circolare 14^[5] del 06.12.2005 si tentò di fornire alcune prime indicazioni sul concetto di riparazione ed implicitamente stabilire alcuni “confini” tra interventi di riparazione e modifica, stante l'ipotesi abbastanza ovvia che quanto non è una riparazione sia una modifica.

Riguardo la riparazione è stato introdotto un principio di responsabilità nella valutazione, con motivazione tecnica, in capo all'utilizzatore ed un principio di condivisione dell'Inail.

La motivazione tecnica deve essere supportata da un'analisi del rischio caso per caso sulle conseguenze dell'intervento tecnico, tale da dimostrare che non sia modificato il progetto e/o le caratteristiche originali, la destinazione e/o il tipo.

Per evitare processi ripetitivi di analisi, la circolare fornisce poi alcuni casi semplici di riparazione: ad esempio l'invariabilità dei limiti ammissibili, la sostituzione di materiali appartenenti allo stesso gruppo previsto dalla norma CR ISO 15608, procedimenti di saldatura già previsti nel progetto originario, invarianza di flussi termici, invariabilità del livello di sollecitazione.

Sono annoverati anche alcuni casi di modifiche non importanti, le quali ai sensi della linea guida 1/3 del WGP^[6] sono assimilate alle riparazioni: ad esempio introduzione di nuove aperture che non modificano la compensazione (*ndr Raccolta VSR*), introduzione di dimensioni o materiali differenti per fasci tubieri e flange cieche e fondi piani, tali da non modificare flussi termici e sollecitazioni sulla rimanente parte dell'attrezzatura, cambio di fluido nell'ambito dello stesso gruppo della PED che non comporti rischi aggiuntivi a quelli del fluido originario.

Infine la circolare cita alcuni esempi che si configurano certamente come una modifica: cambio positivo o negativo dei limiti ammissibili, nonché tutti i casi già visti per le riparazioni che però peggiorano le sollecitazioni per l'attrezzatura o la valutazione del rischio.

La casistica che si può presentare è abbastanza ampia e talvolta complessa, e dunque di difficile standardizzazione: pertanto è sempre opportuno fare valutazioni caso per caso. Per tali casi specifici e di dubbia valutazione, qualora vi sia una competenza INAIL stabilita dal legislatore, è frequente l'interpello al Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'INAIL, che per la corretta interpretazione della normativa e al fine di stabilire comportamenti omogenei si avvale delle valutazioni del Consiglio Tecnico Attrezzature e Insiemi in Pressione.

3. L'approccio al processo di modifica

3.1. Il fabbricante e la documentazione di base

La corretta applicazione del processo di modifica presuppone l'individuazione di un fabbricante come definito dalla PED - laddove non è escluso che l'utilizzatore possa assumere tale figura - la disponibilità di tutta o parte della documentazione originaria.

Riguardo questo secondo aspetto è utile annoverare la documentazione che veniva prodotta secondo il D.M. 21.11.1972 nelle fasi di approvazione del progetto e della fabbricazione. La fattibilità del percorso di modifica dovrebbe basarsi almeno sulla disponibilità del libretto ANCC/ISPESL completo, ovvero comprensivo dell'allegato riepilogo dei materiali e delle dichiarazioni del costruttore (procedimenti, controlli, etc.), e dei disegni di fabbricazione dell'attrezzatura e dei particolari (incluse le rappresentazioni grafiche delle tipologie di giunti saldati), rispondente a quanto previsto dal capitolo VSR.0 della Raccolta Ispesl. Questa documentazione minima consente di disporre di informazioni riguardo i limiti ammissibili, i fluidi ammessi, i materiali, i procedimenti di saldatura, il modulo di efficienza di saldatura, gli eventuali trattamenti e processi di fabbricazione (ad esempio dettagli su particolari e formature), la tipologia del piano di controllo originario, le prove distruttive e non distruttive, e le percentuali di controllo.

Una condizione ideale pre-modifica è quella di disporre, oltre che dei documenti di cui sopra, anche del calcolo condotto secondo le Raccolte VSR o VSG e degli allegati al libretto originario: certificati dei materiali, risultati dei processi di formatura e trattamenti, qualifiche di procedimenti di saldatura e saldatori, risultati delle prove e loro mappa di esecuzione.

E' sempre necessario, al fine di introdurre l'analisi del rischio, avere a disposizione o predisporre in sintesi un documento sulla storia di esercizio dell'attrezzatura, che includa copia dei verbali di messa in servizio e nuovo impianto (se del caso), delle verifiche periodiche, delle eventuali riparazioni intercorse (completi della documentazione di riparazione), delle verifiche decennali e/o di integrità. In questa fase va data notevole importanza all'influenza dei fluidi ammessi e delle modalità di utilizzo sullo stato di conservazione dell'attrezzatura e sulla definizione dei limiti di utilizzo futuri, anche in relazione alle modifiche che si vogliono apportare. Già in questa fase, infatti, è possibile stabilire cicli di vita limitati alle nuove condizioni di progetto, che tengano conto dello stato di conservazione al momento della modifica, precisando che in caso di attrezzature soggette a scorrimento viscoso o ad autorizzazioni post 45° anno di età continuano ad applicarsi i regimi delle circolari Ispesl n. 48 del 05.12.2003 e n. 60 del 14.07.1997, indipendentemente dalla nuova certificazione.

La documentazione pertinente le eventuali autorizzazioni Inail in materia di scorrimento viscoso deve diventare parte integrante del fascicolo tecnico dell'attrezzatura ed essere presa in debita considerazione nel processo di valutazione della conformità.

3.2. L'analisi del rischio, le norme tecniche e le soluzioni da adottare

La modifica di un'attrezzatura a pressione può riguardare uno o più dei seguenti aspetti principali:

- Aumento o diminuzione dei limiti ammissibili (pressione, temperatura, volume, livello)
- Sostituzione o aggiunta di membrane con cambio dei materiali non appartenenti allo stesso gruppo CR/ISO 15608 o cambio di spessori che aggravano lo stato di sollecitazione dell'attrezzatura (riduzioni di spessore, aumenti di spessore che richiedono trattamenti particolari di fabbricazione, etc.)
- Cambio e/o aggiunta di un fluido con altro appartenente ad un gruppo PED più pericoloso e/o che abbia caratteristiche tali da introdurre rischi aggiuntivi (compatibilità con i materiali, usura e corrosione, classificazione Regolamento CLP, etc.), cui vanno aggiunti i casi di cambio categoria dell'attrezzatura
- Cambio di flussi termici che determinano un nuovo stato di sollecitazione dell'attrezzatura (ad esempio riduzioni o aumento di superfici riscaldate)
- Cambio di modalità d'uso che modifichi lo scopo originario

La corretta analisi di una o più delle modifiche sopra indicate determina di fatto il processo di valutazione della modifica stessa, innanzitutto riguardo la determinazione del protocollo di attività per dimostrare la rispondenza ai requisiti essenziali di sicurezza (di seguito RES) e successivamente la fattibilità tecnica-economica del nuovo progetto.

Alla base di questo processo deve essere sempre svolta una valutazione dei pericoli e dei rischi che dia rispondenza alle Osservazioni preliminari contenute nell'allegato I alla PED, valutando quali RES devono essere applicati in relazione anche all'evoluzione della tecnica, e quale processo adottare per dimostrare che, alle nuove condizioni fissate e per i nuovi processi di fabbricazione previsti, l'attrezzatura risponde ai RES applicabili.

Il risultato dell'analisi dei rischi dovrebbe essere mostrato secondo gli attuali canoni del cosiddetto fascicolo tecnico; tuttavia, essendo tale analisi preliminare e non disponendo ancora dei risultati della valutazione dello stato di conservazione, la stessa dovrebbe essere confermata prima dell'emissione della certificazione, al fine di riesaminare e validare che le ipotesi iniziali siano supportate dalle evidenze oggettive della procedura di valutazione della conformità, in particolare riguardo eventuali limitazioni di utilizzo da riportare nel manuale d'uso.

Al termine dell'analisi di rischio preliminare il fabbricante dovrà stabilire e fornire le soluzioni che vuole adottare per fornire una chiara rispondenza ai RES ritenuti applicabili; anche questo documento è allegato nel "fascicolo tecnico" utile alla certificazione, e andrebbe validato e riesaminato alla fine del processo di valutazione della conformità, in quanto potrebbero emergere restrizioni da riportare tra i rischi residui, non note all'atto della valutazione preliminare.

Riguardo le norme che il fabbricante può adottare, la PED, non contemplando le modifiche, non vieta l'utilizzo di norme differenti da quelle originarie (VSR per i recipienti), anche se è sempre auspicabile mantenere il codice di calcolo di origine.

Il codice andrebbe applicato nella sua evoluzione normativa (Raccolta VSR edizione 1999 ed Addenda CTI edizione maggio 2005), che costituisce evoluzione tecnologica e normativa ai sensi della PED; tuttavia la legislazione nazionale (D.M. 190/98) non vieta l'impiego della norma di origine.

Al termine di questa prima fase puramente di valutazione e decisione, occorre definire il percorso e le attività di progettazione, fabbricazione (solo qualora la modifica comporti nuovi procedimenti) incluso il processo di qualifica, valutazione dei materiali esistenti ed eventualmente dei nuovi materiali, esami e prove preliminari e finali, documentazione e valutazione della conformità.

In appendice 1 è stata riportata una tabella riepilogativa della documentazione pregressa da valutare nel processo e della documentazione da produrre in conformità alla PED per i RES applicabili alla modifica.

4. Progettazione

Il fabbricante deve valutare i nuovi fattori pertinenti in base all'analisi di rischio effettuata, innanzitutto definendo i nuovi coefficienti di sicurezza per l'attrezzatura. Tali fattori sono determinati in base al tipo di modifiche proposte e talvolta, a seconda della data di fabbricazione dell'attrezzatura, possono risultare inferiori a quelli originari, ad esempio per attrezzature fabbricate prima del 1975.

Occorre precisare che la norma di calcolo originaria prevedeva solo la verifica alle condizioni di progetto riportate nei punti da a) ad f) dell'art. 1 del d.m. 21.11.1972 (pressione interna, pressione esterna, temperature, carico idrostatico massimo del fluido contenuto in condizioni di esercizio, peso dell'apparecchio e del suo contenuto, carichi massimi previsti per le condizioni di prova); quindi nella verifica del progetto vanno sempre implementate le altre condizioni previste dalla Direttiva, tra le quali possono figurare carichi dovuti al vento, eventuali sovraccarichi dovuti alle sollecitazioni sismiche, traffico, sollecitazioni localizzate dovute a sostegni e collegamenti, carichi dinamici, momenti flettenti, differenza di temperatura e differenza dei coefficienti di dilatazione termica dei materiali adottati, fluttuazione di pressione e temperatura, possibilità di corrosioni o erosioni, fatica durante l'esercizio, decomposizione di fluidi instabili.

Ciò comporta sempre, anche se disponibili i vecchi calcoli, la predisposizione di un elaborato di calcolo nel quale il progettista definisca le nuove sollecitazioni e la loro simultaneità e fornisca quanto richiesto nella procedura di valutazione della conformità applicata.

I calcoli originari, se disponibili, devono comunque essere presi in considerazione per valutare le scelte del fabbricante originario (esempio moduli di efficienza, coefficienti di sicurezza adottati, etc.); altrimenti occorre desumere tali valori da altri documenti disponibili, che si auspica non vengano variati nel processo di modifica. Qualora non vi siano modifiche ai limiti ammissibili, i vecchi calcoli possono essere semplicemente integrati da quanto richiesto dalla PED come sopra specificato. E' facoltà del fabbricante adottare altri codici di calcolo che comprendano tutto quanto richiesto dalla PED con l'accortezza di verificare le implicazioni del nuovo codice sulle parti di attrezzature che non verranno modificate.

Il RES 2.2.3 (Metodo di calcolo) impone di *"limitare le sollecitazioni ammissibili delle attrezzature a pressione tenuto conto delle alterazioni ragionevolmente prevedibili in relazione alle condizioni di esercizio"*: in tal senso quindi deve essere considerato l'esercizio pregresso e quello futuro; da ciò si intuisce che anche i calcoli vanno riesaminati in funzione dei risultati della valutazione dello stato di conservazione dell'attrezzatura ed anche dell'analisi storica di esercizio che costituisce un utile riferimento per capire quale sia stato il comportamento dei materiali nel tempo. Casi tipici e semplici sono quelli per i quali occorre rivalutare la stabilità in funzione solo degli spessori residui delle varie membrature; casi più complessi potrebbero richiedere valutazioni del rischio su fenomeni corrosivi e loro incidenza media nel tempo, o addirittura valutazione basate su tecniche RBI e FFS per meglio valutare il comportamento nel tempo dopo le modifiche e gli intervalli di ricontrollo da applicare (*ndr rischi residui*). Ad ogni modo i margini di sicurezza devono essere fissati dal nuovo fabbricante, anche in conformità ai RES punto 7 della PED. In effetti la modifica consente, a differenza della certificazione di una nuova attrezzatura, di meglio valutare condizioni concrete di uso citate nel RES 2.2.3; ciò costituisce quindi un elemento di forza nel processo di analisi del rischio da prendere in debita considerazione nella modifica. Questa valutazione influisce notevolmente su un

concetto introdotto dalla PED, innovativo rispetto alla precedente normativa: infatti il RES citato chiede di tenere conto nella progettazione dei meccanismi di danno ragionevolmente prevedibili; è quindi evidente come l'esercizio pregresso e le valutazioni di eventuali nuovi fluidi possano rivelarsi un'ottima cartina di tornasole nell'analisi preliminare.

Un altro aspetto rilevante da sottolineare riguarda il concetto di verifica alla pressione ammissibile (modificata o meno): la PED infatti, rispetto ai precedenti dati di input da considerare, ha aggiunto anche i carichi dinamici e l'effetto di eventuali fluidi instabili; da ciò l'obbligo di dover predisporre nuovi calcoli per l'attrezzatura.

Altro punto controverso della progettazione riguarda camere non comprese nel libretto ISPEL che vanno comunque riclassificate e per le quali occorre applicare i pertinenti requisiti della Direttiva. Per le camere in categoria vanno applicati tutti i RES pertinenti; per le camere classificate in art. 4 comma 3 e per le camere solo per pressione di vuoto non è necessario il soddisfacimento dei RES (linea guida WGP 9/12) ma occorre valutare l'influenza che le suddette camere hanno sui RES della/e camera in categoria PED (linea guida WGP 1/13, 9/1, 9/9) con cui sono solidalmente connesse.

Un esame particolare merita la scelta delle sollecitazioni massime ammissibili connesse ai materiali d'origine ed eventualmente i nuovi materiali da utilizzare: si approfondirà l'argomento nel paragrafo 5. In ultimo è importante valutare correttamente eventuali regimi nuovi o pregressi nel campo dello scorrimento viscoso e della fatica: l'eventuale pregresso esercizio in tali regimi influenza fortemente il piano dei controlli da effettuare di cui si parlerà nel paragrafo 7.

5. Fluidi e materiali

La valutazione dei materiali esistenti, così come la scelta di nuovi materiali deve essere effettuata soprattutto in relazione al tipo di esercizio dell'attrezzatura, alle sue modalità d'uso e soprattutto ai fluidi previsti, che possono o meno essere differenti dagli originari, fermo restando che i coefficienti di giunzione siano coerenti con quelli originari, garantendo comunque i minimi ammessi come previsti dalla Raccolta S.

Qualora il fluido rimanga invariato e necessiti l'adozione di nuove membrane, sarebbe opportuno uniformarsi alla scelta dei materiali dello stesso gruppo CR/ISO 15608, in maniera tale da non modificare lo stato complessivo tensionale o generare differenti comportamenti in temperatura tra materiali dissimili, tanto più se l'analisi del rischio in esercizio ha mostrato un buon comportamento dei materiali di origine.

Può accadere invece che la modifica dipenda proprio dalla necessità di un cambio di fluido con altro/i di differenti caratteristiche con riferimento anche al Regolamento CLP 1272/2008, e/o dal cambio di materiali con altri di differente gruppo al fine di far fronte a differenti limiti ammissibili stabiliti (in particolare la temperatura) o fenomeni di deterioramento dei materiali originari in relazione al fluido o alle condizioni operative (fatiche termiche, eccessive corrosioni, scorrimento viscoso, etc.); in tal caso occorre comunque assicurare che non vi siano effetti negativi dovuti a materiali dissimili.

In ogni caso, per attrezzature fabbricate in regime ante PED e classificate in III e IV categoria, occorre effettuare una approvazione particolare dei materiali per i materiali di origine in quanto prodotti in un periodo nel quale, pur esistendo una standardizzazione (Raccolta M Ispesl) non esisteva il concetto di materiali armonizzati, come definito nella PED.

Per i nuovi materiali invece occorre attenersi al tipo di approvazione previsto dalla PED (armonizzazione, approvazione europea o particolare). Inoltre, nel calcolo, vanno adeguati i valori delle sollecitazioni ammissibili in funzione dei requisiti della PED 2.2.3 e 7.5. La valutazione e la selezione dei materiali quindi deve tener conto delle seguenti considerazioni non previste nella regolamentazione originaria: resistenza chimica per i

nuovi fluidi o per quelli originari ed influenza sulle proprietà fisico-chimiche, influenza dell'usura, adattabilità ai processi di fabbricazione e trattamento, oltre a valutare l'influenza di eventuali trattamenti termici necessari per la modifica sui materiali originari già eserciti.

La valutazione della compatibilità del materiale con i fluidi previsti va affrontata anche in relazione ai RES 2.6 (Corrosione ed altre aggressioni chimiche) e 2.7 (Usura). Occorre stabilire se alle nuove condizioni d'uso tali fenomeni sono già avvenuti (analisi dell'esercizio pregresso) o se possono avvenire (ad esempio per nuovi materiali, nuovi fluidi o cambio di modalità di esercizio e/o temperature di esercizio che li possano attivare). Qualora tali fenomeni di corrosione e/o usura siano accertati e/o prevedibili, occorre comunque prevedere sovrassessori, se non previsti in origine; occorre inoltre, a volte, considerare rate di corrosione già manifestati in passato per determinare ad esempio un ciclo di vita o intervalli di ricontrollo dedicati; in alternativa vanno studiati altri metodi di protezione. Tali informazioni devono essere chiarite nelle istruzioni operative.

Un ultimo aspetto di carattere tecnico può riguardare l'eventuale impiego a basse temperature dell'attrezzatura: in tal caso, qualora non sia indicata nel libretto ISPEL una temperatura minima ammissibile o occorra abbassare quella originaria, è opportuno attenersi al codice di riferimento (Raccolta VSR e Raccolta S). Il RES 4.1 (Materiali di parti pressurizzate) chiede espressamente che i materiali possiedano caratteristiche di tenacità e se del caso soddisfino specifici valori riportati nel RES 7.5 (energia di flessione da urto, i.e. resilienza). La selezione dei nuovi materiali evidentemente non genera difficoltà nella valutazione, oltre che per l'evidenza delle prove specifiche; tuttavia si è vincolati dalla valutazione dei materiali di origine. E' abbastanza frequente che attrezzature per le quali non era definita una temperatura minima ammissibile, siano stati fabbricate con materiali, che, seppur codificati come idonei a basse temperature (ad esempio AISI 316), non abbiano subito prove specifiche all'atto della fornitura e dell'accertamento materiali previsto secondo le modalità della Raccolta M IspeSl. E' altrettanto frequente che non si disponga dei certificati di origine e pertanto la decisione finale potrebbe essere quella di rinunciare alla modifica della temperatura minima. Tuttavia la PED non vieta di condurre un'analisi sull'effettiva necessità di valori specifici di resilienza in funzione delle temperature minime di progetto e degli spessori delle membrane: un utile riferimento è costituito dalla regola S.1.B. della Raccolta S IspeSl, così come è possibile effettuare talloni sulle membrane principali.

In ultimo, il RES 4.3 va applicato per i nuovi materiali allegando i certificati previsti in conformità alla norma EN 10204, mentre per i materiali esistenti occorre almeno disporre dell'allegato "riepilogo dei materiali" al libretto ISPEL, in modo da attestare che i materiali in origine abbiano comunque subito le prove previste dalla Raccolta M, che risultano equivalenti alla certificazione di tipo 3.2 della norma EN 10204. Va inoltre garantito il processo di rintracciabilità previsto dal RES 3.1.5 per i nuovi materiali e possibilmente il riconoscimento delle punzonature ISPEL originarie sui materiali esistenti.

6. Fabbricazione

I nuovi processi di fabbricazione da impiegarsi (ad esempio per nuove membrane) seguono le regole già consolidate per la PED – RES 3.1, 3.1.1, 3.1.2 (formatura, preparazione dei componenti mediante impiego di norme armonizzate, giunzioni permanenti e loro qualifica, materiali d'apporto, qualifica dei saldatori); con l'accortezza, ove possibile, di impiegare procedimenti di saldatura compatibili con i materiali di origine - se interessati da tali giunzioni - in quanto, in base alla linea guida WGP 7/1, occorre tenere in considerazione i processi di produzione che modificano le proprietà di base del materiale. Si richiama l'impiego di norme armonizzate per le attrezzature di II, III e IV

categoria, costituite dalla serie di norme EN 15609, EN 15614 e dalle norme EN 9606-1, EN 14732.

Il riesame e la validazione delle procedure di fabbricazione originarie riguardano in particolare l'esame dei giunti saldati originari, comunque garantiti dal libretto Ispesl (allegato "dichiarazioni del fabbricante").

E' raro, ma non da escludere, che tali processi o materiali di apporto impiegati in origine possano diventare incompatibili con nuove condizioni scelte per la modifica (ad esempio l'influenza di fluidi o limiti operativi incompatibili con discontinuità tipiche dei procedimenti di saldatura, stati tensionali residui non valutabili, cattivo comportamento allo scorrimento viscoso o alla fatica, etc.); tuttavia tale incompatibilità accertata dovrebbe indurre a rinunciare alla modifica. In tutti gli altri casi, disponendo del libretto Ispesl e dei suoi allegati, non necessitano attività particolari di riesame.

Un esame particolare merita il RES 3.1.4 (Trattamento termico): qualora la modifica comporti la necessità di effettuare un trattamento termico, occorre limitarlo il più possibile alle nuove membrature da realizzare. Tuttavia ricorrono casi in cui è necessario realizzarlo anche su saldature di connessione alle membrature originarie: in tali casi è opportuna una corretta analisi dei rischi e comunque una valutazione delle sollecitazioni adottate nella progettazione e dei parametri del trattamento stabiliti sulla base delle norme e dei risultati del piano di controllo e prove preliminari delle membrature esercite.

7. Piano di controllo, esami e prove

La PED stabilisce requisiti orientati alla fabbricazione di nuove attrezzature; di fatto non esiste un criterio standardizzato per la valutazione di attrezzature già esercite. Pertanto la scelta del piano di controllo (di seguito PCQ) è l'attività più complessa nel processo di modifica. Lo scopo principale è quello di accertare e valutare, mediante metodi di indagine mirati ed efficaci, lo stato di conservazione dell'attrezzatura e, nel caso di realizzazione di nuove membrature, la corretta esecuzione dei processi di fabbricazione e l'assenza di difetti. Naturalmente la scelta del PCQ è fortemente influenzata dalla convenienza economica della modifica complessiva da realizzare; pur tuttavia occorre assicurare che i risultati dei controlli consentano di valutare correttamente l'attrezzatura in relazione ai RES. In particolare si sottolinea l'onere delle "scelte appropriate" che il RES 1.2 (Norme di carattere generale) pone in capo al fabbricante. Tali scelte, almeno preliminarmente, andrebbero condivise con l'Organismo Notificato incaricato, nello spirito del RES 2.2.4, fatto salvo garantire i requisiti del codice applicato alla modifica.

La verifica dello stato di conservazione deve essere sempre effettuata prima della modifica e deve essere condotta sequenzialmente secondo tali fasi:

- a) esecuzione di esame visivo interno ed esterno, finalizzato a stabilire eventuali meccanismi di deterioramento in atto – RES 2.2.3, 2.4, 2.6, 2.7, 4.1 (corrosioni, erosioni, usure, difetti di lavorazione d'origine su materiale base e saldature, adeguatezza dei materiali in esercizio, etc.);
- b) sulla base anche dell'esame di cui al punto a) esecuzione di esame spessimetrico finalizzato a rilevare lo spessore minimo per ogni membratura – RES 2.6, 2.7, 4.2;
- c) esecuzione di prove non distruttive su giunti saldati ed eventualmente su materiale base – RES 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3;
- d) eventuali prove distruttive mediante prelievi di materiale con e senza esecuzione di talloni di verifica – RES 4.1, 4.3, 7.1, 7.5;
- e) riesame dei risultati e valutazione del deterioramento – RES 3.2.1.

Per le fasi di indagine a) e b) un ottimo strumento operativo è costituito dalla Linea Guida INAIL "Esame visivo e spessimetria"^[1], nella quale sono riportati anche alcuni criteri di

estensione del controllo e metodi di valutazione correlati ad un modello di analisi del rischio, con l'accortezza che la fase b) dovrebbe comunque prevedere l'intensificazione del controllo in zone sospette all'esame visivo o al controllo spessimetrico stesso.

Per la fase c) occorre scegliere il tipo di prove da effettuare, l'estensione e la localizzazione delle stesse. Non è opportuno a priori effettuare prove in conformità alle percentuali del codice utilizzato (ad esempio Raccolta S) in quanto lo scopo principale non è quello di effettuare un controllo su un processo standardizzato (saldatura), bensì principalmente quello di valutare quanto richiesto nel RES 2.2.3 (condizioni concrete d'uso e comportamento dei materiali); quindi tale fase dovrebbe essere stabilita di volta in volta sulla base dei risultati delle fasi a) e b), pur conservando il carattere di campionamento delle zone e del tipo di particolare da indagare (materiale base, saldature, etc.). Per tale scopo si possono utilizzare criteri più semplici, ad esempio quelli già standardizzati per la riqualifica di tubazioni in esercizio (UNI/TS 11325-1), fino a tecniche maggiormente mirate a seconda delle condizioni di esercizio e della specificità dell'attrezzatura (UNI 11096, RBI, FFS, etc.).

La fase d) deve essere sempre effettuata quando, per le particolari condizioni operative dell'attrezzatura, l'analisi dei rischi individui il pericolo di degrado o deterioramento progressivo dei materiali: questa fase può eventualmente essere sostituita mediante prove non distruttive da effettuare nella fase c) che forniscano risultati equivalenti (esempio repliche metallografiche). Lo scopo della fase d) è quello di confermare per il RES 2.1 che le proprietà dei materiali siano verificate.

La fase e) costituisce una parte dell'esame finale previsto dal RES 3.2.1: l'esame andrebbe condotto tenendo conto dei risultati e delle prove del PCQ stabilito per la modifica e di tutti i risultati e prove emersi nella vita dell'attrezzatura, pertanto la disponibilità di eventuali precedenti controlli è di fondamentale importanza nella valutazione complessiva.

La sezione del PCQ relativa invece alla eventuale realizzazione di nuove membrane deve soddisfare i RES 3.1.2 (Giunzioni), 3.1.3 (Prove non distruttive), 3.2 (Verifica finale), 3.2.1 (Esame finale), 3.2.2 (Prova); occorre quindi stabilire le prove distruttive (ove previsti talloni di saldatura) e non distruttive (di seguito PnD) da effettuare durante e alla fine della fabbricazione.

Qualora le nuove saldature interessino parte delle membrane esercite, sui cianfrini preparati su tali membrane sono sempre opportune PnD superficiali al 100%; diversamente il tipo, l'estensione e la localizzazione delle PnD sulle saldature che interessano solo nuove membrane, può soddisfare quanto prescritto dal codice di progetto e dalle norme utilizzate.

Il fabbricante della modifica può adottare un codice differente da quello originario (Raccolte VSR, VSG, M, S), tuttavia questa scelta complica il processo di valutazione della conformità, in quanto il nuovo codice scelto, ad esempio EN 13445 o EN 12952-12953, potrebbe imporre requisiti non raggiungibili nella valutazione delle membrane esistenti.

Argomento talvolta controverso riguarda il soddisfacimento del RES 3.2.2: di fatto la PED impone, nell'ambito della verifica finale, una "prova di resistenza alla pressione, di norma costituita da una prova a pressione idrostatica a un valore di pressione almeno pari, ove opportuno, al valore fissato dal RES 7.4; a tale valore di pressione vanno sollecitate sia le eventuali nuove membrane sia quelle esistenti. Nel caso di temperature massime ammissibili elevate il valore di prova può essere anche molto superiore ai valori di prova originari.

Qualora il fabbricante della modifica non la ritenga dannosa, la prova a pressione va sempre condotta ai nuovi valori stabiliti nel RES 7.4. Tuttavia, nel caso in cui la prova a pressione idrostatica risulti dannosa o non possa essere effettuata, si possono effettuare

anche altre prove di comprovata validità e che, ai sensi del RES 7, consentano di ottenere un livello di sicurezza globale equivalente. Prima di effettuare queste prove alternative, si applicano misure integrative quali prove non distruttive o altri metodi di efficacia equivalente.

E' importante osservare che sull'argomento, in generale anche per le nuove attrezzature, è stata emanata la linea guida WGP 8/2 dove si afferma che il valore di pressione scelto per condurre la prova a pressione idrostatica deve essere tale da assicurare di effettuare la prova di resistenza, tenendo in considerazione i fattori di sicurezza determinati e senza causare danni all'attrezzatura a pressione, mentre il punto 7.4 fornisce delle formule aggiuntive che possono essere applicate solo con le dovute considerazioni dei criteri generali sopra descritti (RES 3.2.2).

8. Altri requisiti essenziali di sicurezza

Qualora la modifica dell'attrezzatura non comporti anche la certificazione di un insieme del quale fosse eventualmente parte, si può escludere l'applicazione dei RES 2.8 (Insiemi), 2.9 (Disposizioni per il caricamento e lo scarico) e 2.11 (Accessori di sicurezza), 3.2.3 (Esame dei dispositivi di sicurezza), mentre vanno valutati i RES 2.10 (Protezione contro il superamento dei limiti ammissibili dell'attrezzatura a pressione) e 2.12 (Incendio all'esterno), fornendo opportune informazioni nelle istruzioni operative riguardo gli accessori di sicurezza di cui l'attrezzatura deve essere dotata e, ove applicabile, riguardo le protezioni da fenomeni di incendio esterno connesse o al fluido impiegato dall'attrezzatura o a condizioni specifiche del luogo di installazione.

I RES 2.3 (Disposizioni a garanzia delle manovre e dell'esercizio in condizioni di sicurezza), 2.4. (Mezzi di ispezione), 2.5. (Mezzi di scarico e di sfiato), devono essere comunque valutati in funzione delle condizioni di utilizzo dell'attrezzatura; generalmente quando necessita una modifica tali condizioni di utilizzo pregresse e quelle dell'eventuale nuova destinazione d'uso sono note.

E' necessario a questo punto considerare per tali RES anche la configurazione e l'utilizzo che assume l'attrezzatura nell'impianto in cui è installata. Questa analisi va condotta preliminarmente all'analisi di rischio e fornirà preziose informazioni riguardo la necessità di verificare e/o dotare l'attrezzatura di nuove connessioni cui connettere sistemi di funzionamento nell'impianto (ad esempio modifica dei volumi che comporti una modifica dei flussi e delle portate nell'attrezzatura, con conseguente necessità di aumentare il diametro di bocchelli).

Altro aspetto rilevante è la presenza di dispositivi di apertura e chiusura; in particolare se sono presenti dispositivi a manovra multipla come definiti nella Raccolta E Ispesl, per tali dispositivi deve essere espressamente previsto nel libretto Ispesl il tipo di omologazione originaria. Il fabbricante, in base alle nuove condizioni di progetto, deve sempre effettuare un'analisi dei rischi di compatibilità di tali sistemi nella nuova configurazione.

Riguardo il RES 2.3 (Disposizioni a garanzia delle manovre e dell'esercizio in condizioni di sicurezza), le soluzioni adottate dal fabbricante originario non coprono le responsabilità del fabbricante della modifica: quest'ultimo infatti è obbligato, per le aperture che possono essere azionate rapidamente, a valutare l'efficacia del dispositivo che ne impedisca l'apertura fintantoché la pressione o la temperatura del fluido costituiscono un rischio, tenendo conto dell'evoluzione della tecnica richiamata dalla PED.

Di semplice attuazione risulta l'applicazione del RES 3.3 (Marcatura e/o etichettatura) che prevede l'applicazione di una nuova targa; congiuntamente andrebbe rimossa la vecchia targa (anche se non risulta un obbligo) al fine di soddisfare il principio di evitare confusioni di marchi sul prodotto, in particolar modo se la modifica ha riguardato la variazione di un limite ammissibile. Infatti obbligo dei fabbricanti, nel soddisfacimento del RES 3.3, è anche

quello di fornire avvertenze fissate all'attrezzatura a pressione per attirare l'attenzione sugli impieghi non corretti.

Per concludere esaminiamo il RES 3.4 (Istruzioni operative), che si ritiene uno dei più importanti nel processo di modifica. Il fabbricante deve sempre assolvere alla commercializzazione del prodotto mediante l'emissione della dichiarazione di conformità UE e delle istruzioni operative, che in generale contengono le informazioni comuni riguardo il montaggio, l'assemblaggio, la messa in servizio, l'impiego, la manutenzione e le ispezioni da eseguirsi da parte dell'utilizzatore, le informazioni presenti nella marcatura. Il tutto deve essere corredato della documentazione tecnica nonché dai disegni e dai diagrammi necessari a una buona comprensione delle istruzioni stesse.

Per la modifica è importante evidenziare, nelle istruzioni, la storia pregressa dell'attrezzatura, eventualmente allegando un estratto della documentazione originaria, se utile alla comprensione delle disposizioni impartite. Un utile riferimento per fabbricanti ed utilizzatori, anche ai fini di requisiti contrattuali da specificare in principio, è la linea guida WGP 8/3.

Particolare attenzione va data ai rischi residui sull'uso scorretto e sulle caratteristiche particolari della progettazione; infatti l'impiego, la manutenzione e gli intervalli di ispezione devono tener conto di tutto quanto rilevato nel processo di valutazione della conformità, in particolare riguardo lo stato di conservazione dell'attrezzatura ed eventuali limitazioni nel ciclo di vita della stessa.

9. Conclusioni

In assenza di standard specifici per la valutazione della conformità in caso di modifiche di attrezzature esercite, la memoria si proponeva di fornire agli addetti al settore alcuni elementi utili per impostare un processo di verifica ed illustrare l'approccio corretto da seguire, il quale tuttavia non può tener conto dell'elevata variabilità dei casi e pertanto è stato orientato a considerazioni di carattere teorico. Nell'esperienza pratica i criteri individuati vanno sempre tarati rispetto alle problematiche riscontrate ed agli obiettivi fissati, fermo restando che tutti i requisiti essenziali di sicurezza ritenuti applicabili a seguito della valutazione del rischio devono essere soddisfatti. Si auspica che la memoria possa diventare l'inizio di un percorso normativo di tipo condiviso.

10. Bibliografia

[1] C. De Petris, C. Mennuti, G. Inguì, con contributo di G. Augugliaro, F. Giacobbe, P. Lenzuni, I. Mazzei - ISBN 978-88-7484-249-0 – Inail – Esame Visivo e spessimetria — edizione 2012

[2] d.lgs. 25.02.2000 n. 93 e s.m.i. – Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione

[3] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[4] d.m. 21.11.1972 – Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione

[5] Circolare Ispesl 14 del 06.12.2005 – Applicazione del d.m. 329/04 – Chiarimenti e precisazioni sulle riparazioni

[6] Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/UE - European Commission Publication Date 15/05/2017 – <http://ec.europa.eu>

Appendice 1 - Schema di sintesi dei RES applicabili ad una modifica

RES	Applicabilità	Vecchia documentazione da utilizzare	Nuova documentazione da elaborare
O.P. 3	SI	Base – Supporto - Esercizio	Analisi dei rischi
1.1	SI	Base – Supporto - Esercizio	Fascicolo tecnico
1.2	SI	Base - Esercizio	Analisi dei rischi – Soluzioni adottate - Manuale d'uso
1.3	SI	Base - Esercizio	Analisi dei rischi – Soluzioni adottate - Manuale d'uso
2.1	SI	Base - Esercizio	Analisi dei rischi – Soluzioni adottate –Calcoli
2.2.1	SI	Base - Esercizio - Calcoli	Analisi dei rischi – Soluzioni adottate - Calcoli
2.2.2	SI	Base - Esercizio - Calcoli	Calcoli e disegni, risultati PCQ conservazione
2.2.3	SI	Base - Esercizio - Calcoli	Calcoli e disegni, risultati PCQ conservazione
2.2.4	SI – per stato conservazione	Base - Esercizio – Calcoli - Disegni	PCQ conservazione
2.3	SI in funzione dell'esercizio	Esercizio - Disegni	Fascicolo tecnico
2.4	SI in funzione dell'esercizio	Esercizio - Disegni	Fascicolo tecnico
2.5	SI in funzione dell'esercizio	Esercizio - Disegni	Fascicolo tecnico
2.6	SI in funzione dell'esercizio	Esercizio - Disegni	Fascicolo tecnico
2.7	SI in funzione dell'esercizio	Esercizio - Disegni	Fascicolo tecnico
2.8	NO	-----	-----
2.9	NO	-----	-----
2.10	SI	Esercizio	Manuale d'uso
2.11	NO	-----	-----
2.12	SI	Esercizio	Manuale d'uso
3.1	SI se previsti	Base – Supporto	Piano di fabbricazione
3.1.1	SI se previsti	Base – Supporto	Piano di fabbricazione
3.1.2	SI	Base – Supporto - Esercizio	PCQ, WPS, WPAR, qual. saldatori per nuove saldature
3.1.3	SI	Base – Supporto - Esercizio	CND conservazione e CND nuove saldature
3.1.4	SI se previsto dal codice	Base – Supporto - Esercizio	Rapporto trattamento termico ove applicabile
3.1.5	SI per nuovi materiali	Base	Riepilogo nuovi materiali
3.2.1	SI	Base – Supporto - Esercizio	Esame visivo, dimensionale, CND, PCQ, qual. ISO 9712
3.2.2	SI	Base - Esercizio	Rapporto prova idraulica, certificati manometri
3.2.3	NO	-----	-----
3.3	SI	Targa	Nuova targa
3.4	SI	Esercizio – Supporto - esiti PCQ base	Manuale d'uso
4	SI	Base – Supporto – Esercizio (se riparati)	PMA, certificati EN 10204 per nuovi materiali, Calcoli
5	SI (se c'è rischio surriscaldamento)	Base – Supporto – Esercizio	Fascicolo tecnico
6	NO	-----	-----
7	SI materiali, giunzioni e pr. idraulica	Base – Supporto	Calcoli, rapporto prova idraulica,

Documenti di base: libretto ANCC/ISPESL completo, allegato riepilogo dei materiali, dichiarazioni del costruttore, disegni di fabbricazione dell'attrezzatura e dei particolari,

Documenti di supporto progressi: calcolo, certificati dei materiali, risultati dei processi di formatura e trattamenti, qualifiche di procedimenti di saldatura e saldatori, risultati delle prove e loro mappa di esecuzione.

Documenti di esercizio: verbali di messa in servizio e nuovo impianto (se del caso), verbali delle verifiche periodiche, verbali di riparazione (completi della documentazione di riparazione), documentazione scorrimento viscoso circolare 48/03 ISPESL.

Proposta metodologica per la valutazione dei rischi per gli assiemi PED. Esplicitazione del fattore umano

G. Baldissoni¹, M. Demichela¹

¹ Politecnico di Torino, DISAT

Sommario

In questo documento è proposta una metodologia semiquantitativa d'analisi del rischio per le attrezzature a pressione soggette alla direttiva sulle attrezzature a pressione - Direttiva 2014/64/UE (PED), relativa all'immissione sul mercato di attrezzature a pressione.

L'obiettivo di questa metodologia è la valutazione del rischio per tutte le attrezzature a pressione o insiemi (nuove attrezzature, di seconda mano o importate dal paese terzo), comprese tutte le forme di approvvigionamento immesse sul mercato dell'UE, corrispondenti alla valutazione di conformità.

Nonostante l'analisi del rischio sia obbligatoria in questa direttiva (dichiarata nei Requisiti essenziali di sicurezza - Allegato 1 punto 3 delle osservazioni preliminari), non sono fornite le istruzioni specifiche, sebbene numerosi approcci siano stati sviluppati nel tempo ed emanate linee guida.

I pericoli connessi con l'apparecchiatura, le deviazioni di processo, le relative cause e conseguenze devono essere valutate durante le varie fasi di funzionamento dell'apparecchiatura. A supporto di questo processo si è utilizzata la metodologia HAZID.

La stima del rischio, per le apparecchiature e le persone, è ottenuta mediante indici di rischio, che tengono conto o meno della protezione dell'apparecchiatura. Il livello di rischio è fornito attraverso ponderazioni numeriche degli elementi nelle equazioni di rischio.

La metodologia è applicabile a tutte le attrezzature a pressione soggette a PED. Nel caso presente, la metodologia è applicata nel caso di studio di una colonna di distillazione con ribollitore integrato, che ha portato a specifici scenari incidentali che sono stati analizzati per la predisposizione di raccomandazioni di sicurezza adeguate.

1. Introduzione

Le attrezzature in pressione sono considerate tra le apparecchiature più pericolose [1], poiché in caso di guasto possono presentarsi serie conseguenze [2]. Già nella prima metà del XX secolo furono redatte le prime norme per l'approvazione e autorizzazione delle apparecchiature in pressione, come, ad esempio, in Italia il r.d. 15/5/1927 n. 824. Più recentemente l'Unione Europea ha valutato che la materia fosse sufficientemente importante da richiedere l'uniformazione delle legislazioni nazionali attraverso diverse direttive, PED (Pressure Equipment Directive), come 97/23/CE, e giungendo alla direttiva 2014/68/UE. Quest'ultima istanza normativa ha adottato come criterio per la progettazione e la commercializzazione delle apparecchiature in pressione la valutazione dei rischi dell'apparecchiatura stessa. Il campo di applicazione della direttiva PED copre tutte le apparecchiature e gli assiemi la cui massima pressione superi 0,5 bar (50 kPa). La valutazione di conformità è obbligatoria e l'analisi dei rischi è una parte fondamentale e indispensabile dell'intero processo.

L'allegato I della direttiva PED prescrive l'esecuzione dell'analisi del rischio come requisito essenziale. In particolare, il punto 1.2 dell'allegato raccomanda ai produttori di eliminare o ridurre i pericoli identificati, di definire e applicare delle misure di protezione adeguate. La direttiva però risulta piuttosto vaga su come garantire il rispetto dei requisiti e su come valutare l'efficacia delle misure protettive adottate.

Hassim e Hurme [4] hanno dimostrato che i potenziali rischi devono essere identificati il prima possibile durante lo sviluppo e la progettazione delle apparecchiature. I produttori devono riconoscere tutti i possibili pericoli, le cause e le conseguenze degli eventi che possono causare danni alle apparecchiature e/o alle persone. Per cui si devono tenere in considerazione tutti gli eventi che durante le normali operazioni possono causare problemi alle persone, agli impianti e alle apparecchiature. In tale valutazioni si devono considerare i progetti, i materiali, i metodi di fabbricazione, d'ispezione e il comportamento delle apparecchiature durante il normale funzionamento, a seguito di guasto o di errore operativo. In letteratura sono presenti diversi esempi di metodologie per la valutazione dei rischi applicate alle apparecchiature in pressione, per esempio: Gerbec [5] propone l'uso dell'HAZOP per un sistema di regolazione della pressione del gas naturale. Invece Casemirra et al [6] hanno utilizzato diversi metodi (FMEA, HAZOP e FTA) per analizzare le stazioni di rifornimento di idrogeno. Biswal et al. [7] hanno utilizzato l'FTA per analizzare il sistema di raffreddamento dell'idrogeno.

In questo testo è presentata una metodologia per la valutazione dei rischi delle attrezzature in pressione. Questa metodologia è stata sviluppata per aiutare il progettista nella verifica della conformità alla direttiva PED, in particolar modo in caso d'insiemi e integra esplicitamente la valutazione dell'errore operativo, che in fase di assemblaggio, manutenzione, ispezione e, spesso, di operatività risulta fondamentale per la sicurezza degli impianti. Il metodo proposto è applicato a una colonna di distillazione.

2. Metodologia d'analisi

In questo articolo è presentato un nuovo approccio per analizzare le apparecchiature in pressione e aiutare il progettista a verificare la conformità alla direttiva PED. In particolare, la metodologia proposta è stata sviluppata per l'analisi degli insiemi. L'insieme è definito come "varie attrezzature a pressione montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale" (punto 6 articolo 2). In caso d'insieme è più difficile verificare la conformità alla direttiva PED, poiché per gli insiemi non è sufficiente la valutazione del rischio per ogni singolo dispositivo, ma è necessaria anche una valutazione del rischio legata all'integrazione delle diverse parti (punto 6 articolo 14).

La metodologia proposta è di tipo semi-quantitativo e utilizza la metodologia Hazard Identification (HazId) per l'identificazione dei pericoli.

La struttura della metodologia proposta è riportata nella Figura 1.

La prima fase dell'analisi è l'identificazione dell'apparecchiatura. In questa fase sono elencate le apparecchiature e i dispositivi di servizio coinvolti dall'analisi. E per ogni parte dell'apparecchiatura e dei dispositivi di servizio sono identificate le condizioni di lavoro e quelle massime ammissibili, in termini di pressione, temperatura e portata.

Sulla base della massima pressione ammissibile è valutata l'applicazione della direttiva PED. Se l'apparecchiatura è al di fuori dei limiti d'applicazione della direttiva PED, l'analista valuta l'applicabilità di altre direttive, come: ATEX, Macchine, ecc.

In ogni caso è necessario valutare il rischio delle apparecchiature al fine di verificare la conformità alle normative e standard nazionali e internazionali. Le tecniche di valutazione dei rischi utilizzate dipenderanno dal tipo di apparecchiatura e dalle condizioni di lavoro.

Se la PED è applicabile, l'analista raccoglierà i dati tecnici più di dettaglio, come l'elenco dei dispositivi di servizio, i dettagli costruttivi, ecc.

Sulla base dei dati raccolti nella fase precedente, si può determinare se l'apparecchiatura può essere classificata come insieme, in accordo al punto 6 dell'articolo 2.

In caso l'apparecchiatura sia classificabile come insieme si procede a un'analisi funzionale, identificando tutte le parti e le attrezzature che potrebbero essere fonte di uno scenario pericoloso.

Dopo l'analisi funzionale, si procede all'identificazione dei pericoli attraverso la metodologia Hazld. Lo scopo di questa procedura è di identificare precocemente i potenziali pericoli per persone, apparecchiature e beni. Inoltre, sono identificate le cause e le possibili conseguenze per ogni pericolo identificato.

Figura 1. Struttura della metodologia d'analisi proposta

In alcuni casi, alcune conseguenze possono fungere da cause di ulteriori condizioni pericolose, che possono causare gravi danni, per cui devono essere tenute nel debito conto durante la valutazione del rischio [8, 9, 10].

Dopo di che si procede a vagliare la possibilità che si possa verificare un effetto domino.

La valutazione semi-quantitativa del rischio, sia riguardo le cose che per le persone, è fatta attraverso le equazioni (1), (2), (3) e (4).

$$R_e = S_e \cdot F \quad (1)$$

$$R_p = S_p \cdot F \cdot E_p \quad (2)$$

$$R_e^* = R_e / L_e \quad R_p^* = R_p / L_p \quad (3)$$

$$R_p^* = R_p / L_p \quad (4)$$

dove

R_e – Livello di rischio per le cose,

R_p – livello di rischio per le persone,

S_e – magnitudo (per le cose),

S_p – magnitudo (per le persone),

F – frequenza,

L_e – numero di sistemi di protezioni per le cose,

L_p – numero di sistemi di protezioni per le persone,

E_p – persone esposte,

R_e^* - livello di rischio residuo per le cose,

R_p^* - livello di rischio residuo per le persone.

Sono state sviluppate delle equazioni specifiche per la valutazione dei rischi riguardanti le persone e le cose, poiché alcuni dei dati considerati, come la magnitudo, possono variare a seconda del tipo di bersaglio considerato, in accordo con la direttiva 2014/68/UE. L'analisi del rischio deve essere condotta sia dal punto di vista meccanico che di processo e valutando l'impatto degli eventi indesiderati sia sulle persone che sulle cose presenti. La magnitudo e la frequenza sono stimate attraverso dati di letteratura (banche dati, dati storici e registrazioni aziendali) oltre che pareri di esperti, inizialmente trascurando i sistemi di protezione installati, in modo da stimare i dati di rischio dell'apparecchiatura nelle condizioni più cautelative.

Dopo di che si può stimare il valore di rischio ridotto, tenendo in considerazione l'effetto delle misure di prevenzione e protezione messe in campo. Le misure preventive e protettive da tenere in considerazione sono sia di carattere tecnico (es. sprinkler, valvole di sicurezza, dischi di rottura, ...), sia operative (es. uso di procedure scritte, ...) e organizzative (es. gestione delle manutenzioni, ispezioni, ...).

In tabella 2 sono riportati i valori dei parametri usati nelle equazioni precedenti.

Sono proposti tre livelli di rischio:

- Rischio basso: ottenuto quando il valore del rischio è inferiore a 4, rappresentato dal colore verde.
- Rischio medio: ottenuto quando il valore di rischio è compreso tra 4 e 12, rappresentato dal colore giallo.
- Alto rischio: ottenuto quando il valore del rischio supera 12, essendo rappresentato dal colore rosso.

In base al valore di rischio ottenuto si dovranno attuare diverse attività correttive. Nel caso di rischio alto le misure correttive suggerite andranno messe in opera immediatamente, e andranno svolte analisi più di dettaglio al fine di definire meglio gli scenari e i valori di rischio. In caso di rischio medio si dovrà redigere un cronoprogramma per l'attuazione delle misure correttive suggerite. Invece in caso di rischio basso bisognerà continuare a monitorare la situazione e nel tempo continuare a lavorare per ridurre il rischio.

Magnitudo sulle cose (Se)	
Solo problemi sul processo	1
Manni minori (es. 1 giorno di fermata)	2
Danni gravi, le apparecchiature sono ancora riparabili	4
Danni critici, le apparecchiature non sono più riparabili devono essere sostituite	8
Magnitudo sulle persone (Sp)	
Medicazioni	1
Infortunio grave	2
Un incidente mortale	4
Incidente <i>con più fatalità</i>	8
Frequenza (F)	
Improbabile $f \leq 10^{-5}$ anni ⁻¹	1
Possibile ($10^{-3} \geq f > 10^{-5}$) anni ⁻¹	2
Probabile ($10^{-1} \geq f > 10^{-3}$) anni ⁻¹	3
Frequente ($1 \geq f > 10^{-1}$) anni ⁻¹	4
Esposizione (E)	
Occasionale	0. 1
Giornaliera	0. 5
Più volte al giorno	0. 8
Costantemente	1
Numero di sistemi protettivi (Le and Lp)	
1–2	1
3–5	2
6–8	3
>8	4

Tabella 1. Valori degli indici usati per la stima del rischio

3. Caso applicativo

La distillazione è un processo di separazione di miscele di liquidi tra i più utilizzati nell'industria di processo [11, 12, 13]. In questa apparecchiatura i liquidi sono separati in base alla volatilità relativa dei diversi componenti: in cima alla colonna si ottiene la frazione più volatile, in coda alla colonna rimane invece il componente meno volatile. La distillazione può essere svolta sia in una colonna a riempimento che in una colonna a piatti. In testa alla colonna i vapori sono raccolti in un condensatore e una parte delle condense ottenute sono rinviate in testa alla colonna come reflusso. Invece in coda alla colonna una parte del liquido ottenuto è fatto evaporare e alimentato nuovamente in fondo alla colonna. La distillazione

può essere condotta a diversi livelli di pressione (sottovuoto, a pressione ambiente, in pressione) in base alle condizioni di processo e alle caratteristiche dei diversi componenti. Lo studio di sicurezza delle colonne di distillazione è un passo importante per le industrie di processo poiché tali apparecchiature possono contenere grandi quantità di sostanze pericolose (es. tossiche, infiammabili), in condizioni critiche (es. temperatura, pressione, ...) [14].

Al fine del presente articolo si è considerato come caso applicativo lo studio di una colonna di distillazione del tipo a piatti, che lavora ad alta pressione e che presenta un ribollitore parziale integrato nella parte inferiore della colonna. Il condensatore è considerato come una parte a sé stante e al di fuori dei limiti d'analisi. In questo modo la parte più critica risulta essere la sezione della colonna con il ribollitore integrato.

Viste le condizioni di lavoro della colonna analizzata, essa ricade nell'ambito di applicazione della direttiva PED. Inoltre, tale apparecchiatura può essere classificata come "insieme" in quanto formata da diverse sezioni operanti in pressione, montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale e come tale commercializzato ed esercito, si veda ad es. Bragatto et al. [15].

Nel caso analizzato la portata di materia prima entra in condizioni di progetto controllate con un apposito scambiatore di calore a monte della colonna di distillazione e al di fuori dei limiti dell'analisi. Il distillato è estratto sotto forma di vapore in testa alla colonna, una parte del prodotto una volta condensato è reinserito sempre in testa alla colonna. Il condensatore risulta essere una attrezzatura distinta e al di fuori dei limiti d'analisi. Il ribollitore integrato in coda alla colonna usa come fluido termico il vapore condensato. La colonna è corredata da manometri per la rilevazione della pressione e di una valvola di sicurezza PSV opportunamente dimensionata. Le giunzioni fra le varie componenti in pressione risultano qualificate, ovvero dotate di un certificato di qualifica della procedura, secondo le norme tecniche di riferimento, ed effettuate da personale qualificato, dotato di certificazione di prova di qualifica.

4. Risultati

Nel presente caso di studio è analizzata una colonna di distillazione con pressione di esercizio superiore a 0,5 bar e dunque ricadente nel campo di applicazione della PED. La colonna di distillazione è considerata come un insieme di 5 parti:

1. Testa della colonna;
2. Sezione di arricchimento;
3. Sezione di strippaggio;
4. Ribollitore;
5. Fondo della colonna.

In Figura 2 è riportato un estratto dei risultati dell'applicazione della metodologia proposta. Le prime 3 colonne riportano i risultati dell'analisi HazId. Nella quarta colonna è indicato l'articolo di riferimento della direttiva PED. Le colonne successive contengono i parametri e i risultati delle equazioni da 1 a 4. Sono poi riportate le misure di protezione per le persone e per le cose. Nell'ultima colonna sono riportati eventuali commenti e le raccomandazioni finali.

Il massimo valore di rischio individuato è stato medio, non sono stati identificati casi con criticità tali da portare a un valore di rischio alto.

No.	Function	Hazard/Deviation	Classes	Consequences	Further Consequences	4 PED Safety Req.	Risk					Safeguards (g)	Safeguards (g)	Comments/recommendations							
							Se	Sp	F	Op	Rm				Rpr	Li	Sp	Int	Op		
1.1	The Safety Fuel	Leak of anticorrosion substances	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	1	1.0	0.0	3	0.75	1	2	3	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, PPE, Training			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions	
	Outside corrosion	Environment	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	1	1	0.5	2	0.5	1	2	3	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions, PPE, Safety barrier			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions	
Failure	High pressure	Explosion	Explosion	Leaks	Leaks	2.2	8	6	1	0.5	6	6	2	0	4	1.000000	Instruments for monitoring process conditions, PDC, Automatic safety means, Fire fighting system	Instruments for monitoring process conditions, Safety barrier, PDC, Automatic safety means, Fire fighting system			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions	
	Operator error/maintenance	Operator error/maintenance	Explosion	Explosion	Leaks	Leaks	2.2	8	6	1	1	6	6	2	2	4	4	Procedure for maintenance, Scheduled maintenance, Controlling maintenance activities, Operator training, Safety barrier	Procedure for maintenance, Scheduled maintenance, Controlling maintenance activities, Operator training, Safety barrier	As the proposal identified in connector with 4 people, there is a need for training for specific the operators (H2O severity)	
						Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Instruments for monitoring process conditions, PDC, Automatic safety means, Fire fighting system
2.2	Cable connector (start)	Blocked pipe (start)	High pressure in the column	Explosion	Leaks	Leaks	2.2	8	6	1	0.5	6	6	2	2	4	4	Instruments for monitoring process conditions, Automatic safety means	Instruments for monitoring process conditions, Automatic safety means	Pressure in the header tubes need to be approximately equal to the pressure in the column	
						Releases	2.2	4	1	1.0	0.5	4	0.75	1	1	3	0.375				Instruments for monitoring process conditions, Automatic safety means
						Damage of the header	2.2	4	1	1.0	0.5	4	0.75	1	1	3	0.375				Instruments for monitoring process conditions, Automatic safety means
						Foreign water	2.2	2	1	1.0	0.5	4	0.75	2	2	1.5	0.375				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions, Automatic safety means
	Inappropriate welding	Manufacturer error	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	5	1.0	0.8	2.0	0.80	1	2	3.0	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, PPE, Training			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions	
	Inappropriate joint	Assembly/connector error	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	1	1.0	0.8	2.0	0.80	1	2	3	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, PPE, Training			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions, PPE, Safety barrier	
	Inappropriate joint	Manufacturer error	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	1	1.0	0.8	2.0	0.80	1	2	3	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, PPE, Training			
					Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions, PPE, Safety barrier	
2.2	Cable joint in end of Connector	Inappropriate joint	Manufacturer error	Corrosion	Leaks	Leaks	2.2	2	1	1.0	0.8	2.0	0.80	1	2	3	0.375	Visual inspections, Procedures for periodic inspections	Visual inspections, Procedures for periodic inspections, PPE, Training		
						Releases	2.2	4	5	1	0.5	4	0.5	2	2	3	1.50				Visual inspections, Procedures for periodic inspections, Instruments for monitoring process conditions, PPE, Safety barrier

Figura 2. Esempio dei risultati dell'analisi.

I livelli di rischio più elevati ottenuti sono legati a deviazioni tipo: rotture (causate dall'alta pressione, dell'errore dell'operatore); corrosione (causata dalla mancanza di sostanze anticorrosive o del materiale utilizzato); l'ostruzione delle tubazioni (causate da incrostazioni o errori operativi); l'uso di materiali di bassa qualità (causate da errore del fabbricante); portate non corrette alte/basse (causate da errori operativi); saldature, tenute e giunzioni inappropriate tra le diverse sezioni (causate da errori del fabbricante).

Tutti i problemi causati e/o correlati agli operatori possono essere prevenuti attraverso un'adeguata formazione e informazione. Il maggior numero di deviazioni registrate è correlato agli errori operativi durante la manutenzione. Questo tipo di deviazione sovente è legata all'intervento di personale esterno e di ditte fornitrici.

Le altre deviazioni identificate sono legate alle condizioni di processo e potrebbero essere gestite introducendo adeguate azioni preventive, correlate all'adeguamento dei parametri di processo e al monitoraggio degli stessi. Una parte significativa delle misure individuate sono classificabili come requisiti di sicurezza della direttiva PED. Ma una parte delle misure individuate non ricade nella direttiva, pur essendo di fondamentale importanza per la gestione in sicurezza dell'apparecchiatura.

5. Conclusioni

La valutazione del rischio per le apparecchiature di processo può essere eseguita con diverse metodologie ottenendo risultati con diversi livelli di dettaglio e richiedendo informazioni e risorse proporzionate al tipo di risultato ricercato. Un'analisi dei rischi esaustiva deve comprendere una valutazione di tipo meccanico, di processo e d'interazione con la componente umana. L'approccio proposto fornisce una metodologia per un'analisi dettagliata delle attrezzature e una valutazione semi-quantitativa del rischio nei diversi

scenari identificati. Il valore del rischio è classificato in tre fasce distinte (verde-basso, giallo-medio o rosso-alto). In base al livello di rischio si può stimare un programma per l'attuazione delle misure correttive. Le misure correttive vanno individuate in fase di analisi e riportate fra le note. Nel caso di studio analizzato è stata prestata particolare attenzione alla sezione contenente il ribollitore, in quanto risultata la sezione più rischiosa dell'intera colonna.

La metodologia d'analisi proposta aiuta nelle fasi di certificazione secondo la direttiva per le attrezzature a pressione (PED), poiché la valutazione dei rischi è parte integrante e sostanziale del processo di certificazione. La struttura dell'analisi permette un'agevole valutazione dei rischi e al contempo la sua struttura consente un'analisi esaustiva e completa. Infatti in tale procedura sono tenuti in considerazione e analizzati i possibili errori umani e problemi organizzativi.

6. Riconoscimenti

Gli autori desiderano riconoscere il prezioso supporto all'impostazione della ricerca fornito da Paolo Bragatto e Corrado Delle Site, INAIL e la collaborazione di Marko DJapan dell'Università di Kragujevac, Serbia per l'applicazione del metodo.

7. Riconoscimenti

[1] J. Darlaston and J. Wintle, "Safety factors in the design and use of pressure equipment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 3, pp. 471-480, 2007.

[2] Occupational Safety and Health Branch Labour Department, *Brief Accident Cases of Boilers and Pressure Vessels in Hong Kong*, Hong Kong: Occupational Safety and Health Branch Labour Department, 2008.

[3] ARIA, *Analysis of pressure equipments related accidents*, Paris: French Ministry of Environment, Energy and the Sea, 2016.

[4] M. H. Hanssim and M. Hurme, "Occupational chemical exposure and risk estimation in process development and design," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 88, no. 4, pp. 225-235, 2010.

[5] M. Gerbec, "A reliability analysis of a natural-gas pressure-regulating installation," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 95, no. 11, pp. 1154-1163, 2010.

[6] M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina and C. Lombardo, "Safety studies of a hydrogen refuelling station: Determination of the occurrence frequency of the accidental scenarios," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 14, pp. 5846-5854, 2009.

[7] G. R. Biswal, R. P. Maheshwari and M. L. Dewal, "Fault tree analysis and process instrumentation of S 2WRS based hydrogen cooling system," in *2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, EnergyCon 2010*, Manama; Bahrain, 2010.

[8] D. J. Smith, "Appendix 12 - HAZID Checklist," in *Cover image Reliability, Maintainability and Risk*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 423-425.

[9] M. Glossop, A. Ioannides and J. Gould, *Review of hazard identification techniques*, Buxton: Health and Safety Laboratory, 2000.

[10] P. W. H. Chung, J. de Brugha, J. McDonald and J. Madden, "Process plant safety information repository and support for safety applications," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, no. 5, pp. 788-796, 2012.

[11] A. A. Kiss and Ž. Olujić, "A review on process intensification in internally heat-integrated distillation columns," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 86, pp. 125-144, 2014.

- [12] N. Medina-Herrera, A. Jiménez-Gutiérrez and S. M. Mannan, "Development of inherently safer distillation systems," *Development of inherently safer distillation systems*, vol. 29, pp. 225-239, 2014.
- [13] L. Cong, L. Chang and X. Liu, "Nonlinear-wave based analysis and modeling of heat integrated distillation column," *Separation and Purification Technology*, vol. 150, pp. 119-131, 2015.
- [14] Ü. Can, M. Jimoh, J. Steinbach and G. Wozny, "Simulation and experimental analysis of operational failures in a distillation column," *Separation and Purification Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 163-170, 2002.
- [15] P. Bragatto, S. Ansaldi and C. Delle Site, "A Pooled Knowledge Basis on Pressure Equipment Failures to Improve Risk Management in Italy," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 33, pp. 433-438, 2013.
- [16] B. Knegtering and H. J. Pasman, "Safety of the process industries in the 21st century: A changing need of process safety management for a changing industry," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 2, pp. 162-168, 2009.
- [17] P. Jain, H. J. Pasman, S. P. Waldram, W. J. Rogers and M. S. Mannan, "Did we learn about risk control since Seveso? Yes, we surely did, but is it enough? An historical brief and problem analysis," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 49, no. A, pp. 5-17, 2017.
- [18] J. Escande, C. Proust and J. C. Le Coze, "Limitations of current risk assessment methods to foresee emerging risks: Towards a new methodology?," *Elsevier Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 43, pp. 730-735, 2016.
- [19] H. J. Pasman, S. Jung, K. Prem, W. J. Rogers and X. Yang, "Is risk analysis a useful tool for improving process safety?," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 6, pp. 769-777, 2009.
- [20] P. K. Marhavidas, D. Koulouriotis and V. Gemeni, "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, no. 5, pp. 477-523, 2011.

Controllo ultrasonoro con tecnica A-scan/B-scan con carrello magnetico sulle lamiere di un serbatoio di stoccaggio di prodotti petroliferi: dimostrazione pratica su un serbatoio ubicato in un'industria operante nel settore petrolchimico

P. Addonizio¹, G. M. Calabrese², M. Madonna¹, G. Oliviero², A. Visciano²

¹ Inail - Uot di Napoli

² D.E.M.I Srl

Sommario

In linea con la quarta rivoluzione industriale che sta investendo tutti i processi produttivi, nel presente lavoro si vuole presentare una tecnica innovativa per effettuare il controllo spessimetrico ad ultrasuoni con tecnica A-scan/B-scan eseguito con l'ausilio di un robot magnetico.

Il lavoro, svolto in collaborazione tra Inail Uot di Napoli e la società D.E.M.I Srl, si prefigge lo scopo di dimostrare l'affidabilità e la velocità di esecuzione del controllo ultrasonoro con tecnica A-scan/B-scan con carrello magnetico.

La maggiore affidabilità della misurazione, effettuata dal robot, è data dalla modalità di registrazione in continuo dei valori di spessore che comporta l'aumento della probabilità di rilievo di eventuali anomalie. Il collegamento del robot ad un PC, inoltre, consente di acquisire un'enorme quantità di dati di spessore correlati alla posizione delle letture e di rivedere immediatamente i profili A-Scan, B-Scan registrati. Le immagini possono essere salvate ed esportate direttamente in fogli di calcolo o di testo; utilizzabili anche ai fini di *reporting*. L'analisi finale dei dati acquisiti permette di evidenziare lo spessore minimo rilevato, lo spessore medio e la deviazione standard. Altro vantaggio da considerare riguarda le nuove modalità di esecuzione del controllo che non comporta più l'utilizzo di ponteggi o scale in quanto il robot viene comandato direttamente da terra, con ricadute positive anche sulla sicurezza di chi effettua le scansioni.

Il lavoro espone i risultati ottenuti a seguito di rilievi spessimetrici eseguiti sulle virole di un serbatoio cilindrico di grandi dimensioni di stoccaggio di prodotti petroliferi presso un'industria di Napoli operante nel settore petrolchimico.

1. Introduzione

I controlli non distruttivi (CND) sono un insieme di prove fisiche e rilievi finalizzati alla ricerca ed identificazione di eventuali difetti presenti in un materiale che non richiedono la distruzione o l'asportazione di materiale dalla struttura oggetto di indagine, consentendo di esprimere un giudizio sulla accettabilità dei singoli pezzi, o viceversa sul loro rifiuto.

In ambito industriale, le prove non distruttive hanno sostituito nel tempo i tradizionali "controlli distruttivi a campione" assumendo una funzione rilevante per la prevenzione di incidenti dovuti alla rottura di componenti contenenti fluidi pericolosi. Difatti, tali controlli consentono di verificare gli spessori di tubi e recipienti in maniera non invasiva e talvolta anche con gli impianti in esercizio [1].

Nel presente lavoro verrà presentato uno strumento innovativo per condurre il controllo spessimetrico ad ultrasuoni. Questo tipo di controllo non distruttivo è basato su uno specifico principio fisico, ovvero quello della propagazione nei solidi, liquidi o gas di fasci di onde elastiche di tipo meccanico con frequenza superiore a quella dei suoni udibili dall'uomo. Le onde ultrasonore sono inviate da un generatore nel sistema da esaminare ed, grazie al contatto con la superficie del pezzo, con interposto un adeguato accoppiante tra le due interfacce, è capace di trasferire il suono senza eccessivo assorbimento. Le

onde così trasmesse, vengono attenuate dalla materia che incontrano e riflesse, deviate o assorbite dalle eventuali discontinuità. Un rilevatore riceve, amplifica, filtra e visualizza i segnali che ritornano alla sonda dopo la propagazione. Si possono quindi rilevare gli echi riflessi da eventuali difetti interni o dalla parete di fondo (eco di fondo). L'energia riflessa da una discontinuità è funzione dalle sue dimensioni, orientamento e natura. Il diagramma che presenta l'ampiezza degli echi in funzione del tempo si chiama oscillogramma oppure A-Scan. Poiché le onde ultrasonore si propagano a velocità costante, dall'oscillogramma è possibile rilevare direttamente la profondità a cui le discontinuità sono situate in quanto le distanze degli echi letti sono proporzionali alle distanze reali.

La rappresentazione B-Scan, invece, permette di visualizzare una sezione trasversale del pezzo in esame. È un diagramma bidimensionale dove il periodo di corsa dell'impulso ultrasonico (profondità) viene rappresentato come spostamento lungo un asse (asse verticale) e il movimento della sonda (lunghezza di scansione) è rappresentato come spostamento lungo l'altro asse (asse orizzontale) [2].

1.1 Lo strumento di misura

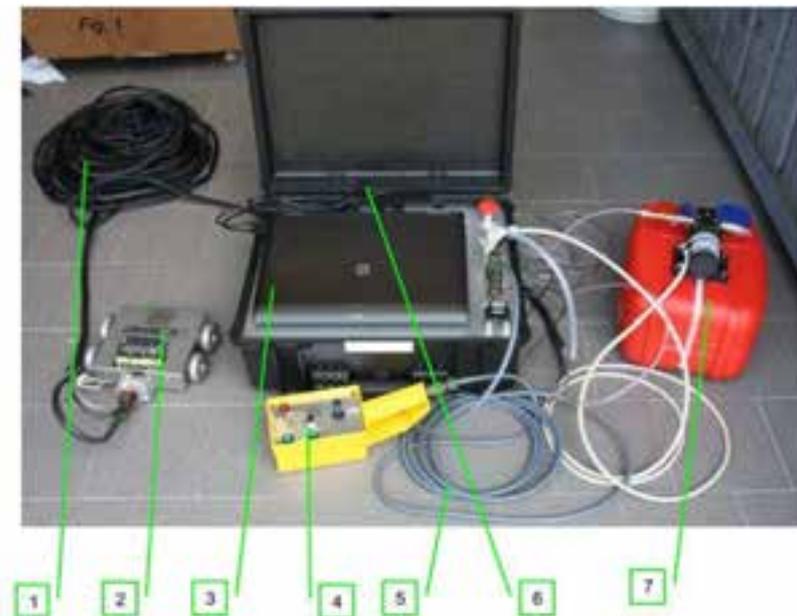


Figura 1. Strumento di misura

Lo strumento di misura, che si presenta in questo studio, rappresenta un'innovazione tecnologica nel modo di eseguire i controlli ultrasonori in quanto è capace di rilevare in continuo lo spessore delle lamiere dei serbatoi mediante un robot. Tale strumento, il cui nome commerciale è *brick crawler* (mattone che striscia), è compatto e risulta costituito dai seguenti componenti (Fig.1):

- 1) cavo di lunghezza 25 m per connettere il robot al sistema di controllo ed è comprensivo di tubo di irrigazione per l'accoppiamento della sonda;
- 2) carrello dotato di 4 ruote magnetiche a motori indipendenti;
- 3) PC portatile con batteria integrata;
- 4) joystick per direzionare l'asse motore;
- 5) cavo di lunghezza 5 m che collega il joystick al sistema di controllo;
- 6) cavi di collegamento USB;
- 7) serbatoio d'acqua con pompa integrata.

Il sistema così costituito risulta leggero e contenuto nelle dimensioni tale da renderlo facilmente trasportabile in due contenitori robusti.

Il carrello che effettua lo scanner (brick) ha un telaio in acciaio inox ed è dotato di quattro ruote motrici magnetiche a motori indipendenti che gli consentono di muoversi anche su superfici convesse e concave con diametro minimo di 2 metri. La forza attrattiva di ciascuna ruota è di 500 N che permette al carrello di muoversi verticalmente lungo le pareti laterali di serbatoi fino a 25 metri. La sonda presente sul carrello è montata su un giunto cardanico grazie al quale si adatta agevolmente al profilo della superficie. Per l'accoppiamento della sonda viene utilizzata l'acqua ed a tal fine il sistema è dotato di un serbatoio d'acqua con pompa, il cui tubo di irrigazione è integrato nel cavo di collegamento del carrello (1) con il sistema di controllo (3).

Il PC portatile ha una batteria integrata a lunga durata che consente otto ore di utilizzo a tempo pieno ed una batteria esterna opzionale che consente altre dodici ore di autonomia. Sul PC è installato un software operativo compatibile con sistemi Windows a 32 Bit, specificamente progettato per il rilievo di spessore in continuo. Il sistema consente di ottenere non solo delle immagini di tutta la superficie scansionata (profilo della lamiera) e di restituire l'evidenza di corrosioni e difetti interni (inclusioni) giocando sui colori, ma restituisce una serie di dati utili per la nostra indagine (valori minimi rilevati, media dei valori, rintracciabilità dell'area corrosa con i valori in essa rilevati, misurazione dell'estensione della corrosione, ecc.). Il report finale viene generato in formato *digitale*.

Tuttavia il limite di utilizzo consiste nel fatto che il robot deve rimanere nel campo visivo dell'operatore che lo manovra e quindi non si presta per ispezioni interne ai serbatoi ed il materiale costituente deve essere ferromagnetico.

In Fig.2 è possibile vedere il robot in funzione mentre sale lungo la parete di un serbatoio effettuando le scansioni dello spessore.

2. Caso studio

Il lavoro espone i risultati ottenuti a seguito di rilievi spessimetrici eseguiti sulle virole di un serbatoio cilindrico di grandi dimensioni di stoccaggio di prodotti petroliferi presso un'industria di Napoli operante nel settore petrolchimico (Fig.2).



Figura 2. Serbatoio sul quale sono stati effettuati i rilievi

Nella seguente tabella (Tab.1) sono riportate le caratteristiche del serbatoio:

Diametro	84,73 m
Spessore Nominale	9,5÷32,5 mm
Altezza totale	14,4 m
Tipologia di tetto	Galleggiante
Materiale	Acciaio al carbonio
Capacità	82.000 mc
Anno di costruzione	1970
Normativa di riferimento	API STD 653

Tabella 1.Dati serbatoio

La scansione è stata condotta su 8 sezioni verticali del serbatoio (circa ogni 45°) ed ha interessato le prime 5 virole del serbatoio (la virola 6 non è accessibile a causa della presenza dell'anello di irrigidimento).

Il controllo spessimetrico è eseguito con l'ausilio di robot magnetico il quale registra in continuo le misurazioni di spessore, massimizzando così la probabilità di intercettare eventuali anomalie. Il collegamento del robot ad un PC consente di acquisire dati di spessore correlandoli alla posizione delle letture ed offre la possibilità di inserire in ogni punto della scansione eventuali note utilizzabili ai fini di *reporting*. I dati vengono rappresentati in A-Scan e B-Scan; le immagini possono essere salvate ed esportate direttamente in fogli di calcolo o di testo. Inoltre l'operatore che effettua la scansione può rivedere immediatamente i profili B-SCAN registrati che danno una visione del profilo della lamiera da cui si evincono in maniera istantanea eventuali anomalie nello spessore della stessa.

L'interpretazione dei segnali rilevati da un esame ultrasonoro di questo tipo, necessita di operatori altamente qualificati e, allo stesso tempo, di notevole esperienza. Infatti, la conduzione di un'ispezione eseguita secondo questa modalità richiede un tecnico che sia stato formato sull'utilizzo di tale tecnologia e che sia anche abilitato al livello 2, ovvero che secondo la norma UNI EN 9712:2012 [3] può sia eseguire l'ispezione sia dare un giudizio sui risultati.



Figura 3. Robot in movimento mentre effettua le scansioni lungo le direttrici del serbatoio cilindrico

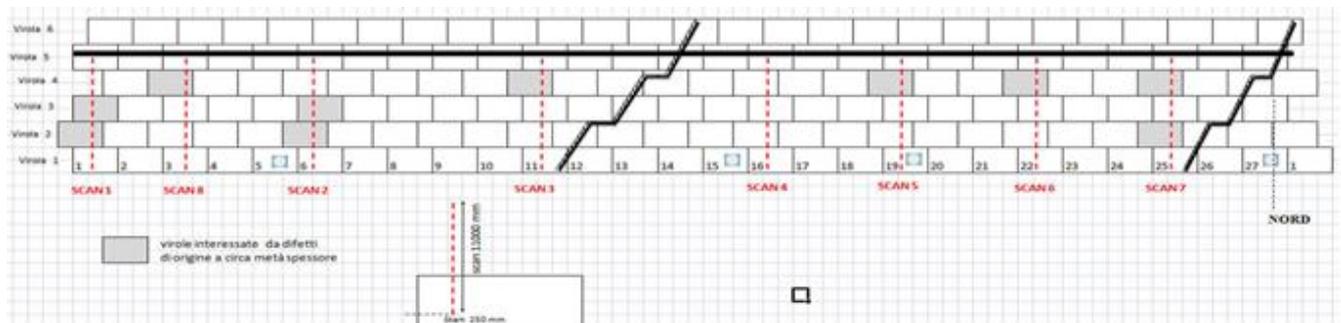


Figura 4. Rappresentazione grafica delle virole e delle direttrici di scansione

2.1 Risultati

Nella tabella *excel* (Tab. 2) in cui sono riportati i dati di spessore rilevati, è stata impostata una tavola dei colori in maniera tale da evidenziare in rosso le riduzioni di spessore del -15% del valore nominale, in quanto corrispondente al valore critico di spessore nelle norme di riferimento [4]. La tabella di seguito riportata evidenzia per tutte le parti di lamiera esaminate, lo spessore minimo, lo spessore medio e le deviazioni standard rilevate. L'esame dei dati relativi al caso esaminato, ha evidenziato una riduzione di spessore massima del 10% situata sulla virola 5 presente sul 60% delle sezioni esaminate.

Inoltre sono state rilevati difetti di origine, nella fattispecie inclusioni gassose (Fig. 5 e 6) presenti in lamiera a circa metà spessore e le lamiere maggiormente interessate sono

quelle della virola 4 in corrispondenza delle scansioni 3-5-6-7-8, ma gli stessi si evidenziano anche nella virola 2 (scansioni 1-2 e 7) e nella virola 3 (scansioni 1 e 2).

Sp. Nominale	Rid. -15%	Sp. Limite	Virola	Spessore Minimo (mm)								Sp. Nominale a Norm.
	(-15%)			Scansioni								
			v9									
			v8									
			v7									
			v6									
9,5	8,08		v5	9,27	9,45	9,95	9,18	10,04	9,86	10,18	9,12	
10,1	8,59		v4	15,9	16,2	15,68	15,68	15,88	16,18	15,76	15,57	
15,4	13,09		v3	20,8	21,2	20,95	21,33	21,47	21,5	21,18	20,86	
20,6	17,51		v2	25	24,7	25,42	25,77	25,58	25,16	24,93	25,72	
26	22,10		v1	31,9	32,6	32,88	33,44	33,62	32,73	33,68	32,96	
32,5	27,63											

Sp. Nominale	Sp. Test Idr.	Sp. Limite	Virola	Spessore Medio (mm)								Sp. Test Idr. > -15%
				Scansioni								
			v9									
			v8									
			v7									
			v6									
9,5	8,08		v5	9,39	9,58	10,17	9,32	10,15	9,27	10,11	9,55	
10,1	8,59		v4	16,1	16,4	16,03	15,82	16,11	16,48	16,07	15,93	
15,4	13,09		v3	20,9	21,3	21,1	21,48	21,65	21,6	21,36	21,11	
20,6	17,51		v2	26,6	26,5	27,17	26,70	26,98	26,62	25,84	26,84	
26	22,10		v1	32,2	32,9	33,18	33,88	33,99	33,46	33,49	33,59	
32,5	27,63											

Sp. Nominale	Sp. Test Idr.	Sp. Limite	Virola	Deviazione Standard								Sp. Test Idr. 0
				Scansioni								
			v9									
			v8									
			v7									
			v6									
9,5	8,08		v5	0,06	0,07	0,12	0,12	0,05	0,10	0,09	0,18	
10,1	8,59		v4	0,06	0,06	0,12	0,07	0,27	0,10	0,31	0,20	
15,4	13,09		v3	0,05	0,05	0,07	0,06	0,07	0,04	0,06	0,10	
20,6	17,51		v2	0,26	0,87	0,52	0,26	0,44	0,35	0,60	0,24	
26	22,10		v1	0,12	0,17	0,13	0,12	0,25	0,20	0,20	0,18	
32,5	27,63											

Tabella 2. Risultati dei rilievi in formato excel

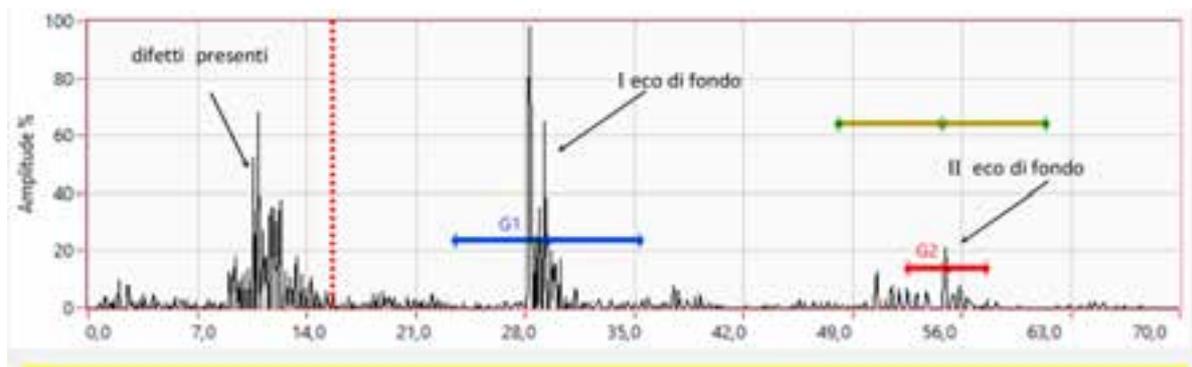


Figura 5. Difetti di origine nella rappresentazione A-scan

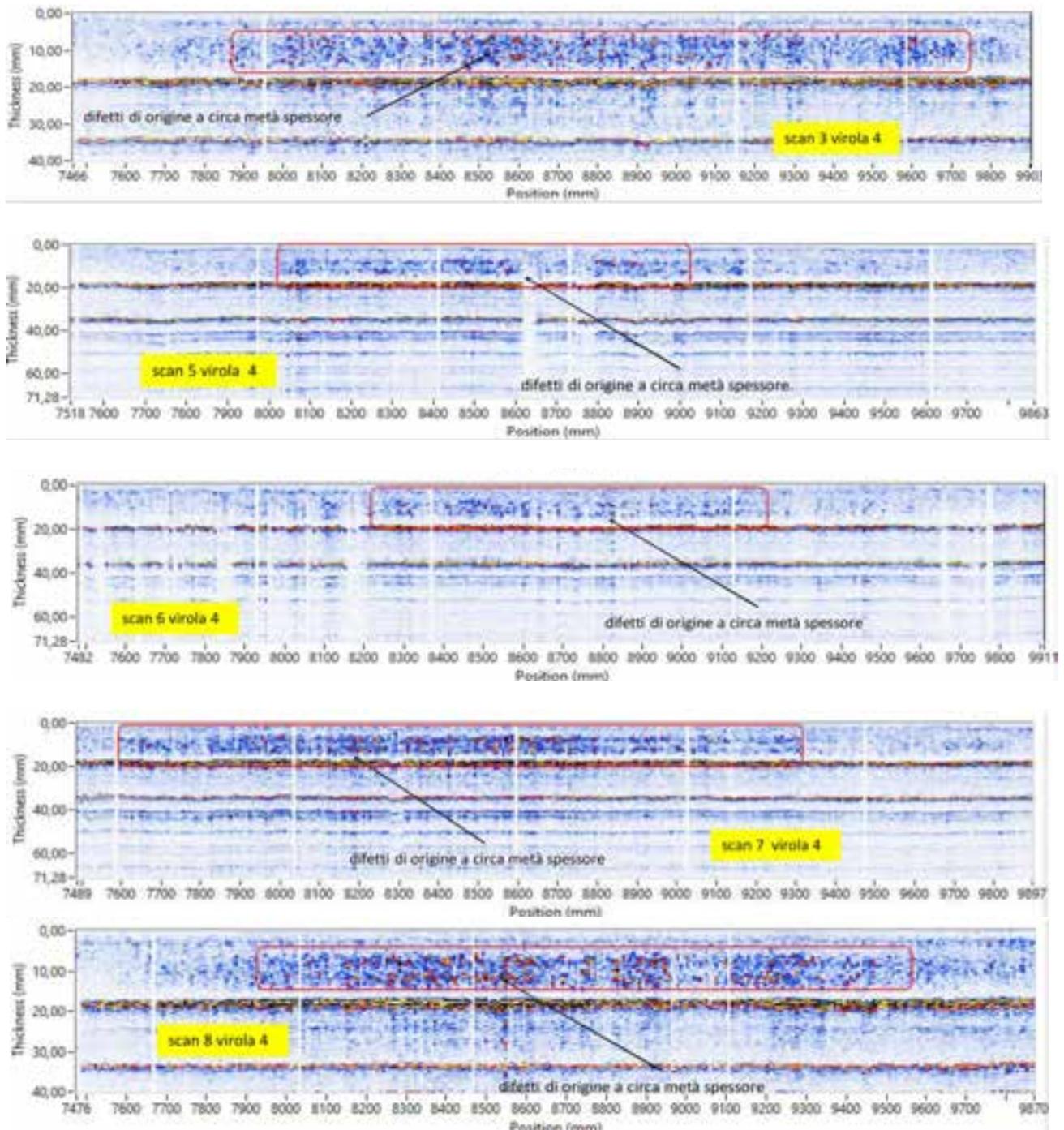


Figura 6. Difetti di origine nella rappresentazione B-scan relativi alla sola virola 4

3. Conclusioni

Il carrello magnetico è una tecnologia avanzata che consente di effettuare le scansioni lungo le superfici esterne di serbatoi di stoccaggio di grandi dimensioni, per rilevarne lo spessore, senza dover utilizzare ponteggi o scale, in quanto il robot viene comandato direttamente da terra dall'operatore. L'innovazione tecnologica che caratterizza questo tipo di soluzione rispetto ai sistemi tradizionali di conduzione di controlli non distruttivi ad ultrasuoni, garantisce un incremento della sicurezza sotto due punti di vista. Da un lato la registrazione in continuo delle misurazioni di spessore rende l'indagine più affidabile, in quanto aumenta la probabilità di intercettare eventuali anomalie e quindi di esprimere una valutazione in tempo reale dello stato di integrità delle attrezzature/componenti. Dall'altra

parte, la nuova modalità di esecuzione delle scansioni, completamente delegate al robot, non espone l'operatore addetto allo svolgimento dell'indagine, a rischi legati a cadute dall'alto che potrebbero presentarsi per raggiungere con ponteggi o scale punti particolari del serbatoio al fine di rilevarne lo spessore.

4. Bibliografia

- [1] C. De Petris, C. Mennuti, G. Inguì. Esame visivo e spessimetria - Procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione. Inail. Roma, 2012.
- [2] A. Tati, P. Varone. Sistemi d'ispezione automatici per i controlli non distruttivi sviluppati da Enea. Atti della Conferenza nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica. Roma, 2009.
- [3] UNI EN 9712:2012 - Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive - Principi generali.
- [4] API Standard 653 – Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction. 2014.

Reti di monitoraggio “leggere” basate su un nodo sensore multifunzione

N. Testoni¹, C. Aguzzi², F. Zonzini³, L. De Marchi³, G. Augugliaro⁴, T.S. Cinotti², A. Marzani^{1,2}

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna

² Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Erode De Castro", ARCES

³ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione “Guglielmo Marconi”, DEI, Università di Bologna

⁴ Inail - Dit

Sommario

Questo lavoro descrive una rete di micro nodi sensore multifunzione, caratterizzati da un bassissimo consumo di potenza, capacità di elaborazione dati, programmabilità in remoto e funzionalità data-to-cloud. In particolare, ogni nodo sensore equipaggiato con un accelerometro MEMS triassiale è in grado di acquisire le accelerazioni temporali, calcolarne in locale lo spettro delle accelerazioni, estrarne i picchi ed inviarli attraverso un dispositivo gateway sviluppato ad-hoc ad un database on-line. La rete può essere ottenuta mettendo in cascata sullo stesso bus di alimentazione e trasferimento dati fino a 64 nodi sensore. In questo lavoro è stata condotta una prova sperimentale con una rete di 5 nodi sensore per monitorare le vibrazioni libere di una trave in acciaio semplicemente appoggiata. Il peso totale e il consumo energetico dell'intera rete sono rispettivamente inferiori a 50 g e 300 mW in condizioni di monitoraggio continuo. I risultati mostrano un ottimo accordo tra le frequenze di vibrazione nominali e quelle misurate. Come tale, la rete di sensori consente di monitorare a distanza e in tempo reale le frequenze portanti degli spettri di accelerazione, risultando quindi ideale per monitoraggio dinamico di strutture.

1. Introduzione

Il monitoraggio in tempo reale dell'integrità di strutture civili e industriali, disciplina altrimenti nota con l'acronimo SHM (Structural Health Monitoring), sta maturando un crescente consenso nella comunità scientifica anche grazie allo sviluppo di reti di sensori intelligenti capaci di acquisire contemporaneamente dati provenienti da una pluralità di sensori [1]. Obiettivo del SHM è quello di incrementare la sicurezza di infrastrutture critiche, attraverso l'implementazione di sistemi di misura “embedded” che consentano di monitorare in tempo reale alcune caratteristiche peculiari della struttura sensibili al suo stato di salute. Una idea di SHM per strutture civili e industriali è quella di misurare nel tempo, in modo non invasivo, le caratteristiche vibrazionali della struttura, per discernere possibili cambiamenti iscrivibili a potenziali danneggiamenti intercorsi tra le varie misure. L'idea si fonda sull'assunto che in assenza di danneggiamenti il comportamento dinamico della struttura rimane invariato nel tempo.

Il SHM ben si coniuga con l'evoluzione delle moderne tecnologie costruttive che permettono di progettare e realizzare strutture sempre più ardite e complesse a patto che il loro comportamento strutturale sia continuamente controllato attraverso appunto l'estrazione continuativa di informazioni e la loro conseguente analisi. Questo è oggi possibile grazie all'uso di tecniche automatiche di trattamento dei dati che ne semplificano e accelerano i processi di acquisizione e gestione [2], come pure per merito

dell'evoluzione tecnologica delle reti di misura caratterizzate da bassissimi consumi di potenza, minimi costi di installazione e peso ridotto.

In particolare, con l'intento di monitorare sul lungo periodo lo stato di salute della struttura, le soluzioni affermatesi in ambito elettronico hanno portato allo sviluppo di reti di sensori distribuite su ampie superfici, dotate di un'elaborazione locale e in tempo reale dei campioni acquisiti. In questo contesto, l'uso di sensori Micro-Elettromeccanici (MEMS) garantisce, fra i molti benefici, versatilità, scalabilità e minima invasività, che divengono parole chiave in un'ottica di controllo intelligente e continuo nel tempo. La facilità di installazione dei dispositivi elettronici, il loro bassissimo peso, la possibilità di riconfigurarne i processi di acquisizione digitalmente senza alcuna particolare conseguenza per la struttura, favoriscono sia la loro implementazione che l'indipendenza dell'azione di monitoraggio dall'operatore.

Il presente lavoro propone una soluzione per il monitoraggio in tempo reale delle vibrazioni strutturali mediante una rete di nodi sensore, ognuno dei quali integra al suo interno un accelerometro MEMS triassiale con capacità di processamento locale delle storie di accelerazione misurate, in modo da estrarne lo spettro di potenza (PSD) e le frequenze portanti. Il caso di studio analizzato è basato su una rete costituita da cinque nodi sensori, installati su una trave in acciaio, nella quale i vantaggi hardware si affiancano a metodi avanzati di elaborazione per la stima di parametri modali. La circuiteria presentata, descritta nella seconda sezione, soddisfa esigenze fondamentali di basso consumo di potenza, peso leggero e dimensioni ridotte. Per calcolare la densità spettrale di potenza (PSD) dei dati di accelerazione acquisiti, come pure per ricavare le proprietà modali dei modi principali di vibrare della struttura, sono stati implementati approcci parametrici e non parametrici (sezione 3). Nella quarta sezione si presentano algoritmi nel dominio del tempo (TDD) e della frequenza (FDD), che insieme all'identificazione a sorgenti indipendenti del secondo ordine (SOBI), sono stati implementati per la ricostruzione delle forme modali. La descrizione dei risultati ottenuti a valle della sperimentazione sono riassunti in sezione 5. Accanto ad una soddisfacente sovrapposizione tra valore atteso e dati estratti sperimentalmente, la rete di sensori proposta si contraddistingue per una analisi completamente automatizzata del comportamento modale della struttura osservata, facilitandone quindi il suo controllo in tempo reale. In aggiunta, il nodo sensore sviluppato è in grado di supportare diversi sensori tra i quali piezoelettrici per la misura di emissioni acustiche, termocoppie per la misura di temperatura, come pure inclinometri e strain gauges per la misura di deformazioni locali. Questo fornisce alla rete di monitoraggio proposta flessibilità per poter operare in modo efficace in diversi scenari applicativi.

2. Materiali

2.1 Nodo sensore

Ciascun nodo sensore è dotato di un accelerometro MEM triassiale, ha sia capacità di elaborazione locale dei dati sia di interfacciamento data-to-cloud. In particolare, l'architettura messa a punto è in grado di registrare serie temporali di accelerazione, di calcolarne la risposta in frequenza e di estrarne le frequenze portanti mediante algoritmi di peak-picking (PP). I dati raccolti vengono poi trasferiti in un database online tramite un gateway appositamente realizzato e un protocollo di comunicazione dedicato. Il cuore del sistema è un microcontrollore STM32F3 a 32 bit alimentato a 3.3 V indicato nello schematico di Figura 1 come MCU. Questa unità funzionale appartiene alla categoria di Microcontroller Unit (MCU), prodotti da ST Microelectronics, caratterizzati da funzionalità di Digital Signal Processing (DSP) compatibili con l'esecuzione di istruzioni Floating Point (FPU) a ridottissimi consumi di potenza.

Il clock di sistema è impostato da un oscillatore RC interno a 8 MHz ed innalzato a 64 MHz tramite un Phase-Locked Loop (PLL), mentre la parte di storage è divisa internamente tra una memoria SRAM con capacità 40 KiB e una di tipo FLASH a 256 KiB.

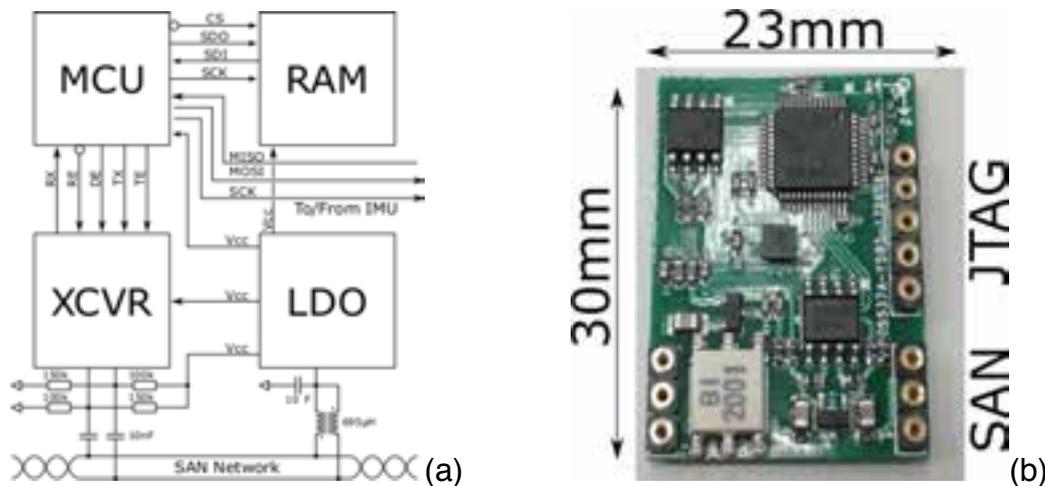


Figura 1. Diagramma schematico del nodo sensore (a) e relativo prototipo realizzato presso il laboratorio del Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Erocole De Castro"(ARCES) (b).

La comunicazione tra il microcontrollore e gli altri elementi è gestita mediante due interfacce seriali integrate: la trasmissione di dati avviene tramite una Serial Peripheral Interface (SPI) o una Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) ed è indipendente dall'esecuzione del programma grazie alla presenza di generatori di clock, shift register e buffer temporanei interni.

Da un punto di vista del consumo, la corrente di picco registrata quando tutti gli elementi sono attivi alla massima frequenza di sistema, pari a 64 MHz, è inferiore a 40 mA e può essere ridotta a 1.37 mA nel caso di modalità standby.

Una SRAM esterna, accessibile con protocollo SPI, è utilizzata come buffer temporaneo per i campioni pre-elaborati. Caratterizzata da un numero infinito di cicli di lettura e scrittura possibili, presenta anch'essa ridotti consumi. Un Tranceiver (XCVR) consente, invece, di connettere il MCU, tramite interfaccia USART, al bus di sistema costituito da una struttura Sensor Area Network (SAN) e basato su una comunicazione Data over Power (DoP). Il driver è inoltre protetto da sovratensioni per mezzo di una circuiteria di shutdown che impone le uscite in uno stato di alta impedenza. La rete SAN e il XCVR sono collegati per mezzo di una rete di componenti passivi.

Un regolatore di tensione LDO fornisce alimentazione all'intero sensore, fissando la tensione a 3.3 V in modo da ridurre il numero minimo di componenti esterni. L'unità inerziale di misurazione del nodo (IMU), è costituita dalla coppia accelerometro e giroscopio 3D digitale LSM6DSL iNEMO prodotta da ST Microelectronics, in grado di registrare valori di accelerazione fino ad un massimo di ± 16 g ed una velocità angolare di ± 2000 dps. L'accelerometro MEMS triassiale così prodotto dimostra possedere una sensibilità di 825 mV/g e un package complessivo dalle dimensioni di (2.5 mm \times 3.0 mm \times 0.8 mm).

Da un punto di vista operativo, il flusso di elaborazione dell'informazione parte dalla registrazione delle vibrazioni strutturali tramite IMU, passando alla successiva memorizzazione dei campioni nella RAM interna del microcontrollore. Le istruzioni e i coefficienti del filtro digitale sono invece immagazzinati nella memoria FLASH, in modo da garantire funzionalità di pre-processing embedded. Infine, i dati vengono raccolti nella

SRAM esterna a cui vengono inviati con protocollo SPI, nell'attesa di una successiva elaborazione.

Complessivamente, l'area occupata dall'intero nodo è pari a 30 mm × 23 mm per un peso totale inferiore ai 5 g ed un assorbimento di corrente massimo di 44.8 mA quando il bus è alimentato a 5.0 V. La forte scalabilità dell'architettura, legata alla possibilità di estendere le dimensioni del sistema fino alla connessione di 64 nodi sensore contemporaneamente, rappresenta un ulteriore punto di forza, rendendo la rete di sensori particolarmente promettente per applicazioni di monitoraggio strutturale real-time in termini di consumi, invasività e velocità di funzionamento.

2.2 Online database

Affinché il monitoraggio possa essere eseguito in remoto, i dati misurati dai nodi sensore, una volta immagazzinati, devono essere trasferiti e raccolti online. La tecnologia database implementata nella presente architettura utilizza le istanze di Cassandra2, sistema NoSQL open access, installate in un datacenter remoto.

La raccolta dei dati si fonda sulla presenza di tre chiavi di memorizzazione: ovvero la (i) PARTITION KEY e il (ii) CLUSTERING COLUMNS, che identificano rispettivamente la località dei dati, ovvero righe con la stessa chiave si trovano nello stesso cluster, e la modalità di memorizzazione delle righe stesse, cioè al modo in cui le righe sono ordinate nel singolo cluster consentendo di inserire, cancellare, aggiornare e leggere dati più rapidamente; ed infine, il (iii) TIMESTAMP ovvero l'istante temporale in cui il singolo campione viene registrato. Per la rete progettata, l'identificativo di ogni nodo sensore rappresenta la PARTITION KEY, che viene integrata dall'ordinamento dei dati per valori decrescenti e infine per TIMESTAMP. In questo modo, la tripletta risulta univoca e la query può essere generata con elevato *throughput*, condizione indispensabile in scenari di monitoraggio critici per i quali la capacità di gestire grandi quantità di dati è fondamentale.

3. Estrazione parametri modali

L'analisi modale di una determinata struttura consiste nel valutare la risposta dinamica del sistema in presenza di sollecitazioni libere o indotte da forzanti esterne [3]. Lo studio delle vibrazioni caratteristiche di una struttura, estraibili generalmente a seguito di una analisi in frequenza dei dati raccolti, consente di identificarne e/o stimarne una serie di proprietà strutturali notevoli. In questo contesto, l'obiettivo finale è generalmente quello di ricavare alcune grandezze fondamentali, prime fra tutte le frequenze naturali di vibrazione f_i , i fattori di smorzamento modale ζ_i , le forme modali ϕ_i . Le quantità appena definite vanno a costituire complessivamente il modello modale della struttura, dal momento in cui sono in grado di sintetizzare le informazioni dinamiche in un insieme ridotto di parametri, la cui analisi continuativa è correlabile al livello di integrità del sistema corrispondente.

3.1 Analisi spettrale

Attraverso l'analisi spettrale dei dati di accelerazione registrati si determina il loro contenuto frequenziale ovvero la distribuzione energetica delle diverse componenti armoniche. In particolare, è usuale indicare con $S_{xx}(\omega)$ lo spettro di un segnale discreto $x(n)$ caratterizzato da N campioni. Per il calcolo dello spettro sono stati implementati una molteplicità di algoritmi distinguibili in funzione della tipologia di segnali per i quali sono stati pensati, nonché per l'onere computazionale e la quantità di dati da processare.

Gli stimatori spettrali tradizionali (non parametrici), si suddividono in metodi diretti o indiretti, basati rispettivamente sulla trasformata discreta di Fourier (Discrete Time Fourier Transform - DTFT) oppure sulla funzione di autocorrelazione (Autocorrelation Function - ACF). Tali approcci necessitano di un numero limitato di campioni per poter produrre lo

spettro cercato. In alternativa, le tecniche cosiddette parametriche, si contraddistinguono per la creazione di un modello matematico equivalente del segnale osservato, particolarmente vantaggioso sotto particolari condizioni operative. Nel seguito saranno utilizzate sia tecniche non parametriche che parametriche. Una volta calcolato lo spettro del segnale di accelerazione le vibrazioni naturali della struttura monitorata vengono ottenute mediante strategie di ricerca del picco della funzione $S_{xx}(\omega)$. Queste si fondano solitamente sulla ricerca di un valore di soglia oltre il quale si selezionano i contributi dominanti.

3.2 Ricostruzione forme modali

La ricostruzione delle forme modali ha quale obiettivo quello di identificare l'andamento spaziale dei modi propri di oscillazione della struttura a partire dai segnali di accelerazione registrati da un certo numero di nodi sensore distribuiti lungo la struttura. All'aumentare della dimensione del numero di sensori e della durata del monitoraggio, la ricostruzione diviene sempre più precisa ed è pertanto indispensabile soddisfare esigenze di sincronizzazione e gestione efficiente dei valori estratti da ciascun nodo sensore.

La ricostruzione di queste curve rappresenta una delle sfide più avvincenti nel contesto del monitoraggio strutturale, essendo esse intrinsecamente collegate allo stato di integrità della struttura. Le metodologie di calcolo più avvincenti sono di tipo "output-only", ovvero si fondano unicamente sull'elaborazione dei campioni acquisiti senza analizzare nel dettaglio le caratteristiche fisiche dei fenomeni registrati.

Una metrica assodata per validare l'estrazione dei modi di vibrare da dati sperimentali si fonda sul calcolo del parametro MAC (Modal Assurance Criterion), ovvero un indice di correlazione tra i modi identificati al termine dell'analisi modale sperimentale e quelli prodotti da un opportuno modello analitico (analisi modale teorica) [8]. L'output dell'analisi MAC è costituito da una matrice con valori compresi nell'intervallo [0-1], in cui ciascun elemento indica la corrispondenza tra il modo i dell'insieme di forme modali teoriche φ_t e il modo j della forma modale sperimentale φ_s . A livello applicativo, si considerano ottimamente correlati i modi appartenenti a due distinte famiglie φ_t e φ_s se il parametro in esame assume valori maggiori di 0.9 [9]. A livello operativo, una volta ordinati i vettori colonna delle forme modali per valori crescenti di frequenza, il processo di ricostruzione delle curve si può definire preciso qualora la matrice risultante approssimi una matrice diagonale. Ciò significa che la sovrapposizione per modi $i=j$ deve essere prossima all'unità, mentre per modi spuri l'affinità deve tendere a zero.

4. Validazione sperimentale

4.1 Setup

Il setup sperimentale è costituito da una trave di acciaio, le cui proprietà geometrico/meccaniche sono riassunte in Tabella 1. La trave è semplicemente appoggiata agli estremi ed è in grado di vibrare in condizioni di oscillazione libera. Su una metà della trave sono stati posizionati cinque nodi sensore, equamente distribuiti con passo $d=214$ mm come mostrato in Figura 2. La trave è stata eccitata in mezzeria mediante un martello da impatto.

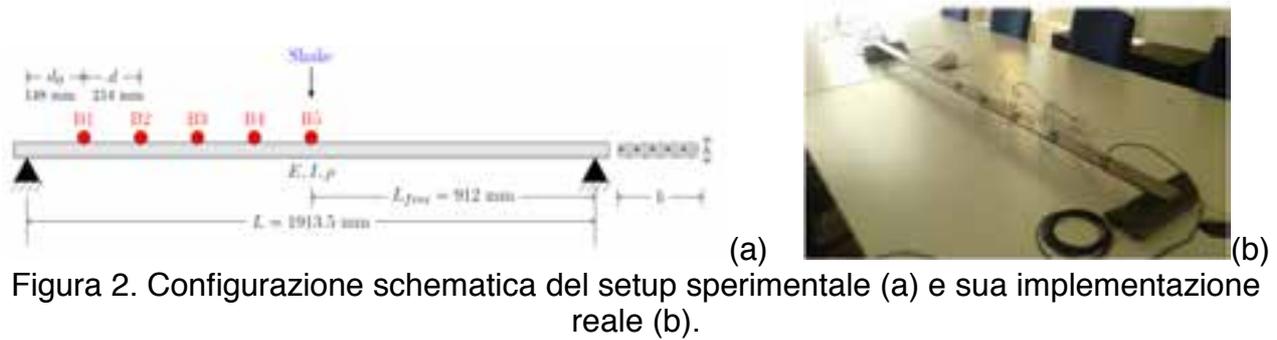


Figura 2. Configurazione schematica del setup sperimentale (a) e sua implementazione reale (b).

Densità (ρ)	7870 kg/m ³
Modulo di Young (E)	200 GPa
Base sezione trasversale (b)	60·10 ⁻³ m
Spessore (h)	10·10 ⁻³ m
Momento di Inerzia (I)	5·10 ⁻⁹ m ⁴

Tabella 1. Parametri caratteristici della trave

L'intento è quello di verificare che l'acquisizione sincronizzata di segnali, ottenuta con nodi sensori multifunzione a basso costo e ridotti requisiti energetici, è in grado di produrre dati ad elevato contenuto informativo, dimostrandosi così affidabili nell'ambito dell'analisi modale in tempo reale. Per questa motivazione si è scelto di testare l'attendibilità della rete progettata all'interno di un ambiente facilmente modellabile anche per via analitica, così da comprovare la qualità dei risultati rispetto ad un noto riferimento teorico. Da un punto di vista energetico, l'architettura realizzata prevede un consumo complessivo inferiore a 300 mW in condizioni di monitoraggio continuo e un peso dell'intera circuiteria minore di 50 g.

Per il caso in esame la formula chiusa di Equazione (1) consente di stimare algebricamente le frequenze di vibrazione naturali della trave:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{(n\pi)^2 \sqrt{E \cdot I}}{L^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (1)$$

in cui n indica l'ordine dell'armonica considerata, $A=b \cdot h$ identifica l'area della sezione ortogonale della trave ed L la distanza effettiva tra gli appoggi, che nel caso specifico in esame sono stati supposti ideali. Il peso della rete di nodi sensore, pari allo 0,5 % del peso della trave (9,69 kg) è stato trascurato nel calcolo delle frequenze di vibrare.

In accordo con la (1), le prime tre frequenze di oscillazione risultano rispettivamente pari a $f_1=6.243 \text{ Hz}$, $f_2= 24.972 \text{ Hz}$, $f_3=56.188 \text{ Hz}$. Sperimentalmente, si è deciso di operare con una frequenza operativa massima di 200 Hz, su buffer di 6000 campioni.

4.1 Spettro di accelerazione

Nel presente lavoro sono state considerate tecniche di analisi spettrale non parametriche, quali il periodogramma e la sua versione ottimizzata secondo Welch, insieme approcci di decomposizione in frequenza. Parallelamente, sono state eseguite stime applicando alcune strategie parametriche autoregressive (AR), con particolare riferimento al modello di Burg e all'algoritmo AR+Noise, ideale in condizioni di forte rumore di fondo. Gli spettri di accelerazione risultanti dall'implementazione delle diverse tecniche per una serie di accelerazione verticale (piano di flessione della trave), misurata al nodo B3 di Figura 2.a, è riportato in Figura 3.

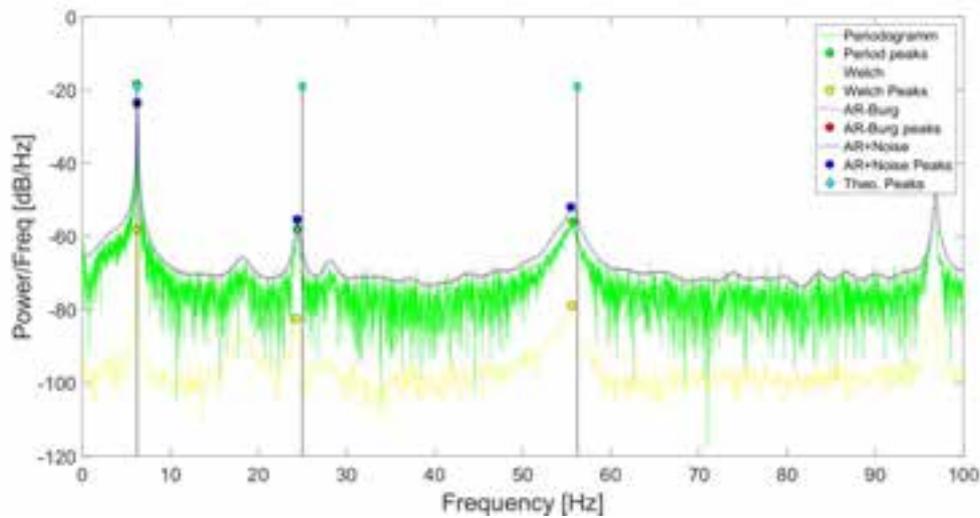


Figura 3. Confronto fra diversi stimatori spettrali considerate per una storia accelerazione misurata al nodo B3.

Gli andamenti spettrali calcolati palesano immediatamente la predominanza del primo modo di vibrare, ovvero quello a frequenza minore. La Figura 3 mostra, inoltre, un buon accordo tra i risultati sperimentali e le frequenze calcolate secondo l'equazione (1), indicate con delle linee verticali continue. In accordo con la posizione di impatto scelta, prossima al punto antinodale della prima armonica di vibrazione, il primo modo viene sollecitato in corrispondenza del suo massimo e risulta perciò prevalente, mostrando un rapporto segnale-rumore (SNR) di circa 40 dB rispetto agli altri. Analogamente, la seconda armonica risulta scarsamente eccitata in quanto presenta un punto nodale nella posizione di eccitazione. Le osservazioni appena esposte giustificano la distribuzione dell'errore relativo commesso, rappresentato dagli istogrammi di Figura 4. In particolare, è stato possibile calcolare l'errore grazie al fatto che i parametri caratteristici della trave, in ingresso all'espressione (1), sono noti con precisione. Per ciascuna tecnica implementata, l'errore relativo percentuale e_n commesso nella stima della frequenza di ordine n è stato calcolato come media tra i valori estratti da ciascun nodo, mediante la formula di equazione (2)

$$e_n = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \frac{|f_s - f_n|}{f_n} \cdot 100 \quad (2)$$

in cui $S=5$ indica il numero di sensori utilizzati, f_s si riferisce alla frequenza individuata sperimentalmente sul singolo nodo ed f_n coincide con la corrispondente frequenza teorica prevista da modello analitico.

Nello specifico, tutte e quattro le strategie utilizzate mostrano un errore inferiore allo 0.5% nell'estrazione della frequenza fondamentale f_1 . L'errore cresce percentualmente nella estrazione della seconda frequenza di vibrare rimanendo tuttavia inferiore al 2.5%. Per l'estrazione della seconda armonica, dove il margine rispetto al rumore non va oltre i 10 dB, la prestazione migliore è restituita dalla tecnica autoregressiva. Anche la terza componente viene individuata con ottima accuratezza, mostrando percentuali di errore intorno all'1%. Gli algoritmi proposti, al di là della particolarità intrinseca all'eccitazione del secondo modo, non mostrano particolari differenze in termini di performance e possono pertanto ritenersi ugualmente efficienti per l'analisi proposta.

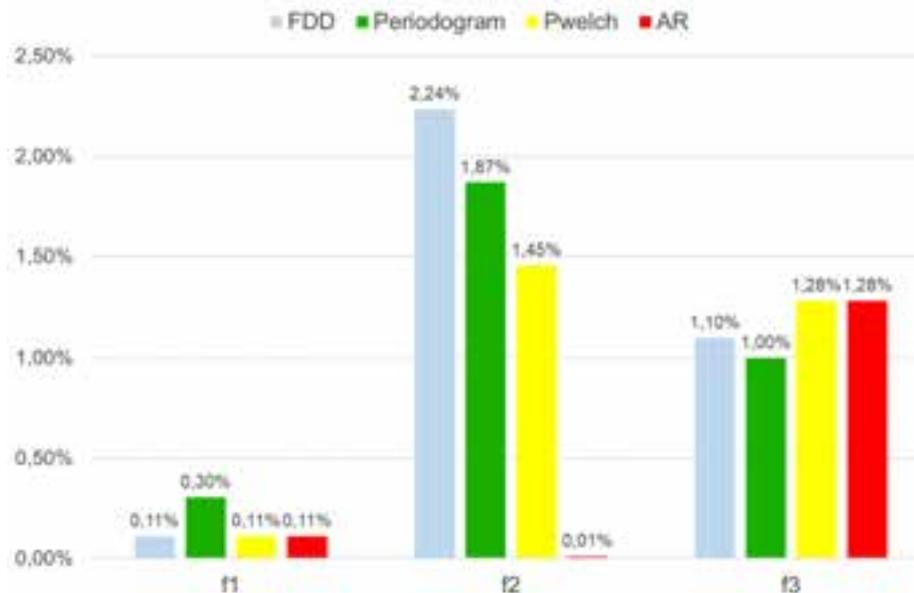


Figura 4. Distribuzione dell'errore relativo nell'estrazione delle frequenze di vibrazione mediante differenti tecniche non parametriche e parametriche di analisi spettrale.

4.2 Ricostruzione forme modali

Grazie alla sincronizzazione temporale dei campioni estratti dai cinque sensori, intrinsecamente garantita dalla soluzione di bus adottata, è stato possibile procedere con la stima output-only delle forme modali. Sono stati implementati algoritmi tradizionali nel dominio della frequenza, i.e. la Frequency Domain Decomposition (FDD), e del tempo, i.e. Time Domain Decomposition (TDD), unitamente alla tecnica SOBI (Second Order Blind Identification) che identifica le forme modali nelle componenti indipendenti nascoste all'interno di un set di segnali misurati [4]. La FDD si fonda sull'applicazione della decomposizione a valori singolari (SVD) alla matrice di densità spettrale [5], mentre nella tecnica TDD viene calcolata la SVD della matrice di correlazione energetica, ottenuta da dati filtrati nell'intorno delle frequenze di vibrazione attese [6].

Le curve di Figura 5, in cui si riportano i primi tre modi estratti con le tre differenti tecniche analizzate, rivelano una sovrapposizione praticamente perfetta tra dato atteso e dato sperimentale per il primo modo di vibrare, indipendentemente dall'algoritmo utilizzato. La deviazione dal modello analitico è, ancora una volta, più pronunciata ad alta frequenza e per l'approccio SOBI, dove si manifestano i discussi fenomeni di rumore indesiderato. Coerentemente con quanto riportato in letteratura [7], la tecnica SOBI risulta meno indicata rispetto agli approcci tradizionali in quelle situazioni di basso rapporto segnale/rumore visto che è pensata per processare sorgenti di segnale i cui picchi energetici sono circa equivalenti e l'oscillazione indotta stazionaria. In scenari reali, caratterizzati da bassi valori di SNR, il rumore può deteriorare i risultati ottenuti con questo approccio, specialmente per il ridotto insieme di operazioni di pre-processamento che vengono applicate ai campioni in ingresso.

Tuttavia, occorre sottolineare che il metodo SOBI è completamente non supervisionato, poiché richiede una minima o nulla conoscenza a priori sul tipo di eccitazione presente, risultando quindi un metodo particolarmente promettente per una rilevazione autonoma del danno in molteplici scenari. In aggiunta, questo metodo prescindendo dal calcolo della SVD, diventa particolarmente vantaggioso dal punto di vista computazionale in ampie e distribuite reti di monitoraggio.

A conferma dei risultati prodotti, analizzando la diagonale principale delle matrici di MAC prodotte per la tecnica TDD (Figura 6(a)) e SOBI (Figura 6(b)), vengono raggiunte percentuali simili, evidenziate da analoghe intensità: accanto a valori prossimi all'unità per il primo modo, si osservano correlazioni via via meno accentuate al crescere della frequenza. L'importanza dell'indice di sovrapposizione modale proposto si traduce dunque nella capacità di quantificare la bontà del dato sperimentale al di là dell'evidenza empirica, fondando cioè l'analisi in tempo reale sulla presenza di parametri oggettivi, facilmente controllabili da remoto e manipolabili per via algebrica.

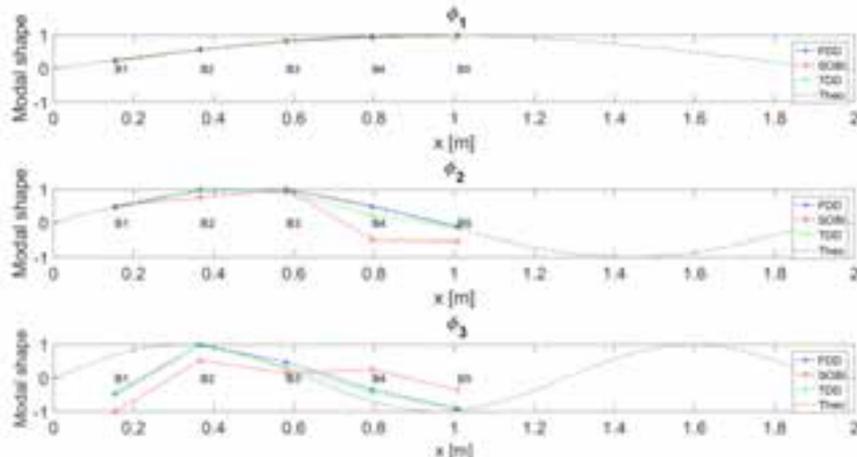


Figura 5. Prime tre forme modali ricostruite con tre differenti tecniche di analisi: Frequency Domain Decomposition (FDD), Time Domain Decomposition (TDD) e Second Order Blind Identification (SOBI).

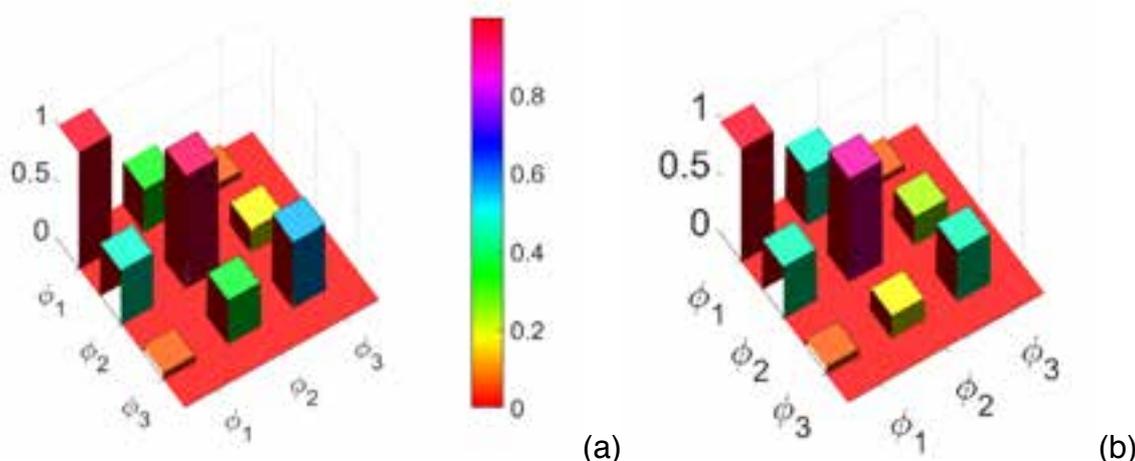


Figura 6. Valori di MAC per la Time Domain Decomposition (TDD) (a) e per la Second Order Blind Identification (SOBI) (b).

5. Conclusioni

Il lavoro mostra come la rete di micro nodi sensore multifunzione progettata consente di estrarre le frequenze di vibrazione e i modi di vibrare di una trave in flessione. Per quanto semplice, il caso studio mostra come la rete di monitoraggio proposta, grazie alla sua facilità di implementazione (basso peso, basso costo e basso consumo di potenza), risponde in maniera estremamente precisa alle necessità di analisi modale, configurandosi come soluzione ideale in tutti quei casi in cui sia necessario monitorare sul lungo periodo, in tempo reale e con minimi consumi le proprietà dinamiche di specifiche strutture. L'alta corrispondenza tra riferimento teorico ed esito sperimentale osservato, sia nel calcolo delle frequenze naturali di vibrazione che nel processo di ricostruzione delle forme modali, è garanzia del corretto funzionamento dei nodi sensore, della loro

sincronizzazione, e delle procedure di processing innestate direttamente in essi. La rete proposta, pertanto, si qualifica per eseguire il monitoraggio dinamico in remoto di strutture civili.

6. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

7. Bibliografia

- [1] Lynch J. P., Loh K.J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 2006; 38: 91–130.
- [2] Girolami A., Brunelli D., Benini L., et al. Low-cost and distributed health monitoring system for critical buildings. Atti della conferenza su *Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2017. Milano, Luglio 24-25, 2017*.
- [3] Heylen W., Sas P. *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universteit Leuven, Departement Werktuigkunde, 2006.
- [4] Poncelet F., Kerschen G., Golinval J.C. Experimental modal analysis using blind source separation techniques. Atti della conferenza su *Noise and Vibration Engineering. Leuven, Settembre 18-20, 2006*.
- [5] Gade S., Møller N.B., Herlufsen H., KonstantinHansen H. Frequency domain techniques for operational modal analysis. Atti della conferenza su *International Operational Modal Analysis. Copenhagen, Aprile 26-27, 2005*.
- [6] Kim B.H., Stubbs N., Park T. A new method to extract modal parameters using output-only responses. *Journal of sound and vibration*. 2005; 282: 215-230.
- [7] Swaminathan B., Sharma B., Chauhan S. Utilization of blind source separation techniques for modal analysis. *Structural Dynamics*, 2011; 3: 189–206.
- [8] Allemang R.J., Brown D.L. A correlation coefficient for modal vector analysis. Atti della conferenza su *international modal analysis conference. Orlando, Novembre 8-10, 1982*.
- [9] Vincenzi L. *Identificazione dinamica delle caratteristiche modali e delle proprietà meccaniche di strutture mediante algoritmi di ottimizzazione*. PhD thesis, Università di Bologna, 2007.

Processing innovativo per la localizzazione delle sorgenti di Emissioni Acustiche

L. De Marchi^{1,4}, N. Testoni², M.M. Malatesta¹, G. Augugliaro³

¹ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", DEI, Università di Bologna

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna

³ Inail - Dit

⁴ Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Ercole De Castro", ARCES

Sommario

Questo lavoro tratta lo sviluppo e l'implementazione di una tecnica di processamento delle Emissioni Acustiche (EA) per la localizzazione della sorgente in guide d'onda. L'algoritmo sfrutta l'informazione delle curve di dispersione, calcolate ad-hoc per il componente in oggetto, per compensare i segnali registrati dall'effetto della dispersione. I segnali compensati risultano stazionari su un nuovo dominio che dipende in modo lineare dalla distanza di propagazione delle EA. La cross-correlazione di segnali compensati consente di individuare la posizione della sorgente prescindendo da una prova di calibrazione e dall'implementazione di complicate procedure di inversione.

L'algoritmo è stato validato su misure sperimentali ottenute registrando mediante l'impiego di due sensori le EA dovute alla rottura di una mina calibrata lungo una barra di alluminio. I risultati ottenuti per diverse posizioni e per diversi valori del rapporto segnale su rumore, mostrano le potenzialità e la stabilità dell'algoritmo proposto rispetto alla classica localizzazione lineare implementata nelle apparecchiature commerciali per EA.

1. Introduzione

Il monitoraggio di strutture mediante la metodica delle EA presenta diversi vantaggi che, anche grazie all'avanzare delle tecnologie impiegate, stanno acquisendo un consenso crescente. Le moderne apparecchiature commerciali per EA permettono un affidabile rilevamento della comparsa di danni ed il loro monitoraggio nel corso del tempo [1]. Al fine di poter agire in modo mirato contro l'insorgenza di danni strutturali è di fondamentale importanza anche poter localizzare con precisione l'evento acustico rilevato. A tal fine in letteratura sono stati proposti diversi approcci che si basano ad esempio su metodi geometrici [2] e su algoritmi basati su reti neurali artificiali [3], tra gli altri. La scelta del giusto metodo da utilizzare all'interno di un sistema di EA deve essere ponderata al fine di ottimizzare la duttilità e le prestazioni del sistema stesso, con il giusto rapporto tra la precisione ed il costo computazionale dell'algoritmo. Per questi motivi spesso in attrezzature commerciali sono integrati algoritmi di tipo geometrico che nonostante la leggerezza computazionale che li contraddistingue riescono ad avere precisioni soddisfacenti. Questi algoritmi, tuttavia, basano il loro principio operativo sulla isotropia del materiale e sulla velocità di propagazione dell'onda supposta costante lungo tutto il percorso tra la sorgente ed i sensori (propagazione non dispersiva), cosa che generalmente non accade quando l'onda meccanica si propaga in una guida d'onda (propagazione dispersiva).

In questo lavoro verrà presentata un'innovativa tecnica di processamento del segnale per la localizzazione di EA basata sulla compensazione della dispersione dell'onda guidata.

Attraverso la conoscenza della curva di dispersione dell'onda meccanica ed usando un operatore matematico chiamato Warped Frequency Transform (WFT) è possibile rimuovere dai ritardi di gruppo dei segnali acquisiti la dipendenza dalla distanza percorsa. Effettuando successivamente la cross-correlazione su tali segnali trasformati, relativi a sensori differenti, è possibile ottenere una stima della differenza delle distanze percorse dall'onda guidata e quindi della posizione della sorgente [4]. La procedura descritta è compatibile con l'implementazione in sistemi "embedded" in quanto il suo costo computazionale è paragonabile a quello di una Fast Fourier Transform (FFT).

Al fine di valutare le potenzialità dell'algorithmo proposto sono stati realizzati più setup sperimentali per la localizzazione di sorgenti acustiche lungo una barra monodimensionale in alluminio. I segnali acustici dopo essere stati acquisiti attraverso un sistema commerciale, l'AMSY-5 della VallenSysteme, sono stati processati sia dall'algorithmo di localizzazione integrato nello strumento sia dall'algorithmo proposto basato su WFT. I test comparativi hanno mostrato come quest'ultimo consenta un grado di accuratezza ed una stabilità nella localizzazione della sorgente migliore rispetto all'algorithmo di localizzazione integrato nello strumento.

Il lavoro è organizzato come segue: la compensazione della dispersione, gli strumenti matematici necessari per la sua comprensione e la localizzazione sono presentati nella sezione 2; nella sezione 3 sono presentati i setup sperimentali atti a validare l'algorithmo di localizzazione, messo a confronto con i moderni sistemi di acquisizione commerciali; la sezione 4 conclude il lavoro presentandone le sue conclusioni.

2. Compensazione della dispersione

2.1 Warped Frequency Transform (WFT)

Sia dato un segnale $s(t)$ dispersivo, rappresentativo della propagazione di un'onda meccanica in una guida d'onda, e si indichi con $S(f) = \mathbf{F}\{s(t)\}$ la sua rappresentazione in frequenza con \mathbf{F} operatore della trasformata di Fourier. L'operatore di warping in frequenza \mathbf{W}_w trasforma l'asse delle ascisse mediante un'adeguata funzione $w(f)$, chiamata *warping map*[5], come:

$$s_w(t) \doteq \mathbf{W}_w\{s(t)\} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}\{s_w(t)\} = \sqrt{\dot{w}(f)} S(w(f)) \quad (2)$$

dove $s_w(t)$ è il segnale a cui è stato applicato l'operatore warping, e $\dot{w}(f)$ rappresenta la derivata prima di $w(f)$. La trasformata di un segnale reale è a sua volta un segnale reale se $w(f)$ è una funzione dispari, se vale cioè la relazione $w(f) = -w(-f)$. Inoltre, al fine di preservare l'invertibilità della funzione, $w(f)$ deve mappare l'asse delle frequenze su se stessa, devono cioè valere:

$$\dot{w}(f) > 0 \quad a. e. \Rightarrow \exists w^{-1}, \quad w^{-1}[w(f)] = f. \quad (3)$$

È stato mostrato in [6] che la WFT discreta può essere facilmente calcolata con gli algoritmi e le interpolazioni della Fast Fourier Transform, con un costo computazionale ridotto. In questa trattazione $w(f)$ è definita attraverso il suo funzionale inverso, definito come:

$$K \frac{dw^{-1}(f)}{df} = \frac{1}{c_g(f)} \quad (4)$$

dove $c_g(f)$ è la curva della velocità di gruppo nominale dell'onda guidata che si va a considerare, e K è un parametro di normalizzazione scelto in modo tale da avere $w^{-1}(0.5) = w(0.5) = 0.5$.

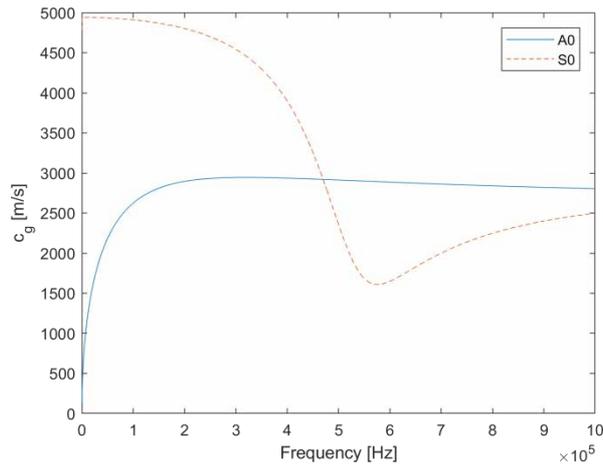


Figura 1. Curve di dispersione $c_g(f)$ per i modi fondamentali (A0 e S0) delle onde di Lamb in una piastra di alluminio di spessore 2mm.

In modo analogo a quanto descritto è possibile definire la *warping map* inversa $w^{-1}(f)$ mettendo in evidenza la velocità di fase $c_{ph}(f)$ o il numero d'onda $k(f)$ dell'onda guidata come:

$$Kw^{-1}(f) = \frac{f}{c_{ph}(f)} = \frac{k(f)}{2\pi} \quad (5).$$

La figura 1 presenta le curve di dispersione in termini di velocità di gruppo per le onde di Lamb che si propagano in una piastra di alluminio di 2 mm di spessore, calcolate considerando i seguenti parametri meccanici del materiale:

- Modulo di Young $E = 69 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson $\nu = 0.33$
- Densità $\rho = 2700 \text{ kg m}^{-3}$

Le curve sono state ottenute tramite la formulazione semi-analitica a elementi finiti (SAFE) proposta in [7].

2.2 Compensazione della dispersione attraverso la WFT

Si supponga dapprima che l'istante di generazione dell'evento acustico sia noto, come può avvenire ad esempio per le tecniche di monitoraggio attive. Sia $s_0(t, D)$ la forma d'onda nel dominio del tempo di un'onda guidata non smorzata registrata ad una distanza D dal punto di eccitazione. Tale segnale può essere modellato come un sistema dispersivo la cui risposta nel dominio delle frequenze risulta:

$$S_0(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi \int \tau(f, D) df} \quad (6)$$

in cui $S_0(f, 0)$ è la trasformata di Fourier dell'impulso di eccitazione nel punto di attuazione a $D = 0$. $\tau(f, D)$ è il ritardo di gruppo delle componenti dell'onda alla frequenza f (è assunto che il trasduttore sia ideale e che ecciti solo il modo guidato di interesse) definito come $\tau(f, D) = D/c_g(f)$. Prendendo a riferimento la relazione (4) si può riscrivere $S_0(f, D)$ come:

$$S_0(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi D \int \frac{1}{c_g(f)} df} = S_0(f, 0)e^{-j2\pi w^{-1}(f)KD} \quad (7)$$

dove si evidenzia che la distorsione causata dalla dispersione risulta descritta dall'elemento di fase non lineare [8].

Nelle tecniche di monitoraggio passivo però l'istante temporale di generazione dell'emissione acustica è sconosciuto. Si supponga quindi che l'evento di EA sia generato all'istante generico t_1 , la trasformata di Fourier dell'impulso di eccitazione è ora data da:

$$S_1(f, 0) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi f t_1} \quad (8)$$

Dall'equazione (7) e dalla (8) è possibile scrivere la forma d'onda $s_1(t, D)$ acquisita ad una distanza percorsa D dal punto di generazione nel dominio delle frequenze come:

$$S_1(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi f t_1} e^{-j2\pi w^{-1}(f)KD} \quad (9)$$

Si consideri ora che l'onda dispersiva generata $s(t)$ sia acquisita tramite due differenti sensori (sensore 1 e sensore 2) dopo aver viaggiato lungo due diverse distanze di propagazione, rispettivamente distanza D_1 e D_2 . Le WFT dei segnali acquisiti alle due diverse distanze $s(t, D_1)$ e $s(t, D_2)$ sono date da:

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_1)\} = \sqrt{w(f)} S_0(w(f), 0) e^{-j2\pi w(f)t_1} e^{-j2\pi f K D_1} \quad (10)$$

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_2)\} = \sqrt{w(f)} S_0(w(f), 0) e^{-j2\pi w(f)t_1} e^{-j2\pi f K D_2} \quad (11)$$

Le due espressioni sono equivalenti a meno del ritardo di fase nell'ultimo esponenziale che dipende linearmente dalla distanza. Ciò si traduce semplicemente in una traslazione sull'asse delle ascisse tra i segnali $s_w(t, D_1) = W_W\{s(t, D_1)\}$ e $s_w(t, D_2) = W_W\{s(t, D_2)\}$. In aggiunta si osserva che tali segnali hanno una modulazione di frequenza costante dovuta al termine $e^{-j2\pi w(f)t_1}$. Questa proprietà può essere sfruttata utilizzando tecniche di correlazione tra i segnali, in quanto nel dominio delle frequenze la cross-correlazione di due segnali a cui è stato applicato l'operatore warping è data da

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_1)\} \cdot (\mathbf{FW}_W)^*\{s(t, D_2)\} = w(f) |S_0(w(f), 0)|^2 e^{-j2\pi f K (D_1 - D_2)} \quad (12)$$

In questo modo il valore dell'ascissa in cui l'involuppo della cross-correlazione dei due segnali $s_w(t, D_1)$ e $s_w(t, D_2)$ è massimo può essere associato immediatamente alla differenza delle distanze di propagazione dei due segnali dispersivi,

$$\Delta_{1,2} = D_1 - D_2 \quad (13)$$

Tramite questo stimatore è immediato calcolare la posizione della sorgente di EA in un sistema monodimensionale, come ad esempio lungo una barra di alluminio. Note infatti le coordinate dei suddetti sensori (x_i , $i = 1, 2$) può essere applicata la semplice relazione:

$$\Delta_{1,2} = |x_1 - x_p| - |x_2 - x_p| \quad (14)$$

che permette di stimare la posizione x_p della sorgente di EA lungo la guida d'onda ispezionata.

In figura 2, ad esempio, è possibile osservare due segnali acquisiti lungo la barra di alluminio a seguito della rottura di una mina (Hsu-Nielsen test). I sensori 1 e 2 distano rispettivamente 100 cm e 80 cm dalla sorgente. Nel pannello in basso di figura 2 è rappresentata la cross correlazione nel dominio *warped* dei due segnali, l'involuppo della stessa effettuato mediante la trasformata di Hilbert, la distanza reale $\Delta_{1,2}$, differenza delle distanze D_1 e D_2 di propagazione, e la sua stima tramite algoritmo proposto presa come il massimo della trasformata di Hilbert.

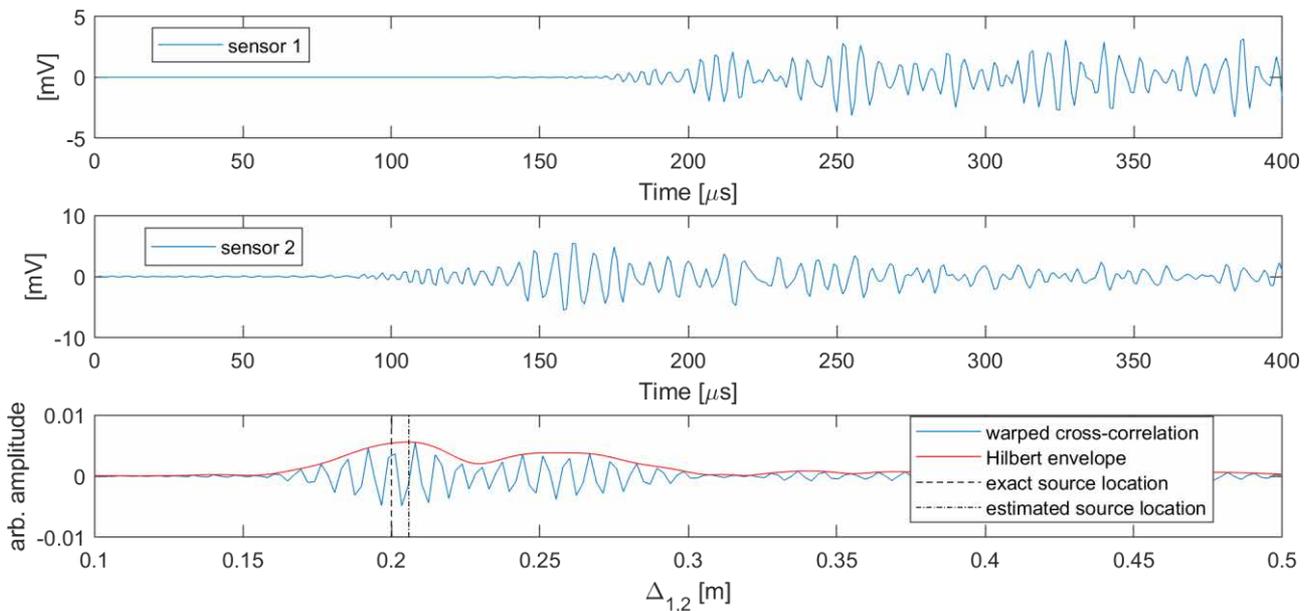


Figura 2. Segnali acquisiti ai sensori 1 e 2 nel dominio del tempo. Cross correlazione di tali segnali a cui è stato applicato l'operatore di warping e trasformata di Hilbert della cross-correlazione.

3. Validazione sperimentale

Al fine di validare le prestazioni dell'algoritmo proposto sono stati preparati quattro setup sperimentali per la generazione e l'acquisizione di EA lungo una barra di alluminio mediante, rispettivamente, la rottura di mine calibrate (*pencil break*) e l'apparecchiatura commerciale AMSY-5 della VallenSysteme. La rottura di una mina di matita calibrata è una tecnica largamente utilizzata per la generazione di EA e prende il nome di Hsu-Nielson Test. Il segnale emesso dalla rottura della mina è infatti paragonabile per intensità e caratteristiche ad eventi acustici generati da micro fratture all'interno del materiale. Inoltre, come dimostrato in [9], è possibile affermare entro un certo grado di approssimazione che l'Hsu-Nielson Test è ripetibile e riproducibile.

La barra di alluminio di dimensioni 4x0.2x200 cm è stata sensorizzata mediante due sensori commerciali anch'essi della VallenSysteme, i VS150-R, posti in prossimità delle zone di estremità della barra stessa.

I segnali acquisiti dallo strumento sono stati prima processati attraverso l'algoritmo di localizzazione dell'AMSY-5 e successivamente estratti per essere processati con l'algoritmo di warping proposto in questo lavoro.

3.1 Setup#1 & setup#2

Nel setup#1 i due sensori sono stati fissati alla barra di alluminio mediante nastro adesivo, senza l'utilizzo di gel di accoppiamento acustico, e posizionati in modo simmetrico a ± 98 cm dal centro del provino. Nel setup#2 i sensori sono stati fissati al provino nelle stesse posizioni del setup#1 tramite gel di accoppiamento al fine di valutare la robustezza dei due algoritmi di localizzazione in diverse condizioni di accoppiamento acustico. In figura 3 è possibile osservare la barra di alluminio e la sensorizzazione nei due casi descritti. Per sfruttare la simmetria di un provino come quello preso in esame sono stati effettuati dieci *pencil breaks* (PB) a dieci centimetri di distanza l'uno dall'altro lungo metà provino, partendo dal centro e spostandosi verso il bordo.

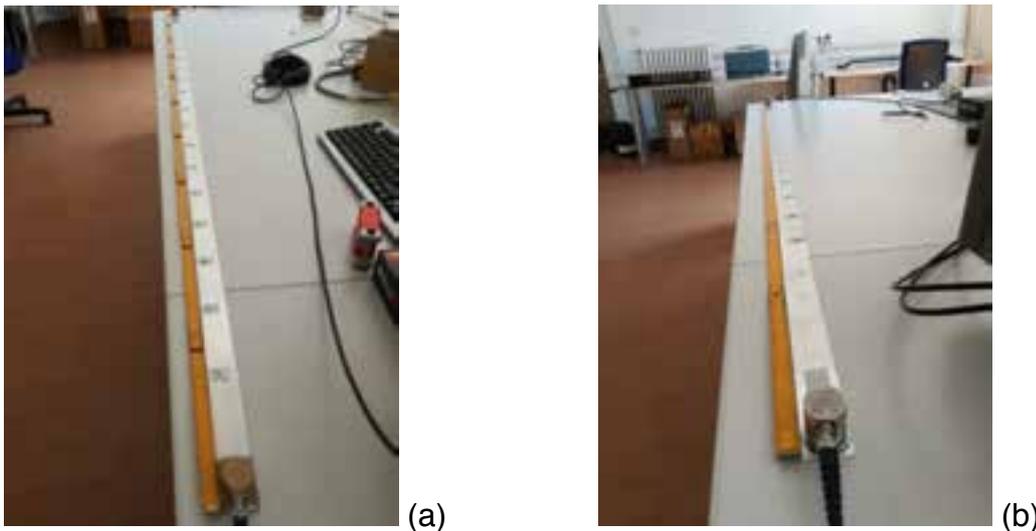


Figura 3. A sinistra (a) il provino di alluminio con i sensori fissati con nastro adesivo, a destra (b) il provino con i sensori fissati con il gel di accoppiamento acustico.

Questo tipo di stimolazione è stata ripetuta per entrambi i setup sperimentali, con e senza gel di accoppiamento. A fine test, il sistema di acquisizione restituisce un data set delle varie forme d'onda acquisite considerando un campionamento alla frequenza di 5MHz con finestre da 2048 campioni ciascuna. Tale data set è stato utilizzato per testare sia l'algoritmo di localizzazione integrato nello strumento sia quello presentato in questo lavoro. In particolare l'algoritmo di localizzazione dell'AMSY-5 scelto per la misura è di tipo *linear (rod)* che assume la propagazione di un'onda acustica non dispersiva lungo un dominio unidimensionale isotropo ed indisturbato (il cammino deve cioè essere privo di ostacoli). L'algoritmo ha bisogno della posizione dei sensori, del set di forme d'onda acquisite e della velocità v di propagazione dell'onda nel materiale ottenuta durante la fase di calibrazione del sistema. Date queste informazioni e misurata la differenza temporale Δt degli arrivi degli hit sui due sensori relativi allo stesso evento di EA, l'algoritmo *linear* calcola la differenza in distanza percorsa come:

$$X = \Delta t * v \quad (15)$$

La stima della posizione della sorgente acustica sarà quindi ottenuta come la distanza X dal punto medio tra i sensori. Per questo motivo più è precisa la calibrazione più sarà precisa la velocità v stimata e quindi migliore sarà la qualità della misura. Tramite questo approccio si ottiene una stima del posizionamento della sorgente di EA senza considerare fenomeni quali la dispersione del segnale lungo il percorso di propagazione e la multi-modalità delle onde guidate [10].

La tecnica di elaborazione del segnale per la localizzazione di EA basata su WFT, al contrario, utilizza un modello di propagazione a guida d'onda in cui vengono considerati i fenomeni nominati precedentemente, cioè la dispersione e la multi-modalità delle onde guidate, rendendo la localizzazione più raffinata e meno dipendente dal posizionamento dei sensori e dalla qualità del loro fissaggio.

In tabella 1 è possibile osservare i moduli degli errori assoluti in centimetri tra la sorgente reale e quella stimata nei due setup sperimentali relativi ai due algoritmi, il *linear* dell'AMSY-5 e quello basato su WFT.

Nel setup #1, cioè con i sensori fissati al provino con nastro adesivo, si può osservare che la condizione migliore per l'algoritmo *linear* è quella in cui la sorgente acustica è posizionata alla stessa distanza rispetto ai due sensori. In questa situazione infatti errori di localizzazione dovuti alla arbitrarietà della velocità v sono minimizzati. Per lo stesso motivo l'errore dell'AMSY-5 ha un andamento lineare, aumentando progressivamente con

l'aumentare della distanza del *pencil break* dal centro del provino. L'algoritmo di localizzazione basato su WFT in questo caso risulta essere più preciso in tutte le dieci misurazioni, con errori spesso minori del centimetro. Nel PB#10 si ha la maggiore riduzione dell'errore rispetto all'AMSY-5, con un miglioramento di 12.72 cm.

#PB [posizione reale [cm] ¹]	Errore AMSY-5 setup#1 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#1 [cm]	Errore AMSY-5 setup#2 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#2 [cm]
#1 [0]	2.26	0.11	0.43	0.23
#2 [10]	3.96	0.28	0.25	0.08
#3 [20]	5.00	2.02	1.32	0.28
#4 [30]	5.88	0.94	0.81	1.82
#5 [40]	6.75	0.20	0.14	0.78
#6 [50]	8.79	2.00	1.35	1.31
#7 [60]	8.05	1.09	1.46	1.61
#8 [70]	9.89	2.80	1.04	1.91
#9 [80]	12.07	2.19	2.00	1.30
#10 [90]	12.82	0.10	2.43	2.54

Tabella 1. Errore assoluto in cm dell'algoritmo *linear* presente nel sistema AMSY-5 e dell'algoritmo proposto basato su WFT nei setup#1 e setup#2.

Nel setup#2 in cui i sensori sono stati fissati al provino mediante gel di accoppiamento, i risultati della localizzazione dell'AMSY-5 sono molto diversi rispetto al caso precedente. In particolare il buon accoppiamento acustico tra sensori e provino facilita la fase di calibrazione restituendo una stima di v più precisa, e quindi ad una localizzazione migliore. Anche in questo caso si può osservare come l'errore sia maggiore a grandi distanze, sebbene in maniera meno evidente rispetto al setup#1. Gli errori di localizzazione dell'algoritmo basato su WFT rimangono invece in linea con il caso precedente, dimostrando di essere indipendenti dalla qualità dell'accoppiamento del sensore alla struttura.

3.2 Setup#3 & setup#4

Nel terzo setup sperimentale i due sensori, sensore 1 e sensore 2, sono stati fissati alla struttura con nastro adesivo, senza l'utilizzo di gel di accoppiamento, rispettivamente a 5 cm e 15 cm dai bordi del provino. Nel setup#4 i sensori sono stati posizionati in modo analogo al setup#3, ma fissati al provino mediante gel di accoppiamento. In figura 4 è possibile osservare la sensorizzazione della barra di alluminio nei due differenti casi. La scelta di posizionare i sensori in modo asimmetrico lontani dai bordi è stata effettuata per diversi motivi. Per prima cosa con questa configurazione vengono accentuati i fenomeni causati dai cammini riflessi come gli echi, essendo i sensori lontani dai bordi. Data inoltre l'asimmetria del posizionamento dei sensori, tali fenomeni non avranno lo stesso peso specifico nei segnali acquisiti dai due sensori. Lo scopo della misurazione è infatti quello di investigare le prestazioni dei due algoritmi anche in condizioni meno favorevoli. In particolare sono stati effettuati otto *pencil breaks* ogni 20 cm lungo tutto il provino partendo dal sensore 1 verso il sensore 2.

¹ I valori tra parentesi quadre nella prima colonna della tabella sono da intendersi in un sistema di riferimento in cui lo zero è al centro del provino.

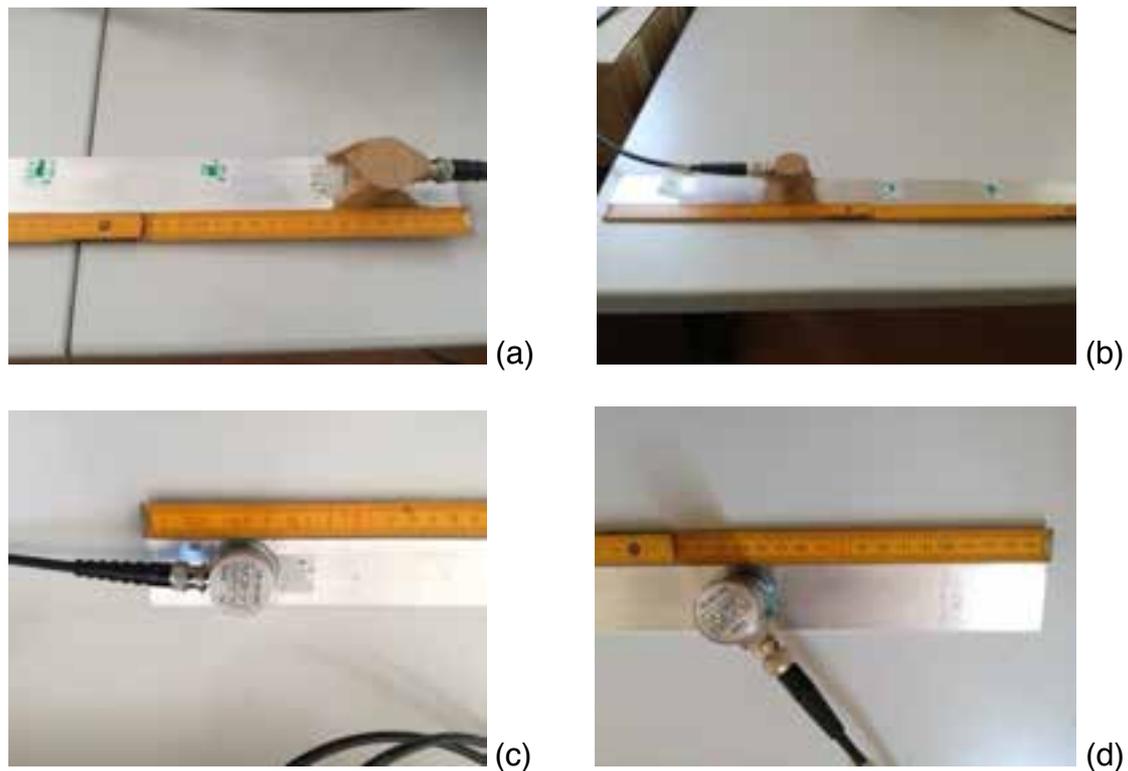


Figura 4. A sinistra (a,c) i sensori a 5 cm dal bordo fissati rispettivamente con nastro adesivo e gel, a destra (b,d) i sensori a 15 cm dal bordo fissati anche essi rispettivamente con nastro adesivo e gel.

Un ulteriore *pencil break* è stato effettuato al centro tra i due sensori. Queste stimolazioni sono state ripetute in modo analogo in entrambi i setup descritti. In tabella 2 è possibile osservare le coordinate dei punti in cui è stata generata la EA (Hsu-Nielsen test) e gli errori di localizzazione dei due algoritmi nei due setup considerati.

#PB [posizione reale [cm] ²]	Errore AMSY-5 setup#3 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#3 [cm]	Errore AMSY-5 setup#4 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#4 [cm]
#1 [20]	6.75	4.52	6.77	0.01
#2 [40]	8.08	2.7	5.65	4.15
#3 [60]	1.96	0.31	3.83	0.46
#4 [80]	6.73	0.59	3.26	0.46
#5 [90]	1.04	0.69	1.89	1.38
#6 [100]	5.55	1.17	0.22	2.53
#7 [120]	15.18	1.86	2.17	2.3
#8 [140]	15.41	4.99	3.64	4.36
#9 [160]	32.73	0.98	4.88	0.47

Tabella 2. Errore assoluto in cm dell'algoritmo dell'AMSY-5 e dell'algoritmo basato su WFT nel setup#3 e setup#4.

²I valori tra parentesi quadre nella prima colonna della tabella sono da intendersi in un sistema di riferimento in cui lo zero è nel punto in cui è posizionato il sensore 1.

Nel setup#3 si può osservare che l'errore di localizzazione dell'AMSY-5 cresce mano a mano che il PB si avvicina al sensore 2, cioè quello posto a 15 cm dal bordo, dimostrando i limiti dell'algoritmo *linear* (Vallen) nella gestione delle riflessioni e degli echi. Con il gel di accoppiamento lo strumento migliora in modo considerevole la misura, risultando meno sensibile a tali fenomeni.

L'algoritmo di localizzazione basato su WFT invece riesce in entrambi i setup a mantenere l'errore sempre al di sotto dei 5 cm, dimostrando di non risentire del tipo di fissaggio dei sensori e di essere più performante in condizioni non ideali.

Questo è ancora più evidente se si osservano le tabelle 3 e 4, in cui sono riassunti i risultati fin qui ottenuti. La tabella 3 confronta l'errore medio dei due algoritmi nel setup#1 e nel setup#2. Nell'ultima riga è evidenziata la variazione in percentuale dell'errore di ciascun algoritmo rispetto ai setup sperimentali. Analogamente la tabella 4 confronta l'errore medio dei due algoritmi nel setup#3 e nel setup#4 e le relative variazioni in percentuale.

	Errore medio AMSY-5	Errore medio WFT
Setup#1 (nastro adesivo)	7.55 cm	1.17 cm
Setup#2 (coupling gel)	1.12 cm	1.19 cm
Variazione errore	-85%	+1.7%

Tabella 3. Errori assoluti medi degli algoritmi nel setup#1 e setup#2, con variazione dell'errore tra i due setup sperimentali

	Errore medio AMSY-5	Errore medio WFT
Setup#3 (nastro adesivo)	10.38 cm	1.98 cm
Setup#4 (coupling gel)	3.59 cm	1.79 cm
Variazione errore	-65%	-9.6%

Tabella 4. Errori assoluti medi degli algoritmi nel setup#3 e setup#4, con variazione dell'errore tra i due setup sperimentali

L'errore di localizzazione dell'algoritmo dell'AMSY-5 è abbattuto dell'85% passando dal setup#1 al setup#2, in cui è stato utilizzato il gel di accoppiamento. Analogamente si ha una diminuzione dell'errore del 65% passando dal setup#3 al setup#4. Al contrario l'algoritmo basato su WFT risulta essere molto più robusto sotto questi aspetti, variando solo dell'1.7% e del 9.6%. Questo risultato può avere una notevole importanza applicativa in grandi sistemi di monitoraggio con un gran numero di sensori. In tali situazioni infatti non è sempre facile verificare il perfetto accoppiamento dei singoli sensori alla struttura e l'aver un algoritmo di localizzazione il più possibile indipendente da questo fattore può quindi risultare determinante.

4. Conclusioni

In questo elaborato è stato presentato un algoritmo per la localizzazione di sorgenti di EA in guide d'onda monodimensionali. La metodologia proposta si differenzia dalle comuni tecniche presenti in letteratura in quanto sfrutta la natura dispersiva delle onde guidate per effettuare una compensazione della dispersione sui segnali acquisiti da sensori piezoelettrici passivi attraverso la Warped Frequency Transform. In particolare, i segnali compensati risultano stazionari su un nuovo dominio e semplicemente traslati gli uni rispetto agli altri sull'asse delle ascisse. Applicando la cross-correlazione di queste forme d'onda è possibile estrarre la differenza delle distanze di propagazione $\Delta_{1,2}$ dell'evento acustico ai due sensori, attraverso la quale è possibile localizzare la sorgente di EA.

L'algoritmo è stato successivamente testato sperimentalmente e confrontato con lo stimatore linear del sistema commerciale l'AMSY-5 della VallenSysteme. I risultati ottenuti mostrano come l'approccio proposto, computazionalmente non oneroso (paragonabile a quello di una FFT) seppure raffinato, consenta spesso di stimare la posizione delle EA con un'accuratezza migliore rispetto all'algoritmo linear del sistema Vallen. Considerare la natura dispersiva delle EA in guide d'onda, inoltre, così come pure la loro multi-modalità, consente di sviluppare una metodologia di localizzazione più robusta, che a sua volta consente ottimi gradi di precisione anche variando la posizione dei sensori lungo il provino e la qualità del loro accoppiamento acustico.

5. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

6. Bibliografia

- [1] Gholizadeh S., Leman Z., Baharudin B.T.H.T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Struct. Engineer. and Mech.* 2015; 54: 1075-1095.
- [2] Salinas V., Vargas Y., Ruzzante J., Gaete L. Localization Algorithm for Acoustic Emission. *Phys. Procedia.* 2010; 3: 863-871.
- [3] Sengupta S., Datta A.K., Topdar P. Structural damage localisation by acoustic emission technique: A state of art review. *Latin Amer. Jour. of Solids and Struc.* 2015; 12: 1565-1582.
- [4] De Marchi L., Marzani A., Speciale N., Viola E. A passive monitoring technique based on dispersion compensation to locate impacts in plate-like structures. *Smart Mater.Struct.* 2011; 20: 035021(9pp).
- [5] De Marchi L., Marzani A., Caporale S., Speciale N. Ultrasonic guided-waves characterization with warped frequency transform. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2009; 56: 2232-2240.
- [6] Caporale S., De Marchi L., Speciale N. Fast Computation to Frequency Warping Transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 2010; 58: 1110-1121.
- [7] Bartoli I., Marzani A., Lanza di Scalea F., Viola E. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *J. of Sound and Vib.* 2006; 295: 685-707.
- [8] Perelli A., De Marchi L., Marzani A., Speciale N. Acoustic emission localization in plates with dispersion and reverberations using sparse PZT sensors in passive mode. *Smart Mater.Struct.* 2012; 21: 025010(10pp).
- [9] Boczar T., Lorenc M. The repeatability and reproducibility of calibrating signals generated by Hsu-Nielson method. *J. Phys. IV France.* 2005; 129: 97-103.
- [10] Thenikl T., Altmann D., Vallen H. Quantifying location errors. Atti della Conferenza su *Acousting Emission Testing. Praga, Settembre 07-09, 2016.*

Confronto di modelli numerici per lo studio della propagazione dei segnali EA

A. Chiappa¹, F. Giorgetti¹, M. Messina², G. Augugliaro³, M.E. Biancolini¹

¹ Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

² Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

³ Inail - Dit

Sommario

La tecnica delle emissioni acustiche (EA) consente di definire sistemi di monitoraggio estremamente precisi ed affidabili. Nell'ambito del progetto SmartBench le informazioni sullo stato di salute dei componenti vengono aggregate nella piattaforma per rendere la sicurezza integrata, attiva e smart. La progettazione e l'interpretazione dei dati di una rete di sensori EA o di nodi sensore connessi fra loro in modalità wireless sono fondate su una accurata previsione della propagazione delle onde meccaniche all'interno delle apparecchiature. La simulazione numerica dei transitori è una tecnica ben consolidata ma risulta molto costosa in termini di tempi di calcolo. Nella presente memoria si riportano diversi scenari di propagazione bulk e guidata (2D e 3D) simulati con software commerciali differenti (COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN). I risultati vengono confrontati sia in termini di accuratezza che in termini di prestazioni. Si studia infine la scalabilità nel caso in cui si ricorra all'uso del super calcolo dimostrando un sostanziale abbattimento del tempo richiesto per la simulazione.

1. Introduzione

Le onde guidate (ultrasonic guided waves, UGW) stanno emergendo come un approccio efficace per i controlli non distruttivi e per il monitoraggio dell'integrità di strutture che si comportano come guide d'onda. Rispetto alle onde bulk hanno una maggiore versatilità e consentono di ispezionare strutture a forma di piastra o di trave come tubature e binari ferroviari [1,2]. La capacità di propagare in un mezzo dipendono dal rapporto fra lunghezza d'onda e dimensione del dominio [3], se la lunghezza d'onda è maggiore dello spessore si ha che l'effetto dei contorni diventa dominante e si possono instaurare onde guidate, in caso contrario il mezzo si comporta come infinito e si hanno onde bulk. La verifica strutturale mediante UGW si basa su due fenomeni di propagazione: la riflessione e la distorsione del segnale che incontra un difetto, l'emissione spontanea di vibrazioni prodotta dall'evoluzione di un difetto. Il comportamento dispersivo delle UGW, dovuto alla dipendenza della velocità di fase dalla frequenza ed alla presenza di modi diversi, ne complica l'interpretazione e deve essere analizzato in modo corretto. Ogni modo è caratterizzato da una curva di dispersione e una frequenza eccitatrice può coinvolgere la risposta di più modi. Il calcolo della dispersione per strutture in parete sottile [4] può essere studiato mediante gli elementi finiti (FE), l'approccio può essere esteso al caso di guide d'onda solide [5] mediante una discretizzazione FE della sezione retta abbinato allo studio analitico nella direzione di propagazione (metodo FE semi analitico, semi-analytical finite element SAFE). Lo stesso approccio è stato poi esteso [6] sfruttando la simmetria ciclica. Il metodo SAFE è stato ulteriormente migliorato in studi successivi [7] tenendo anche conto degli effetti di smorzamento adottando una formulazione complessa della matrice di rigidezza [8]. Mentre il metodo SAFE è uno strumento utile per determinare le proprietà dispersive dei modi propagativi ed evanescenti nelle guide d'onda, analisi FE nel dominio del tempo sono ancora la scelta prediletta se le forme d'onda o il campo di spostamenti sono d'interesse,

come nello studio [9] dove i calcoli condotti con ABAQUS EXPLICIT trovano un ottimo accordo con le evidenze sperimentali per la localizzazione di un difetto in un binario ferroviario. La validazione di tale metodo FE è riportata in [10] dove il caso della piastra piana, la cui soluzione analitica è nota, viene usato come riferimento. In [11] si riportano dei controlli incrociati rispetto a risultati numerici per il caso dei laminati ottenuti con ABAQUS, ANSYS, COMSOL e un software in-house. Sebbene ci sia una buona rispondenza in termini di risultati, i tempi di calcolo sono molto diversi e COMSOL dimostra di essere lo strumento più veloce.

Lo studio presentato in questa memoria si inquadra all'interno delle attività sull'uso delle Emissioni Acustiche del progetto Smartbench (www.smartbench-project.it) e riporta un confronto fra i risultati ottenuti nella simulazione FE della propagazione di onde ad ultrasuoni mediante tre software commerciali (COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN) per il caso di onde bulk e di onde guidate sia in 2D che in 3D.

2. Test numerici

In questo paragrafo si riportano i dettagli dello studio numerico relativi a scenari di propagazione di onde ultrasoniche di complessità crescente: un modello 2D in condizioni di deformazione piana per il caso sia delle onde bulk che guidate, un modello 3D completo per il caso di onde guidate. Il materiale è organizzato in sotto-paragrafi contenenti la descrizione del problema, la base teorica delle specifiche modalità di propagazione e una sintesi dei risultati ottenuti. In tutti i casi il materiale considerato per il modelli è un acciaio con le seguenti caratteristiche:

- Modulo di Young $E = 209 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson $= 0.3$
- Densità $\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$

I tre solutori si basano su una formulazione di tipo implicito: generalized- α nel caso di COMSOL, il metodo di Newmark nel caso di ANSYS APDL e una variante del metodo Newmark-Beta nel caso di NX NASTRAN. Se non specificato diversamente, i calcoli hanno girato con una workstation Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 core.

2.1 Propagazione onde bulk in dominio 2D

Il primo confronto riguarda la propagazione di onde bulk in un blocco di acciaio rappresentato con elementi 2D in stato di deformazione piana.

La propagazione bulk ha velocità delle onde longitudinali e trasversali pari rispettivamente a $c_L = 6005.8 \text{ m/s}$ e $c_T = 3210.3 \text{ m/s}$. Lo smorzamento viene trascurato e il modello ha spessore unitario. Il dominio ha forma rettangolare con estremi liberi ed è sollecitato da una forza variabile nel tempo in direzione ortogonale alla mezzeria del lato superiore. Per motivi di simmetria il modello FEM, visibile in figura 2a, rappresenta metà del dominio ed ha quindi forma quadrata con la forza applicata al vertice in alto a destra; il lato sinistro è vincolato per rappresentare la simmetria, ovvero spostamento nullo in direzione ortogonale al lato stesso.

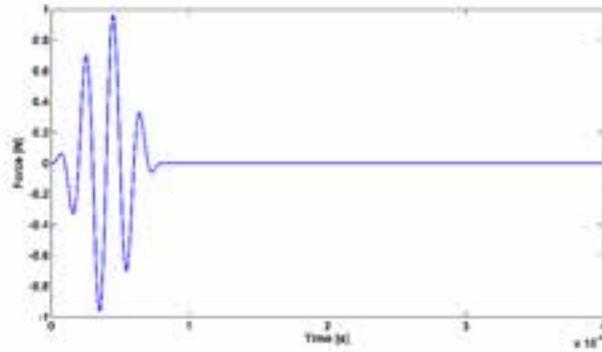


Figura 1. Evoluzione della forzante nel tempo

La forzante utilizzata per innescare la propagazione ondosa evolve nel tempo come mostrato in figura 1. Si tratta di una sinusoide con frequenza centrale $f_0 = 50\text{kHz}$, modulata da una funzione di Hann non nulla nell'intervallo da $t = 0$ a $t_{Hann} = 8 \cdot 10^{-5}$ s. Le simulazioni girano da $t = 0$ fino a $t_{end} = 4 \cdot 10^{-4}$ s. Considerando i valori della velocità delle onde e la frequenza della forzante si ha che la lunghezza d'onda delle onde longitudinali e di taglio risultano essere rispettivamente $\lambda_L = c_L / f_0 = 0.12$ m e $\lambda_T = c_T / f_0 = 0.064$ m. Il lato L del quadrato è stato scelto pari a 10 volte la lunghezza λ_L , $L = 10 \cdot \lambda_L = 1.2$ m.

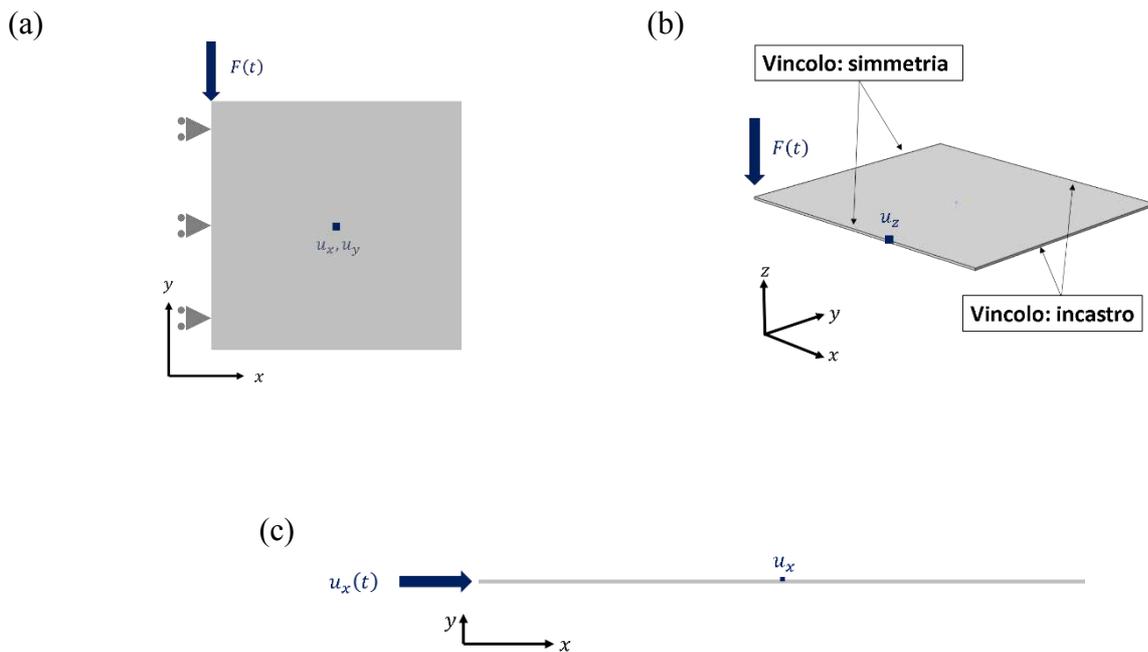


Figura 2. Domini di simulazione: (a) 2D bulk; (b) 3D guided; (c) 2D guided

Un aspetto cruciale per l'accuratezza e la velocità delle simulazioni, specialmente per le onde ultrasoniche, è la scelta della discretizzazione usata nello spazio e nel tempo. Nello studio [7] si raccomanda di utilizzare un lato dell'elemento finito b_e dipendente dalla più piccola lunghezza d'onda che si intende analizzare λ_{min} ; la risoluzione spaziale viene scelta fra un minimo di 10 a un massimo di 20 nodi per lunghezza d'onda.

$$\frac{\lambda_{min}}{20} \leq b_e \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (1)$$

Per quanto riguarda il passo temporale Δt , si sceglie la condizione più stringente fra (2) e (3), con f_{max} la frequenza più alta del problema dinamico.

$$\Delta t = \frac{b_{e,min}}{c_L} \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{1}{20 \cdot f_{max}} \quad (3)$$

Nel riferimento [10] si riporta come il limite di 20 divisioni nella (1) sia troppo severo e si dimostra che il vincolo sulla risoluzione spaziale è meno stringente rispetto a quello del lasso di calcolo. Nel riferimento [11] si suggerisce come 8 nodi per lunghezza d'onda siano già adeguati utilizzando un numero di Courant pari a 0.58 moltiplicando il termine a destra della (2). Poiché i requisiti di discretizzazione possono dipendere dal software (in questo studio COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN) e dallo specifico algoritmo, sono stati fatti alcuni tentativi per definire i valori ottimali. Il riscontro più semplice per verificare l'adeguatezza della discretizzazione è nel confrontare l'andamento della velocità di propagazione. A tale scopo si definisce un punto sonda (rappresentato dai quadratini blu in figura 2) ad una certa distanza dalla sorgente il quale riceve il segnale dopo un tempo che dipende dal rapporto fra la distanza e la velocità. Si è esaminato il centro del dominio quadrato posto ad una distanza $d = 0.85$ m dal punto di eccitazione. Poiché l'eccitazione è confinata dalla finestra di Hahn anche la risposta sul punto sonda è limitata all'intervallo $[t_{1L} \ t_{2L}]$ con:

$$t_{1L} = \frac{d}{c_L} = 1.414 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_{2L} = t_{Hamm} + \frac{d}{c_L} = 2.214 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (4)$$

L'intervallo delle onde di taglio, $[t_{1T} \ t_{2T}]$, si calcola in modo analogo:

$$t_{1T} = \frac{d}{c_T} = 2.646 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_{2T} = t_{Hamm} + \frac{d}{c_T} = 3.446 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (5)$$

Questi limiti consentono di verificare quanto siano attendibili i risultati numerici. Poiché le indicazioni di letteratura sono numerose, si è deciso di iniziare con la condizione più severa data dalla (1), usando 20 nodi per lunghezza d'onda, e dalla (2) moltiplicandone il risultato con un numero di Courant pari a 0.25, ottenendo $b_e = 0.0032$ m e $\Delta t = 1.33 \cdot 10^{-7}$ s. Il dominio è stato diviso con elementi quadrati a 4 nodi bilineari. L'andamento del segnale al punto sonda ottenuto con i tre solutori è riportato in figura 3. Gli intervalli dati dalla (4) e dalla (5) sono rappresentati dalle linee verticali rosse e verdi. Le oscillazioni che attraversano la seconda linea verde sono dovute alle onde riflesse; tutti i solutori danno risultati simili e rispettano il check sulla velocità.

È stata quindi provata la griglia più rada (10 nodi per lunghezza d'onda) definendo l'intervallo temporale anche in questo caso con la (2) e con numero di Courant ancora pari a 0.25 ($b_e = 0.0064$ m e $\Delta t = 2.66 \cdot 10^{-7}$ s) ma in questo caso COMSOL mostra un comportamento anomalo con un arrivo in anticipo delle onde di taglio (figura 4). Sperimentando ulteriori combinazioni si deduce che una griglia più rada tende ad anticipare l'arrivo dell'onda ed un intervallo temporale più ampio tende ad introdurre un ritardo; sembrerebbe quindi opportuno mantenere una proporzionalità fra le due spaziature. Si è quindi cambiato il numero di Courant, usando un valore unitario, così da avere Δt pari al valore della (2). I risultati di tale discretizzazione ($b_e = 0.0064$ m e $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ s) sono riportati in figura 5. Si nota ancora un anticipo nella soluzione COMSOL, anche se di minore entità, un buon centraggio del segnale calcolato con ANSYS e un ritardo sul segnale calcolato con NASTRAN. Intervalli temporali più elevati non sono stati provati perché non avrebbero rispettato il criterio di (3). In tabella 1 (righe "2D BULK") si riportano i parametri delle simulazioni e il tempo impiegato dai diversi solutori.

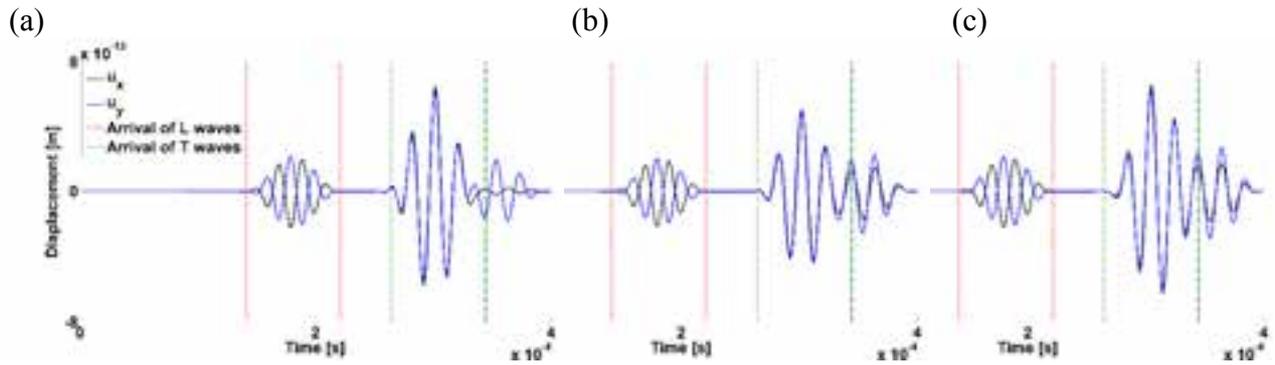


Figura 3. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

Simulazione	b_e [m]	Δt [s]	Numero di elementi			Tempo di calcolo [s]		
			COMSOL	ANSYS	NASTRAN	COMSOL	ANSYS	NASTRAN
2D BULK	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	140625	141376	139876	1339	2600	3279
2D BULK	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	35344	35344	35344	44	91	375
2D GUIDED	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	600	600	600	32	64	5
2D GUIDED	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	9600	9600	9600	76	188	115
3D GUIDED	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	530104	763416	440896	1331	2297	1137
3D GUIDED	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	530104	763416	440896	751	1139	711

Tabella 1. Discretizzazioni spaziali e temporali usate nelle simulazioni di propagazione, dimensione della griglia di calcolo e tempo necessario per il completamento del run.

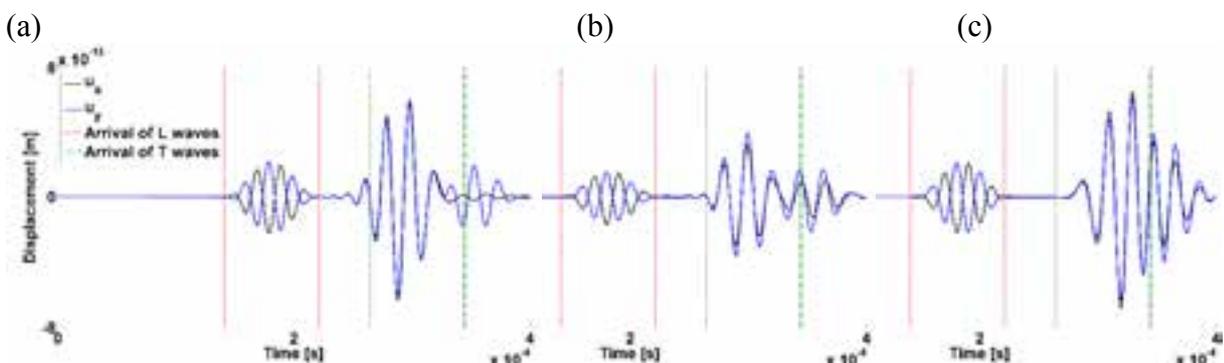


Figura 4. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

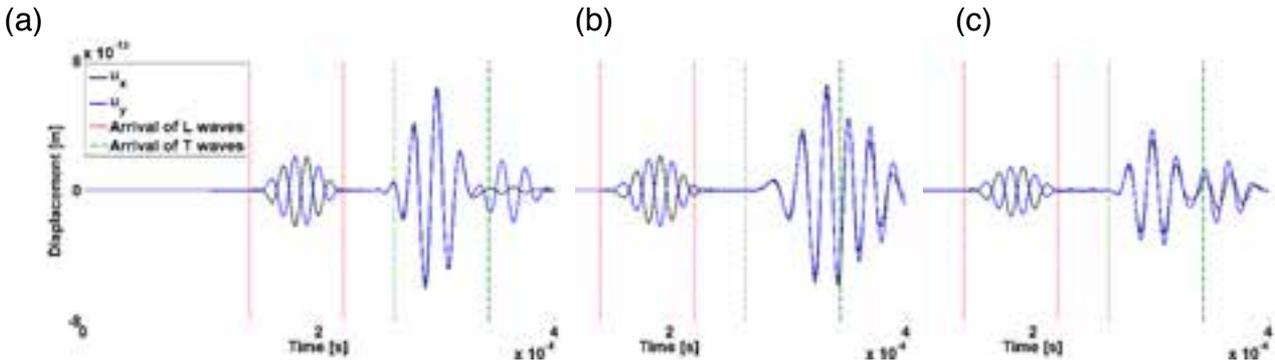


Figura 5. Risultati del terzo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

2.2 Onde guidate in dominio 2D

Il caso di onde guidate in una piastra sottile di materiale isotropo con contorni scarichi è governato dall'equazione di Lamb la cui soluzione di Rayleigh-Lamb risulta essere:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \text{ modi simmetrici} \quad \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \text{ modi antisimmetrici} \quad (6)$$

con k numero d'onda e $2h$ spessore della piastra.

I parametri p e q si ottengono dalla pulsazione angolare ω , il numero d'onda k e la velocità delle onde bulk:

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2 \quad q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2 \quad (7)$$

Nel caso di sezioni rette di forma generica è necessario ricorrere all'approccio SAFE [7], implementato in questo studio nel software Guiguw (disponibile sul sito www.quiguw.com); l'esempio qui studiato è lo stesso riportato nel riferimento [9], si tratta di una piastra sottile 2D lunga 3 m e spessa 2 cm di lunghezza infinita nella terza direzione e con superfici superiore e inferiore libere (figura 2c). L'eccitazione avviene ad uno degli estremi per una durata di 20 μ s con andamento mostrato nella figura 6a, il cui spettro (figura 6b), mostra come il limite superiore in frequenza possa essere definito pari a 100 kHz. Le curve di dispersione ottenute con il solutore SAFE Guiguw (figura 7) rivelano che nell'intervallo di frequenza considerato ci siano solo i modi di ordine zero simmetrico S_0 e anti-simmetrico A_0 ; essendo l'eccitazione simmetrica rispetto al piano medio longitudinale si ha l'attivazione del solo modo simmetrico S_0 . I primi calcoli sono stati svolti usando le spazature suggerite in [9] (elementi a 4 nodi in stato di deformazione piana con dimensioni $b_e = 10$ mm e un passo temporale $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7}$ s).

Osservando le curve di dispersione di Lamb si nota che per le frequenze di interesse la velocità di fase delle onde simmetriche risulta pari a $c_{ph,1} = 5459$ m/s per frequenze basse e $c_{ph,2} = 4942$ m/s per la frequenza di 100 kHz. Trattandosi di onde guidate è necessario considerare la velocità di gruppo associata a pacchetti di onde che in questo caso diminuisce da $c_{g,1} = 5394$ m/s a $c_{g,2} = 3489$ m/s, con una variazione di lunghezza d'onda da $\lambda_1 = 545.9$ m a 0 kHz, fino a $\lambda_2 = 0.049$ m a 100 kHz.

La variabile monitorata è lo spostamento longitudinale di un punto a metà della superficie superiore che si trova ad una distanza $d = 1.5$ m dall'eccitazione. Le simulazioni vengono fatte girare nell'intervallo da $t = 0$ a $t_{end} = 1.3 \cdot 10^{-3}$ s e la finestra di arrivo $[t_1 t_2]$ viene stimata come nell'applicazione delle onde bulk, considerando in questo caso le velocità di gruppo:

$$t_1 = \frac{d}{c_{g,1}} = 2.781 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_2 = 20[\mu\text{s}] + \frac{d}{c_{g,2}} = 4.499 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (8)$$

I risultati di questa simulazione sono riportati nella figura 8 che mostra i segnali di spostamento calcolati con i tre solutori COMSOL, ANSYS e NASTRAN. Sia COMSOL che ANSYS anticipano leggermente l'arrivo dell'onda simmetrica con un picco negativo subito prima della curva rossa, mentre il segnale calcolato con NASTRAN sembra essere centrato meglio e risulta più simile al risultato di letteratura. La seconda oscillazione è dovuta alla riflessione generata all'estremo di destra. Anche in questo caso si sono variate le spazature spaziali e temporali mantenendo la proporzionalità. L'intervallo riportato in (1) è ben bilanciato dal passo temporale della (2) con numero di Courant unitario. Si è quindi usata una spaziatura di 20 nodi per lunghezza d'onda considerando che il passo temporale associato si correla bene con il criterio di Nyquist (3) e che il dominio ha piccole dimensioni. I risultati di questo secondo set di analisi ($b_e = \lambda/20 = 0.0025 \text{ m}$, $\Delta t = b_e/c_{g,1} = 4.6 \cdot 10^{-7} \text{ s}$) sono mostrati in figura 9 dove si confrontano le soluzioni ottenute con COMSOL, ANSYS e NASTRAN. Si evidenzia che in questo caso tutte le curve sono simili e ben centrate. I parametri dei modelli e i tempi necessari alle simulazioni sono riassunti nella tabella 1 (righe "2D GUIDED").

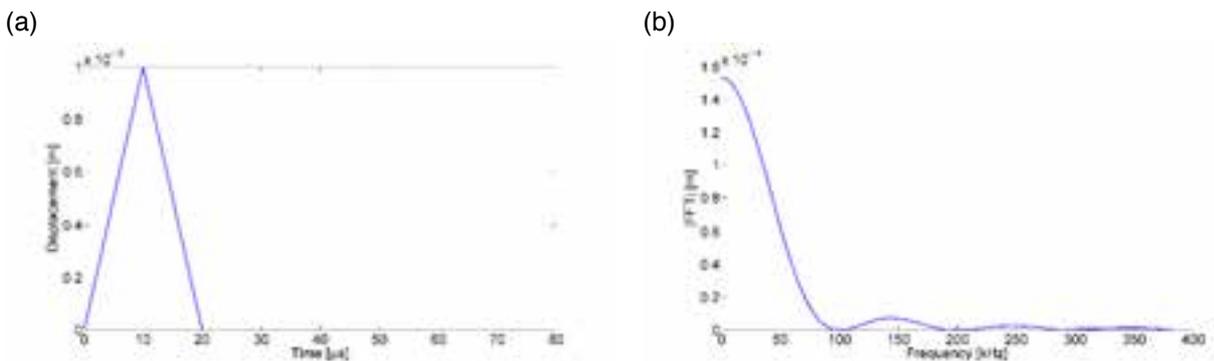


Figura 6. Legge temporale di spostamento dell'impulso (a) e spettro in frequenza (b).

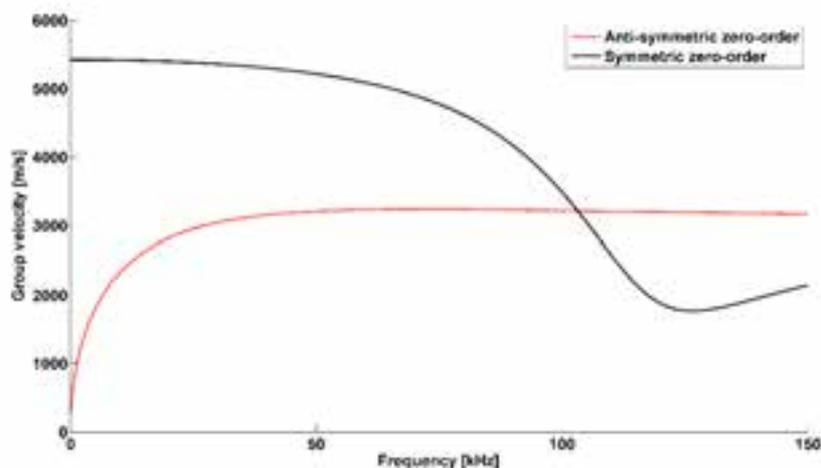


Figura 7. Velocità di gruppo in funzione della frequenza per il caso 2D guidato.

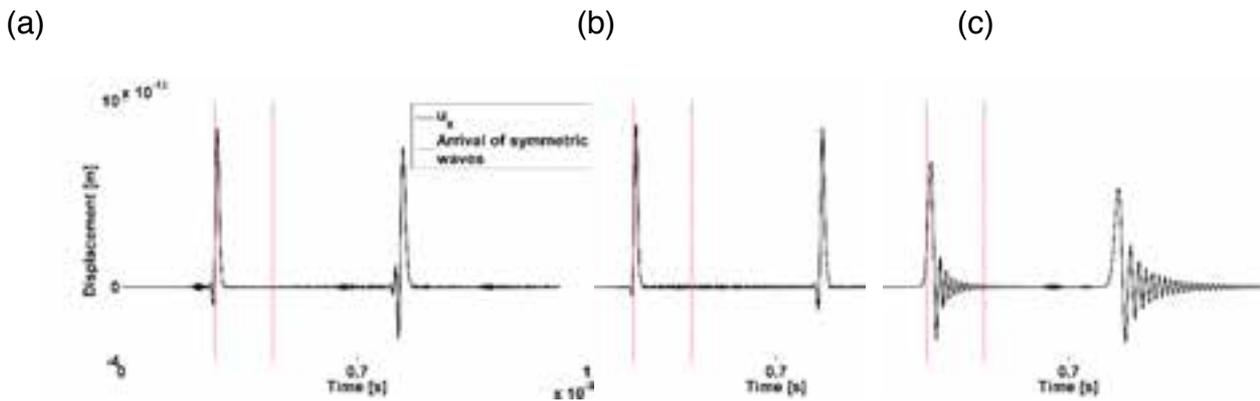


Figura 8. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 2D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

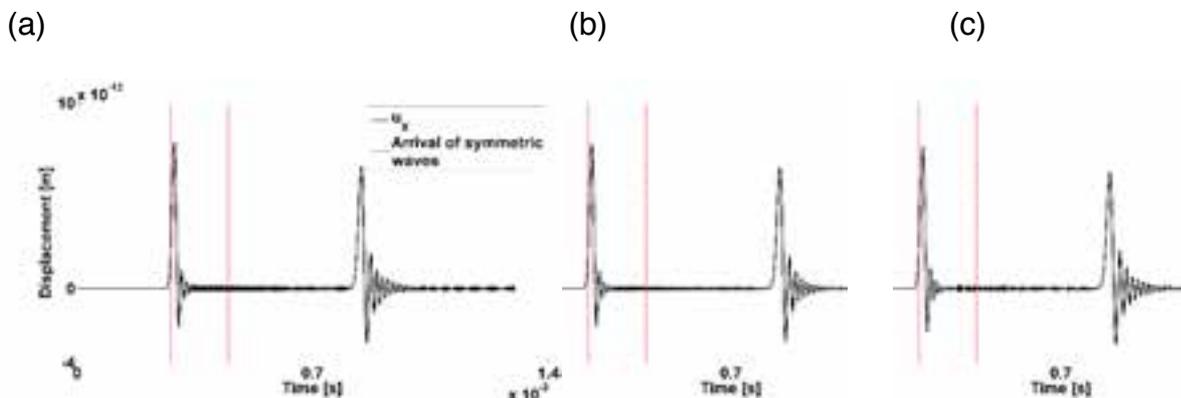


Figura 9. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 2D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

2.3 Onde guidate in dominio 3D

Con l'ultima applicazione numerica è stato affrontato il problema della propagazione di onde guidate in un solido tridimensionale; si tratta di una piastra sottile con superfici superiore ed inferiore scariche, di forma quadrata e lato di 1.26 m e spessore di 1 cm (figura 2b). Il solido è eccitato dalla stessa forzante dell'esempio del sotto paragrafo 2.1: una forza trasversale applicata al vertice in alto a sinistra del quadrato. Anche in questo caso si prescrive la condizione di simmetria al lato sinistro e a quello superiore mentre i lati in alto e a destra sono mantenuti fissi. La forza è posizionata in modo da eccitare il modo anti-simmetrico A_0 . Il segnale di risposta viene monitorato sulla superficie esterna del lato sinistro ad una distanza $d = 0.79$ m dalla zona eccitata dalla forzante. La soluzione del problema di Lamb per il problema anti-simmetrico consente di stimare una velocità di fase $c_{ph,1} = 1897$ m/s, una velocità di gruppo $c_{g,1} = 2965$ m/s e una lunghezza d'onda $\lambda_1 = 0.038$ m a 50 kHz. Anche in questo caso la spaziatura viene posta pari a $b_e = \lambda_1/10 = 0.0038$ m e $\Delta t = 1/(20 \cdot 50 \cdot 10^3) = 1 \cdot 10^{-6}$ s (3). Tale condizione è valida per le direzioni di propagazione; poiché si eccita solo il modo di ordine zero antisimmetrico, il campo di spostamento attraverso lo spessore risulta essere monotono (con un picco negativo ed uno positivo ai punti più esterni), giustificando quindi la scelta di usare solo due divisioni attraverso lo spessore al fine di mantenere un rapporto di forma accettabile degli elementi finiti. La griglia di calcolo è realizzata con due strati di elementi prismatici a base triangolare. Le simulazioni vengono

fatte girare nell'intervallo $t = 0$ e $t_{end} = 4 \cdot 10^{-4}$ s. Lo spostamento trasversale nel punto monitorato è riportato nella figura 10 confrontando i risultati ottenuti con i tre solutori (COMSOL, ANSYS e NASTRAN). La linea rossa segna il tempo di arrivo dell'onda antisimmetrica previsto a $t = d/c_{g,1} = 2.66 \cdot 10^{-4}$ s. Il secondo limite in questo caso non è riportato perché fuori dalla finestra di simulazione. Le immagini mostrano chiaramente che solo il NASTRAN è in grado di rispettare il check sulla velocità. Anche in questo caso per poter affrontare le discrepanze registrate con COMSOL e ANSYS si è operato sull'offset fra le diverse andature nello spazio e nel tempo delle onde. Dopo numerosi tentativi è stato possibile indentificare una soluzione accettabile solo rilassando le condizioni della (3), usando 10 divisioni per ciclo. I nuovi run sono stati quindi fatti girare usando un passo temporale $\Delta t = 2 \cdot 10^{-6}$ s e i risultati sono riportati in figura 11. Si nota in questo caso che COMSOL e ANSYS rispettano i check sulla velocità mentre NASTRAN prevede un ritardo eccessivo. Anche in questo caso si riportano i parametri delle simulazioni e il tempo impiegato dai diversi solutori nella tabella 1 (righe "3D GUIDED").

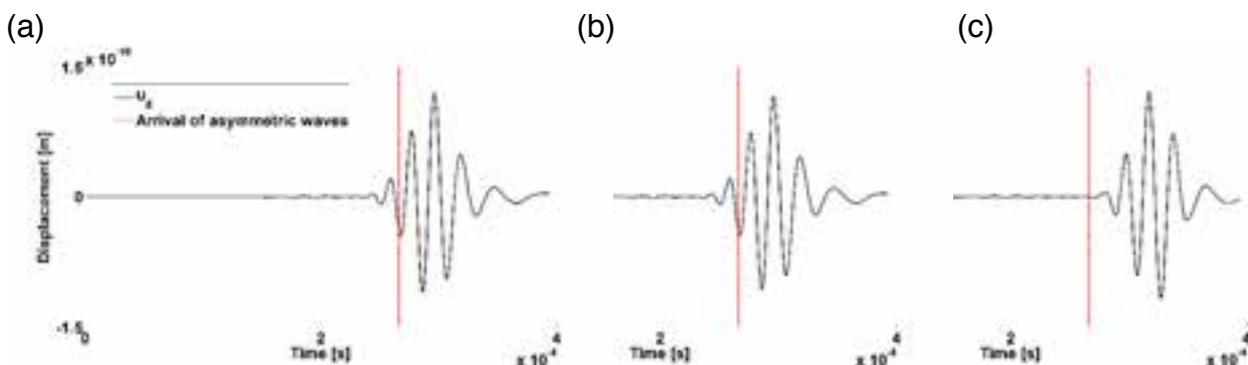


Figura 10. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 3D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

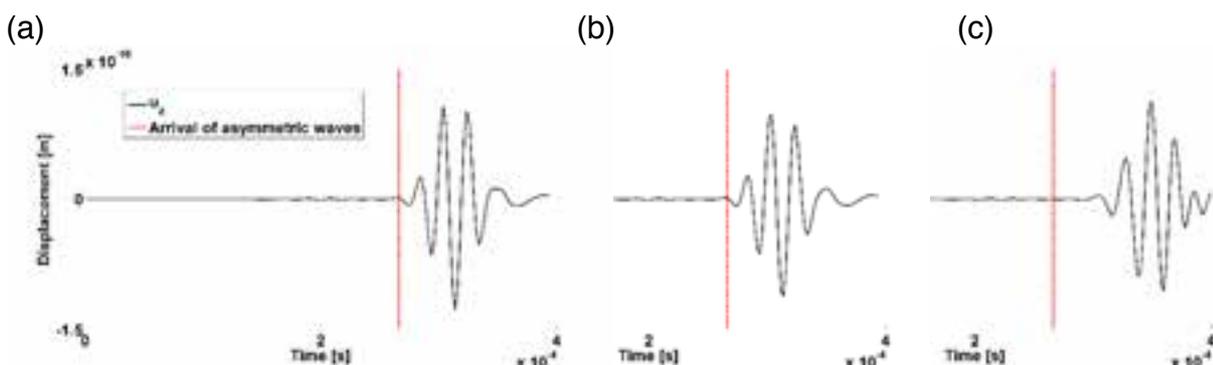


Figura 11. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 3D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

1.1. High Performance Computing (HPC)

Essendo i tempi necessari per le simulazioni numeriche piuttosto elevati sono stati svolti dei test in ambiente HPC avvalendosi di un Server Dell PowerEdge R940 con 4 CPU Intel(R) Xeon(R) Gold 6152 CPU @ 2.10GHz, 256 GB di RAM, 2 TB di disco e 88 core. Gli speed-up relativi al solo caso del solutore ANSYS APDL sono mostrati nel grafico della figura 12 e riguardano il caso di propagazione guidata con modello 3D. Si hanno vantaggi importanti

salendo fino a 30 core. Passando da 5 a 88 core, il tempo per la simulazione si riduce da 43 minuti a circa 6 minuti con un risparmio pari a 86%.

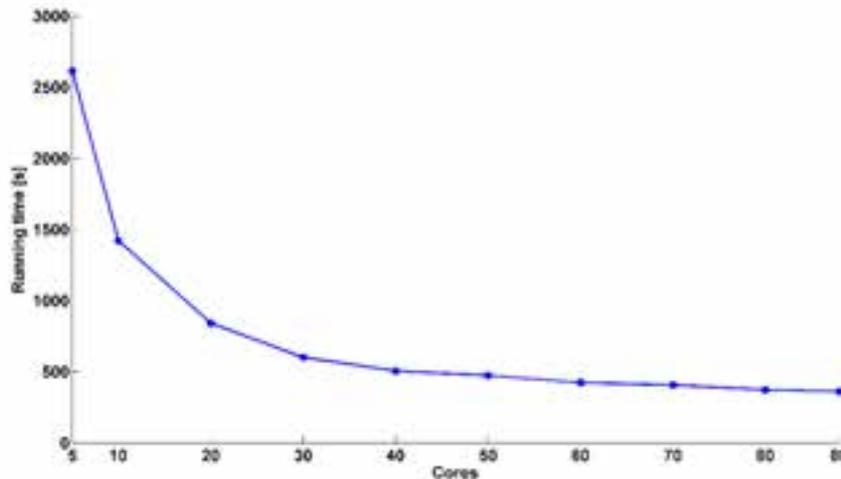


Figura 12. Tempo di calcolo in funzione del numero di core utilizzati durante i test HPC.

3. Conclusioni

Negli ultimi anni le onde guidate a ultrasuoni si sono affermate come uno strumento valido per la valutazione dell'integrità strutturale delle strutture mediante metodi di emissione acustica. La fisica che governa il problema è piuttosto complessa e la soluzione analitica è disponibile solo per geometrie molto semplici. Per studiare casi di forma complessa è quindi necessario ricorrere ad analisi transitorie utilizzando il metodo degli elementi finiti per le quali risulta molto critica la definizione delle discretizzazioni spaziali e temporali adatte a catturare il fenomeno. In questa memoria si è presentato un confronto fra i risultati numerici ottenuti con tre software commerciali molto diffusi, COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN, per lo studio della propagazione di onde bulk e onde guidate per casi bidimensionali e della propagazione di onde guidate per un caso tridimensionale. Nel caso di onde guidate sono stati modellati domini a parete sottile in modo da rispettare le ipotesi del problema di Lamb utilizzando le curve di dispersione per verificare l'attendibilità dei risultati dei modelli FE.

ANSYS e NASTRAN hanno dimostrato una maggiore robustezza fornendo risultati accettabili al variare della discretizzazione spaziale e temporale. Per quanto riguarda il tempo di calcolo, COMSOL si è dimostrato molto più veloce pur mostrando una maggiore sensibilità alle scelte di discretizzazione.

Un aspetto critico è dato proprio dal fatto che la velocità di propagazione, essendo legata sia alla discretizzazione spaziale che temporale, dipende molto dai parametri ed è quindi necessario rispettare un opportuno rapporto fra dimensione dell'elemento e passo di calcolo temporale.

Per quanto riguarda l'analisi HPC, qui sperimentata per il solo solutore ANSYS APDL, si è osservato che nel caso 3D consenta un risparmio del tempo di calcolo pari a 86% passando da 5 core a 88 core con benefici importanti già usando 30 core.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

Bibliografia

- [1] Lowe, MSJ., Alleyne, DN., Cawley, P., 1998. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics* 36, 147-154
- [2] Leckey, CAC., Wheeler, KR., Hafiychuk, VN., Hafiychuk, H., Timuçin, DA., 2018. Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: benchmark comparisons of numerical coded and experiment. *Ultrasonics* 84, 187-200
- [3] Rose, JL., 2014. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press, New York USA
- [4] Gavrić, L., 1994. Finite element computation of dispersion properties of thin-walled waveguides. *Journal of Sound and Vibration* 173(1), 113-124
- [5] Gavrić, L., 1995. Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique. *Journal of Sound and Vibration* 185(3), 531-543
- [6] Wilcox, P., Evans, M., Diligent, O., Lowe, M., Cawley, P., 2002. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* 21, 203-210
- [7] Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F., Viola, E., 2006. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *Journal of Sound and Vibration* 295(3), 685-707
- [8] Marzani, A., Viola, E., Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Rizzo, P., 2008. A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides. *Journal of Sound and Vibration* 318, 488-505
- [9] Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Fateh, M., Viola, E., 2005. Modeling guided wave propagation with applications to the long-range defect detection in railroads tracks. *NDT&E International* 38, 325-334
- [10] Moser, F., Jacobs, LJ., Qu, J., 1999. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT&E International* 32, 225-234
- [11] Leckey, C. A., Wheeler, K. R., Hafiychuk, V. N., Hafiychuk, H., & Timuçin, D. A. (2018). Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: Benchmark comparisons of numerical codes and experiment. *Ultrasonics*, 84, 187-200.

Modellazione di serbatoi atmosferici soggetti ad invecchiamento

M. Messina¹, V. Cozzani¹, M. Demichela², P. Agnello³

¹ Università di Bologna

² Politecnico di Torino

³ Inail - Dit

Sommario

I sistemi di Structural Health Monitoring (SHM) sono basati su onde ultrasoniche guidate e su sensori permanentemente installati nelle strutture, che hanno la potenzialità di ridurre i costi di manutenzione e prevenire possibili cedimenti strutturali in impianti chimici. Questi sistemi possono, infatti, controllare lo stato di salute della struttura e, nel caso, segnalare la necessità di compiere interventi di manutenzione quando effettivamente richiesti e non ad intervalli regolari. Inoltre, possono essere utilizzati in real-time o attivati da remoto per check estemporanei. Il processo di monitoraggio consiste in due fasi: (i) generazione e ricezione di onde guidate ultrasoniche in punti opportuni della struttura, tramite networks di nodi sensore, e (ii) elaborazione dei segnali raccolti con l'obiettivo di valutare l'integrità strutturale. Nell'ambito del progetto Saf-era PROAGE, finanziato da Inail, una delle linee di ricerca riguarda la rilevazione di danni in serbatoi atmosferici soggetti ad invecchiamento. In particolare, anche in accordo con la fenomenologia individuata dalle ispezioni condotte dai tecnici INAIL, è stato preso in considerazione il fenomeno della corrosione interna. In questo paper si è utilizzata la tecnica tomografica 'Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage' (RAPID) per la determinazione e localizzazione del danno da corrosione in serbatoi atmosferici in acciaio. In particolare, si è studiata la capacità della tecnica tomografica di rilevare il danno al variare del numero di sensori attivi e alla severità della corrosione. La generazione e propagazione delle onde guidate è stata effettuata tramite il metodo degli Elementi Finiti.

1. Introduzione

Lo stato di salute di grandi strutture metalliche a spessore sottile può essere valutata efficacemente con l'utilizzo di onde ultrasoniche guidate (GWs) [1], grazie alla loro bassa energia di attivazione e allo loro bassa attenuazione. Come riportato in [2], anche se la vita media di un serbatoio atmosferico in acciaio si aggira intorno ai 40 anni, cedimenti dovuti a corrosione sono stati riportati dopo solo tre anni dall'entrata in servizio. I serbatoi atmosferici in acciaio contenenti liquidi sono particolarmente suscettibili alla corrosione interna, che può comportare un riduzione di spessore delle pareti verticali e della copertura, generando imperfezioni che riducono significativamente i carichi critici di buckling [3]. Per questo tipo di strutture, array di sensori piezoelettrici possono essere utilizzati per eccitare e registrare GWs, e, tramite opportuna elaborazione del segnale registrato, determinare l'eventuale presenza di un danno e la sua posizione. Una comune tecnica di elaborazione è quella tomografica (TM). In questo lavoro, vedi Figura 1, una piccola porzione di un serbatoio atmosferico in acciaio è stata presa in considerazione, in questo modo è stato possibile limitare il tempo computazionale per generare i segnali e per testare la generazione di immagini tomografiche al variare del numero di coppie attuatore-sensore attive, per un massimo di 16 sensori attivi.

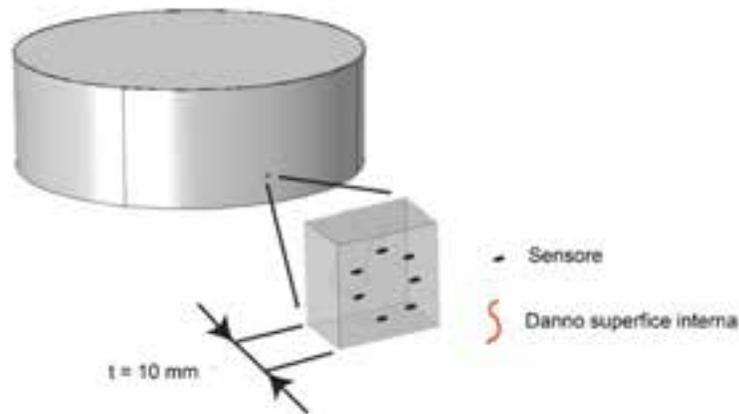


Figura 1. Geometria del serbatoio atmosferico con in evidenza la parte di mantello simulata.

2. Tomografia: principi di funzionamento

Il principio alla base della TM con tecnica consiste nel confrontare il segnale GW di una coppia attuatore-sensore relativo ad una struttura in condizioni ottimali, con quello della stessa coppia relativa alla stessa struttura dopo che ha subito un danno. Le differenze fra i due segnali sono utilizzate per identificare la presenza di eventuali difetti nel percorso attuatore-sensore. Aumentando il numero di attuatori e sensori, e quindi dei cammini delle onde guidate, e combinando opportunamente gli indicatori di eventuale danno di tutti i percorsi, è possibile identificare e localizzare il difetto. L'algoritmo utilizzato per determinare l'eventuale presenza del difetto e la sua localizzazione è il 'Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage' (RAPID) [4].

3. Simulazione onde guidate ultrasoniche

Il metodo agli elementi finiti è stato utilizzato per determinare la propagazione delle onde GW all'interno della parte di mantello considerata. Dato il rapporto molto piccolo t/R , con t spessore del mantello ed R raggio di curvatura del serbatoio cilindrico, una piastra quadrata piana di lato 0.3 m e spessore 10 mm, riportata in Figura 2, e realizzata con acciaio A36, è stata utilizzata nelle simulazioni FEM. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche dell'acciaio A36 si sono considerati i seguenti valori::

- Modulo di Young E : 200 GPa
- Rapporto di Poisson ν : 0.26
- Densità ρ : 7800 kg/m³

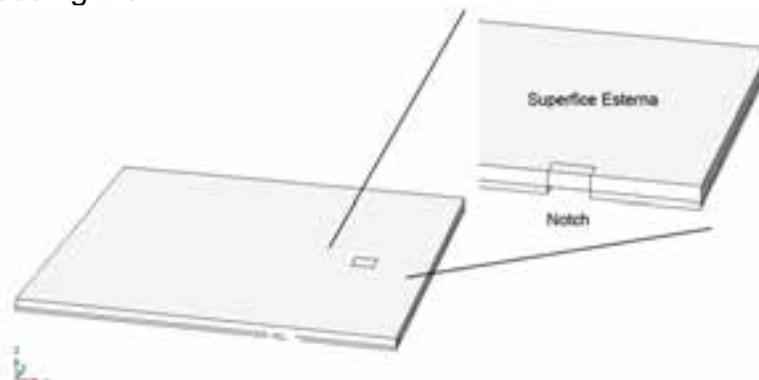


Figura 2. Geometria piastra con dettaglio danno da corrosione

Per la modellizzazione del danno da corrosione, si è considerato un notch quadrato di lato $L_d = 17.50$ mm e spessore h_d , con centro posizionato in (x_d, y_d, z_{lower}) , sul lato opposto a quello utilizzato per il posizionamento dei sensori. Le condizioni iniziali assegnate sono state di campo di spostamento e velocità nulli, mentre come condizioni al contorno si è utilizzata la condizione di “low-reflecting” sui bordi della piastra e di assenza di sollecitazioni sulle superfici orizzontali superiore ed inferiore.

La piastra è stata discretizzata con elementi finiti di dimensione massima L_e , minore di $1/8$ della minima lunghezza d’onda prevista [5], che corrisponde ad un’onda di tipo A_0 . Per la valutazione della velocità di propagazione dell’onda A_0 sono state generate, con il tool GUIGUW [6], le curve di dispersione della piastra in acciaio A36 e spessore 10 mm. In Figura 3 sono riportate le curve di dispersione per la velocità di gruppo c_g e per la velocità di fase c_{ph} .

Il time step utilizzato nelle simulazioni soddisfa la condizione di Courant Friedrichs Levy (CFL), con un numero CFL massimo pari 0.25, basato sulla velocità di gruppo S_0 . La disposizione dei sensori è circolare, di raggio $R_a = 69.81$ mm e sono stati utilizzati fino ad un massimo di 16 sensori.

Dato che è necessario simulare l’attuazione di ogni sensore attivo, sia per la piastra integra che per la piastra danneggiata, le dimensioni della piastra e del raggio R_a sono state mantenute a valori contenuti per mantenere un tempo di calcolo ragionevole. L’attuatore è stato simulato tramite una pressione costante $p(t)$ su un cerchio di raggio 16 mm. Questo valore assicura che almeno due elementi lungo la dimensione radiale siano sottoposti alla forzante. La variazione $p(t)$ è data da un sine burst a 50 kHz e 4 cicli modulato con una finestra di Hanning.

Sono state effettuate simulazioni variando la profondità h_d e la posizione del danno e utilizzando tre configurazioni di sensori: 16, 8 e 4. Nel seguito il termine “baseline” è utilizzato per indicare i dati raccolti sulla struttura non danneggiata, mentre il termine “current” per i dati raccolti su quella danneggiata. Il software MATLAB [7] è stato utilizzato per l’implementazione del tool di post processing.

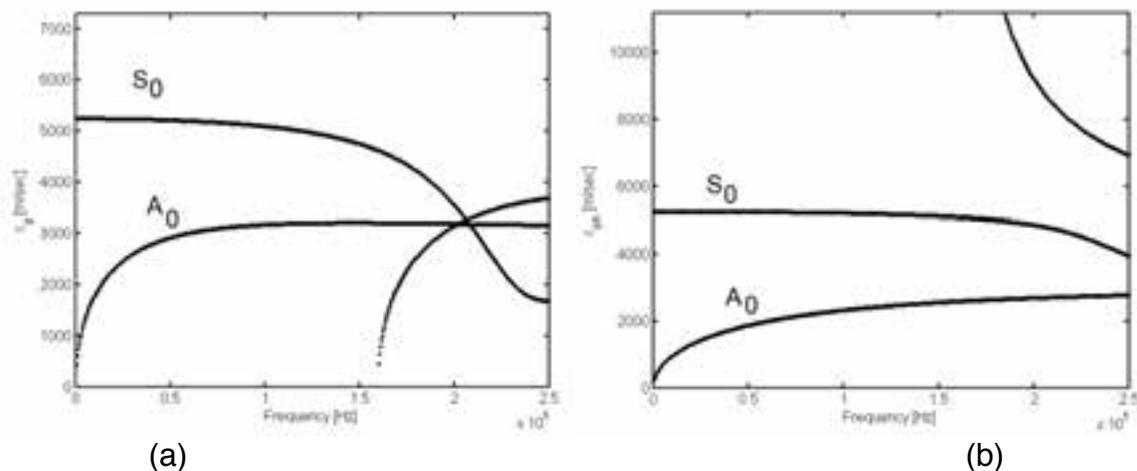


Figura 3. GUIGUW curve di dispersione acciaio A36 con spessore 10 mm: (a) velocità di gruppo e (b) velocità di fase

4. Generazione immagini tomografiche

Per ciascun trasmettitore i e ricevitore j è possibile calcolare un signal difference coefficient value (SDC_{ij}) tra il segnale baseline $B_{ij}(t)$ e quello current $D_{ij}(t)$ [4]:

$$SDC_{ij} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (B_{ij}(t_k) - \overline{B_{ij}}) (D_{ij}(t_k) - \overline{D_{ij}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (B_{ij}(t_k) - \overline{B_{ij}})^2 \sum_{k=1}^n (D_{ij}(t_k) - \overline{D_{ij}})^2}} \quad (1)$$

dove k varia da 1 al numero n di time steps registrati e la barra sopra una grandezza ne indica la media. Questo coefficiente è una misura della differenza fra le due strutture e quindi può essere utilizzato come indicatore della presenza di danno fra la coppia di sensori ij . Assumendo a priori una distribuzione spaziale di danno s_{ij} di forma ellittica, con fuochi il trasmettitore i e il ricevitore j , la probabilità damage presence probability $P(x,y)$ può essere definita come:

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} SDC_{ij} s_{ij} \quad (2)$$

dove N_s è il numero totale di sensori utilizzati per la misura.

5. Risultati

Il danno da corrosione è stato posizionato in due punti: uno con centro in ($x_d = 52.49$; $y_d = 0.00$) mm (posizione I) e uno con centro in ($x_d = 87.48$; $y_d = -17.50$) mm (posizione II). La Figura 4 mostra la normalized damage probability $P(x,y)$ con danno nelle due posizioni e per profondità di corrosione h_d pari a 3 mm e 9 mm. Come si può notare la tomografia è in grado di rilevare il danno sul lato opposto rispetto a quello su cui sono state realizzate le misure, indipendentemente dalla profondità della corrosione h_d e dal numero di sensori attivi. Per valutare l'effetto della diminuzione dei sensori attivi sul posizionamento del danno, è stato calcolato il rapporto percentuale tra la distanza fra il massimo di $P(x,y)$ e la posizione del centro del notch, e il raggio R_a della disposizione dei sensori:

$$e = 100 * \frac{\|x_{\max(P)} - x_{c,notch}\|}{R_a} \quad (3)$$

Nel caso di danno in posizione I, Figura 5a, con danno in posizione simmetrica rispetto all'asse delle x , la diminuzione del numero di sensori attivi peggiora la localizzazione del difetto fino ad un errore del 100 %. Nel caso di danno in posizione II, Figura 5b, con danno in posizione generica, la tomografia ha un peggioramento nello stimare la posizione del danno fino ad un errore dell'80 %.

6. Conclusioni

La tomografia, effettuata con tecnica RAPID e con un array funzionante di 16 sensori, è in grado di rilevare la presenza di un danno da corrosione, indipendentemente dalla profondità di quest'ultimo nel range di valori studiati 3 ÷ 9 mm, con un errore di localizzazione variabile dal 15 % al 30 %. Il danno interno è stato localizzato avendo posizionato i sensori sulla superficie esterna, consentendo, nella situazione reale, la possibilità di fare le misure senza necessariamente dover svuotare il serbatoio e con la necessità di disporre correttamente del suo contenuto. Questo a prescindere dal numero di sensori attivi. Per una tecnica SHM, la sensibilità al numero di sensori attivi è di vitale importanza: per array posizionati permanentemente in loco, la possibilità che qualche sensore venga danneggiato e diventi inoperativo è molto probabile. Dall'analisi delle configurazioni studiate, una riduzione del numero di sensori attivi non diminuisce la capacità della tomografia di identificare la presenza

del danno, d'altra parte la sua localizzazione è fortemente legata al numero di sensori attivi, degradando in precisione al diminuire dei sensori attivi.

Riconoscimenti

I risultati descritti nel presente articolo sono stati raggiunti nell'ambito del progetto PROAGE, finanziato da Inail nell'ambito del 3° Bando SAFERA.

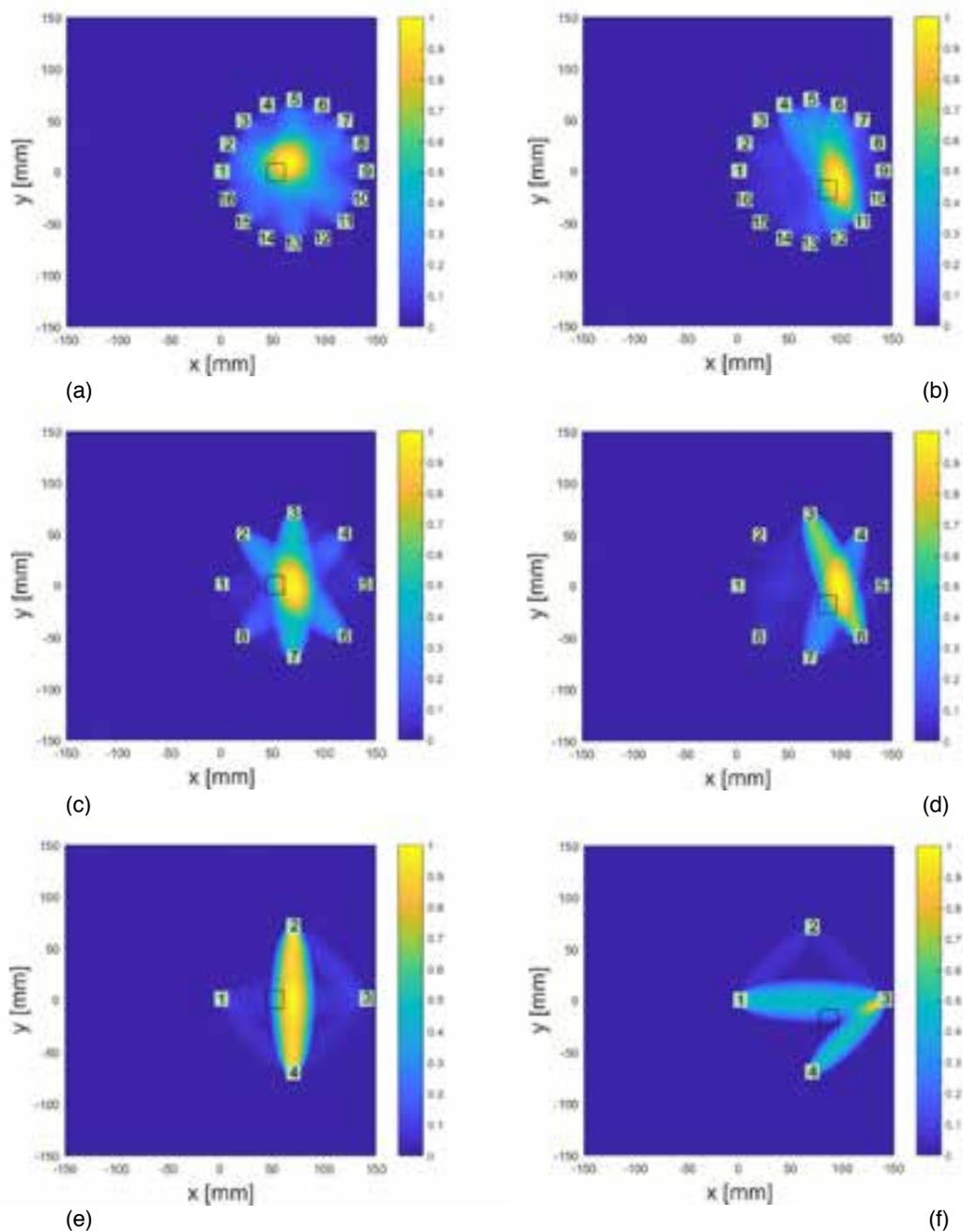


Figura 4. Risultati tomografici per 16, 8 e 4 sensori attivi (dall'alto in basso), per il danno in posizione I (a), (c) ed (e) e per il danno in posizione II (b), (d) ed (f).

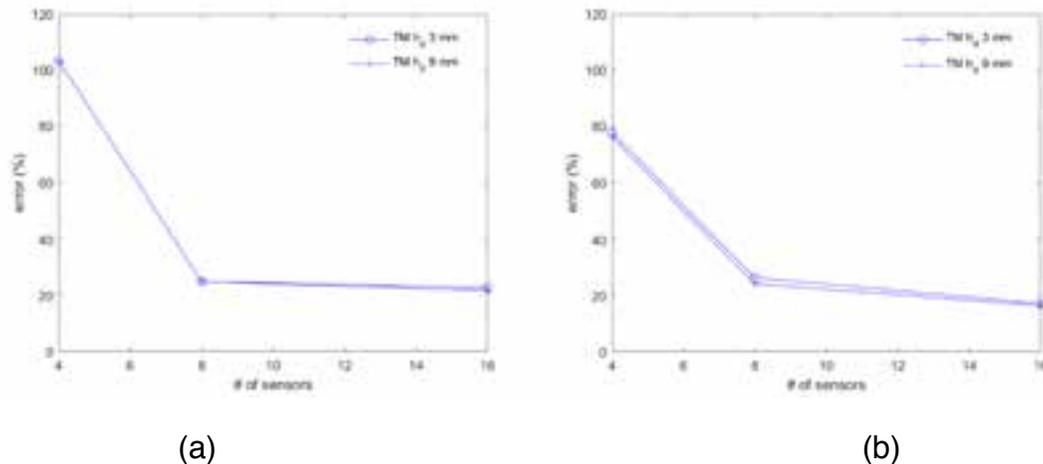


Figura 5. Errori nella localizzazione per (a) danno in posizione I e (b) danno in posizione II.

7. Bibliografia

- [1] Li X.X., Zhou S.Q., 2016, Assessing damages in pipes through circular distribution of ultrasonic guided wave reflections from defects, *Chemical Engineering Transactions*, 51, 541-546.
- [2] Maheri M.R., Abdollahi A., 2013, The effects of long term uniform corrosion on the buckling of ground based steel tanks under seismic loading, *Thin-Walled Structures*, 62, 1-9.
- [3] Shokrzadeh A.R., Sohrabi M.R., 2016, Buckling of ground based steel tanks subjected to wind and vacuum pressures considering uniform internal and external corrosion, *Thin-Walled Structures*, 108, 333-350.
- [4] Tabatabaeipour M., Hettler J., Delrue S., Van Den Abeele K., 2014, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, Prague, Czech Republic.
- [5] Duczek S., Joulaian M., Düster A., Gabbert U., 2014, Numerical analysis of Lamb waves using the finite and spectral cell method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 99(1), 26–53.
- [6] Bocchini P., Marzani A., Viola E., 2011, Graphical User Interface for guided acoustic waves, *Journal of Computing in Civil Engineering* 25(3), 202-210.
- [7] The MathWorks, Inc., 2017, MATLAB 9.2, Natick, Massachusetts, United States. Willberg C., Duczek S., Vivar-Perez J.M., Ahmad Z.A.B., 2015, Simulation Methods for Guided Wave-Based Structural Health Monitoring: A Review, 67(1), 1-20.

Emissione Acustica: soluzione altamente tecnologica ad impatto zero

N. Altamura¹, A. Nuzzo¹, D. Manca², C. Policastro², C. Barbarossa³

¹ Inail - Uot di Bari

² Inail - Uot di Taranto

³ Inail - Dit

1. Introduzione

La redazione dei Rapporti di Sicurezza in adempimento all'articolo 15 del d.lgs. 105/2015 si fonda sulla capacità previsionale di incidenti con forte impatto sia sull'ambiente e sia sulla salute e sicurezza dell'uomo, perciò grandissima attenzione è posta sull'integrità strutturale degli apparecchi in pressione presenti negli stabilimenti coinvolti; dai semplici contenitori con funzione di stoccaggio, alle tubazioni che assolvono al difficile compito del trasporto delle sostanze, passando attraverso scambiatori di calore fino ad arrivare alle macchine di processo come le autoclavi o celle di tempra, o semplicemente per essere stoccate in altri recipienti o mezzi di trasporto.

Il d.lgs. n. 105/2015, in attuazione della Direttiva 2012/18/UE, rispetto al precedente d.lgs. 334/99 ha novellato la materia dando più importanza alla qualità delle verifiche periodiche. A tale scopo, è pertanto fondamentale ricercare continuamente soluzioni sempre più all'avanguardia della tecnica ed in grado di soddisfare allo stesso tempo le esigenze di produzione ed esercizio richieste in tutti i settori, e soprattutto dagli stabilimenti a ciclo continuo.

Attraverso il metodo delle Emissioni Acustiche (EA), si intuisce come il risparmio di tempo e di costi afferenti la realizzazione delle verifiche di integrità non risulta indifferente, soprattutto se le attrezzature da verificare sono tante, vicine fra loro e/o con una logistica impiantistica complicata; e se poi a questo si aggiunge la sicurezza degli operatori i quali non dovranno più entrare all'interno dei recipienti con i relativi pericoli, si capisce come dal solo punto di vista della organizzazione della verifica ci potranno essere solo dei vantaggi. In questo studio si esporranno i metodi di applicazione del sistema EA nell'ambito del settore GpL, ma ciò non sarà a detrimento della generalità applicativa della trattazione.

2. Evoluzione del sistema EA

Il collaudo di serbatoi di GPL è stato una tra le prime applicazioni di tecniche basate sul metodo dell'Emissione Acustica sin dal 1980. Da quel tempo sono state sviluppate e pubblicate procedure di ispezione in tutto il territorio Europeo.

In Europa, come in altri continenti, gruppi di lavoro competenti (TC groups) hanno a loro volta sviluppato, sulla base delle evidenze applicative osservate, norme tecniche generali e di prodotto, applicabili al settore del GPL.

Quest'ultime norme differenziano le metodiche di applicazione delle tecniche in base alla capacità dei serbatoi GPL interessati, rispettivamente minori o maggiori di 13 m³ esplicitando in maniera dettagliata, nelle relative appendici (cfr. rev. 2010) le modalità di esecuzione delle verifiche di integrità con Emissione Acustica.

In Italia, dal 2004 è stata recepita mediante un decreto ministeriale, la norma europea EN 12818 permettendo a partire dal 2005 l'esecuzione delle verifiche di integrità con Emissione Acustica per i soli serbatoi GPL interrati di capacità fino a 13 m³. Per tutti le altre tipologie di serbatoi, specie quelli con capacità maggiore di 13 m³, deve esser applicato il d.m. 329/04 ed il piano di ispezioni previsto dal suo art. 12.

Le ispezioni previste dall'art 12 del d.m. 329/04, cosiddette tradizionali, prevedono:

- Esame visivo interno ed esterno;
- Esame spessimetrico delle membrature;
- Eventuali ulteriori controlli si rendessero necessari a fronte di situazioni evidenti di danno;
- In caso di non ispezionabilità interna od esterna, integrazione del suddetto piano con prova idraulica a 1.125 volte la pressione di progetto o prova pneumatica a 1.10 volte la pressione di progetto (previa predisposizione di necessarie misure di sicurezza);

L'elenco di cui sopra rispetto alla normativa antecedente al d.m. n. 329/04, non prevede grandi novità, anche se in merito alle verifiche di dettaglio lascia ampi margini di scelta; infatti una connotazione delle ispezioni di screening è quella di essere ugualmente applicata indipendentemente dalle capacità, conformazioni geometriche e strutture delle attrezzature in pressione.

Appare quindi evidente che, specie per recipienti di notevole dimensioni, come quelli solitamente ricompresi nel d.lgs. n. 105/15, tale piano di ispezione potrà essere di difficile attuazione, nonché particolarmente invasivo in termini operativi da parte dell'utente/proprietario dell'attrezzature da collaudare.

Infatti per i recipienti contenenti GpL bisognerebbe eseguire essenzialmente le seguenti attività:

- Svuotamento e spiazzamento del GPL contenuto;
- Bonifica con acqua e relativo smaltimento;
- Rimozione del materiale di tumulo o di interrimento con deposito temporaneo;
- Visita esterna e spessimetria;
- Visita interna;
- Riempimento con acqua per preparare il recipiente alla prova idraulica;
- Prova idraulica con successivo svuotamento e smaltimento;
- Riposizionamento del materiale di tumulo o di interrimento;
- Riempimento di GpL

Fortunatamente, il d.m. 329/04, prevede la possibilità da parte dell'utente/proprietario dell'attrezzature di richiedere al Ministero dello Sviluppo Economico, una ispezione alternativa a quanto previsto dall'art.12 a patto che essa garantisca un livello di protezione equivalente.

A riguardo, dal 2008, grazie all'impegno del Ministero dello Sviluppo Economico e dell'Inail Settore Ricerca sono state introdotte tecniche basate su Emissione Acustica anche su tali tipologie di serbatoi, avvalendosi dell'esperienza ed affidabilità pregressa della procedura di collaudo messa a punto dai vari operatori del settore.

In Italia, probabilmente a causa della configurazione geografica del territorio la quale rende la penisola quale naturale punto di approdo delle materie prime e entry point energetico dell'Europa, sono presenti numerosi depositi di stoccaggio, stabilimenti petrolchimici e raffinerie. Diversamente dal resto d'Europa, a partire dal 2000, si è prediletto molto di più l'installazione di tali serbatoi mediante interro e tumulazione.

Solitamente la capacità di tali serbatoi non supera i 50 m³ di capacità quando installati a servizio di industrie, reti canalizzate e distributori carburanti, per i depositi di stoccaggio destinati alla distribuzione del prodotto sul territorio esso può raggiungere i 450 m³, mentre per i grandi stabilimenti petrolchimici e raffinerie si arriva a capacità fino a 3000 -5000 m³.

Come sappiamo nel metodo EA è di primaria importanza la qualità ed il numero dei posizionamenti dei sensori, il tutto in funzione della capacità, geometria e materiale del

recipiente.

A questo punto però, benché gli standard europei di riferimento siano abbastanza chiari sulle modalità di esecuzione della verifica di integrità con Emissione Acustica, sorgono difficoltà pratiche circa l'applicabilità allorquando vi siano serbatoi interrati o tumulati con diametri maggiori a 2,5 m.

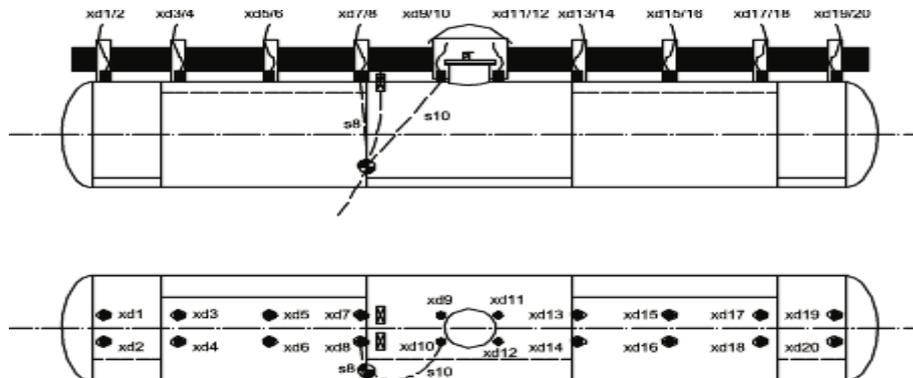


Figura 1. Esempio di posizionamento dei sensori su due righe

Infatti, in accordo con la EN 14584, il posizionamento dei sensori su una o più righe deve essere stabilito in modo da coprire l'intera superficie del serbatoio, in relazione al profilo di attenuazione sviluppato.

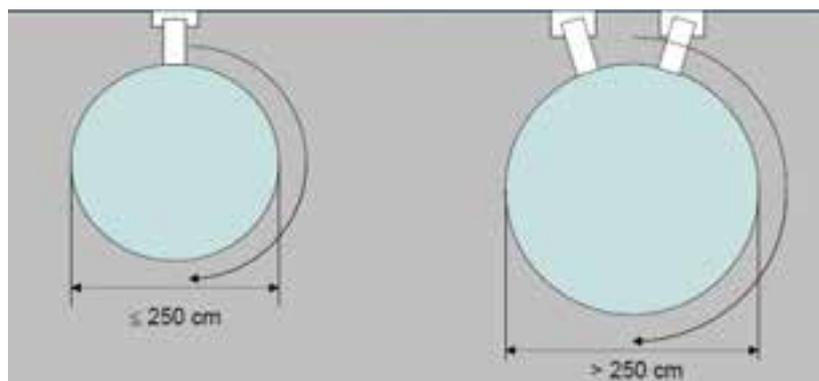


Figura 2. Sezione del serbatoio con le due righe superiori per l'introduzione dei sensori

Dall'esperienza acquisita, tali righe possono essere due (con l'aggiunta di una terza "di controllo" ad ore 12) quando il diametro del serbatoio è minore uguale a 4 m, con installazione dei sensori fino alla linea equatoriale del serbatoio; man mano che il diametro del serbatoio cresce, è necessario introdurre ulteriori righe di sensori, installando gli stessi in posizioni molto più profonde rispetto al piano di interro del serbatoio stesso.

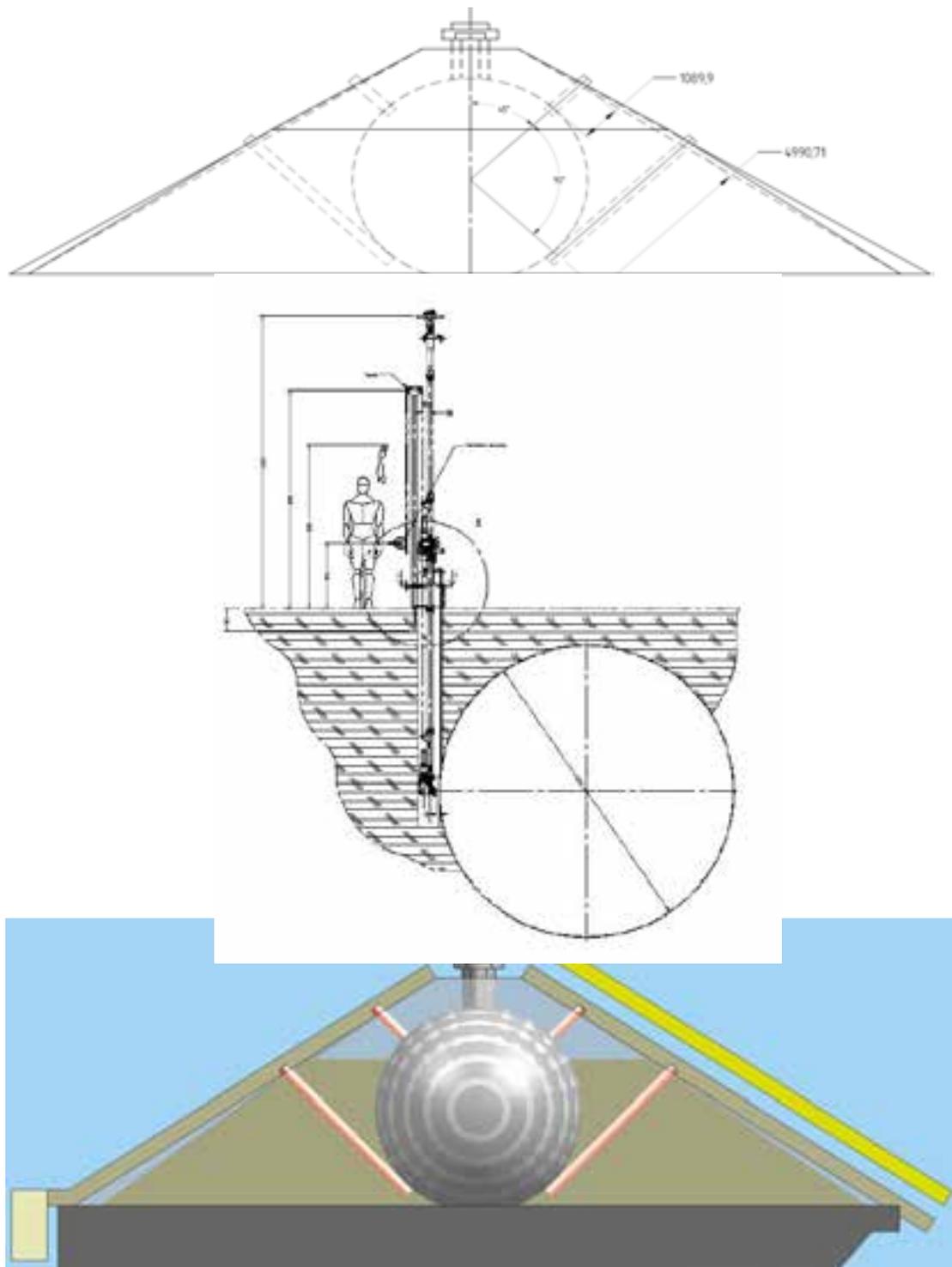


Figura 3. Esempi di metodi per l'inserimento di più righe di sensori anche alle quote inferiori

Nasce pertanto la necessità di mettere a punto delle soluzioni, altrettanto mini invasive per l'utente/proprietario del serbatoio, al fine di render applicabile ed efficace la verifica di integrità con Emissione Acustica.

3. Le Tecniche Mini-Invasive

Tali tecniche prevedono l'utilizzo di tubazioni in pvc o altro materiale inerte per l'accesso alla membratura dei serbatoi interrati o tumulati anche a grandi profondità.

Si distinguono essenzialmente in funzione del diametro del serbatoio oggetto di test, per cui si parla di:

- “**predisposizione mediante microtrivellazioni verticali o subverticali**” nel caso di due righe di sensori installate sulla linea equatoriale del serbatoio;
- “**predisposizione mediante aspiratore a risucchio**” nel caso in cui si debbano installare più righe di sensori a profondità maggiori rispetto alla linea equatoriale del serbatoio.

3.1 Predisposizione mediante microtrivellazioni verticali

Si tratta di una predisposizione microinvasiva con realizzazione di fori tangenziali all'equatore di ciascun serbatoio (ore 3 ed ore 9 rispetto alla circonferenza ottenuta dalla sezione trasversale del serbatoio) ed installazione di tubazioni in PVC opportunamente sagomati ed accoppiati alla superficie del serbatoio manualmente.

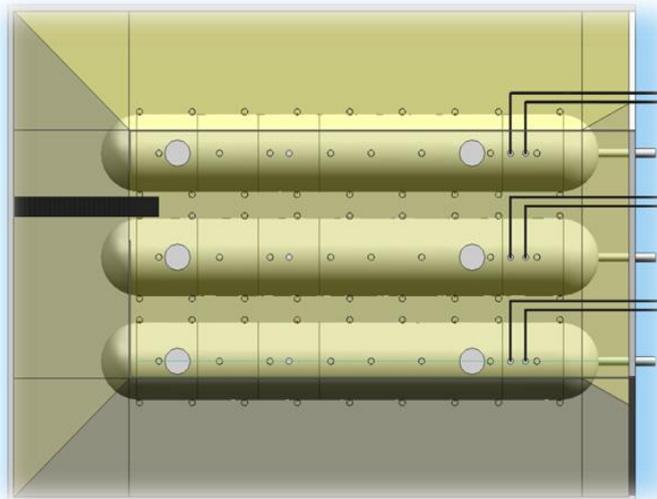


Figura 4. Predisposizione verticale - veduta dall'alto

Ciascun foro è di 320 cm ca di diametro, lunghezza variabile a seconda della profondità (da 1 a 5 m), comprensivi di tubo di rivestimento in PVC diametro 315 mm e tappi di chiusura in E.V.A. (polimero a celle chiuse avente particolari caratteristiche fisico-meccaniche, ignifugo, resistente agli agenti atmosferici, resistente ai raggi UV, resistente al deterioramento nel tempo).

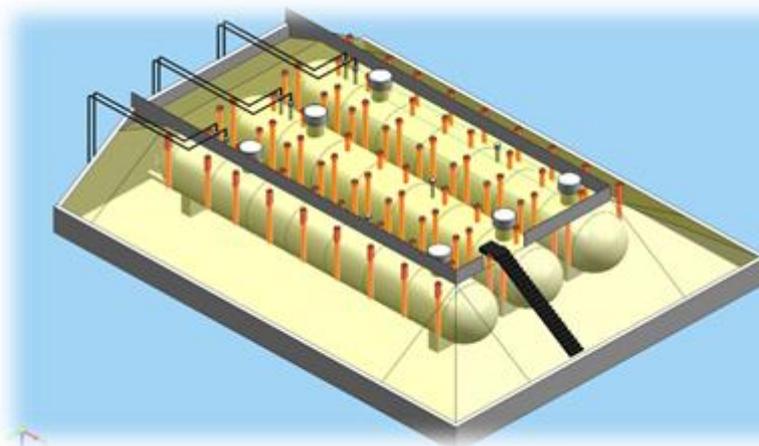


Figura 5. Predisposizione verticale - veduta laterale



Figura 6. Esempio cantiere in lavorazione

Una volta installate le tubazioni permanenti, si procede alla rimozione del rivestimento protettivo del serbatoio (bitume, resine epossidica, vernice epossibituminosa, etc.) mediante uno speciale robot pneumatico, appositamente progettato.



Figura 7. Robot pneumatico

Preparata la superficie, vengono applicati i sensori mediante opportuni tool di posizionamento ed accoppiamento. Di qui si può eseguire un normale test EA secondo quanto indicato dagli standard di riferimento (calibrazione).



Figura 8. Applicazione dei sensori teleguidata



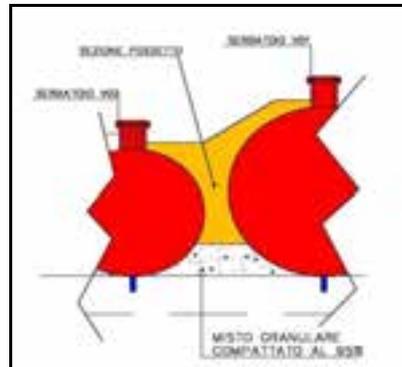
Figura 9. Applicazione dei sensori e calibrazione con mina



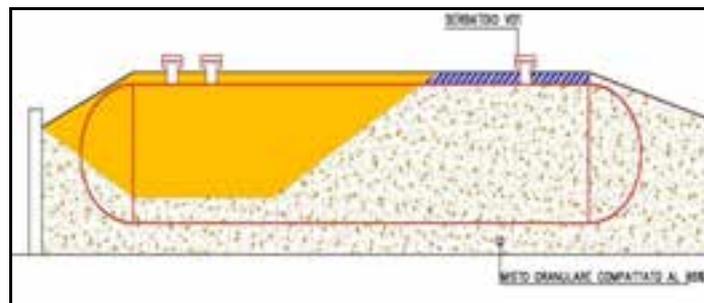
Figura 10. Strumentazione EA

3.2 Predisposizione mediante aspiratore a risucchio

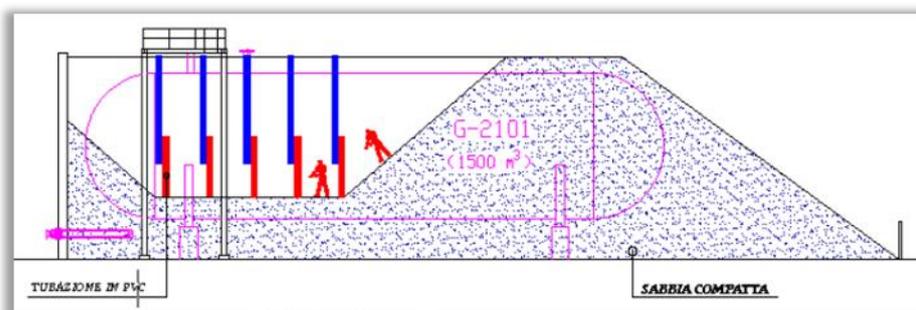
Qualora il diametro del serbatoio richieda l'installazione di più righe di sensori, è necessario eseguire una predisposizione del tumulo e dei serbatoi mediante la realizzazione di trincee, rimuovendo il materiale ricoprente il serbatoio fino al raggiungimento della quota necessaria all'installazione dei sensori EA.



La rimozione del materiale ricoprente, avviene mediante macchinari di ultima tecnologia - gli aspiratori a risucchio - i quali garantiscono l'asportazione del terreno in piena sicurezza e senza il rischio di danni ai serbatoi ed alle attrezzature installate. Il materiale aspirato, in base alle risultanze della caratterizzazione del tumulo, sarà stoccato e successivamente reimpiegato.



Successivamente all'apertura delle trincee viene praticata, mediante l'utilizzo di una gru, l'installazione delle tubazioni in PVC. Le stesse, opportunamente sagomate, sono accoppiate alla superficie del serbatoio mediante l'utilizzo di un apposito mastice di chiusura. Dall'interno della tubazione è realizzata un'apertura nel rivestimento protettivo del serbatoio, ove verrà installato il sensore EA ai fini della verifica di integrità.



Posizionate tutte le tubazioni, si realizza il rinterro ed il ripristino del tumulo.



Figura 10. Disposizioni Tubazioni e reinterro delle trincee

Ultimata la fase di predisposizione e calibrazione, ciascun serbatoio è pronto per essere sottoposto alla verifica di integrità in accordo a quanto previsto dagli standard di riferimento.



Figura 11. Vista generale di cantiere

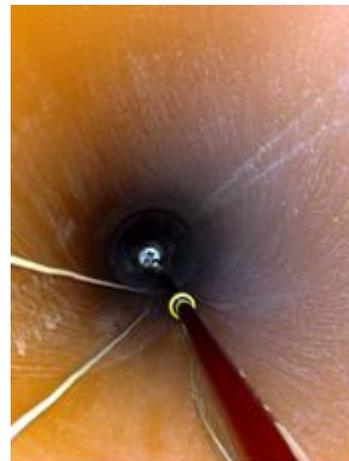


Figura 12. Predisposizione sensori EA

4. Conclusioni

Le tecniche di inserimento dei sensori viste sopra possono ovviamente essere affinate nel tempo mediante l'utilizzo di sistemi pneumatici ed elettronici sempre più precisi, ma i risultati attuali già garantiscono un altissimo livello di affidabilità sia della verifica che della preparazione della stessa:

L'utilizzo dei tubi in PVC che ovviamente rimangono nel tumulo o nell'interro non costituiscono un elemento pregiudicante sulla funzione del tumulo o dell'interro stesso; infatti durante l'esercizio degli apparecchi, i tubi saranno coperti da appositi tappi in E.V.A. stabilmente posizionati e pronti per essere comunque rimossi in occasione delle verifiche di integrità successive. Tuttavia, anche nel caso di una scelta drastica come quella di riempire i tubi di materiale di tumulo o reinterro, lo stesso potrà essere rimosso mediante appositi aspiratori o tecniche simili. Spesso questa scelta può essere dettata sia da fattori di rischio legati alle perdite di GPL e sia a fattori di rischio legati al tipo di corrosione per ossigenazione differenziata che comunque può essere facilmente controllata mediante l'utilizzo di anodi sacrificali e misurazione della relativa tensione.

Avere comunque degli spazi in cui poter inserire sempre dei sensori è utile anche per operazioni intermedie come ispezioni di controllo, piuttosto che le verifiche periodiche ex DM n. 329/04, e soprattutto evitare rimozioni di grandi masse di terra che tra l'altro comportano sempre cantierizzazioni onerose, soprattutto in termini di sicurezza sul lavoro a causa delle intersezioni dei rischi legati alle attività di esercizio rimanenti e quelli legati alla verifica propriamente detta.

Non è stato raro trovare tumuli o interramenti con situazioni particolari quali:

- Presenza di acqua in profondità;
- Tumulo congelato totalmente o parzialmente;
- Pendenze pericolose;
- Piante e relative radici pericolose;
- Accessi inutilizzabili.

Ovviamente i tubi in PVC costituiscono delle soluzioni della continuità della terra che può produrre rinforzi al sistema e stabilità termica dello stesso.

Rimane indubbio il fatto che poter riposizionare i sensori sempre sulle stesse coordinate costituisce un enorme vantaggio dal punto di vista dell'attendibilità delle verifiche, ma soprattutto delle comparazioni future sullo stato del materiale e il relativo spessore. Infatti, le triangolazioni che i vari sensori permetterebbero sarebbero sempre le stesse e quindi sarà data la possibilità di individuare immediatamente le zone del recipiente che potrebbero presentare eventuali problemi o differenze con le misurazioni pregresse.

Dalle ultime esperienze si è potuto constatare quali sono le zone delle superfici dei recipienti di grandi dimensioni che producono alterazioni accettabili dello stato originario, nonché focalizzare l'attenzione sulla possibilità concreta di avere i rilasci continui attraverso le guarnizioni dei passi d'uomo o di tutte le connessioni situate sulla generatrice superiore dei serbatoi. E' per questo che le stesse dovranno trovare riparo mediante apposite semplici protezioni in modo da ridurre drasticamente i deterioramenti che solo il metodo EA riesce a svelare al contrario della semplice prova idraulica.

In ultimo ci si augura che in un futuro prossimo i grandi recipienti tumulati e/o interrati siano progettati ed installati con una predisposizione al controllo mediante metodo EA in modo da avere sin dall'inizio la possibilità di eseguire le misurazioni necessarie a constatare lo stato dell'apparecchio e comparare le stesse con il passare del tempo e con l'esercizio dello stesso.

Nodi sensore per il monitoraggio dell'integrità strutturale di attrezzature di lavoro mediante il metodo di Emissione Acustica

C. Mennuti¹, M.E. Biancolini², G.C. Cardarilli³, L. De Marchi⁴, L. Di Nunzio³, R. Fazzolari³, A. Marzani⁵, N. Testoni⁵

¹ Inail - Dit

² Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini" - Università degli Studi di Roma Tor Vergata

³ Dipartimento di Ingegneria Elettronica - Università degli Studi di Roma Tor Vergata

⁴ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi" - DEI, Università di Bologna

⁵ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM, Università di Bologna

Sommario

Le attuali procedure di verifica dell'integrità strutturale di attrezzature a pressione mediante il metodo di Emissione Acustica (EA) sono basate su controlli periodici. Incrementi dei livelli di affidabilità e di sicurezza delle attrezzature sono raggiungibili mediante tecniche di monitoraggio strutturale. In questo contesto si palesa la necessità di disporre di strumenti di misura delle EA piccoli, leggeri, poco costosi, facilmente installabili sull'attrezzatura e atti al monitoraggio in continuo. Questo lavoro presenta due prototipi di nodo-sensore ideati per essere installati in modo e capaci di monitorare nel tempo i segnali EA. I nodi sensore, caratterizzati da dimensioni e pesi ridotti, basso consumo di potenza e capacità di elaborazione in locale del segnale acquisito, risultano ideali in diversi scenari applicativi, in particolare nel monitoraggio di attrezzature a pressione o atmosferiche contenenti fluidi pericolosi (esplosivi, infiammabili, tossici, comburenti, ecc.). Sui nodi sensore è possibile innestare algoritmi di processamento del segnale sviluppati ad hoc per i segnali EA, e possono essere programmati per trasferire in modalità wireless, su piattaforme "cloud based service", il segnale processato. Il lavoro mostra i risultati di una prima campagna di prove sperimentali volta a confrontare la capacità di acquisire i segnali EA dei nodi sensore rispetto ad apparecchiature commerciali. Quale scenario di prova, si considera una porzione del mantello di un serbatoio.

1. Introduzione

Il monitoraggio di una attrezzatura a pressione mediante tecniche basate sul metodo EA richiede una continua estrazione ed analisi di informazioni al fine di valutare l'integrità strutturale, preferibilmente secondo tecniche automatiche che semplificano e accelerano l'acquisizione e la gestione dei dati. Inoltre, il consumo energetico, i costi ed il peso degli elementi che costituiscono il sistema di monitoraggio devono essere ridotti al minimo non solo per motivi energetici, ma anche per rendere la presenza di tali dispositivi il più discreta possibile.

In questo scenario, i dispositivi elettronici da impiegare devono essere progettati secondo le funzionalità del monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring o SHM), principalmente con l'intento di fornire una rete di monitoraggio costante delle membrature a pressione ed identificare tempestivamente eventuali fenomeni di danneggiamento o degrado. L'unione di questi due aspetti consente di generare rapporti periodici sullo stato dell'attrezzatura o impianto a pressione per un ampio periodo di tempo.

Le prestazioni ed i requisiti dei sistemi EA tradizionali hanno dimostrato in primo luogo di produrre design di difficile impiego all'atto pratico a causa di peso, dimensioni e cablaggio.

Inoltre, sorgono problemi quando si affrontano fasi di acquisizione a lungo termine: ciò è dovuto all'uso di trasduttori piezoelettrici il cui costo costringe i ricercatori a limitare la durata delle campagne sperimentali per riutilizzare la stessa attrezzatura. Un altro aspetto importante da sottolineare è la consapevolezza del fatto che i segnali registrati dai dispositivi piezoelettrici non sono completamente adatti per indagare il comportamento dinamico delle infrastrutture con sufficiente precisione.

Recentemente, i significativi progressi nel campo della miniaturizzazione dei dispositivi elettronici hanno permesso la realizzazione di reti di sensori distribuiti capaci di fornire non soltanto l'acquisizione ma anche l'elaborazione dei dati registrati direttamente sulla struttura indagata tramite l'uso di strumenti di calcolo distribuito. Inoltre, l'utilizzo di innovativi sensori piezoelettrici specificamente progettati per permettere installazioni permanenti, minimamente invasive ed a basso costo, al posto dei sistemi tradizionali offre, tra i molti vantaggi, versatilità, scalabilità e analisi a lungo termine. Le posizioni possono essere modificate, il processo di acquisizione può essere riconfigurato digitalmente senza particolari conseguenze per la struttura, contenendo quindi l'intrusività del sistema di monitoraggio.

Questo lavoro presenta due diverse realizzazioni di reti di sensori con elaborazione dati incorporata per SHM in tempo reale, sviluppata specificamente per favorire bassi consumi energetici, leggerezza e dimensioni ridotte. Al fine di valutare le funzionalità del sistema, le misurazioni vibrazionali sono state registrate da una lastra in acciaio sottoposta a sollecitazioni Hsu-Nielsen [1-2]. Nella seconda sezione viene presentata una panoramica generale del nodo proposto e realizzato presso l'Università di Tor Vergata, seguita dalla descrizione degli algoritmi implementati per valutare l'energia contenuta nel segnale EA ed i relativi risultati dell'elaborazione. Nella terza sezione viene invece presentata una simile panoramica del nodo proposto e realizzato presso l'Università di Bologna. I due sistemi si distinguono per dimensioni, peso e connettività. Entrambi i sistemi dimostrano come sia possibile realizzare reti di nodi sensori affidabili ed a basso costo nel contesto SHM.

2. Nodo sensore SHM-TV

Il nodo sensore sviluppato presso l'Università di Tor Vergata (SHM-TV) nasce dall'esigenza di ridurre l'ingombro, la complessità ed aumentare l'efficienza delle apparecchiature attualmente impiegate nella diagnostica non distruttiva per mezzo di EA. Le apparecchiature attualmente utilizzate presentano due grandi svantaggi:

- Impiego difficoltoso su attrezzature a pressione di medie-grandi dimensioni a causa dei numerosi cavi di collegamento sensori-sistema di acquisizione e degli ingombri non trascurabili.
- Progettate per il monitoraggio real-time limitato al tempo di durata della prova EA.

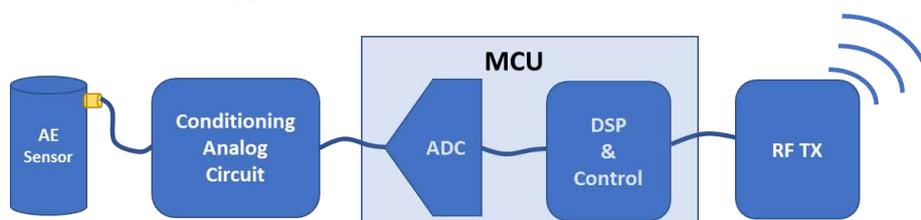


Figura 1. Schema a blocchi del nodo sensore SHM-TV

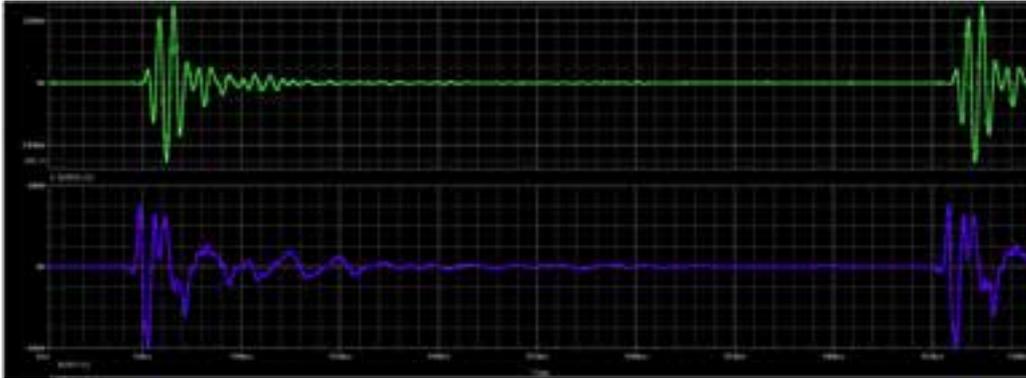


Figura 2. Segnale filtrato (verde) e segnale grezzo proveniente dal sensore Vallen (blu)

Per far fronte a tali limitazioni si è sviluppata una Wireless Sensor Network (WSN) in grado di garantire monitoraggio real-time in continuo e basso ingombro. Una importante caratteristica della WSN sviluppata è quella di essere compatibile con molti sensori presenti in commercio. La WSN è composta da nodi sensore wireless e un sistema remoto per la raccolta e rappresentazione dei dati. I nodi sensore costituiscono sicuramente la parte più complessa del sistema.

In Figura 1 è mostrato lo schema a blocchi di un singolo nodo sensore, esso è composto da un sensore per emissioni acustiche commerciale (AE Sensor), un circuito di condizionamento analogico, un Microcontrollore per la digitalizzazione del segnale e per il Digital Signal Processing (DSP) e un transceiver per l'invio wireless dei dati al concentratore di dati. Negli esperimenti condotti sin qui si è fatto uso di sensori Vallen VS-150 M.

2.1. Circuito di condizionamento Analogico

Il circuito di condizionamento analogico ha il compito di fornire un segnale compatibile con quanto richiesto dal convertitore analogico digitale (ADC) presente nel Microcontrollore. Esso è costituito da tre blocchi principali:

1. Buffer di ingresso
2. Filtro passa banda
3. Traslatore di livello

Il buffer in ingresso ha il compito di disaccoppiare il sensore commerciale con il circuito di condizionamento analogico fornendo al sensore una alta impedenza. Il filtro passa banda è invece impiegato al fine di rimuovere dal segnale componenti in frequenza non utili al processamento. Il filtro analogico dipende dal sensore utilizzato; nel caso di un Vallen VS-150 M, ad esempio, è stato impiegato un filtro attivo passa banda Butterworth del decimo ordine centrato su 150 KHz, larghezza di banda di 120 KHz e un'attenuazione in banda oscura di 30 dB. In Figura 2 è mostrato il segnale prima e dopo il filtraggio.

L'ultimo blocco costituente il circuito di condizionamento analogico è un traslatore di livello basato su amplificatore operazionale. Tale traslatore viene impiegato per trasformare il segnale, che si può considerare a media nulla, in un segnale solo positivo con ampiezza compresa tra 0 e 3.3 V.

2.2. Sistema DSP

Il sistema di acquisizione ed elaborazione è basato su un microcontrollore ST Microelectronics. Si tratta di un microcontrollore ARM Cortex M4 montato su una scheda STM32 Nucleo STM32L476RG. Il microcontrollore è fornito di un convertitore analogico-digitale (ADC) a 12 bit in grado di effettuare acquisizioni alla velocità di 2 mega samples

per secondo (MSPS). Il microcontrollore è in grado di lavorare fino a una frequenza di clock di 180 MHz, ciò lo rende adatto ad effettuare delle elaborazioni numeriche del segnale anche di una certa complessità.

L'acquisizione del segnale è effettuata sfruttando un comparatore analogico presente sul Microcontrollore stesso. Tale comparatore permette la generazione di un interrupt quando il segnale di ingresso (in questo caso il segnale dell'emissione acustica) supera una soglia definita dall'utente. Tale interrupt attiva automaticamente l'ADC che, a questo punto, inizia l'acquisizione del segnale. Questo approccio permette inoltre di ottimizzare il consumo di potenza dinamica in quanto la conversione si avvia solo in seguito al superamento di tale soglia.

Nel nodo sensore sviluppato, la soglia di comparazione è selezionabile dall'utente mentre la frequenza di campionamento è stata fissata a 2MSPS. Quando il comparatore invia l'interrupt di superamento soglia, l'ADC acquisisce 1000 campioni corrispondenti a circa 0.4 ms di segnale. Per ottimizzare il processo di acquisizione, il salvataggio dei dati in memoria avviene tramite Direct Memory Access (DMA), ovvero un processo che permette che i dati vengano memorizzati dall'ADC direttamente sulla memoria RAM senza che questi passino per il processore. La quantità di campioni acquisita occupa circa 2 KBytes di spazio in memoria, ma si tratta di un numero abbastanza esiguo, in quanto la quantità di memoria RAM disponibile è di 128 KBytes.

Al fine di ridurre il traffico di dati wireless e quindi la potenza dissipata il nodo sensore invia solo le features utili all'analisi. È quindi necessario un processing locale sul sensore per l'estrazione di tali features che sono:

1. Numero di attraversamenti per una data soglia (threshold)
2. Durata del segnale
3. Valore Massimo e valore Minimo
4. Energia

2.2.1. Numero di attraversamenti di una data soglia e durata

Data una determinata soglia scelta dall'utente, il numero di attraversamenti di tale soglia è definito come il numero di volte che il segnale oltrepassa dal basso verso l'alto tale soglia. L'intervallo di tempo tra il primo e l'ultimo istante di attraversamento della soglia corrisponde alla durata del segnale.

2.2.2. Valore massimo e valore minimo

Si tratta dei valori massimo e minimo relativi al segnale Tali valori sono espressi in millivolt (mV).

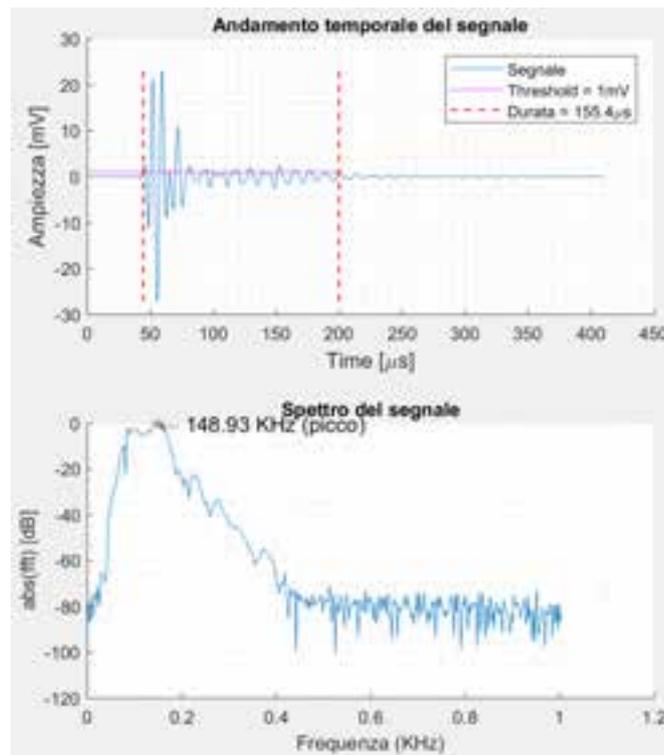


Figura 3. Andamento temporale e spettro di una emissione acustica

FEATURES	SEGNALE CON FILTRO
Numero di attraversamenti della threshold	15
Valore massimo [mV]	23
Valore minimo [mV]	-27.2
Energia	20471
Durata [us]	155.4

Tabella 1. Risultati ottenuti dalla estrazione delle feature da parte del nodo sensore

2.2.3. Energia del segnale

L'energia di un segnale generico $x(\tau)$ tempo continuo è mostrata nell'equazione (1):

$$E(t) = \int_{t_{in}}^{t_f} P(\tau) d\tau = \int_{t_{in}}^{t_f} |x(\tau)|^2 d\tau \quad (1)$$

dove t_{in} e t_f sono rispettivamente gli istanti iniziale e finale del segnale, mentre $P(t)$ rappresenta la potenza istantanea del segnale stesso. Nel nostro caso, trattandosi di un segnale tempo discreto, la (1) può essere riscritta come mostrato nell'equazione (2):

$$E(n) = \sum_{n=t_{in}}^{t_f} P(n) = \sum_{n=t_{in}}^{t_f} |x(n)|^2 \quad (2)$$

Dall'equazione (2) si evince che la l'energia di un'emissione acustica può essere calcolata sommando il quadrato dei campioni del segnale.

2.3. Test di laboratorio e risultati sperimentali

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra i risultati di elaborazione di un segnale EA ottenuto con la rottura di una mina a pochi centimetri dal sensore posizionato su una lamiera di acciaio P355NH. Per validare la funzionalità degli algoritmi implementati, oltre alle features, è stata esportata anche l'intera forma d'onda acquisita. Tramite il tool matlab sono state estratte le features dalla forma d'onda e i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli elaborati dal microcontrollore. Entrambe le elaborazioni

hanno prodotto gli stessi valori di features. La Tabella 1 riassume tutte le caratteristiche estratte dal nodo sensore per il segnale mostrato in Figura 1.

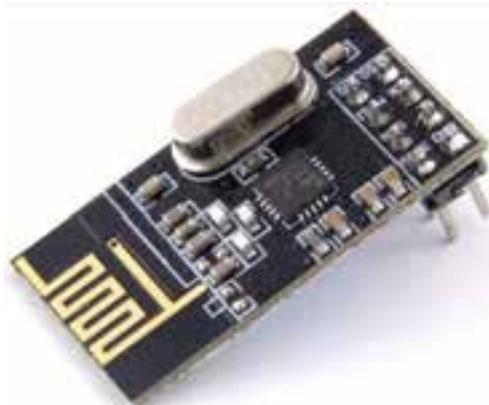


Figura 4. Transceiver Wireless

Date	Time	Sensor	Max Value	Zero cross	Energy	Duration
2015-04-21	15:30:21	2	96.0	107	26.0	8.0
2015-04-21	15:33:09	2	100.0	134	175.0	200.0
2015-04-21	15:34:08	2	67.0	108	15.0	17.0
2015-04-21	15:33:49	2	146.0	200		
2015-04-21	15:33:49	2	146.0	200		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		1.0

Figura 5. Interfaccia sito web per la visualizzazione dei dati

2.4. Trasmissione wireless

Le features estratte dal Microprocessore sono inviate verso un sistema di raccoglimento dati dotato di sito web. La trasmissione dati avviene mediante il transceiver NRF24L01 mostrato in Figura 4 prodotto da Nordic Semiconductor (2.4 GHz, data rate 1Mb/s, raggio circa 30m all'aperto). Il sistema di raccoglimento dati basato su scheda Raspberry Pi, permette, invece, di raccogliere e rendere disponibili i dati provenienti dai vari sensori wireless in modo da consentire un monitoraggio real time e continuo nel tempo, come mostrato in Figura 5, dove è possibile osservare l'interfaccia web alla rete per la visualizzazione dei dati.

3. Nodo sensore SHM-BO

La rete di nodi sensore sviluppata presso l'Università di Bologna (SHM-BO) è caratterizzata da dimensioni ridotte, bassa potenza e peso leggero ed è particolarmente adatta per il rilevamento di onde guidate generate da sorgenti EA sia su strutture composite che metalliche. Un dispositivo gateway permette l'accesso alla rete sia per quanto riguarda la comunicazione dati che per quanto riguarda l'alimentazione: ciò è possibile grazie all'impiego di un bus di rete basato sull'uso della tecnologia ad onde convogliate o Data Over Power (DOP). L'alimentazione elettrica può essere ottenuta sia dal collegamento USB del PC o da un alimentatore esterno a bassa tensione (PSU).

Ciascun nodo sensore è stato progettato per essere collegato ad altri dispositivi simili per creare una rete con un massimo di 64 nodi, ma il numero totale di nodi sulla rete può essere esteso arbitrariamente tramite nodi ripetitori, non discussi in questo lavoro. La comunicazione ad un PC notebook o ad una piattaforma embedded come Intel Edison® o Raspberry Pi viene eseguita in modo half-duplex a una velocità effettiva minima di 200kbps tramite un ricetrasmittitore RS485 a bassa tensione e alta velocità.

Il cuore del nodo sensore, mostrato in Figura 6, è un microcontrollore (MCU) STM32F3 a bassa tensione che permette una elaborazione mista analogica/digitale dei segnali a 32 bit tramite istruzioni DSP e FPU, inoltre integra quattro convertitori analogico/digitali con risoluzione 12bit, tempo di conversione pari a $0.2\mu\text{s}$ e riferimento di tensione incorporato.

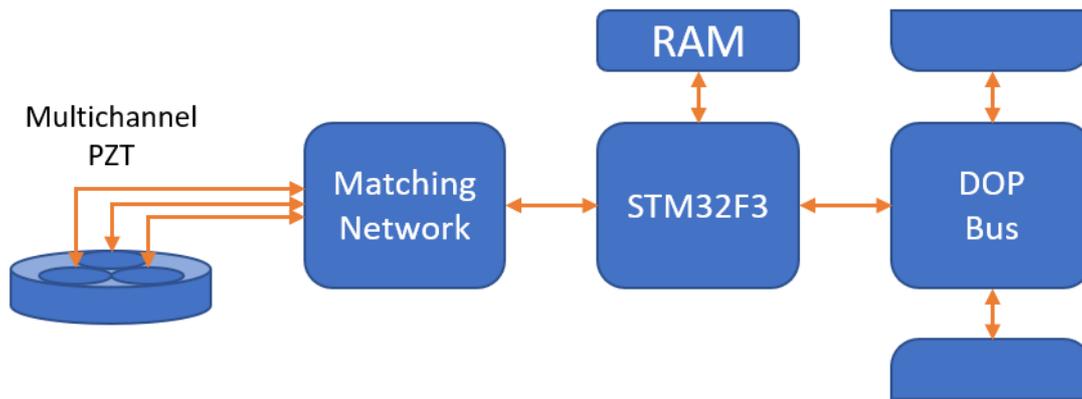


Figura 6. Digramma schematico del nodo sensore SHM-BO

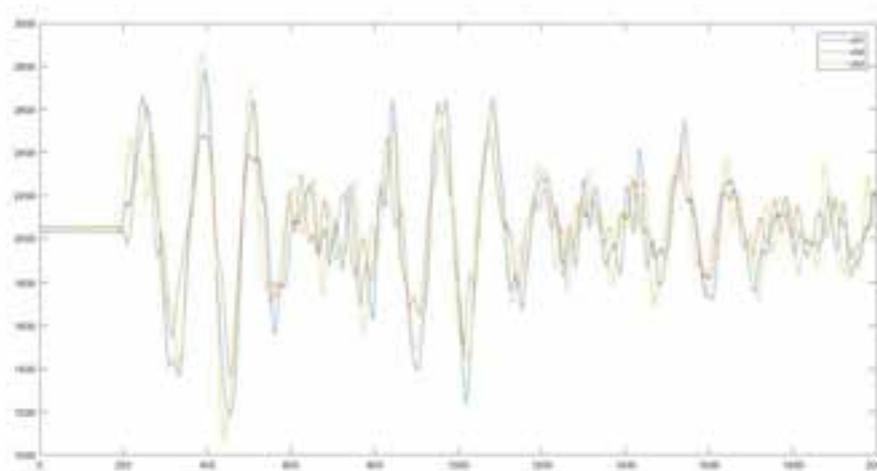


Figura 7. Segnale registrato dal nodo sensore sui 3 differenti canali a fronte di una sollecitazione Hsu-Nielsen

Le onde elastiche generate dalle sorgenti EA e propaganti sulla struttura sono registrate da un sensore piezoelettrico multicanale opportunamente progettato per l'acquisizione e la localizzazione di EA e memorizzate nella SRAM interna di 40KB. Le istruzioni del programma e i coefficienti dei filtri sono memorizzati in una memoria flash da 256 KB incorporata all'interno dell'MCU ai fini dell'elaborazione dei dati. Dopo l'elaborazione, i dati vengono memorizzati in una RAM statica seriale da 128KB con interfaccia SPI. In Figura 7: viene mostrato un esempio di segnale acquisito dal nodo sensore a fronte di una sollecitazione di tipo Hsu-Nielsen su una lastra di acciaio P355NH a breve distanza dall'elemento sensibile.

Ogni nodo sensore ha dimensioni pari a 30x23mm, consuma meno di 35mW a fronte di una tensione di alimentazione del bus DOP di 5V, e pesa meno di 4gr, rendendolo attraente per l'impiego in settori in cui le dimensioni, la potenza e la riduzione del peso sono fondamentali.

3.1 Procedura di acquisizione e localizzazione delle sorgenti EA

Il sistema di acquisizione dei dati del nodo sensore SHM-BO si basa fortemente sulle capacità di analisi ed elaborazione dei dati fornite dal microcontrollore STM32F303CC prodotto da ST Microelectronics.



Figura 8. Posizionamento dei sensori nel setup sperimentale

Il sistema richiede prima di iniziare l'acquisizione di impostare le soglie di rilevazione per ciascun canale: ogni nodo sensore è in grado di acquisire dati da 3 sensori a singolo canale o da un sensore multicanale espressamente progettato da Università di Bologna per lavorare in combinazione con il nodo sensore ed ottimizzato per la rilevazione di emissioni acustiche e rilasci locali di energia. È inoltre possibile impostare la frequenza di campionamento, la durata della acquisizione e la percentuale di segnale da memorizzare prima dell'occorrenza dell'evento.

Una volta impostati i parametri del segnale da rilevare, il nodo sensore entra in fase di monitoraggio ed acquisisce continuamente i dati da ciascun canale in modo indipendente. Se anche una sola delle soglie viene superata, il nodo sensore entra in fase di memorizzazione e registra il segnale elettrico generato dal sensore piezo a fronte della sollecitazione meccanica dovuta alla EA. Terminata la registrazione il sistema elabora internamente il segnale, mantenendo copia della traccia acustica originale per permettere all'utente ulteriori indagini. Il sistema di localizzazione si basa sulla ottimizzazione degli algoritmi proposti in [3] e permette di evidenziare l'angolo di arrivo dell'onda meccanica su un arco di 360° sulla base dei segnali acquisiti sui tre canali. Combinando l'informazione proveniente da due o più sensori e note le rispettive posizioni sulla struttura indagata, è possibile localizzare la sorgente EA tramite tecniche di triangolazione.

3.2 Confronto con la strumentazione commerciale

Il nodo sensore SHM-BO ottiene prestazioni concorrenziali se comparato alla strumentazione commerciale. Per valutare quantitativamente il rapporto di prestazioni tra le due soluzioni, è stato svolto uno studio comparativo basato su ripetute sollecitazioni Hsu-Nielsen su una lastra di acciaio di dimensioni 12x50cm e di spessore pari a 4mm; i sensori sono stati posizionati come mostrato in Figura 8. La distanza della sollecitazione è stata variata da 5 a 35cm con un passo regolare di 5cm.

Distanza	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm
Sensore commerciale [mVpp]	128	55	73	91	54	51	61
Unibo con gel [mVpp]	233	180	129	219	223	243	329
Unibo senza gel [mVpp]	1440	823	910	790	813	831	792

Tabella 2. Confronto della sensibilità della strumentazione commerciale con il nodo Unibo

Come è possibile osservare in Tabella 2, l'ampiezza del segnale rilevato dal nodo sensore Unibo è decisamente superiore a quella rilevata dal sistema commerciale. I sensori sono stati accoppiati alla struttura per mezzo di un gel per accoppiamento acustico. È interessante osservare come questo gel sia di fatto un ostacolo alla misura del nodo sensore Unibo: ciò è dovuto alla diversa impedenza acustica dei materiali che

costituiscono l'elemento sensibile del sensore realizzato da Università di Bologna. In particolare, in assenza di gel, è possibile osservare come il nodo proposto abbia una sensibilità di circa 10 volte superiore al sistema commerciale sotto ogni condizione operativa.

3.3 Trasmissione dei dati

Il sistema di acquisizione SHM-BO può essere connesso sia ad una postazione PC (fissa o portatile) o ad un computer su singola scheda come Raspberry Pi. Questo dispositivo viene connesso alla rete di nodi sensori per mezzo del bus DOP e permette lo scambio di dati e comandi con i nodi remoti tramite la propria interfaccia WiFi. I dati collezionati in tal modo possono essere memorizzati su un database online per realizzare un sistema di monitoraggio integrato remoto. Inoltre, il log degli eventi registrati dal sistema durante la vita della struttura può fornire delle utili informazioni per la pianificazione delle operazioni di manutenzione. Per tale motivo si è scelto di utilizzare la tecnologia Cassandra (<http://cassandra.apache.org/>) come sistema di database: essa offre un supporto robusto per sistemi cluster ed è pensata per gestire grandi moli di dati. Non da ultimo, la capacità di essere altamente disponibile grazie alla sua natura distribuita impedisce fallimenti di tipo a singolo punto e garantisce una alta scalabilità.

4. Conclusioni

Entrambi i sistemi presentati mostrano come sia possibile realizzare reti di monitoraggio per attrezzature a pressione mediante tecniche basate sul metodo EA utilizzando strumentazione capace di ridurre pesi, costi ed ingombro entro limiti accettabili per l'impiego sul campo. La possibilità di impiegare sensori commerciali o specificatamente progettati garantisce una grande flessibilità di impiego, salvaguardando al tempo stesso la sensibilità del sistema e mantenendo contenuti i costi ed i tempi di applicazione.

5. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da Inail nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

6. Bibliografia

- [1] Hsu N.N., F.R. Breckenridge F.R. Characterization and calibration of acoustic emission sensor. *Materials Evaluation*, 1981; 39: 60-68.
- [2] Sause M.G.R. Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources. *Journal of acoustic emission*, 2011; 29: 184-196.
- [3] Garofalo A., Testoni N., Marzani A., De Marchi L. Multiresolution wavelet analysis to estimate Lamb waves direction of arrival in passive monitoring techniques. Atti della Conferenza 2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), Milan, 2017, pp. 1-6.

Modelli di resilienza e analisi del rischio: valutazione incidente rilevante

M. Di Nardo¹, M. Madonna², M. Clericuzio¹, L.C. Santillo¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della Produzione Industriale – Università degli Studi di Napoli “Federico II”

² Inail - Uot di Napoli

Sommario

Qualsiasi evento in grado di essere analizzato viene concepito come un sistema, ovvero un insieme di parti che, dialogando tra loro, assolvono una specifica funzione. Tuttavia, la combinazione di due o più sistemi semplici sono i sistemi complessi, adattabili in ogni ambito. Nel presente lavoro, la parte introduttiva riguarda l'analisi degli approcci qualitativi e quantitativi richiesti per lo studio dei sistemi complessi. Particolare attenzione è posta al tema della resilienza, quale capacità di resistere e adattarsi alle perturbazioni del suo stato nominale di funzionamento. Viene analizzato, successivamente, il modello di resilienza sistemico a partire dallo stato dell'arte, in particolare le varie definizioni che diversi autori danno al concetto di resilienza. I sistemi complessi sono contestualizzati in un impianto con rischio ad incidente rilevante: si studierà il caso di uno stabilimento di trattamento petrolifero e per esso si esporrà un diagramma di flusso contenente le misure necessarie atte alla prevenzione o alla limitazione del rischio, tenendo altresì presente il contesto territoriale.

1. Introduzione

Qualsiasi evento in grado di essere analizzato viene concepito sotto forma di sistema, ovvero un insieme di parti, opportunamente legate tra loro, che convertono uno stato iniziale in uno stato desiderato, funzione della capacità del sistema stesso. Analizzare una qualsiasi realtà di interesse sistemico prevede un approccio di natura quantitativo, attraverso il quale, in presenza di ingenti dati numerici, si valuta matematicamente la realtà; in alternativa vi è un metodo qualitativo, indagine fondata sulla valutazione di parametri empirici che richiedono competenza ed esperienza nell'operatore in quanto non ha alcun carattere matematico.

Quando due o più sistemi dialogano tra loro, nasce il concetto della complessità, che inevitabilmente conduce a fenomeni di natura sociale e filosofica, ma nell'ambito della sistemistica non è altro che la combinazione di due o più sistemi semplici. Tale definizione si adatta bene ad ogni settore scientifico; infatti, esempi di sistemi complessi sono illimitati, basti pensare all'ambito meccanico i cui esempi sono il manovellismo di spinta, sistema massa-molla; in ambito gestionale, in cui l'analisi dei sistemi è di fondamentale importanza per garantire la corretta interazione tra le parti; esempi possono essere gestione delle fasi di un impianto di produzione, piuttosto che la valutazione dei rischi, solo per citarne alcuni. Per complessità si intende l'impossibilità di prevedere con certezza la relazione causa/effetto, da non confondere la complicatezza, ovvero un insieme scomponibile da cui si risale alle relazioni causa/effetto. Complesso o complicato, dunque, conduce in ogni caso alla soluzione. Interagire tra i sistemi è possibile se e soltanto se è nota la logica di funzionamento di ogni sottosistema. La varietà dei requisiti implica che la complessità del sistema atto al controllo deve essere inevitabilmente maggiore o uguale alla massima complessità del sistema [1]. Controllare un sistema significa essere in grado di eseguire adeguate modifiche in ingresso al fine di avere una serie di risultati desiderati all'uscita [2]. Il presente lavoro vuole mostrare come sia possibile controllare i dati in ingresso e per stabilire i requisiti di output desiderati attraverso un approccio bottom-up, mediante il

metodo AMAS (Adaptive Multi-Agent System), il quale si basa sulla cooperativa autorganizzazione degli autonomi micro-livelli con l'unico fine di affrontare la complessità dei macro-livelli, sulla base di una logica costruttiva: il comportamento di un sottosistema in un insieme di sistemi può e deve garantire il raggiungimento dell'obiettivo finale, ovvero la funzionalità di output richiesta. Al fine di conseguire lo stato desiderato, l'insieme dei valori in ingresso e uscita, meglio detti MIMO (Multiple Input - Multiple Output), è descritto come una combinazione di tre criteri: vincoli, target di riferimento e ottimizzazione. Grazie all'analisi AMAS è possibile quindi definire un modello che permette di prevedere il comportamento dei sottosistemi, analisi essenziale per valutare l'andamento percentuale dei suddetti criteri in funzioni del prestabilito livello di criticità.

1.1 Analisi non lineare dei sistemi complessi

Come definito da Ottino [3], una caratteristica interna dei sistemi complessi è rappresentata dal fatto che questi non permettono la comprensione logica del sistema stesso e l'eventuale predizione del comportamento dell'insieme con la valutazione delle funzionalità dei singoli componenti, detti LRU (Line Replaceable Unit). Un potenziale incidente non può essere adeguatamente predetto con l'analisi della serie dei danni ai vari componenti [4]. Una visione del genere di incidente come conseguenza di una catena di eventi è il fondamento per l'analisi del rischio. Questo comportamento è dovuto alla non linearità dei sistemi, per i quali non si segue il principio di sovrapposizione degli effetti e dove non risulta univoco il rapporto tra causa ed effetto. I modelli che particolarmente delineano questo approccio sono il FRAM (Functional Resonance Accident Model/Function Resonance Analysis Method) e lo STAMP (System Theoretic Accident Model and Process) [5]. Il FRAM, in particolare, è un metodo che si occupa di discretizzare il sistema ed il suo comportamento, inclusi i possibili incidenti. Esso considera un componente per la funzione che svolge, valutandone come la variabilità dei suoi compiti può essere connessa e può condurre a risultati non lineari [6]. Lo STAMP è un modello dinamico di analisi che può essere utilizzato per approcciare ad un incidente (fenomeno ex-post) attraverso l'approccio STPA (System Theoretic Hazard Analysis). Questo identifica l'incidente da considerare, il livello di pericolo e i requisiti funzionali, ne elabora un modello di controllo di struttura funzionale per il sistema. Dopodiché identifica le potenziali azioni pericolose e determina l'approccio da utilizzare in funzione dei possibili scenari [7]. Il risultato di tale analisi è essenzialmente una lista che comprende i vari ambienti di ogni attività di controllo pericolosa, che diventa causa di incidenti. Nell'ambito della formulazione delle decisioni, del proporre alternative/opzioni di controllo e della comunicazione dei risultati, così come analizzato nei modelli precedenti, si inserisce l'analisi del rischio, ovvero un insieme di tecniche per mezzo delle quali si valuta in maniera quantitativa e/o qualitativa la comparsa di pericoli specifici in determinati scenari, in accordo alla norma ISO EN 31010. La norma parte dall'assunto che la valutazione del rischio venga effettuata nell'ambito dei processi di gestione del rischio, fornendo le politiche, le procedure e le soluzioni organizzative a tutti i livelli. La valutazione del rischio, in definitiva, è il processo complessivo di identificazione, analisi e accertamento del rischio stesso, analizzato ad ogni livello di attività, comprendendone cause e conseguenze connesse al suo insorgere. Lo scopo della valutazione del rischio è quello di fornire indicazioni, basate sia su evidenze che su metodi di analisi, per poter prendere decisioni informate su come trattare particolari rischi e come scegliere tra differenti opzioni. Completata la valutazione, bisogna definire il trattamento del rischio; selezionare e condividere, cioè, una o più opzioni rilevante e modificare la probabilità di accadimento. In quanto parte del processo di gestione dei rischi, questi devono essere monitorati e riesaminati, in modo da accertarsi che la valutazione sia avvenuta in modo corretto. D'altra parte, quando la valutazione probabilistica si basa su una scarsa conoscenza e profonde incertezze, la struttura delle distribuzioni di probabilità

viene fortemente influenzata. Kaplan e Garrick [8] quantificano la frequenza di accadimento di uno scenario potenzialmente rischioso attraverso un insieme di valori R definito come

$$R = \{(S_n, \phi_n, x_n) : n = 1, \dots, N\}$$

Avendo indicato con S tutti gli eventi che possono accadere, I quantifica la probabilità di occorrenza di S , le x sono le conseguenze, e la frequenza suddetta è indicata con ϕ . A questo punto, tenendo conto delle possibili conseguenze di ogni scenario, si approccia col metodo quantitativo basato sulle conseguenze degli eventi, ovvero il *Event Tree Analysis*, in cui non solo viene considerata solo la possibilità di funzionamento/non funzionamento, ma si studia una condizione intermedia per mezzo dei livelli di severità, con l'analisi dei quali il comparto dei *decision maker (DM)*, coloro i quali assumono decisioni circa la modalità di gestione di un qualsiasi evento, valuta e stima effettivamente se il pericolo in esame ha conseguenze gravi o meno, successivamente, dunque, si decide se la gravità del pericolo è tale da poter essere tralasciato oppure occorre intervenire [9]. Tuttavia, quando si analizzano gli alberi degli eventi (diagrammi di flusso), la probabilità che l'evento si verifichi dipende dalla probabilità di successo degli eventi accaduti nella parte superiore dell'albero e le relative contromisure, ovvero vi è una relazione a cascata nel susseguirsi degli eventi. Questo metodo di valutazione può essere applicato in casi in cui vi siano dati insufficienti durante il giudizio di efficacia [10].

1.2 Modello di resilienza sistemico

Qualsiasi sistema complesso, oltre ad essere funzionale per la valutazione del rapporto causa-effetto relativo al comportamento di ogni componente ed inoltre affidabile in termini di gestione del rischio, dovrà garantire un efficace livello di resistenza al variare dei flussi in ingresso e in uscita dai sottosistemi, poiché nel caso più generale risultano non costanti sia nel tempo che nello spazio; tale particolare capacità viene definita *resilienza*. Il concetto di resilienza nei sistemi complessi risale all'opera di Holling [11], il quale definì la resilienza come una misura della persistenza di un sistema e la sua abilità di assorbire variazioni e disturbi conservando le stesse connessioni tra i sottosistemi. Nel corso del tempo, diversi studiosi hanno affrontato il tema della resilienza, cercando di definire la resilienza in funzione del dominio di applicabilità [12]. Vugrin, in seguito, definì la resilienza come, nota l'occorrenza di un particolare evento distruttivo, la capacità di un sistema di ridurre gradualmente gli effetti negativi [13]; Altintas e Royer hanno successivamente definito la resilienza come la capacità di un'organizzazione di persistere o ripristinare uno stato dinamico stabile, in cui il sistema può operare senza interruzioni inaspettate [14]. Successivamente Gilly descrisse la resilienza come una doppia capacità: resistenza agli shock o limitarne gli effetti ed eventualmente anticiparne le conseguenze adattando il suo comportamento. Definizione in cui sono incarnate le due abilità di un sistema auto-organizzantesi, cioè assorbire o limitare tutto ciò che è fuori progetto [15]. Cutter definì la resilienza come l'abilità di anticiparsi, prepararsi e adattarsi a qualsiasi evento sia all'occorrenza dello stesso che durante il suo progredirsi. Tale definizione si differisce dalle altre perché ammette che lo stato del sistema possa variare, modificarsi nel metabolizzare l'evento [16]. Secondo Linkov durante un processo di resilienza, come una parte critica, l'analisi del rischio può essere usata come misura della probabilità che uno stato del sistema raggiunga un punto di limite; mentre l'analisi del rischio può aiutare il sistema a prepararsi per affrontare il suddetto evento [17]. Nan e Sansavini definiscono la resilienza integrale come la combinazione di quattro fasi, ovvero la fase iniziale, l'insorgere dell'evento, il ricovero e l'emergere dello stato iniziale. Per ogni fase vi è una misura delle performance in base ad un valore di target imposto.

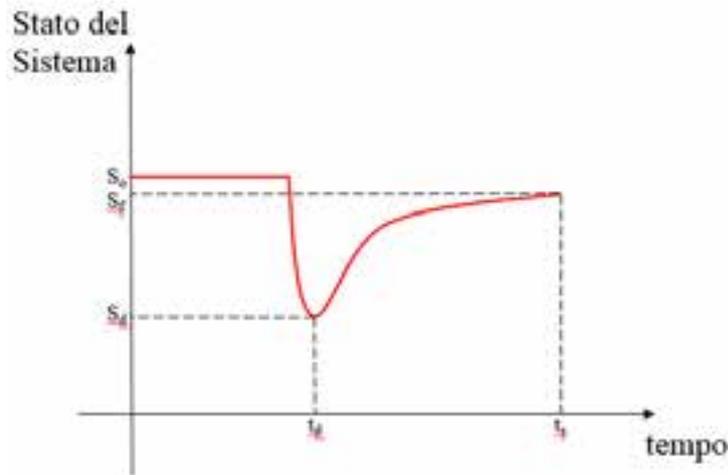


Figura 1. Fasi di resilienza

Il minimo valore temporale per ogni fase rappresenta appunto la resilienza del sistema [18]. Youn definisce ingegneristicamente la resilienza come la combinazione di probabilità, quali di accadimento di un evento, di una corretta diagnosi e di un corretto pronostico [19]. Il concetto di resilienza è stato applicato per l'ottimizzazione dei problemi. A sostegno di ciò vi è la definizione di Francis e Bekera, ai quali si attribuisce la prima definizione di resilienza dinamica: da un punto di vista analitico, la prestazione di un sistema è misurata in termini di funzione merito, φ , che descrive nel tempo la performance del sistema [20]. Si considera il sistema in figura in uno stato iniziale S_0 al tempo t_0 ; insorge un evento distruttivo al tempo t_e e perdura fino al tempo t_d , come conseguenza il sistema entra in uno stato distruttivo S_d . Come risposta, scaturisce un'azione di recupero al tempo t_s , ristabilendo il sistema allo stato finale S_f . Tanto più S_f è prossimo a S_0 , quanto più il sistema è resiliente. Dunque, detto e^j un evento e $\varphi(t|e^j)$ il valore di φ per quel dato evento, l'insieme degli eventi distruttivi è definito come $E = \{e^j: \varphi(t|e^j) < \varphi(t_0)\}$. La funzione resilienza, dunque, definita a partire dall'evento distruttivo e^j , scelto un tempo $t \in (t_d, t_s)$, è propriamente detta *quoziente di resilienza*, e risulta:

$$R_\varphi(t|e^j) = \frac{\varphi(t|e^j) - \varphi(t_d|e^j)}{\varphi(t_0) - \varphi(t_d|e^j)}$$

Sia $\hat{\varphi}(t)$ il potenziale valore prestazionale, se dal tempo t_0 al tempo t , l'evento distruttivo non influenza il sistema, la resilienza di tale sistema S è data da:

$$R(t) = \frac{\int_{t_0}^t \varphi(u) du}{\int_{t_0}^t \hat{\varphi}(u) du}$$

Definita la funzione di stress Φ come l'insieme degli eventi, non correlata necessariamente alle proprietà intrinseche degli eventi. Una considerazione importante è che, a seconda della definizione, più di un evento può avere lo stesso valore di stress. Tuttavia, dopo aver classificato e indirizzato i livelli di rischio nelle relative classi di funzioni di appartenenza, le interdipendenze tra le funzioni specifiche sono state valutate tramite la *what-if analysis*.

2. Caso Studio [21]

Si vuole analizzare l'impatto di un incidente rilevante su di un impianto di trattamento petrolifero; in particolare, dopo un breve contestualizzazione dello stabilimento, si esamina un diagramma di flusso che riassume le condizioni causa/effetto che si sviluppano

dall'insorgere dell'incidente, quindi alla procedura di messa in sicurezza. Seguirà un'analisi del danno con opportune valutazioni sulla resilienza dell'impianto.

2.1 Descrizione impianto petrolchimico

L'impianto di trattamento petrolifero di interesse si estende su di una superficie pari a circa 180.000 m². Possiede una capacità di trattamento di 104.000 barili di petrolio e 4.660.000 standard m³ di gas al giorno. Il ciclo dei diversi processi operativi (*up-stream*) ha inizio attraverso l'estrazione del greggio dai pozzi circostanti. Il fluido di giacimento è convogliato allo stabilimento dove avviene una separazione meccanica del fluido proveniente dalle aree pozzo, i cui componenti principali sono l'olio, l'acqua e il gas. L'olio, dopo un processo di stabilizzazione, viene stoccato nei serbatoi ed inviato, con l'ausilio di pompe, tramite oleodotto in raffineria per le successive lavorazioni (*down-stream*); l'acqua di strato subisce un trattamento per eliminare i residui di idrocarburi e di gas, e successivamente reiniettata nel giacimento di origine da cui era stata estratta; infine il gas subisce una lavorazione specifica: desolfurato, disidratato e opportunamente condizionato, viene immesso tramite una stazione di compressione rete di distribuzione.

Le operazioni svolte nello stabilimento, dunque, sono di pertinenza mineraria destinate essenzialmente alla separazione e conseguente lavorazione delle tre fasi presenti nel fluido estratto (petrolio grezzo, gas naturale, acqua); tutto ciò si deve alla presenza di impianti quali trasferimento petrolio grezzo, spedizione zolfo, produzione vapore, trattamento gas, produzione di energia elettrica, impianti di combustione e depressurizzazione delle apparecchiature. Infine, nel territorio circostante per un raggio di 5 km (definibile quale area di danno) sono presente due centri abitati, un invaso artificiale e svariati insediamenti industriali.



Figura 1. Ciclo tipo di uno stabilimento petrolchimico

2.2 Scenari di incidente connessi

In base alla classificazione di rischio ai sensi del D.lgs. 105/2015, le sostanze trattate nello stabilimento rientrano tra quelle classificabili come liquidi facilmente infiammabili, molto tossici, gas naturali, estremamente infiammabili, tossici per organismi acquatici. Nel presente lavoro si valutano solo alcuni degli incidenti rilevanti con elevata probabilità di accadimento durante il ciclo produttivo. Questi scenari sono relativi al riversamento di petrolio grezzo dovuto a cedimento del pipe-rack ripristinabile in 24 ore; rilascio di idrogeno solforato e di gas naturale a seguito della rottura di una valvola di sicurezza a protezione di una colonna di distillazione, con tempo di ripristino di circa 10 ore con conseguenze di irraggiamento termico, emissione di fumo, possibile ricaduta di fuliggine e di aerosol. Ulteriore scenario di rischio è la fuoriuscita di fluido refrigerante (CO₂, C₃H₈, R134a) dovuta a perdite nel circuito di raffreddamento del gas, comportando tempi di ripristino di circa 5 ore. Incidente ad alto rischio è l'innalzamento di pressione del vapore all'interno dei separatori trifase (acqua, gas e petrolio greggio) con conseguente innalzamento della temperatura fino a valori critici; si ritiene che per tale incidente occorra un intervallo temporale per il ripristino di 30 ore. Lo sversamento di un serbatoio di raccolta

del greggio comporta un incidente che, nel caso di minima entità del danno, è ripristinabile in 50 ore.

2.3 Misure di prevenzione e sicurezza

Le misure di prevenzione e sicurezza adottate nello stabilimento sono definite dal punto di vista impiantistico, operativo e gestionale. L'impianto risulta attrezzato con sistemi atti al monitoraggio e al controllo delle strumentazioni con possibilità di blocco e di intervento, associati ad ulteriori sistemi di comunicazione alla popolazione dello stato di allarme, attraverso allertamento acustico e luminoso. Durante le situazioni di emergenza sono previste alcune modalità di informazione alla popolazione che utilizzano prevalentemente canali di comunicazione a mezzo telefonico e intervento di squadre di soccorso con compiti informativi. Il piano di emergenza prevede la circoscrizione di tre zone, sulla base di una tecnica LOPA (*Layer of Protection Analysis*): *zona I di sicuro impatto*, immediatamente adiacente al punto di accadimento dell'evento incidentale, è caratterizzata da effetti ad elevata letalità; *zona II di danno*, è la zona delimitata dalla soglia di lesioni irreversibili, caratterizzata da possibili danni per le persone che non assumono le corrette misure di autoprotezione; *zona III di attenzione*, delimitata sulla base delle valutazioni delle autorità locali, generalmente non provoca danni gravi, anche per i soggetti più vulnerabili. Inoltre nel piano di emergenza è stata definita un'area di interesse per l'organizzazione delle attività di pianificazione, in cui sono poste in atto specifiche azioni di intervento in base all'incidente rilevante.

a) Capacità di ripristino di impianto

Lo stato di allarme si instaura per quegli eventi che, pur sotto controllo, per la propria natura o per particolari condizioni ambientali, possano far temere un aggravamento o passa essere avvertito dalla maggior parte della popolazione esposta comportando la necessità di attivazione delle procedure di sicurezza e di informazione. Il gestore dello stabilimento attiva il piano di emergenza interno, al fine di evitare la propagazione degli effetti e delle conseguenze secondo le procedure dello stesso; informa la sala operativa dei Vigili del Fuoco di quanto sta accadendo, rilasciando tutte le informazioni sensibili ad un intervento diretto ed immediato; informa inoltre circa tipologia, entità e gravità le autorità territoriali di competenza; assicura infine ogni utile assistenza alle squadre di intervento, fornendo, se richiesto, il proprio personale e le proprie attrezzature. Le autorità territoriali dispongono l'allertamento delle risorse da impiegare nella fase di allarme-emergenza e, secondo le proprie procedure, l'informazione alla popolazione ed agli stabilimenti adiacenti. Contemporaneamente, l'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) invia sul posto del personale che fornisce, sulla base della propria conoscenza dei rischi associati allo stabilimento, il supporto tecnico per le valutazioni ambientali e, se necessario, effettua campionamenti ad analisi mirate alla valutazione della situazione ed al suo evolversi. La cessazione dello stato di allarme avviene allorché lo stesso gestore dello stabilimento comunicherà a tutti gli enti intervenuti la fine dello stato di preallarme; seguirà l'evoluzione dell'evento per verificare l'eventuale presenza di elementi che possono aggravare la situazione, intervenendo, se necessario, con attività di prevenzione. La resilienza dell'impianto viene valutata come capacità di ripristino delle condizioni iniziali: l'impianto in esame verrà definito resiliente, quindi robusto, dal momento che, in caso di allarme, le operazioni di ripristino avvengano in un intervallo di tempo definito, non comportando ritardi alla produzione, e minimizzando l'impatto ambientale. A tal fine, verrà definito come indicatore di resilienza la velocità di ripristino del sistema per ogni incidente; verranno inoltre stabiliti dei fattori di peso per ogni scenario, per delineare la gravità di un incidente rispetto agli altri. Le attività appena descritte possono essere riassunte nel diagramma di flusso di figura 3, con lo scopo di

analizzare con immediatezza l'incidenza di ogni evento e la successiva valutazione della capacità di ripristino del sistema complesso in esame.

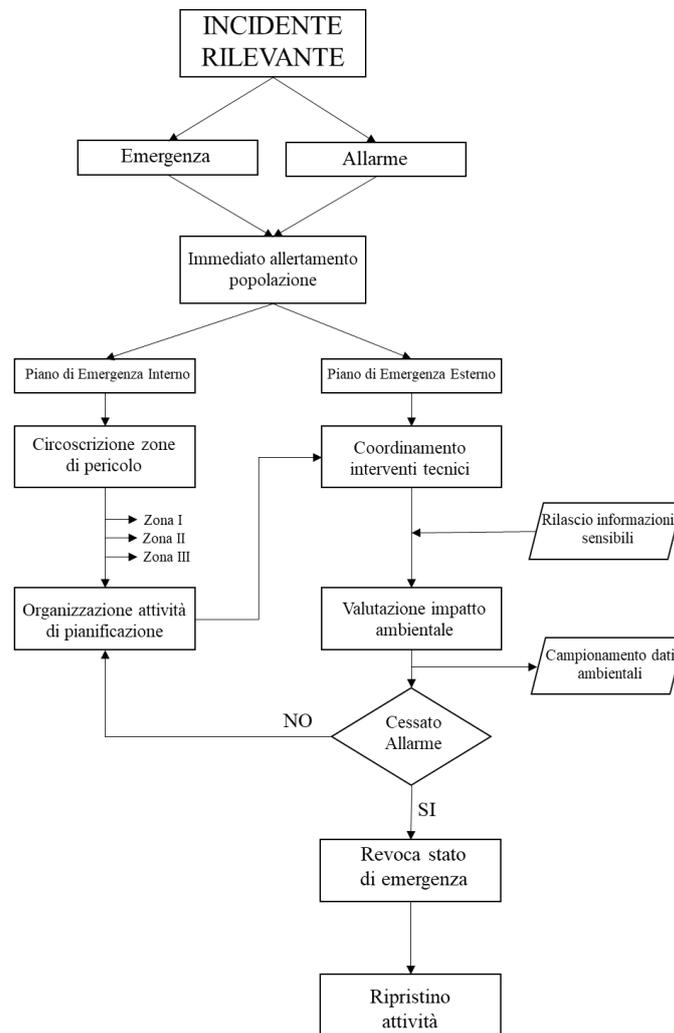


Figura 3. Diagramma di flusso sviluppo incidente rilevante

b) Calcolo indice di resilienza

La scelta di questi particolari incidenti rilevanti nell'impianto di studio risiede nel fatto che essi sono tra loro collegati; il blocco del separatore di ingresso trifase (evento A), infatti, comporta una scorretta separazione del fluido, con due conseguenze rilevanti: la prima è dovuta al rilascio di gas tossico (evento B) e riversamento del petrolio greggio sia dal pipe-rack (evento C), sia dai serbatoi (evento D); come seconda conseguenza vi sono possibili perdite di liquido di raffreddamento (evento E) dovuto alla presenza di fluido indesiderato (gas impuro) nel ciclo frigo. A seguito degli incidenti scelti, il numero di possibili eventi distruttivi D_e è dato da:

$$D_e = \sum_{i=1}^5 \binom{5}{i} = 31$$

Sulla base di queste valutazioni, per ogni evento si definiscono dei fattori di peso h_i in termini percentuali ad indicare l'incidenza di ciascun evento nel sistema, considerando tali valori in termini di ripristino della sola attività produttiva, tralasciando, in questo studio, l'incidenza sull'impatto ambientale.

$$h_A = 60\% \quad h_B = 6\% \quad h_C = 16\% \quad h_D = 15\% \quad h_E = 3\%$$

Per il calcolo dell'indice di resilienza si considera la frequenza di ripristino f_i del sistema per l'insorgere di un singolo evento, ovvero l'inverso del tempo necessario per fronteggiare un danno; tali valori risultano, pertanto, pari a:

$$f_A = 0,034 \quad f_B = 0,1 \quad f_C = 0,042 \quad f_D = 0,02 \quad f_E = 0,2$$

Quando incorre un evento la capacità del sistema decresce linearmente fino a 0 a seguito del susseguirsi degli eventi stessi. Per esempio, con l'evento A la capacità del sistema, unitaria in condizioni di normale funzionamento, tende a 0 a causa dell'incidente [22]; in base alle specifiche di robustezza del sistema, esso, in quanto resiliente, risponde allo stress in tempi funzione della reattività dello stesso garantendo il ripristino della condizione iniziale. Tuttavia, la reale capacità del sistema verrà ulteriormente ridotta dai fattori di peso, in quanto un evento che pesa di più, abbatte maggiormente la capacità del sistema e, all'insorgere dell'incidente, l'impianto dovrà essere ancora più robusto per invertire l'andamento decrescente della capacità, quindi prestazioni di resilienza maggiori. Di seguito si riportano gli effettivi valori della frequenza di ripristino opportunamente pesata:

$$f_{hA} = 0,0204 \quad f_{hB} = 0,006 \quad f_{hC} = 0,00672 \quad f_{hD} = 0,003 \quad f_{hE} = 0,006$$

Si riporta, in figura 4, un grafo in cui i nodi rappresentano gli eventi con le relative frequenze di ripristino debitamente pesate e gli archi connettono i nodi in funzione delle conseguenze che ogni incidente ha verso gli altri.

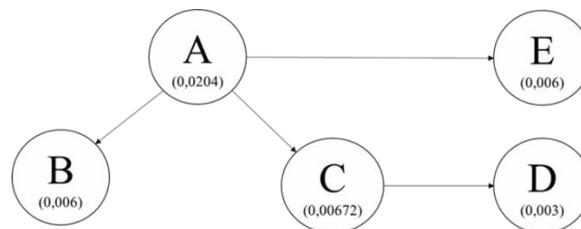


Figura 4. Grafo degli eventi

Nella figura 5 viene mostrata l'incidenza dei fattori di peso sulla capacità del sistema per il solo evento A; per gli altri eventi l'andamento è analogo, ciò che varia è l'entità di decrescita del sistema. La curva in rosso mostra l'andamento del sistema in assenza del fattore di peso, il quale contribuisce nella curva in blu in cui si nota una maggiore velocità di caduta della capacità e pertanto un ulteriore incremento del tempo di ripristino.

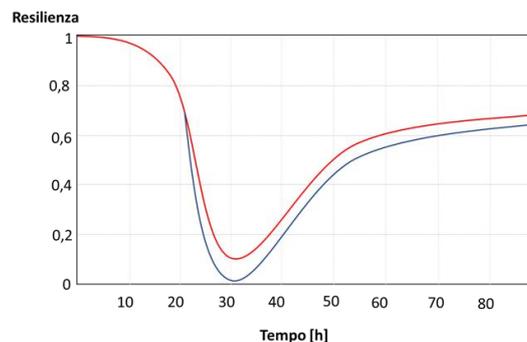


Figura 5. Capacità di ripristino del sistema

2.4 Descrizione dei risultati

All'insorgere di un guasto, le misure da adottare sono sempre più invasive al crescere della severità del guasto stesso. A meno dal valore della frequenza di ripristino relativo al caso di assenza di guasto, qualsiasi azione che si adotta, sia nel caso di semplice allarme piuttosto che di emergenza, comporta misure cautelative ai fini della sicurezza che richiedono tempi e attività straordinari per il possibile ripristino dello stabilimento. L'impianto analizzato presenta una certa barriera di sicurezza, infatti tutti i controlli interni sono frutto del monitoraggio continuo delle apparecchiature. I dati vengono così inviati al DCS (Distribution Control System) il quale, grazie ad un diagramma causa effetto, somma le condizioni operative che monitorano in tempo reale lo scostamento dall'obiettivo di produzione, definito come una funzione obiettivo da minimizzare. Tale comportamento del sistema fa in modo che l'impianto possa essere definito come un sistema complesso ad alta capacità: all'insorgere di un guasto di lieve entità, relativo ad esempio ad un semplice superamento di valori di soglia, la capacità di ripristino del sistema mantiene valori prossimi al valore massimo, relativi cioè alle condizioni di funzionamento nominale. Qualsiasi altro guasto mette il sistema in una condizione che determina un possibile ripristino in tempi non più accettabili. Chiaramente, non esiste una soglia di accettabilità parziale, perché ogni superamento dei valori ammissibili, determinano un mancato raggiungimento di produzione.

3. Conclusioni e sviluppi futuri

In questo articolo, si è voluto contestualizzare il tema della resilienza per un'industria di trattamento petrolifero. Nella parte introduttiva, sono stati descritti i sistemi complessi per definire un modello di discretizzazione. L'analisi effettuata ha mostrato la non linearità di questi sistemi e come descriverli in base alla loro capacità di recupero. Si è analizzato le varie attività dello stabilimento in caso di emergenze e allarme. La resilienza di un sistema, dunque, è in grado di modificare totalmente la sua capacità di funzionamento, in quanto riesce a garantire parametri di affidabilità tali da conservare il sistema stesso nello stato di attività nominale, anche in caso di *failure*. L'argomento per la ricerca futura sarà esplorare il comportamento di sistemi complessi di grandi dimensioni rispetto al set completo di eventi dirompenti, sulla base di dati dettagliati. L'enfasi di questo argomento sarà su come misurare gli effetti dell'insieme di eventi sviluppando strategie per migliorare le prestazioni del sistema, per minimizzare così il potenziale impatto degli eventi.

4. Bibliografia

- [1] Ashby "An introduction to Cybernetics", Chapman & Hall, 1956, London UK
- [2] Boes Migeon "Self-Organizing multi-agent system for the control of complex system"; The Journal of System and Software 2017, (134) 12-28
- [3] Ottino JM "Engineering complex system", Nature 2004; 427 (6973) 399
- [4] Leveson N. "A system approach to risk management through leading safety indicators" Reliability Engineering and System Safety 2015; (136) 17-34
- [5] Bjerga T., Aven T., Zio E. "Uncertainty treatment in risk analysis of complex system: the case of FRAM and STAMP" Reliability Engineering and System Safety 2016;(156) 203-209
- [6] Leveson N. "Engineering a safer world: system thinking applied to safety" Cambridge: The MIT Press 2011
- [7] Hollnagel E. "Barriers and accident prevention: or how to improve safety by understanding the nature of accidents rather than finding their causes" Hampshire 2007

- [8] Kaplan S., Garrick B.J. "On the quantitative definition of risk" Risk Analysis 1981, (1) 78-83
- [9] Borgonovo E., Cappelli V., Maccheroni F., Marinacci M. "Risk analysis and decision theory a bridge" European Journal of Operational Research 2018, 280-293
- [10] Quan C., Linguiag L., Dongping Y., Gu Y. "A reliability risk analysis method based on the fuzzy fault tree and fuzzy event tree" China Safety Science Journal 2013, 23 (8) 78-83
- [11] Lundberg J., Johansson B. "Systemic resilience model" Reliability Engineering and System Safety 2015; (141) 22-32
- [12] Wang Z., Nistor M.S., Pickl S.W. "Analysis of the definitions of resilience" IFAC PapersOnLine 2017 (50) 10649-10657
- [13] Vugrin E.D., Warren D.E., and Ehlen M.A., A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane, Process Safety Progress 2011, 30(3), 280–290
- [14] Altintas G. and Royer I, *Renforcement de la résilience par un apprentissage post-crise: une étude longitudinale sur deux périodes de turbulence* M@n@gement 2009, 12(4), 266–293.
- [15] Gilly J.P., Kechidi M., and Talbot D. *Resilience of organisations and territories: The role of pivot firms*, European Management Journal 2014, 32(4), 596–602
- [16] Cutter S.L., Ahearn J.A., Amadei B., Crawford P., Eide E.A., Galloway G.E., Goodchild M.F., Kunreuther H.C., Li-Vollmer M., Schoch-Spana M., et al. *Disaster resilience: A national imperative*, Environment: Science and Policy for Sustainable Development 2013, 55(2), 25–29
- [17] Linkov I., Bridges T., Creutzig F., Decker J., Fox-Lent C., Kroger W., Lambert J.H., Levermann A., Montreuil, B., Nathwani J., et al., *Changing the resilience paradigm*, Nature Climate Change 2014 4(6), 407–409
- [18] Nan C. and Sansavini G., *A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures*, Reliability Engineering & System Safety 2017, 157, 35–53
- [19] Youn B.D., Hu C., Wang P. (2011). *Resilience driven system design of complex engineered systems*, Journal of Mechanical Design 2011, 133(10), 101011
- [20] Francis, R. and Bekera, B. *A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems*, Reliability Engineering & System Safety 2014, 121, 90–103
- [21] Eni Exploration & Production, *Analisi rischio rilevante Descrizione delle unità di processo dello stabilimento Centro Olio Val d'Agri*. Disponibile su www.prefettura.it. Accesso il 15 Giugno 2018.
- [22] Dessavre D.G., Ramirez-Marques J.E., Barker K. *Multidimensional approach to complex system resilience analysis*, Reliability Engineering & System Safety 2016, 149, 34-43

Limiti e condizioni per l'impiego dello standard API 581 "Risk Based Inspection Methodology" nelle analisi di rischio dei Rapporti di Sicurezza di cui al d.lgs. 105/2015

S. Campana¹, R. Iovene², A. Lombardi¹

¹ ARTA - Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente dell'Abruzzo

² Inail - Uot di Pescara

Sommario

Nei Rapporti di Sicurezza presentati dai Gestori degli stabilimenti soggetti agli obblighi del d.lgs. 105/2015, l'analisi affidabilistica per la valutazione della frequenza di rottura random (casuale) di apparecchiature e tubazioni è talvolta effettuata utilizzando lo Standard API 581:2000, "Risk Based Inspection Base Resource Document" [1].

La versione 2000 dello standard, oggi superata dalla revisione 2016, consigliava alcuni valori numerici per le frequenze generiche di rottura di apparecchiature o tubazioni che vengono ancora utilizzati e talvolta impropriamente ridotti impiegando un fattore che tiene conto dell'efficacia del sistema gestionale adottato.

Questo utilizzo dello standard API non è in linea con le sue finalità, cioè quantificare per ciascuna apparecchiatura la variazione nel tempo della probabilità di rottura causata dai diversi meccanismi di usura cui l'apparecchiatura è sottoposta e quantificare l'effetto positivo conseguibile con un piano di ispezioni mirate rispetto al meccanismo di usura.

Le successive revisioni dello standard API 581:2000 [1] hanno semplificato l'analisi e uniformato le frequenze generiche di rottura. Ciò rende maggiormente evidenti le incongruenze dell'impiego dello standard API nei Rapporti di Sicurezza con finalità differenti da quelle per le quali lo standard è stato elaborato.

Affinché nell'analisi affidabilistica si possano considerare in modo adeguato gli effetti positivi indotti dal Sistema di Gestione della Sicurezza sulla riduzione delle frequenze di rottura, l'estensore del Rapporto di Sicurezza potrà più propriamente fare ricorso a metodologie di analisi integrata del rischio.

In quest'ottica, un'accreditata metodologia di RBI consentirà di predisporre un piano di ispezione che porti ad un'effettiva riduzione della frequenza di rottura.

1. L'analisi affidabilistica secondo lo standard API 581:2016 "Risk Based Inspection Methodology"

Lo standard API 581:2016 "Risk based inspection Methodology" [2] fornisce una metodologia quantitativa per definire un piano di ispezione, basato sull'analisi del rischio, da utilizzarsi in impianti chimici o petrolchimici, in raffinerie o in impianti di produzione di gas e idrocarburi.

La valutazione del rischio è una questione complessa che comporta la contemporanea considerazione di due valutazioni: quella relativa alla probabilità di rottura di un'apparecchiatura e quella relativa alle conseguenze della rottura.

La probabilità di rottura al tempo t , $P_f(t)$, per componenti diversi da scambiatori di calore a fascio tubiero, è calcolata attraverso la seguente formula:

$$P_f(t) = gff \times F_{MS} \times D_f(t) \quad (1)$$

dove gff è la frequenza generica di rottura, F_{MS} è un fattore che tiene conto del sistema di gestione e $D_f(t)$ è il fattore che tiene conto dell'usura in funzione del tempo.

La frequenza generica di rottura di un componente è definita come “frequenza di rottura prima che ogni meccanismo di usura abbia luogo a seguito dell’esposizione del componente all’ambiente operativo”.

La dimensione della rottura si definisce attraverso l’idealizzazione della rottura a foro circolare e prendendo in considerazione il diametro di detto foro equivalente.

Lo Standard API 581:2016 [2] consiglia valori di frequenza generica rappresentativi dell’industria petrolchimica in corrispondenza di 4 diametri di rottura.

Come si evince dalla (1), l’analisi affidabilistica proposta dallo Standard individua due fattori correttivi per la frequenza generica.

Il fattore relativo al sistema di gestione F_{MS} tiene conto dell’effetto del sistema di gestione sulla integrità meccanica della componentistica di impianto. Lo Standard propone il metodo per la quantificazione del valore del fattore F_{MS} attraverso una check list: sono indicati i vari punteggi da attribuire, nel corso di un audit, ad ogni voce prevista nella tabella per giungere alla determinazione di detto valore che può variare da 0.1 a 10. L’effetto del fattore è quindi, di fatto, quello di aumentare o ridurre la frequenza generica di rottura al massimo entro un ordine di grandezza.

Il fattore di usura $D_f(t)$ è determinato sulla base dei meccanismi di usura significativi per i materiali di costruzione del componente e per il servizio cui è destinato. Il fattore di usura è quindi specifico per ciascun componente e consente di valutare in modo probabilistico il danno provocato dall’usura che può essere presente in funzione sia del tempo di servizio sia dell’efficacia dell’attività ispettiva nel quantificare l’entità effettiva del danno da usura. Il valore del fattore di usura ha una variabilità molto più ampia del precedente: esso può infatti essere inferiore a 1 ma può anche raggiungere valori superiori a 1000, incrementando la frequenza di rottura di tre ordini di grandezza e oltre rispetto alla frequenza generica.

I meccanismi di usura considerati dallo standard API 581:2016 [2] sono:

- Corrosione interna
- Usura del rivestimento
- Corrosione esterna
- Fratture per corrosione sotto sforzo
- Attacco da idrogeno ad alta temperatura
- Fatica meccanica
- Frattura per fragilimento

Lo Standard consente anche di quantificare il fattore di usura derivante dalla contemporanea presenza di più meccanismi di usura tra quelli considerati, attraverso il calcolo del fattore per ciascuno dei meccanismi e la successiva combinazione di questi valori secondo formule prestabilite.

L’analisi delle conseguenze della rottura può essere effettuata mediante due livelli di analisi, il primo dei quali di tipo speditivo. Le aree di danno sono calcolate come media delle aree per ogni diametro di rottura, pesata sulla frequenza associata a ciascun diametro. Possono essere valutate le aree di danno sia per scenari di incendio, sia per rilasci tossici.

Il rischio al tempo t , $R(t)$, è valutato con la seguente formula:

$$R(t) = Pf(t) \times Cf \quad (2)$$

nella quale $Pf(t)$ è la probabilità di rottura al tempo t , espressa in termini di eventi/anno, variabile in funzione dell’accumularsi nel tempo del danno legato ai meccanismi di usura, mentre Cf è l’entità delle conseguenze del rilascio, che possono essere valutate sia in termini economici, sia in termini di estensione delle superfici di danno.

La metodologia prevede la costruzione di matrici di rischio, nelle quali la probabilità di rottura è riportata sulle ascisse e l’entità delle conseguenze sulle ordinate, oppure di grafici bidimensionali log-log contenenti le linee di isorischio. Il rischio associato ad un componente

è rappresentato con un punto che si posiziona fra le linee associate a “rischio basso”, “rischio medio” o “rischio alto”.

Nell’analisi si possono quindi categorizzare apparecchiature per le quali il valore del rischio dipende prevalentemente dalla frequenza, apparecchiature in cui il fattore prevalente nel calcolo del rischio è quello delle conseguenze di un eventuale rilascio e altre per le quali i due fattori hanno peso simile.

Per le prime, la riduzione del rischio necessita di azioni volte a ridurre la frequenza di rottura: su queste può quindi risultare determinante, in senso positivo, un piano di ispezioni mirate in relazione al meccanismo o ai meccanismi di usura ipotizzabili.

Per le seconde, di contro, è necessario agire su aspetti progettuali e ingegneristici volti a ridurre l’entità delle conseguenze di un’eventuale perdita di contenimento.

Infine, nel caso di componenti per i quali le frequenze e le conseguenze hanno peso simile nella valutazione del rischio, occorre agire su entrambi i fronti.

Il Piano di ispezioni basato sul rischio parte dall’assunto che il rischio raggiunga nel tempo un valore soglia, definito dal Gestore, in corrispondenza del quale è opportuno effettuare un’ispezione che valuti quali sono gli effetti dei danni prodotti dall’usura. Il valore soglia può essere individuato sulla probabilità di rottura o sul fattore di usura, che sono i termini dell’equazione (2) che cambiano nel tempo. A seguito dell’ispezione, che deve essere mirata allo specifico meccanismo di usura, si potrà valutare l’effettiva entità del danno e, quindi, se il componente sia ancora in grado di svolgere la sua funzione ovvero debba essere sostituito. In conseguenza di un’ispezione, la probabilità di rottura è pertanto rivalutata in base all’effettivo stato del componente.

In questo modo, la (2) viene modificata nella seguente:

$$R(t, I_E) = Pf(t, I_E) \times Cf \quad (3)$$

dove I_E è l’efficacia dell’attività ispettiva effettuata.

Un piano di ispezione deve essere pertanto sviluppato sulla base dell’analisi del rischio, in modo da consentire di ottenere le informazioni necessarie a quantificare il danno nonché il rateo di usura. Il piano contiene le apparecchiature soggette ai piani ispettivi, le frequenze ed i metodi ispettivi non distruttivi da utilizzare (ad ultrasuoni, radiografici, visivi). L’efficacia delle ispezioni nell’individuare e quantificare il danno derivante da una specifica causa di usura è valutata aggiornando la probabilità di rottura attraverso l’analisi statistica bayesiana. A titolo di confronto con le scelte effettuate nelle istruttorie sui Rapporti di Sicurezza in Italia, si evidenzia che lo Standard individua 5 categorie di frequenze e 5 categorie di conseguenze. Assumendo una frequenza generica di 3.06×10^{-5} eventi/anno e un valore del fattore del sistema di gestione F_{MS} pari a 1, le più basse categorie hanno frequenza inferiore a 3.06×10^{-5} eventi/anno e aree di danno inferiori a 10 m^2 , le categorie più critiche hanno frequenza superiore a 3.06×10^{-2} eventi/anno e aree di danno superiori a 10.000 m^2 .

2. L’utilizzo dello standard API 581:2000 nei Rapporti di Sicurezza

In alcuni Rapporti di Sicurezza presentati in Italia, l’analisi affidabilistica delle rotture “random” di apparecchiature e tubazioni è stata effettuata facendo riferimento allo Standard API 581 nella sua versione iniziale, pubblicata nel 2000 [1].

Rispetto alla versione API 581:2016 descritta nel paragrafo precedente, la versione 2000 dello standard calcolava la Frequenza di rottura secondo la seguente formula:

$$Frequency_{adjusted} = Frequency_{generic} \times F_E \times F_M \quad (4)$$

Dove i valori della frequenza generica ($Frequency_{generic}$) venivano consigliati nello standard, il fattore F_M era in tutto analogo al fattore F_{MS} della revisione 2016, mentre F_E (*Equipment Factor*) era molto più articolato rispetto al corrispondente fattore di usura D_f presente nella revisione 2016. Risulta evidente come l’intendimento dello standard API 581:2000 fosse

proprio quello di arrivare a calcolare la probabilità di rottura, tenendo conto anche delle cause esterne come terremoti, condizioni climatiche, complessità impiantistica, ecc. Infatti l'Equipment Factor era una combinazione di 3 sotto-fattori:

- Technical Module Subfactor, che teneva conto dei ratei di danneggiamento delle cause di rottura, nonché dell'efficacia dei meccanismi di ispezione;
- Mechanical Subfactor, che teneva conto della complessità impiantistica, dell'adeguatezza degli standard costruttivi, dei fattori di sicurezza adottati in fase costruttiva, del monitoraggio delle vibrazioni, del ciclo di vita dell'apparecchiatura;
- Universal Subfactor, che teneva conto delle condizioni meteorologiche, dello stato di pulizia dell'impianto, della sismicità.

La revisione 2016 dello standard semplifica l'analisi affidabilistica rispetto alla revisione iniziale: il fattore di usura è un'evoluzione del solo "Technical Module Subfactor". Gli altri "sotto-fattori" non sono più presenti, ma è pur vero che essi influivano indiscriminatamente su tutte le apparecchiature e, pertanto, non risultavano significativi rispetto all'obiettivo di individuare un elenco di priorità.

In realtà, di tutta la metodologia indicata dallo standard API 581 revisione 2000 per l'analisi affidabilistica, gli estensori dei rapporti di sicurezza utilizzano solo una parte: viene pertanto presa a riferimento solo parzialmente la (4).

Nello specifico, vengono desunti dallo standard API 581:2000 [1] i valori consigliati delle frequenze generiche di rottura (*gff*) e viene quindi valutato il fattore relativo al sistema di gestione (F_M) utilizzando la check list riportata nello standard stesso, che si basa su una valutazione della qualità delle procedure del Sistema di Gestione. In questo modo, di fatto, vengono semplicemente ridotti i valori delle frequenze generiche di circa un ordine di grandezza.

E' del tutto evidente come questo utilizzo dello standard API 581 per l'analisi affidabilistica dei Rapporti di Sicurezza risulti improprio.

Merita evidenziare, ad ulteriore conferma di quanto sopra, che gli estensori dei Rapporti di Sicurezza si trovano oggi nell'impossibilità di adottare questa metodologia utilizzando la versione vigente dello standard API 581:2016 [2], in quanto le frequenze generiche di rottura sono state radicalmente cambiate rispetto alla revisione 2000.

Infatti, mentre le frequenze generiche della revisione 2000 risultano in larga misura confrontabili con quelle desunte da altre fonti bibliografiche riconosciute (quali Purple Book del TNO [3], Failure Rates dell'HSE [4], ecc.), le frequenze generiche della versione 2016 sono di fatto significativamente diverse da quelle desumibili da altre fonti.

Si pensi che le frequenze generiche di rottura per le tubazioni in API 581:2016 non sono individuate per unità di lunghezza e, inoltre, le frequenze consigliate si differenziano molto poco l'una dall'altra al variare del diametro della tubazione.

Fonte bibliografica	DN ≤ 2"	6" ≤ DN ≤ 12"
Failure Rates HSE [4]	$2.5 \cdot 10^{-5}$ occ/m*anno	$1.6 \cdot 10^{-6}$ occ/ m*anno
API 581:2000 [1]	$1.9 \cdot 10^{-5}$ occ/m*anno	$2 \cdot 10^{-7}$ occ/m*anno
API 581:2016 [2]	$3.05 \cdot 10^{-5}$ occ/anno	$3.05 \cdot 10^{-5}$ occ/anno

Tabella 1. Confronto Frequenze cumulate di rottura delle tubazioni, desunte da Failure Rates [4], API 581:2000 [1] e API 581:2016 [2]

A titolo esemplificativo, nella tabella 1 si riporta il confronto fra i ratei cumulati di rottura per le tubazioni fra tre fonti bibliografiche: il documento Failure Rates dell'HSE [4], i valori consigliati dallo standard API 581:2000 [1] e i valori consigliati dallo standard API 581:2016 [2].

Risulta del tutto evidente come i valori delle prime due fonti possono essere confrontati, mentre la API 581:2016 utilizza un'unità di misura che non è utilizzata né utilizzabile per l'analisi affidabilistica di tubazioni in quanto non tiene conto della lunghezza della tubazione. Osservando le frequenze generiche di rottura cumulate, per ciascuna dimensione di rottura, della revisione 2016 dello standard, si evince che esse sono tutte uguali fra loro, per compressori, tubazioni di qualsiasi diametro, pompe, ventilatori, ecc: 3.05×10^{-5} occ./anno. I diversi componenti partono quindi tutti dagli stessi valori cumulativi di frequenze generiche di rottura.

Quello che differenzia davvero un'apparecchiatura da un'altra, secondo lo standard API 581:2016, è il fattore di usura, che tiene conto dei meccanismi di danneggiamento cui essa è sottoposta nell'ambiente operativo in cui si trova a lavorare.

La revisione 2016 dello standard, pertanto, a differenza della versione 2000 che mirava a calcolare l'effettiva frequenza di rottura, sembra perseguire l'intento di semplificare l'analisi affidabilistica, definendo una scala di valori di rischio relativi per le apparecchiature di uno stesso impianto in base ai fattori di usura cui sono sottoposti, allo scopo di individuare le priorità nella predisposizione del Piano di Ispezioni.

Quanto sopra rafforza la tesi che l'utilizzo dello standard per l'analisi affidabilistica dei Rapporti di Sicurezza, se anche fosse effettuato in modo più aderente alla API 581 rispetto a quanto finora proposto, sarebbe comunque improprio; né appare plausibile consentire ancora l'utilizzo della versione 2000, sostituita dalle revisioni successive.

3. Il Sistema di Gestione della Sicurezza nell'analisi affidabilistica dei Rapporti di Sicurezza

Allo scopo di quantificare l'efficacia delle procedure del Sistema di Gestione della Sicurezza nel ridurre la frequenza di alcune cause di rottura, è possibile ricorrere alle tecniche di analisi integrata del rischio, che forniscono metodologie quantitative per tenere conto delle procedure gestionali nella valutazione del rischio.

Come noto, già la Direttiva 96/82/EC (Seveso II) aveva imposto in capo ai Gestori degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante gli obblighi di definire una Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti e implementare un Sistema di Gestione della Sicurezza, i cui requisiti sono puntualmente individuati nella norma.

Anche la Commissione Europea ha commissionato uno studio per sviluppare una metodologia di I-Risk da applicare nelle valutazioni di rischio in stabilimenti "Seveso". I risultati sono illustrati nel documento *"I-RISK: A quantified integrated technical and management risk control and monitoring methodology"* [5].

La metodologia proposta prevede una valutazione quantificata del rischio, effettuata mediante le usuali tecniche (Fault Tree Analysis), e un audit mirato sui sistemi di gestione della Sicurezza per la prevenzione dei rischi di incidenti rilevanti. In esito all'audit, il metodo fornisce gli algoritmi per il calcolo dei fattori del sistema di gestione da applicare ai parametri usati nell'analisi di rischio.

Nel caso di rotture random di apparecchiature e tubazioni, è evidente che la presenza di un Piano di Ispezione risk based costituisce, in quest'ottica, elemento fondamentale per ridurre le frequenze delle principali cause di rottura.

Disponendo infatti di dati affidabilistici che consentano di risalire alla frequenza per specifica causa di rottura, tramite un piano di ispezioni mirate è possibile senz'altro ridurre le frequenze dovute a cause note di usura, come per esempio la corrosione interna o esterna, la fatica meccanica, l'infragilimento, ecc.

A tal proposito, risulta interessante la metodologia semplificata proposta da M.F. Milazzo et al. [6] per le tubazioni.

A titolo esemplificativo, si riporta nella tabella 2 il confronto fra le frequenze generiche di rottura cumulate tratte da tre diversi Report desunti da banche dati incidentali:

1. Report UKOPA 2018 [7], che illustra ed analizza le informazioni relative ad eventi incidentali che hanno interessato tubazioni fuori terra di trasporto di prodotti chimici di origine petrolifera dal 1962 al 2016 nel Regno Unito; l'attuale estensione di tubazioni che contribuiscono al popolamento del database è di 21.845 km.
2. Report Concawe n.6/18 [8], che descrive le statistiche di dati incidentali relative ad un'estensione pari a 37.500 km di oleodotti interrati europei dal 1971 al 2016.
3. Report EGIG 2018 [9], che riporta le informazioni sui dati incidentali dal 1970 al 2016 forniti da 70 operatori del settore di trasporto del gas in Europa relativi a 142.794 km di condotte.

La tabella n. 2 mostra che i tre report restituiscono ratei di rottura cumulati dello stesso ordine di grandezza, relativamente ad un periodo di osservazione di quasi 50 anni, per tutti i diametri di tubazione e per tutte le dimensioni di rottura.

Fonte di dati	Frequenza totale rottura (incidenti/anno*1000 km)
Report UKOPA [7] - Condotte trasporto prodotti chimici di origine petrolifera in UK nel periodo di osservazione 1962-2016	0,212
Report CONCAWE [8] - Condotte interrate trasporto prodotti petroliferi in UE nel periodo di osservazione 1971-2016	0,46
EGIG [9]- Condotte interrate trasporto Gas in UE nel periodo di osservazione 1970-2016	0,31

Tabella 2. Confronto fra le frequenze di rottura delle condotte, desunte dai Report UKOPA 2018 [7], Concawe 2018 [8] ed EGIG 2018 [9], cumulate per ciascun diametro di tubazione e per ciascuna dimensione di rottura

I citati Report (Ukopa [7], Concawe [8] ed Egig [9]) forniscono anche l'incidenza sulla frequenza totale delle diverse cause di rottura.

Alcuni dati estratti dalle fonti citate sono riportati nella tabella 3, relativa al Report EGIG [9].

Cause di rottura delle condotte di trasporto gas - Report EGIG - periodo 1970-2016	Frequenza della specifica causa rottura in occ/1000 km * anno
Interferenza esterna	0,144
Corrosione	0,052
Difetti di costruzione/rotture del materiale	0,051
Hot tap fatti per errore	0,014
Movimenti terra	0,026

Tab. 3. Ratei osservati nel periodo 1970-2016 relativi alle diverse cause di rottura, derivati dal Report Egig 2018 [9]

Come si evince dalla fig.1, costruita con i dati del Report Concawe [8], la frequenza delle cause di rottura osservate per le condotte di trasporto di prodotti petroliferi del Regno Unito dipende fortemente dalle condizioni di trasporto del fluido, in particolare dalla temperatura (fluido riscaldato o a temperatura ambiente). In questo caso, appaiono nuovamente evidenti i benefici che potrebbero derivare da un Piano di ispezione mirato allo specifico meccanismo di danneggiamento delle tubazioni, chiaramente differente in funzione del tipo di fluido che trasportano, nella riduzione della frequenza delle cause alla base della rottura.

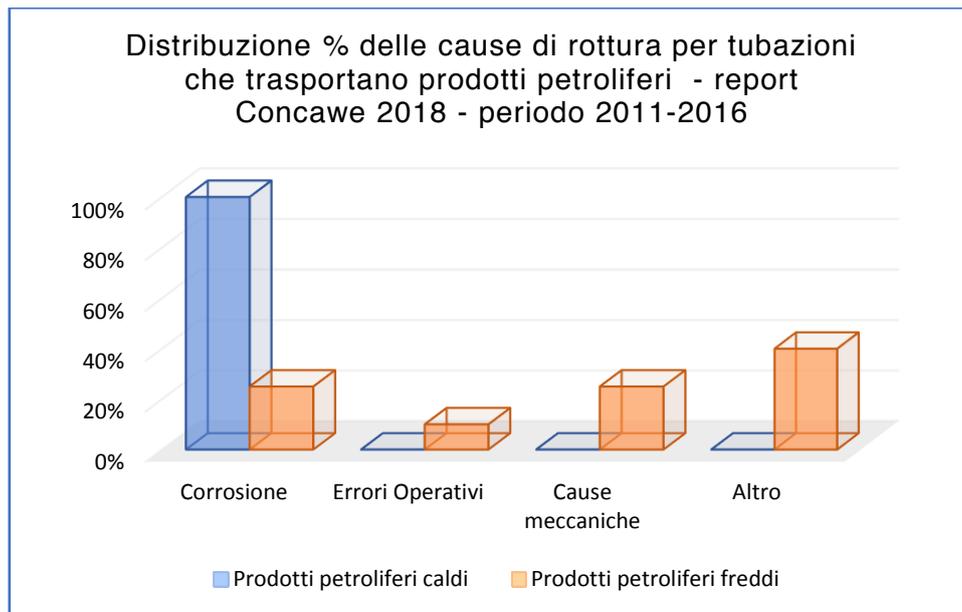


Figura 1. Confronto distribuzione percentuale delle cause di rottura osservate nel periodo 2011-2016 relativamente a condotte di trasporto di fluidi petroliferi freddi e caldi nel Regno Unito. Dati desunti dal Report Concawe 2018 [8]

Il Report Concawe [8] analizza puntualmente l'incidenza degli errori umani sulle cause di rottura: nell'ottica dell'analisi integrata del rischio, l'adozione di programmi e piani di formazione degli operatori, sia sulle normali procedure operative sia sulla conduzione di attività ispettive mirate, potrà concretizzarsi nella significativa riduzione delle frequenze di alcune cause di rottura.

Dal Report Ukopa [7], per le tubazioni del Regno Unito che trasportano prodotti chimici di origine petrolifera, compreso il gas naturale, è stata tratta la figura 2. Si può evincere come, nell'intero periodo osservato, la frequenza di rottura imputabile a corrosione esterna sia stata di 0.045 occ/(anno*km), corrispondente al 21% circa del complessivo rateo di rottura osservato. Un Piano di Ispezione mirato a tale meccanismo di usura può certamente contribuire a ridurre la frequenza di rottura dovuta a corrosione esterna.

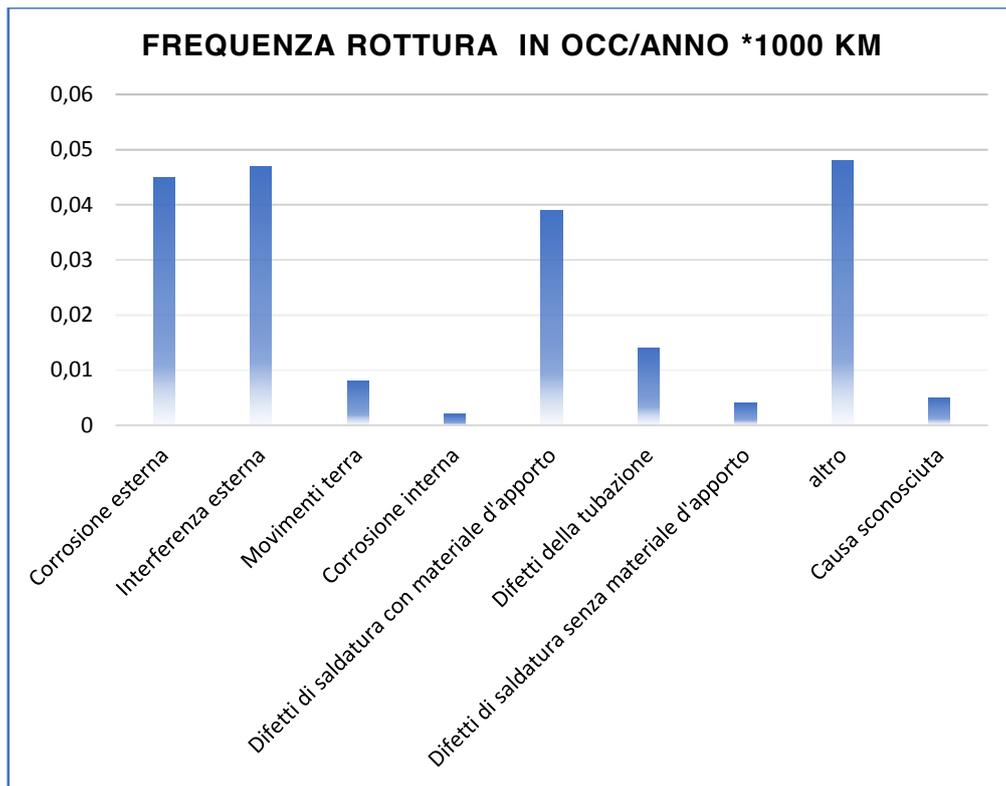


Figura 2. Frequenza osservata per le cause di rottura di tubazioni. Dati ricavati da Report UKOPA 2018 [7]

4. Conclusioni

Lo standard API 581:2016 [2] indica una metodologia per la predisposizione dei Piani di Ispezione basati sulla valutazione del rischio.

L'analisi di rischio proposta dallo standard è chiaramente una metodologia finalizzata a stabilire le priorità nell'individuazione delle apparecchiature da ispezionare, nonché frequenze e modalità di conduzione del Piano delle Ispezioni, e non può essere considerata rispondente ai criteri individuati nell'allegato C del d.lgs. 105/15 per l'analisi affidabilistica contenuta nei Rapporti di Sicurezza.

A ciò si aggiunga che talvolta si è osservato nei Rapporti di Sicurezza un utilizzo improprio e parziale dello standard nella prima revisione 2000, con il solo scopo di ridurre di un ordine di grandezza le frequenze generiche di rottura di apparecchiature e tubazioni, tenendo conto in modo generico delle procedure gestionali adottate nello stabilimento.

Tuttavia, se si utilizzano in modo mirato tecniche consolidate di analisi integrata del rischio, che tengano conto dell'efficacia del Sistema di Gestione della Sicurezza per ridurre la frequenza degli eventi iniziatori di TOP EVENT, certamente l'implementazione di un Piano di ispezione basato sull'analisi del rischio porterà a ridurre le frequenze associate alle principali cause di rottura, specie per rotture random (casuali), di apparecchiature e tubazioni.

Si può concludere che nell'estensione di un Rapporto di Sicurezza, effettuata ai sensi dell'all. C al d.lgs. 105/15, non è opportuno mutuare l'analisi affidabilistica utilizzata dallo standard API 581 [1,2], ma si potrà senz'altro tenere conto dei benefici derivanti dall'adozione di un efficace Piano di Ispezione basato sull'analisi del rischio nella determinazione dei ratei di rottura di apparecchiature e tubazioni.

5. Bibliografia

- [1] American Petroleum Institute (API). API Publication Base Resource Document 581 -Risk-Based Inspection; 2000.
- [2] American Petroleum Institute (API). API Publication 581 - Risk-based Inspection Methodology; 2016.
- [3] The Netherlands Organisation for applied scientific research (TNO). Guidelines for quantitative risk assessment. Purple Book. Dicembre 2005.
- [4] Health and Safety Executive (HSE). Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments, 2012.
- [5] EU Publications - I-RISK Main Report, I-RISK: A quantified integrated technical and management risk control and monitoring methodology, 2000.
- [6] M.F. Milazzo, G. Maschio e G. Uguccioni, The Influence of Risk Prevention Measures on the Frequency of Failure of Piping. IJPE, vol. 6, No.1, January 2010, pp. 19-33.
- [7] United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association (UKOPA). Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962 – 2016). February 2018.
- [8] European Petroleum Refiners Association, Concawe. Report n. 6/18. Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971.
- [9] European Gas Pipeline Incident Data Group. 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016).

La gestione dei reattori chimici in stabilimenti a rischio di incidente rilevante

R. Balistreri¹, I. Mazzarelli², G. Sferruzza³

¹ Inail - Uot di Cagliari

² Inail - Uot di Milano

³ Inail - Uot di Palermo

Sommario

Il lavoro si propone di fornire uno strumento di valutazione dei requisiti di sicurezza per l'esercizio di reattori chimici installati in stabilimenti RIR, in particolare quelli nei quali si eseguono reazioni esotermiche, che possono o meno essere divergenti.

Si è ipotizzato che in uno stabilimento di soglia superiore occorra effettuare l'installazione di un reattore chimico con introduzione di un nuovo scenario dovuto a reazione runaway, tale da configurare una modifica con aggravio di rischio ai sensi della normativa vigente. Nel caso in esame è stata considerata una reazione di sintesi che impiega sostanze infiammabili, tossiche e pericolose per l'ambiente. Tale reazione consiste in una copolimerizzazione composta da una prima fase di isomerizzazione ed una seconda fase di polimerizzazione che presenta caratteristiche esotermiche con processo svolto a pressioni superiori a 0.5 barg.

Facendo riferimento alla normativa vigente in materia di attrezzature ed insiemi a pressione ed alla Direttiva Seveso, verranno illustrati i corretti adempimenti relativi allo studio della modifica, l'analisi del rischio ed il riesame dei requisiti di sicurezza, la pianificazione specifica della formazione, l'installazione, il controllo operativo e le verifiche di esercizio e la manutenzione.

1. Il quadro giuridico e normativo. Adempimenti per la gestione della modifica

Lo stabilimento in esame è soggetto al d.lgs. 26.06.2015 n.105^[2] di attuazione della Direttiva 2012/18/UE e le sostanze pericolose sono presenti in quantità superiori alle quantità elencate nella colonna 3 della parte 1 dell'allegato 1 (soglia superiore).

Nell'ipotesi che l'introduzione del nuovo processo comporti una modifica con aggravio del preesistente livello di rischio ai sensi dell'allegato D del d.lgs. 105/15, il Capo III impone al gestore dello stabilimento di attuare quanto richiesto dall'art. 18, tra l'altro riesaminare ed aggiornare il sistema di gestione della sicurezza di cui all'art. 14 ed il rapporto di sicurezza di cui all'art. 15 (*di seguito rapporto*).

Tale rapporto è trasmesso in forma preliminare al Comitato Tecnico Regionale per l'avvio dell'istruttoria di cui all'art. 17, che si conclude con il rilascio di un nulla osta di fattibilità (NOF), atto che autorizza l'esecuzione impiantistica della modifica. Il gestore successivamente trasmette al CTR il rapporto definitivo, comprensivo delle valutazioni e dell'assolvimento alle eventuali prescrizioni formulate in fase preliminare. E' importante notare che il comma 7 dell'art. 17 indica la necessità da parte dei gruppi di lavoro incaricati delle istruttorie, soprattutto nella fase definitiva, di eseguire sopralluoghi tesi a garantire che i dati e le informazioni contenuti nel rapporto descrivano fedelmente la situazione del progetto di modifica e a verificare l'ottemperanza alle prescrizioni, pertanto le modifiche da realizzare si intendono autorizzate dopo la fase NOF, periodo durante il quale occorre realizzare l'impianto, ma non è possibile esercire le attrezzature fino a che il CTR non si esprime sul rapporto definitivo.

Trattandosi di processo in pressione le attrezzature impiegate sono soggette ai requisiti di

commercializzazione imposti dalla Direttiva 2014/68/UE recepita con le modifiche al d.lgs. 93/00, ed alle regole previste per la messa in servizio di cui al d.m. 329/04^[3].

Il comma 2 dell'art. 4 di tale decreto prescrive la verifica di messa in servizio o primo impianto, che riguarda l'accertamento della corretta installazione del reattore ed è finalizzata anche al controllo del funzionamento in sicurezza delle attrezzature. Il comma 4 dell'art. 4 consente la temporanea messa in funzione dell'attrezzatura ai soli fini di eseguire la verifica di primo impianto, che si conclude eventualmente con un verbale degli accertamenti. Tale fase non sembra ostacolata temporalmente dal procedimento tecnico/amministrativo della Seveso, tuttavia, qualora richiesta ed espletata prima dell'atto conclusivo dell'istruttoria, non dovrebbe riportare una autorizzazione alla messa in servizio, bensì richiamare lo stato dell'iter dell'istruttoria art. 17 d.lgs. 105/15, infatti solo dopo la conclusione di tale iter l'utilizzatore potrà adempiere a quanto richiesto nell'art. 6 del d.m. 329/04 riguardo la comunicazione di messa in servizio all'Inail.

Il rapporto deve dimostrare che il gestore ha individuato i rischi di incidente rilevante, adottato misure preventive e di limitazione delle eventuali conseguenze, messo in atto la politica della prevenzione ed il sistema di gestione. La progettazione, la costruzione, l'esercizio e la manutenzione di qualsiasi impianto, deposito, attrezzatura e infrastruttura, connessi con il funzionamento del nuovo processo e che hanno un rapporto con i pericoli di incidente rilevante nello stesso, devono essere sufficientemente sicuri e affidabili.

Il rapporto contiene almeno i dati di cui all'allegato 2 (*criteri, dati ed informazioni occorrenti per la redazione del rapporto di sicurezza*), tali dati includono l'adozione di misure specifiche in relazione ai diversi tipi di incidenti, la valutazione del rapporto da parte dell'autorità competente è condotta secondo i criteri della parte 3 dell'allegato C.

Un utile riferimento alla semplificazione del processo amministrativo è costituito dal comma 5 dell'art. 15 del d.lgs. 105/15, laddove è consentito di costituire parte del rapporto anche con la documentazione predisposta in attuazione di altre norme di legge, è questo il caso della documentazione prevista dal d.m. 329/04 e dalla circolare Ispesl 03/05 in materia di verifiche di messa in servizio di attrezzature in pressione, anche se per quanto si osserverà al punto 3 esistono elementi di differenza negli scopi e nei contenuti della documentazione stessa.

Nel caso in esame la documentazione relativa all'aggravio di rischio deve descrivere l'identificazione dell'impianto, la descrizione delle sostanze e loro caratteristiche, del processo dal punto di vista della sicurezza e del comportamento delle sostanze in condizioni normali ed anomale prevedibili, incluse le modalità operative, oltre alle condizioni nelle quali si può presentare l'incidente rilevante e le misure preventive proposte, l'identificazione e l'analisi dei rischi, le misure di protezione e di intervento per limitare le conseguenze dell'incidente rilevante.

Occorre focalizzare l'attenzione su quanto richiesto nell'allegato 2 ovvero è necessario fornire una descrizione dettagliata dello scenario (reazione runaway intesa come aumento di temperatura e pressione se del caso e possibilità di innesco di reazioni secondarie), una analisi storica con il riesame degli incidenti e degli eventi anomali occorsi in passato legati all'utilizzo delle stesse sostanze e degli stessi processi, la valutazione analitica della probabilità di accadimento o delle condizioni in cui tali scenari possono prodursi, corredata di una sintesi degli eventi che possono avere un ruolo nell'innescare ognuno di tali scenari (top event), ad esempio cause interne all'impianto principalmente di tipo operativo.

I contenuti del rapporto vanno completati con la valutazione dell'estensione e della gravità delle conseguenze (scenario) e lo studio di eventuali effetti domino interni e/o esterni, inclusa la descrizione dei parametri tecnici e delle attrezzature utilizzate per garantire la sicurezza degli impianti.

E' importante notare che in fase di comunicazione del rapporto preliminare la parte 2 dell'allegato C del d.lgs. 105/15 consente di non trasmettere le informazioni relative alla

politica ed alla struttura organizzativa, la descrizione dell'impianto in caso di indisponibilità delle reti di servizio (fatta eccezione per la HazOp), le precauzioni gestionali e la verifica di aree critiche ed obiettivi, il riesame della politica, i manuali operativi del processo; tutti questi dati devono essere forniti all'atto della consegna del rapporto definitivo.

Nelle ipotesi che lo stabilimento sia già dotato di un documento di politica ai sensi del d.lgs. 334/99, occorre effettuare un riesame del medesimo sulla base dell'allegato B ed in conformità all'allegato 3 del d.lgs. 105/15, inoltre il comma 7 dell'art. 14 impone l'obbligo di informazione, formazione, addestramento ed equipaggiamento di coloro che lavorano in stabilimento.

L'allegato 3 del decreto impone alcune procedure di sistema obbligatorie, qualora il Gestore abbia adottato anche la UNI 10617^[4], la norma, oltre a considerare le stesse procedure dell'allegato 3, ne prescrive altre come indicato di seguito alle lettere da d) a g):

- a) per l'identificazione e l'analisi dei rischi, che include l'identificazione e valutazione sistematica dei pericoli rilevanti derivanti dall'attività normale o anomala e l'individuazione delle misure di prevenzione e protezione dei rischi RIR;
- b) per il controllo operativo, inteso come funzionamento in condizioni di sicurezza, inclusa la manutenzione dell'impianto, dei processi e delle apparecchiature e per la gestione degli allarmi e le fermate temporanee; lo scopo è quello di ridurre il rischio di malfunzionamento del sistema e nel contempo attuare un monitoraggio e controllo del processo di reazione in modo efficace e coerente con l'analisi di rischio
- c) per la gestione della modifica (permanente o temporanea), finalizzata a programmare la stessa;
- d) per la gestione dei documenti di origine interna ed esterna (UNI 10617 e allegato B per il solo controllo operativo)
- e) per lo scambio di informazioni in caso di effetto domino esterno (UNI 10617)
- f) per l'identificazione e l'accesso alle prescrizioni legali ed alle norme volontarie adottate (UNI 10617)
- g) per l'informazione, il coinvolgimento e la comunicazione interna (UNI 10617)

Preme focalizzare l'attenzione sulla procedura di gestione della modifica in quanto maggiori dettagli sono riportati nell'allegato B del d.lgs. 105/15 e nel punto 4.4.8 della norma UNI 10617, in particolare sulla struttura e sui contenuti della procedura stessa. Scopo è quello di pianificare e valutare la modifica mediante i seguenti passaggi rigorosi: definizione della modifica, studio del progetto e scelta dei requisiti di sicurezza, informazione del RLS, analisi e valutazione del rischio, scelta e valutazione delle misure di prevenzione e mitigazione e riesame della progettazione e dei requisiti di sicurezza, definizione e riesame della documentazione di supporto (rapporto preliminare, documenti di progetto, P&I, manuali operativi, etc.), riesame dei fabbisogni formativi e di addestramento, riesame ed approvazione della modifica, descrizione e validazione dell'iter giuridico per l'aggravio di rischio richiamato dall'art. 18, stesura del rapporto di sicurezza definitivo ed eventuale riesame e validazione della progettazione in presenza di prescrizioni, pianificazione ed attuazione della modifica e riesame della fase di realizzazione in conformità al progetto incluso il collaudo finale, validazione dell'iter del rapporto definitivo incluso l'ottenimento delle verifiche Inail di cui al d.m. 329/04, comunicazione al personale e termini per attuazione del nuovo processo, comunicazione della messa in servizio art. 6 del d.m. 329/04, attuazione della informazione, formazione ed addestramento, avviamento.

2. Cenni sulle reazioni esotermiche

Si è accennato che l'allegato C del d.lgs. 105/15 individua criteri, dati ed informazioni per la redazione e la valutazione del rapporto preliminare e definitivo. Nel caso in esame occorre fornire una descrizione dettagliata del processo, delle sue tecnologie di base e

delle sostanze coinvolte (reagenti e prodotti di reazione), con riferimento ovviamente al Regolamento 1272/2008 CLP (allegando le schede di sicurezza), inoltre la descrizione delle sostanze che possono generarsi in caso di instabilità termica o perdita di controllo della reazione. Il processo deve essere descritto con riferimento anche all'impianto in esame inteso come strutture, sistemi ed apparecchiature. Riguardo lo schema a blocchi e la strumentazione, trattandosi di un reattore è sufficiente riferirsi al P&I, indicando per i fluidi i regimi di temperatura, pressione e portata nel funzionamento normale.

Il punto C.2.1 "*reazioni incontrollate*" impone di fornire informazioni atte a dimostrare che il gestore abbia identificato i pericoli di incidente rilevante connessi a reazioni esotermiche e/o difficili da controllare a causa dell'elevata velocità di reazione, specificando le condizioni alle quali esse possono divergere, desunte da conoscenze storiche e/o da letteratura o preferibilmente in base all'applicazione di metodi predittivi, ovvero dei risultati sperimentali di specifici metodi calorimetrici.

Occorre indicare le cinetiche di reazione, le necessità di efflusso, le sostanze secondarie prodotte ed i loro quantitativi (quantità di sostanze pericolose che possano significativamente prodursi a causa di una condizione anomala del processo tecnicamente prevedibile), anche ai fini delle analisi degli eventi incidentali, evidenziando le azioni impiantistiche e gestionali adottate al fine di garantire la sicurezza.

Analogamente i punti B.3.5.4 e B.3.5.5 chiedono di descrivere il comportamento chimico e/o fisico, nelle condizioni normali e/o anomale prevedibili di utilizzazione, con particolare riferimento alla suscettibilità a dare origine a fenomeni di instabilità, riportando la fonte dei dati/informazione, inoltre di descrivere le sostanze che possono originarsi per modificazione o trasformazione della sostanza considerata a causa di anomalie prevedibili nell'esercizio dello stabilimento, quali ad esempio le variazioni di condizioni di processo (temperatura, pressione, portata, rapporto stechiometrico dei reagenti, imperfetto dosaggio del catalizzatore, presenza di impurità o prodotti di corrosione, ecc.). E' esplicitamente chiesto di indicare i meccanismi di reazione, la cinetica chimica e le condizioni termodinamiche (calori di reazione, ΔT adiabatici, ecc.), riportando la fonte dei dati/informazioni.

Si intuisce che la completa conoscenza dei fenomeni chimici coinvolti nelle reazioni esotermiche condotte in batch (discontinue) e delle grandezze ad essi correlati, presuppone la conoscenza approfondita dei fenomeni di trasformazione chimica in atto, che talvolta impongono uno studio in scala del processo, al fine di determinare in maniera accurata i cosiddetti dati calorimetrici richiamati dal punto C.2.1. Tale studio costituisce la base per assolvere a tutti gli adempimenti finora citati, oltre ad assumere un passaggio sostanziale inderogabile per la corretta progettazione del processo e per l'analisi su come governare tecnologicamente lo stesso mediante l'insieme delle apparecchiature e dei sistemi impiantistici, nonché delle procedure gestionali del rischio. La progettazione degli impianti è fortemente influenzata dall'aspetto termodinamico e pertanto è di fondamentale importanza conoscere: caratteristiche della reazione o delle reazioni coinvolte nel processo di reazione esotermica, stabilità termica delle singole sostanze, comportamento della reazione dal punto di vista della determinazione dei calori in gioco e della loro incidenza sulla sicurezza e stabilità del sistema, cautele che appaiono in grado di scongiurare la perdita di controllo del sistema reagente.

Dal punto di vista puramente teorico occorre valutare la massima quantità di calore che una reazione può sviluppare e la massima velocità di generazione del calore, strettamente legata alla velocità di reazione. L'energia che si sviluppa per ottenere la trasformazione è influenzata invece dall'affinità dei reagenti "*n*" in gioco e dalla temperatura del sistema.

La velocità di reazione può essere espressa in 2.1, mentre la sua dipendenza dalla concentrazione dei reagenti in 2.2:

$$r_A = -\left(\frac{1}{V}\right) \frac{dn_A}{dt} \quad (2.1)$$

$$r_A = k \cdot C_A^n \quad (2.2)$$

dove n_A è il numero di moli del componente A in un certo istante, t è il tempo, V è il volume del sistema reagente, C_A la concentrazione molare della sostanza n_A/V in un determinato istante. La costante k , *costante di velocità di reazione*, è funzione principalmente della temperatura e dell'eventuale presenza di un catalizzatore e si può esprimere con l'equazione 2.3 di Arrhenius:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.3)$$

dove E è l'energia di attivazione, k_0 il fattore pre-esponenziale, R la costante universale dei gas. Vi è da notare che la reazione di sintesi di polimerizzazione radicalica non segue la legge di Arrhenius e quindi è suscettibile di accelerazione anche in condizioni isoterme (polimerizzazioni contenenti doppi legami). Dal punto di vista termodinamico l'energia interna del sistema, dipendente dalla temperatura, è data da 2.4, mentre l'entalpia ad una assegnata temperatura T^* è data da 2.5, infine in 2.7 è espressa legge di Hess che indica il calore finale sviluppato dalla reazione, negativo in caso di reazioni esotermiche:

$$\Delta U = Q + W \quad (2.4) \quad \Delta H_r^{T^*} = \Delta H_r^0 + \sum_v c_p (T^* - T^0) \quad (2.5)$$

$$\sum_v c_p = \sum c_p \text{prodotti} - \sum c_p \text{reagenti} \quad (2.6) \quad \Delta H_r = \sum H_f \text{prodotti} - \sum H_f \text{reagenti} \quad (2.7)$$

dove Q è la quantità di calore scambiata dal sistema, W è il lavoro scambiato dal sistema durante la trasformazione, ΔH_r^0 entalpia di reazione standard calcolata a $T^0 = 25^\circ\text{C}$, $p^0 = 1$ atm, c_p valor medio dei calori specifici tra le due temperature, ΔH_f l'entalpia standard di formazione.

Stabilito che le reazioni esotermiche hanno un ΔH_r negativo, l'esotermia è interessata da un equilibrio, ovvero è termodinamicamente favorita (tendenza al raggiungimento di massimo disordine), a seconda che rispettivamente la variazione di entropia ΔS sia minore o maggiore di 0, concetto legato all'energia libera di Gibbs G espressa in 2.8:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.8)$$

Legando ora i dati cinetici con quelli termodinamici otteniamo in 2.9 il *flusso di calore* q generato dalla reazione (quantità di calore prodotto nell'unità di tempo e di volume), parametro di fondamentale importanza nella valutazione di adeguatezza dei sistemi di controllo, sicurezza e protezione:

$$q = r \cdot \Delta H_r \quad (2.9)$$

In ultimo altri dati di fondamentale rilevanza da acquisire sono l'aumento adiabatico di temperatura ΔT_{ad} 2.10 che fornisce la stima della massima temperatura raggiunta in assenza di scambi termici ed arresto dell'agitazione, la velocità di produzione del calore Q in 2.11, il volume specifico dei gas che si sviluppano, la velocità di salita della pressione ed il suo valore massimo, le temperature di ebollizione e decomposizione delle sostanze.

$$\Delta T_{ad} = \frac{c_A \cdot \Delta H_r}{c_p \cdot \rho} \quad (2.10)$$

$$Q = r \cdot \Delta H_r \cdot V = q \cdot V \quad (2.11)$$

Lo studio della cinetica non prescinde dal calcolo del TMR (Time to maximum rate) che rappresenta il tempo necessario per raggiungere la massima velocità di reazione in condizioni adiabatiche, necessario per valutare la risposta dei sistemi di protezione e delle azioni umane in una analisi di rischio Seveso, riportato in 2.12 per reazioni fortemente esotermiche:

$$TMR = (R \cdot T^2) / (E \cdot \Delta T_{ad} \cdot k) \quad (2.12)$$

La reazione diventa divergente quando la velocità di produzione del calore è superiore alla velocità di rimozione dello stesso, quindi è essenziale progettare il sistema in maniera tale da assicurare punti di equilibrio stabile di tale condizione di scambio termico.

Nel caso in esame inoltre andrà valutato l'aspetto delle reazioni di decomposizione (o polimerizzazione), dette secondarie, e quindi bisogna confrontare la temperatura di innesco di tali reazioni T_{onset} che deve essere confrontata con la temperatura di processo e con la temperatura di innesco di reazioni secondarie delle specifiche sostanze in gioco e inoltre con la massima temperatura raggiunta dal sistema $T_{max}=T_r+\Delta T_{ad}$, dove T_r è la temperatura del processo.

Lo sviluppo di una reazione secondaria rappresenta quindi uno dei maggiori pericoli associati alla perdita di controllo della reazione primaria e pertanto la stima della pericolosità di un processo deve necessariamente passare attraverso lo studio della reattività e della stabilità termica delle sostanze che vi prendono parte.

A tale scopo è importante approfondire lo studio calorimetrico acquisendo il valore della massima temperatura T_f che può essere raggiunta dalla reazione in condizioni adiabatiche espressa in 2.13 dove X_{acc} è il grado di accumulo; tuttavia il valore di T_f ed X_{acc} variano durante la reazione in base alla velocità di aggiunta della miscela ed al tempo di reazione, pertanto si può calcolare con 2.14 la temperatura massima raggiunta dalla reazione MTSR in funzione anche della massa della miscela di reazione alla fine dell'aggiunta M_{Rf} e della massa della miscela di reazione al massimo di accumulo M_{Rmax} , il valore ottenuto deve essere poi confrontato con la temperatura di decomposizione delle sostanze per intuire il livello di criticità della reazione, infatti le reazioni più critiche sono quelle per le quali risulta MTSR maggiore della temperatura di decomposizione.

$$T_f = T_r + X_{acc} \cdot \Delta T_{ad} \quad (2.13) \qquad MTSR = T_r + X_{acc} \cdot \Delta T_{ad} \cdot \frac{M_{Rf}}{M_{Rmax}} \quad (2.14)$$

3. L'analisi di rischio: sostanze e processi

E' stato affermato che alla base del processo di analisi del rischio vi è l'analisi delle sostanze (utilizzate, prodotte e generate per deviazioni del processo) e l'analisi del processo secondo i criteri individuati nel punto 2. Le problematiche legate alla sicurezza nella conduzione di processi di reazione che avvengono con trasformazioni chimiche sono direttamente correlate alle caratteristiche dei reagenti impiegati e dei prodotti ottenuti, sia dal punto di vista delle rispettive proprietà chimiche, fisiche e termodinamiche sia sotto il profilo del rischio di infiammabilità, tossicità e pericolosità per l'ambiente, per le quali si fa riferimento alle schede di sicurezza di cui al Regolamento 1272/2008 ed a quanto già si è detto in particolare per i punti B.3.5.4 e B.3.5.5 dell'allegato C parte 1.

E' opinione personale che l'analisi di rischio, unitamente alla scelta dei sistemi di regolazione e protezione, deve mirare a realizzare un sistema tale che le reazioni siano condotte preferibilmente a probabilità di rischio runaway inferiori all'ordine di 10^{-6} .

La descrizione delle caratteristiche di pericolosità delle sostanze, della termodinamica e della cinetica del processo trovano punti in comune con l'introduzione all'analisi di rischio prevista dal d.lgs. 81/08 ed in particolare da quanto richiesto nella relazione tecnica di cui all'art. 6 del d.m. 329/04 e circolare IspeSl 03/05, tuttavia le finalità sono differenti in quanto quelle del d.m. 329/04 si limitano ad individuare i criteri di scelta e dimensionamento dei dispositivi di protezione e sicurezza di tipo attivo (termostati, pressostati, quenching, etc.) e di tipo passivo (valvole di sicurezza e dischi di rottura) per mantenere i parametri operativi entro i limiti ammissibili delle attrezzature (pressione, livelli e temperature). La relazione tecnica prevista dal d.m. 329/04, una volta descritti i dati termodinamici e cinetici della reazione elencati al punto 2, deve determinare analiticamente il flusso di calore Q nel caso di raggiungimento solo della temperatura di ebollizione per la presenza di solventi, mentre nel caso di reazione non controllata occorre considerare anche l'apporto termico dovuto all'esotermia massima. In ultimo occorre valutare per la reazione di polimerizzazione se la ΔT_{ad} , data dal rapporto tra il calore di

reazione ed il calore specifico della miscela, è tale da raggiungere la temperatura di decomposizione delle sostanze.

L'analisi di rischio Seveso invece è finalizzata a valutare qualitativamente e quantitativamente le probabilità di accadimento del top event "reazione runaway" intesa come aumento di temperatura e pressione in relazione alla decomposizione delle sostanze ed eventuale innesco di reazioni secondarie.

Tale analisi di rischio pertanto è basata innanzitutto sull'analisi storica incidentale e sull'individuazione di apparecchiature critiche (reattore e sistemi connessi), condotte rispettivamente secondo il punto C.1 e C.4 dell'allegato C al d.lgs. 105/15.

Il d.lgs. 105/15 non impone metodi per la valutazione del rischio, il punto C.4.1 indica la sequenza da adottare per l'analisi degli eventi incidentali, anche se è specificato che *"Il gestore effettua la scelta della metodologia di analisi da adottare con riferimento allo stato dell'arte in materia ed alle specifiche caratteristiche del proprio stabilimento e dei suoi rischi intrinseci"*. Si è dell'avviso quindi che l'analisi del rischio debba essere condotta mediante una analisi qualitativa di operabilità (HazOp), che individua le cause delle deviazioni di processo ed i rimedi connessi ai sistemi manuali ed automatici di controllo, regolazione e protezione (inclusa la sequenza incidentale), su analisi quantitative costituite da albero dei guasti e degli eventi (FTA/ETA - Fault and Event Tree Analysis), dove la prima considera la probabilità di parziale o mancato funzionamento dei singoli componenti del sistema e la seconda le affidabilità dei sistemi tecnici ed organizzativi atti a mitigare il top event, entrambe finalizzate ad esaminare probabilità e frequenze attese di accadimento degli incidenti. Ovviamente l'analisi di rischio è completata con la valutazione delle conseguenze che non sono oggetto della presente memoria. Il processo di analisi del rischio è di tipo sistemico e va applicata la procedura predisposta nell'ambito del sistema di gestione della sicurezza di cui all'allegato B del Decreto, ove è chiaramente specificato che l'analisi deve essere condotta in termini di probabilità e di gravità e documentata nell'ambito di un'analisi di sicurezza espletata secondo lo stato dell'arte, sia per le condizioni normali di esercizio sia per le condizioni anomale e per ogni fase di vita dell'impianto. L'espletamento di tali attività deve permettere la valutazione dell'idoneità delle misure di sicurezza adottate, oltre ad individuare le possibili aree di miglioramento.

Al punto 3.3.4 dell'allegato B è chiarito che l'analisi deve essere aggiornata qualora intervengano nuove conoscenze tecniche in materia di sicurezza, interne o esterne all'organizzazione, anche derivanti dall'esperienza operativa o dall'analisi di incidenti, quasi incidenti e anomalie di funzionamento o dal rilevamento di altri indicatori di invecchiamento delle apparecchiature.

In appendice 2 alla memoria, con riferimento alla sezione del P&I di appendice 1, è riportato lo stralcio dell'analisi HazOp relativa all'aumento di pressione e temperatura, naturalmente tale analisi va completata con le altre frasi relative alle variabili complessive del sistema, inclusa l'indisponibilità parziale o totale dei fluidi di servizio (elettricità, acqua, vapor d'acqua, azoto o aria compressa); in appendice 3 invece è riportato l'albero dei guasti per la frase alta temperatura.

E' importante rilevare che talvolta è possibile raggiungere una probabilità del top event "runaway" dell'ordine di 10^{-6} , solo mediante la separazione fisica del circuito di raffreddamento da quello di riscaldamento del reattore, disponendo di due linee separate di raffreddamento e/o su doppia intercapedine/serpentino, oltre a ridondare secondo analisi SIL conforme a IEC 61508/IEC 61511 i sistemi di sicurezza di temperatura e pressione; in alternativa occorre prevedere un sistema di quenching della reazione di tipo automatico o manuale. Nel caso non sia ipotizzabile la decomposizione non è necessario sviluppare l'albero degli eventi in quanto lo scenario ha una probabilità di accadimento inferiore a 10^{-6} , mentre nel caso di possibile decomposizione ed innesco di reazioni secondarie i dischi di rottura e/o le valvole di sicurezza vanno considerati come dispositivi

di mitigazione e quindi non contribuiscono ad evitare il fenomeno runaway, ma mitigano lo scenario e quindi vanno considerati nel solo albero degli eventi.

4. Il controllo operativo e l'analisi di affidabilità

Il punto C.6.1.1 dell'allegato C al d.lgs. 105/15 prescrive al gestore di descrivere nel rapporto i dispositivi di blocco e allarme, la strumentazione di sicurezza, le valvole di sezionamento telecomandate, etc., mentre il punto C.6.1.3 impone di riportare informazioni su controlli sistematici delle zone critiche, programmi di manutenzione e ispezione periodica, verifica di sistemi di sicurezza e blocchi, evidenziandone la congruenza con le risultanze dell'analisi di sicurezza, tale analisi secondo il punto C.6.3 deve essere valutata in condizioni normali, anomale, di prova, di avviamento, di fermata e per la fase di dismissione degli impianti.

L'allegato 3 del d.lgs. 105/15 descrive il controllo operativo come un'attività sistematica fondata su specifiche procedure, analogamente la UNI 10617 impone la redazione di procedure ed istruzioni operative. Il punto D.4 dell'allegato C relativo al rapporto di sicurezza impone che tali procedure/istruzioni siano congruenti con le risultanze dell'analisi di sicurezza, in particolare vanno considerate tutte le fasi del processo quali l'avviamento, l'esercizio normale, le fermate programmate, le fermate di emergenza, le procedure di messa in sicurezza, le fermate di prova e le condizioni anomale di esercizio. L'allegato B relativo al sistema di gestione specifica al punto 3.4.3 che tali procedure devono riguardare la conduzione e il controllo del funzionamento degli impianti in condizioni normali di esercizio, in condizioni anomale e di emergenza, tenendo in debito conto i fattori umani, al fine di assicurare la funzionalità delle interfacce fra operatori, processo e impianti, richiamando uno specifico punto della UNI 10617.

Tralasciando per motivi di sintesi i requisiti delle procedure sulla gestione della documentazione, nel punto 3.4.1 è altresì specificato che le procedure devono almeno riguardare le procedure operative (esercizio e manuali operativi), le procedure di manutenzione e di ispezione, l'approvvigionamento e le verifiche di preavviamento. La parte 3 dell'allegato C (criteri di valutazione dei rapporti di sicurezza), specifica che devono essere valutate le informazioni in merito alle misure adottate per il controllo operativo degli impianti, con particolare riguardo al controllo e gestione delle situazioni caratterizzate da valori dei parametri operativi considerati critici al di fuori degli intervalli standard. Tutto ciò si traduce per il gestore col dover predisporre un manuale operativo dell'impianto di reazione (serbatoi reagenti, reattore, condensatore, ribollitori, fiorentine, etc.), che, oltre a descrivere il processo, deve includere le modalità di conduzione nelle condizioni sopra indicate, facendo espresso riferimento alle apparecchiature critiche ed ai limiti operativi normali e massimi, ed ai set point dei dispositivi di protezione e sicurezza.

La norma UNI 10617 estende il concetto di pianificazione del controllo operativo includendo anche le attività di progettazione, costruzione, messa in esercizio, manutenzione e smantellamento, concetto reso più fumoso nel punto 3.4.3 dell'allegato B, ma maggiormente in linea con il d.lgs. 81/08 ed il D.M. 329/04.

Una fase basilare del controllo operativo è quella di verificare che gli elementi critici individuati siano inseriti nei programmi di manutenzione, di ispezione e di controllo periodici. Tali programmi devono essere stabiliti in funzione dell'affidabilità di tali elementi desunta dall'albero dei guasti (ratei e frequenze di guasto e probabilità); è sempre più diffuso l'impiego di analisi SIL che tengono conto di quanto sopra indicato e che sono aggiornate in relazione del tempo di vita o alle frequenze di guasto, specificate dai fornitori o stabilite in base all'esperienza di funzionamento, e ai risultati dei controlli precedenti. Nel caso in esame lo stralcio dell'analisi SIL per una catena di sicurezza è riportata in appendice 2.

La coerenza delle frequenze di controllo dei dispositivi di protezione e di sicurezza

individuate nell'analisi di rischio, generalmente rispondente anche a quanto richiesto dall'art. 71 comma 8 del d.lgs. 81/08 e s.m.i., deve essere verificata anche in relazione a quanto richiesto per le verifiche periodiche di attrezzature in pressione, come stabilito nel d.m. 329/04 e nel d.m. 11.04.2011, in particolare riguardo la verifica di efficienza di tali dispositivi. Infatti tali riferimenti legislativi dispongono che la priorità va data alle indicazioni fornite dal fabbricante, che eventualmente potrà specificare anche le modalità di tali controlli, in assenza di tali indicazioni andrà considerato come limite massimo la periodicità di verifica dell'attrezzatura (reattore) sulla quale sono installati tali dispositivi, che nel caso in esame è di due anni (allegato VII del d.lgs. 81/08, attrezzatura di IV categoria, fluidi del gruppo 1 di cui alla Direttiva 2014/68/UE).

5. La manutenzione

Il rapporto deve dimostrare che la manutenzione sia sicura ed affidabile (rif. Art. 15 d.lgs. 105/15 e punto C.6.1.3 allegato C), tale attività è parte del controllo operativo e quindi soggetta a specifiche procedure, secondo il punto 3.4.4 dell'allegato B i criteri e le procedure di manutenzione, ispezione e verifica devono essere predisposti in modo da garantire l'affidabilità e disponibilità prevista per ogni parte dell'impianto in congruenza con quanto assunto a base alla valutazione del rischio.

La norma UNI 10617 specifica che tale manutenzione deve essere di tipo preventiva, programmata (*preventiva e predittiva*) e a guasto (*run to failure*), inoltre deve essere assicurata la rintracciabilità di sistemi e componenti critici, mentre il punto 3.4.5. dell'allegato B impone regole per l'approvvigionamento di apparecchiature, materiali e servizi, rilevanti ai fini della sicurezza, in modo da garantire il permanere dei requisiti di sicurezza minimi di legge e congruenti con quanto assunto nella valutazione del rischio, anche attraverso l'esecuzione di verifiche di preavviamento.

E' bene distinguere l'attività di ispezione che si compone sostanzialmente di esami visivi (ad esempio corretta connessione di collegamenti elettrici dei dispositivi, tenuta meccanica, pulizia, etc.), dall'attività di verifica che include prove (ad esempio corretta misura dei dispositivi, prove di regolazione e portata, rumorosità dei cuscinetti degli agitatori, etc.). Tali attività consentono di definire con accuratezza la manutenzione programmata e riesaminare le cadenze stabilite nella manutenzione preventiva (ad esempio ingrassaggi, ripristino tenute e collegamenti elettrici, smontaggi componenti per interventi tecnici, etc.).

I metodi più validi per la definizione della manutenzione preventiva, che tengano conto delle frequenze di guasto e degli MTBF (*mean time between failures*) dei componenti, sono costituiti da tecniche RCM per l'individuazione degli elementi critici del sistema, abbinate a tecniche FMECA (*Failure Mode and Effects Criticality Analysis*). Il processo prevede di identificare e scomporre in sottosistemi l'apparecchiatura (ad esempio agitatori, strumentazione di controllo, di protezione, di regolazione, etc.), effettuare una analisi di criticità disponendo del numero di ordini per manutenzione a guasto di tali sottosistemi per tutti i reattori di stabilimento, ed assegnando indici di criticità maggiori ai dispositivi di prevenzione e protezione dell'evento e dello scenario (questa indicizzazione potrebbe non essere standardizzata). Successivamente andrebbe assegnato un peso specifico alla facilità di accesso o meno del sottosistema per la sua manutenzione ed alla possibilità di intervenire con impianto in marcia. L'ultima fase è la validazione degli indici di criticità assegnati con una analisi FMECA, che contempla la ricerca dei possibili modi e cause di guasto, la definizione dei potenziali effetti del guasto e della probabilità del guasto stesso. Si assegnano gli indici di gravità coerenti con l'analisi di rischio e si compensa con l'assegnazione di indici di rintracciabilità del guasto stabiliti nell'attività di verifica ed ispezione (esempio con autodiagnosi ed autocontrolli dei dispositivi), calcolando infine il RPN (*Risk Priority Number*) dato dal prodotto tra indice di probabilità, gravità e

rintracciabilità.

Gli elementi critici individuati devono essere inseriti nei programmi di manutenzione, di ispezione e di controllo periodici, in relazione alla loro affidabilità o al loro tempo di vita o alle frequenze di guasto, con analoghi principi già espressi per il controllo operativo.

Si rammenta che all'atto della predisposizione della procedure e delle istruzioni per il controllo operativo manutentivo, occorre considerare anche le attività nel lungo termine per i rischi legati all'invecchiamento delle attrezzature e alla corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso, la UNI 10617 meglio specifica sull'obbligo di adozione di un piano di integrità per la prevenzione degli incidenti rilevanti, che si allinea al concetto di perdita dell'integrità fisica delle strutture, cui può seguire una perdita di contenimento delle sostanze pericolose, come riportato nella parte 3 dell'allegato C.

6. Informazione, formazione ed addestramento

Il comma 7 dell'art. 14 del d.lgs. 105/15 impone al gestore di procedere alla informazione, formazione ed addestramento secondo le modalità indicate nell'allegato B, pertanto le necessità formative e di addestramento devono essere pianificate. La UNI 10617 specifica che il gestore deve identificare e verificare periodicamente le necessità formative, anche in relazione ai rischi di incidente rilevante, al fine di raggiungere i requisiti di qualifica professionale e capacità operativa. L'appendice 1 dell'allegato B indica ai gestori come ottemperare in maniera organica e programmata agli obblighi di informazione, formazione, addestramento, fermo restando i contenuti in argomento del d.lgs. 81/08 e del d.m. 10 marzo 1998, specificando che occorre predisporre una specifica procedura. E' bene ricordare che è insita nella definizione di informazione, formazione ed addestramento l'individuazione di scopi, modalità e strumenti differenti, infatti l'informazione è mirata a fornire conoscenze ed utilizza strumenti comunicativi rapidi e basati sul concetto che il personale abbia già acquisito livelli di base formativi e di addestramento sui rischi di incidente rilevante. La formazione ha un carattere teorico ed è finalizzata a trasferire conoscenze di base e/o approfondite, nonché di procedure ed istruzioni specifiche al fine di acquisire competenza per lo svolgimento in sicurezza dei rispettivi compiti in azienda e alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi di incidente rilevante. Infine l'addestramento ha un carattere pratico ed è orientato all'apprendimento dell'uso corretto di attrezzature, macchine, impianti, sostanze, dispositivi, anche di protezione individuale e collettiva, di procedure di lavoro, con particolare riferimento alle procedure di sicurezza e di emergenza. E' bene precisare che gli obblighi di informazione per i lavoratori dipendenti da terzi, ivi compresi i lavoratori di imprese subappaltatrici, ricadono sul gestore, mentre per l'assolvimento degli adempimenti relativi alla loro formazione ed all'addestramento, questi ricadono sui rispettivi datori di lavoro ed è sufficiente che il gestore effettui l'accertamento di avvenuta formazione mediante verifica della documentazione stabilita nell'ambito della procedura del sistema di gestione.

Nell'esempio adottato della modifica con aggravio di rischio per inserimento di un nuovo processo e nuove sostanze, con conseguente introduzione di nuovi scenari incidentali si possono sintetizzare le esigenze informative, formative e di addestramento per i lavoratori secondo la tabella 1 ricavata per il caso specifico in base alla tabella riportata nell'allegato B.

7. Conclusioni

Gli autori hanno evidenziato come l'installazione di un reattore chimico in un impianto RIR sopra soglia, con introduzione di un nuovo scenario dovuto a reazione runaway e tale da configurare una modifica con aggravio di rischio, prevede che il gestore si applichi in un approfondito studio del processo e dei rischi ad esso associati, stabilendo come dati di

input indispensabili i risultati degli studi calorimetrici della reazione, ciò al fine di stabilire opportuni requisiti di sicurezza. Oltremodo deve adottare specifiche procedure di gestione dell'impianto e del suo controllo operativo, nonché garantire un opportuno stato manutentivo. Tali procedure devono essere basate, oltre che sulle informazioni dei rispettivi fabbricanti delle attrezzature, anche su studi approfonditi legati alla FTA ed all'analisi SIL, ciò per assicurare l'affidabilità dei componenti e delle apparecchiature critiche, per assicurare quanto ipotizzato nell'analisi degli eventi e degli scenari ipotetici. Questo complesso processo di analisi e fattibilità tecnica-economica deve essere condotto nel rispetto delle procedure di autorizzazione da parte degli Enti preposti (VVF, ARPA, INAIL), che devono essere omogeneizzate con i regolamenti pertinenti le singole amministrazioni, ad esempio l'esercizio delle attrezzature in pressione.

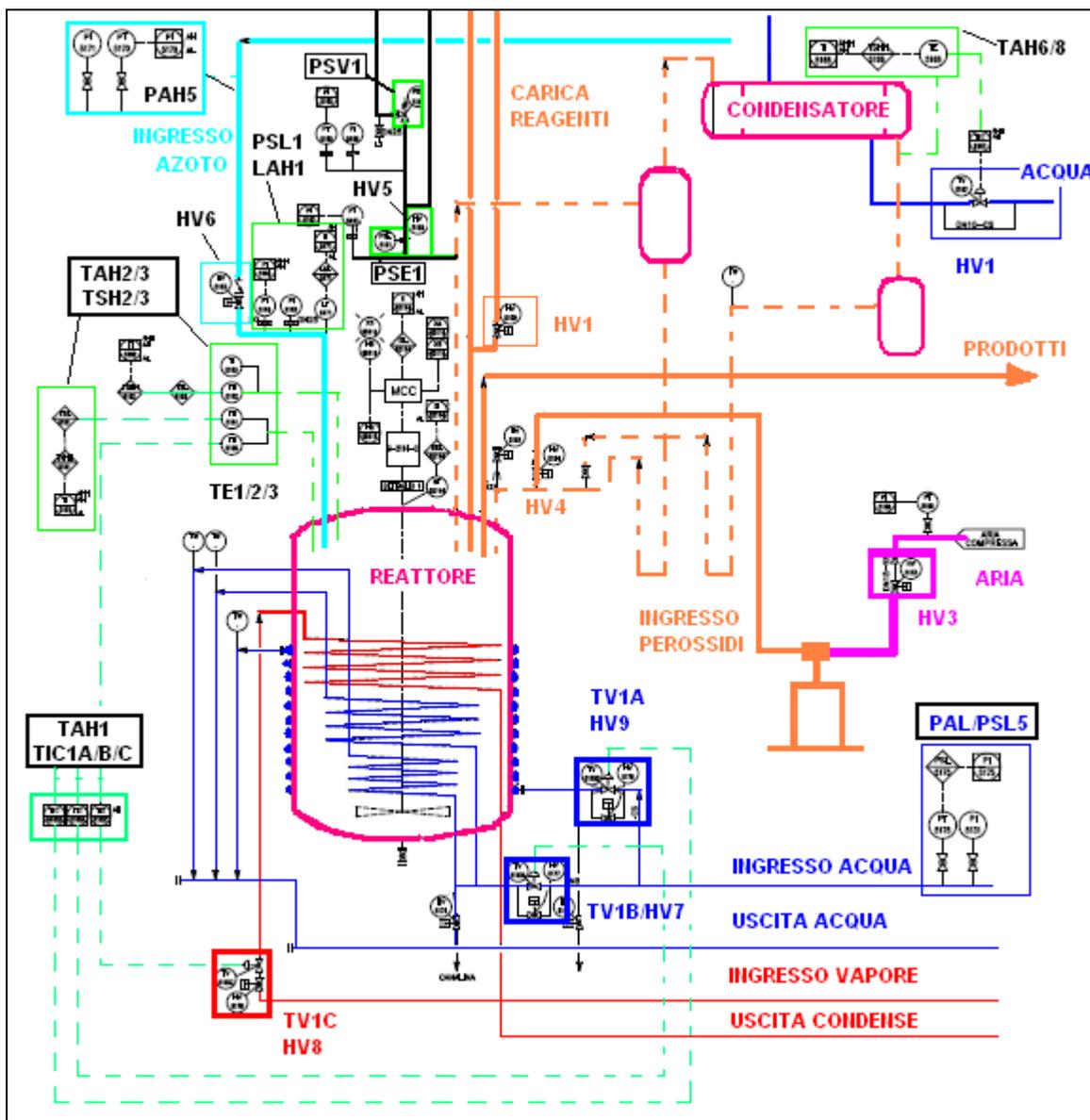
Fase	Argomenti	Modalità
Informazione con accertamento trimestrale della comprensione	Schede di sicurezza Analisi e scenari di rischio e aree di danno Misure di prevenzione e protezione Procedure di emergenza e comunicazione Manuale operativo (controllo operativo) Modifica delle procedure di sistema Notifica Documenti specifici del progetto di modifica	Trasferimento di documenti con accertamento di ricezione e consultazione (mail, bacheche, consegna diretta di documenti)
Formazione	Schede di sicurezza e decomposizione - Reazioni runaway - Analisi e scenari di rischio e aree di danno - Requisiti di sicurezza e apparecchiature critiche. Parametri che incidono sulla sicurezza individuale e collettiva - Condizioni normali ed anomale - Misure di prevenzione e protezione e segnalazione anomalie - Individuazione e comportamenti per i rischi specifici - Procedure di emergenza e comunicazione - Manuale operativo (controllo operativo e manutenzione) ed uso delle attrezzature - Modifica delle procedure di sistema Notifica - Utilizzo dei DPI	Corsi d'aula con verifica di apprendimento (test)
Addestramento effettuato prima dell'entrata in vigore della modifica	Uso simulato delle attrezzature e valutazione dei parametri che incidono sulla sicurezza individuale e collettiva Procedura di ispezione, controllo e manutenzione specifica Procedure di emergenza e comunicazione Manuale operativo (controllo operativo e manutenzione) ed uso delle attrezzature Utilizzo dei DPI	Esercitazioni pratiche e ripetute con: esecuzione simulata del processo con manovre esecuzione di procedure di emergenza prove d'uso di dispositivi di protezione

Tabella 1. Esempio di argomenti e modalità per l'informazione, formazione e addestramento

8. Bibliografia

- [1] ISBN 88-448-0270-8 – ANPA - Dipartimento Rischio Tecnologico e Naturale – Sicurezza dei reattori chimici – Stampa SPED Srl – Roma - 2000
- [2] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 - Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [3] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [4] Norma UNI 10617:2012 – Impianti a rischio di incidente rilevante – Sistemi di gestione della sicurezza – Requisiti essenziali

APPENDICE 1 –P&I semplificato del reattore e sintesi calcolo SIL (IEC61508/61511)



Il calcolo SIL secondo IEC61508 è stato condotto solo per una logica a titolo di esempio.

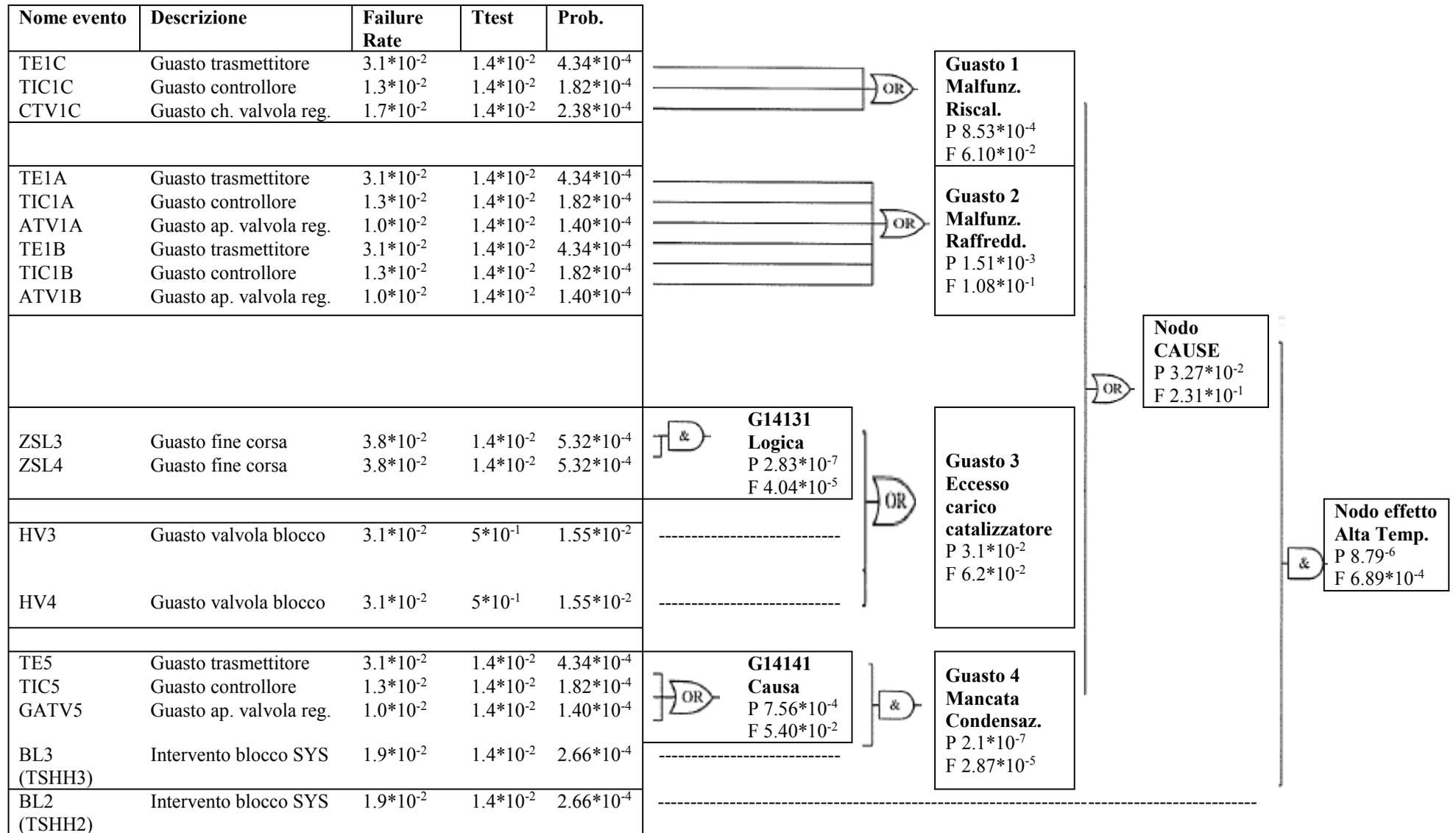
Parti del sistema	Proof test T1	Logica	PFD	SIL massimo	λt ($10^{-6}/h$)	Fs %	DC %	MTTR h	β %
Strumenti di misura	6	1su2	$5.79 \cdot 10^{-5}$	3	4	50	90	106	5
Logica PLC	5	NA	$2.36 \cdot 10^{-4}$	2	0.5	50	50	20	5
Azionatore 1	12	1su2	$1.93 \cdot 10^{-5}$	3	1	80	80	130	5
Azionatore 2	12	1su2	$1.01 \cdot 10^{-4}$	3	1	80	80	130	5
SIF GLOBALE			$4.14 \cdot 10^{-4}$	2					

APPENDICE 2 – Analisi HazOp

Sistema Reattore di sintesi		Disegno/P&I Appendice 1	Te (°C) 90-120	TS (°C) 175	Pe (barg) 0.25	PS (barg) 8	Ipotesi
Parola guida	Cause possibili	Conseguenze	Segnalazione	Interventi		Note	
Più pressione nel reattore	Errore operativo chiusura valvole manuali vapor line e ritorno condense OR- mancata apertura sfiato ad abbattitore OR-perdita polmonazione azoto OR-Rottura serpentino vapore e guasto riduttore vapore OR-guasto in apertura HV1 carico solventi OR-alto livello OR-rottura riduttore N2 o aria OR-aumento temperatura	Scoppio reattore Rilascio sostanza infiammabile/eco tossica/tossica	PAH1 set 2.5 PAH5 su N ² LAH1	PSH1 chiude HV3, HV4, HV6 ed apre HV5 sfiato rapido PSE1 PSV1	Eseguire FTA Calcolare domino se scenario è pari o superiore a 10 ⁻⁶ Montare PAH su aria	Top 01	
Più temperatura nel reattore	Errore operativo chiusura valvole manuali riciclo solvente e vapor line OR- mancata apertura TIC1A- TV1A e TIC1B-TV1B OR- mancata chiusura TIC1C- TV1C OR-mancata condensazione e riciclo sovente più caldo OR- mancata apertura ZSL3/HV3 e ZSL4/HV4	Scoppio reattore Rilascio sostanza infiammabile/eco tossica/tossica	TAH1 su vapore TAH2 TAH3 PAL5 su acqua TAH6/ TAH8 sfiati reattore	TSH2/ TSH3 chiudono HV3/HV4, aprono HV7/HV9 e chiudono HV8 ZSH3 chiude HV3/HV4 e chiude valvola HV8 PSL5 chiude HV3/HV4 e chiude valvola HV8	Eseguire FTA Calcolare domino se scenario è pari o superiore a 10 ⁻⁶		
Più temperatura nel reattore	Mancata apertura TIC1A-TV1A e TIC1B-TV1B AND mancata chiusura TIC1C- TV1C	Sovratemperatura per decomposizione termica* Possibile Runaway Esplosione termica reattore Rilascio sostanza infiammabile/eco tossica/tossica	TAH1 TAH2 TAH3 PAL5 su acqua	TSH2/TSH3 chiudono HV3/HV4, aprono HV7/HV9 e chiudono HV8 PSL5 chiude HV3/HV4 e chiude valvola HV8	Eseguire FTA Installare quenching se probabilità top è pari o superiore a 10 ⁻⁶	Top 02	

*Il sistema arriva fino alla temperatura di 225°C maggiore della temperatura di decomposizione che è di 217°C. La reazione di decomposizione produce esotermia con conseguente temperatura fino a 400°C

APPENDICE 3 – Albero dei guasti



Nota: Le valvole HV3-HV4 sono valvole a singolo effetto composte da controllore di portata ZSL con funzione di blocco

Come i risultati delle ispezioni possono migliorare la prevenzione degli incidenti chimici

S. M. Ansaldi¹, A. Pirone¹, M. R. Vallerotonda¹, C. Delle Site¹, P. Agnello¹

¹ Inail - Dit

Sommario

Il Decreto legislativo 26 giugno 2015, n. 105 di recepimento della Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) ha previsto una diversa articolazione delle attività di controllo negli stabilimenti; in particolare, l'introduzione di una ben definita pianificazione e programmazione delle ispezioni sul sistema di gestione della sicurezza, ha consentito di migliorare la periodicità delle stesse, tanto da garantire che tutti gli stabilimenti fossero ispezionati almeno una volta nel corso del triennio di riferimento. I documenti predisposti ed acquisiti dalle Commissioni ispettive nel corso delle campagne ispettive del triennio 2016-2018 rappresentano un importante patrimonio di informazioni. Nel presente lavoro sono presentate alcune elaborazioni, effettuate partendo dai documenti a disposizione, che mirano a valorizzare i contenuti della documentazione e a promuovere una certa "lungimiranza" nella prevenzione degli incidenti chimici. L'articolo presenta la metodologia per "estrarre conoscenza" dai documenti e la sua applicazione per supportare previsioni o intuizioni sulla sicurezza. I risultati ottenuti possono essere utilizzati per migliorare l'attività ispettiva, indirizzare le iniziative formative e individuare opportunità in relazione all'innovazione tecnologica.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni in Europa le direttive per il controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose (Direttive Seveso), hanno delineato un sistema complesso, ma ben strutturato, che comprende fasi definite (autorizzazione, controllo, verifica e pianificazione) ed il coinvolgimento di Autorità, normatori e organismi di controllo. Gli stabilimenti interessati dall'applicazione della legislazione Seveso, pur non costituendo un numero significativo nel panorama industriale, rivestono un ruolo strategico e significativo che richiede la definizione di misure mirate sia a livello tecnico che organizzativo e gestionale per fronteggiare i potenziali pericoli. Prevedere le situazioni di pericolo risulta, quindi, fondamentale. Tale "lungimiranza" può essere indubbiamente acquisita attraverso un'attenta analisi degli incidenti e dei quasi incidenti che si verificano in azienda.

L'approccio di studio utilizzato è generalmente noto; lo stesso database europeo degli incidenti rilevanti (e-MARS) nasce con la volontà di comprendere le cause di un incidente e fornire indicazioni utili sia ai gestori che alle Autorità competenti per reagire in maniera efficace a problematiche più o meno note. L'utilizzo di queste informazioni è, invece, più difficile qualora si vogliano anticipare i rischi, soprattutto quelli emergenti derivanti dagli sviluppi tecnologici, economici, sociali, organizzativi per i quali potrebbero rendersi necessari anche adeguamenti normativi di settore.

È noto che il potenziale informativo presente negli eventi è notevole e la gestione di quelli più significativi non è certamente un argomento nuovo nel settore dei rischi di incidenti rilevanti; numerose sono le ricerche riferite ai cosiddetti quasi incidenti (near miss), tra le quali rientrano le classificazioni e i modelli per l'analisi. Gnoni et al. (2013) hanno fornito un metodo per classificare i near miss calcolando la loro distanza dall'incidente o dal top event [1]. Questo metodo è adatto per misurare l'efficacia del sistema di gestione, come riportato da Andriulo et al. (2014) [2]. Un approccio più generale è proposto da Gnoni et Saleh (2017), in cui i near miss sono classificati e interpretati alla luce di un sistema di principi di sicurezza

[3]. Zhou et al. (2017), invece, propongono un metodo per l'analisi dei quasi incidenti basato sulla teoria delle reti complesse [4].

Un ulteriore modo per valorizzare le informazioni può essere quello di individuare i cosiddetti segnali deboli di un sistema, ovvero lievi anomalie rispetto al normale funzionamento, o i casi e le situazioni che, da un'analisi complessiva della documentazione a disposizione, risultano più ricorrenti in modo da poter intervenire in anticipo rispetto al verificarsi di un evento incidentale. Tale approccio è quello che caratterizza il presente lavoro nell'ambito del quale sono considerati i cosiddetti "common beliefs" per indicare i quali si utilizzerà il termine "convinzioni" al fine di indicare l'insieme di informazioni note che si ritrovano anche in eventi nuovi, la cui elaborazione, da parte di esperti, consenta di evidenziare la correlazione con nuovi pericoli.

Il punto di partenza è la documentazione che viene raccolta nel corso delle ispezioni condotte a livello nazionale negli stabilimenti "Seveso" di soglia superiore per verificare l'adeguatezza del sistema di gestione della sicurezza per il controllo del pericolo di incidenti rilevanti (SGSPIR).

Il decreto n. 105/2015 ha distinto una fase di pianificazione ed una di programmazione per lo svolgimento delle ispezioni. Gli insediamenti industriali da sottoporre a verifica ordinaria sono inseriti dai Comitati Tecnici Regionali all'interno di un programma annuale che viene redatto sulla base di un piano triennale, predisposto a cura del Ministero dell'Interno con il supporto dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA), riguardante tutti gli stabilimenti di soglia superiore siti nel territorio nazionale (articolo 27, comma 3). In attuazione di quanto sopra, il piano nazionale delle ispezioni in corso fa riferimento al triennio 2016-2018 e alla sua conclusione sarà possibile disporre della documentazione relativa a tutte le aziende, prodotta nel corso delle ispezioni e raccolta in maniera sistematica.

Nel presente articolo viene discussa una metodologia che permette di valorizzare il potenziale conoscitivo di questi documenti. Nel paragrafo 2 è riportato l'obiettivo del lavoro, i paragrafi 3 e 4 descrivono rispettivamente i documenti utilizzati e la metodologia proposta per la gestione degli stessi. Nel paragrafo 5 sono presentati i casi studio cui è stata applicata la metodologia per verificare aspetti di pericolo, sia emergenti che noti, certi o ipotizzabili, nelle industrie chimiche italiane. Le conclusioni sono riportate nel paragrafo 6.

2. Finalità e obiettivi

La finalità del presente lavoro è mostrare come le informazioni presenti nella documentazione acquisita dai membri delle Commissioni ispettive nel corso delle ispezioni Seveso possano essere utilizzate per aumentare la capacità dei gestori e dei soggetti coinvolti nei processi decisionali per la prevenzione degli incidenti chimici di andare oltre l'evidenza degli eventi occorsi. Pertanto, l'obiettivo più ambizioso, e forse audace, è individuare le informazioni "nascoste" nei documenti ovvero quelle che non sono immediatamente visibili attraverso una lettura di tipo tecnico o settoriale. Per fare ciò è stato necessario definire una nuova chiave di lettura attraverso la quale si riuscisse a comprendere il potenziale informativo dei documenti delle ispezioni, opportunamente organizzati, estraendo la conoscenza attraverso ricerche mirate.

3. I documenti delle ispezioni "Seveso"

Il riferimento per la pianificazione, la programmazione e lo svolgimento delle ispezioni, ai sensi dell'art. 27 del D.lgs. 105/2015, è l'allegato H; in particolare, l'appendice 2 riporta i criteri e le procedure da seguire per la loro conduzione, descrivendone in maniera dettagliata le singole fasi. Nel corso della prima giornata di ispezione la Commissione deve acquisire dal gestore la seguente documentazione:

- le schede dell'analisi dell'esperienza operativa, di cui alla parte II - sezione 2 dell'allegato H del decreto;
- la tabella "Eventi incidentali - misure adottate" di cui alla parte II - sezione 4 dell'allegato H del decreto;
- la lista di riscontro di cui all'appendice 3 del decreto sugli elementi del sistema di gestione della sicurezza.

Questi documenti, predisposti sulla base di format forniti al gestore precedentemente all'ispezione, rappresentano il punto di partenza per lo svolgimento dell'attività ispettiva e, insieme ai riscontri sugli elementi che sostanziano il sistema di gestione della sicurezza, sono il riferimento per la redazione del rapporto finale di ispezione.

Per chiarire quali sono gli elementi a disposizione dell'analisi che si vuole condurre si riporta una descrizione sintetica dei contenuti di tali documenti.

Le schede dell'esperienza operativa rappresentano una raccolta degli eventi occorsi nello stabilimento, ed in impianti analoghi, nel corso dei dieci anni precedenti all'anno di ispezione. Il gestore deve riportare un evento per ogni scheda con le informazioni identificative (numero di riferimento, data, titolo), una breve descrizione dell'evento occorso, i sistemi tecnici critici, i fattori gestionali coinvolti e le misure di prevenzione e protezione attuate.

La tabella "Eventi incidentali - misure adottate" è il documento in cui il gestore dell'impianto riporta gli eventi incidentali ipotizzati nel Rapporto di sicurezza. Per ogni scenario incidentale sono indicate le misure attraverso le quali prevenire, controllare e limitare le conseguenze di un eventuale incidente nonché i sistemi tecnici, organizzativi e gestionali per prevenire l'evento ipotizzato, oltre che i dati utili per la ricostruzione dell'evento al fine di seguirne l'evoluzione.

Gli elementi fondamentali del SGSPiR, come definiti nell'allegato B del decreto, sono analizzati attraverso l'utilizzo della lista di riscontro. Durante l'ispezione, il format compilato viene analizzato e discusso con il gestore e/o i rappresentanti aziendali. Per ognuno dei punti della lista sono riportati i riscontri indicativi, ma non esaustivi, del SGSPiR rispetto ai quali la Commissione può considerare l'opportunità di approfondimento e/o integrazione. La lista di riscontro è un riferimento essenziale per la redazione del rapporto finale di ispezione (RFI) elaborato dal team degli ispettori. Il RFI oltre a contenere gli elementi richiesti dal mandato ispettivo e gli aspetti strettamente legati sia ad adempimenti previsti dal decreto sia agli esiti delle precedenti verifiche ispettive, riporta i dettagli sullo stabilimento e sul sito, sulla movimentazione delle sostanze pericolose, sul processo, sull'organizzazione aziendale e sulle procedure di emergenza. Inoltre, nel rapporto sono indicati i riscontri effettuati dalla Commissione sugli elementi del SGSPiR con l'indicazione degli eventuali rilievi, delle evidenze acquisite e delle eventuali raccomandazioni e/o proposte di prescrizione formulate.

A partire dalla campagna ispettiva del 2016, per ogni ispezione negli stabilimenti di soglia superiore, l'Inail-Dit raccoglie sistematicamente i documenti sopra descritti al fine di perseguire obiettivi di ricerca specifici e condividere le informazioni con gli addetti del settore. Sulla base delle ispezioni concluse, è ad oggi possibile disporre di una notevole quantità di documentazione; nello specifico, tali ispezioni hanno reso disponibili circa 1000 schede dell'analisi dell'esperienza operativa per anno.

4. Metodologia

L'insieme dei documenti precedentemente descritti è stato organizzato in un repository; la maggior parte di questi si riferisce alle schede dell'esperienza operativa che hanno costituito il nucleo del lavoro svolto, rappresentando al contempo la più ampia raccolta sia per tipologia di impianti che di eventi accaduti. Proprio per la numerosità e varietà di casi si è

potuta applicare la metodologia basata sulla misura della distanza tra una query di ricerca ed una serie di eventi con caratteristiche di similarità, come descritta di seguito. Le informazioni si riferiscono agli eventi significativi così come definiti nel paragrafo 1 dell'allegato H del D.lgs. 105/15. Per valorizzare le informazioni riportate nelle schede è stata elaborata una metodologia per "estrarre conoscenza" dal repository. La Figura 1 mostra il diagramma di flusso del metodo.

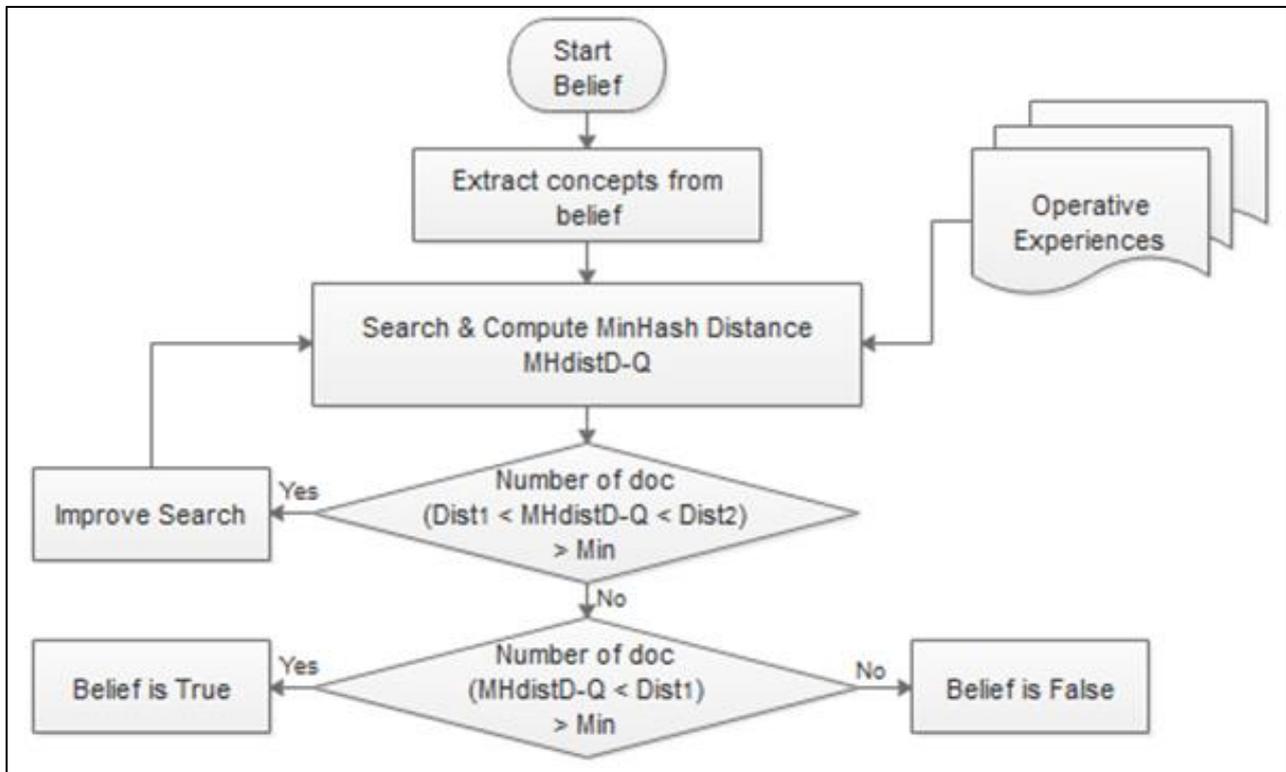


Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata

La metodologia inizia con la raccolta concetti considerati comuni, forniti dagli stessi ispettori o da un team di esperti per uno specifico argomento. Gli argomenti possono riguardare aspetti di carattere tecnico, ad esempio un'apparecchiatura, un impianto o un dispositivo, ma estendersi anche ad aspetti diversi come, ad esempio, le condizioni meteo.

La procedura illustrata nella figura 1 rappresenta una struttura generale, le attività principali e i tipi di condizioni sono di seguito descritti in modo completo.

La prima attività consiste nell'estrarre quei concetti che meglio rappresentano una convinzione o un'opinione comune, tali argomenti sono stati ipotizzati dagli ispettori o dal team di esperti.

Il metodo applicato è la ricerca avanzata e semantica che include il controllo automatico di sinonimi, composti, ridondanze e dipendenza dal contesto. Lo strumento adottato è IBM OmniFind ©, che ha molte funzionalità di ricerca tra cui la generazione di riepiloghi automatici, basati su parole chiave di input e il calcolo della somiglianza semantica [5]. Come descritto da Ansaldi et al. (2016) [6], la vicinanza dei documenti, rispetto alla query utilizzata per la ricerca, adotta un algoritmo basato su "min-hash", definito come segue:

$$P_{D-Q} = \left(\frac{K^D \cap K^Q}{K^D \cup K^Q} \right) \quad (1)$$

in cui $P_{(D-Q)}$ è la vicinanza di un documento D rispetto alla query Q; K^D e K^Q sono le parole chiave individuate, rispettivamente, nel documento D e nella query Q dal motore di ricerca. In base alla vicinanza, la distanza $MHdist_{(D-Q)}$ è definita come complementare:

$$\text{MHdist}_{D-Q} = 1 - P_{D-Q} \quad (2)$$

Nella figura 1, il primo test è effettuato sulla distanza $\text{MHdist}_{(D-Q)}$ che viene confrontata con le misure Dist1 and Dist2 ; esse sono le misure, nello spazio delle frasi, che definiscono rispettivamente l'area di pertinenza e la zona in cui non è possibile prendere una decisione, la cosiddetta area grigia. L'area di pertinenza contiene quei documenti che sono appropriati alla ricerca.

Se il numero di documenti è significativo, un insieme di risultati è qualificato per essere un cluster di una determinata zona. Quindi, il primo controllo della procedura, illustrato nella Figura 1, corrisponde a verificare se il numero di documenti trovati nell'area grigia è maggiore di un parametro Min . Se si verifica questa condizione, significa che c'è un numero rilevante di documenti contenenti alcuni dei concetti inseriti nella ricerca, ma tutti sono piuttosto "lontani" dall'obiettivo di ricerca. Pertanto, la clausola di ricerca necessita di alcune revisioni, come ad esempio aggiungere nuovi concetti o l'utilizzo di sinonimi. Questo processo di miglioramento dell'attività di ricerca può essere ripetuto più volte, fino a quando il numero di risultati nella zona grigia diventa irrilevante, cioè inferiore a Min . Nell'applicazione dei casi il parametro Min ha valore uguale a 3, ciò significa che uno o due documenti (su un dominio di circa 1000 documenti) non sono sufficienti per giudicare la validità della clausola, se è una convinzione vera o falsa oppure un argomento che merita di essere approfondito in relazione al contesto "Seveso".

Il secondo test della procedura riportata in Figura 1 significa che i documenti nella zona di rilevanza vengono contati al fine di verificare se il loro numero è maggiore del limite ipotizzato (Min). In caso affermativo, la clausola di ricerca inserita è valida (la convinzione/l'ipotesi è vera), perché si è già verificata nei siti industriali. Al contrario, cioè se la risposta è negativa, si può dedurre che l'espressione cercata non riguarda il dominio dei documenti raccolti. Il valore "falso" è un risultato che va riferito al repository così come strutturato nel momento in cui si esegue la ricerca, quindi il risultato potrebbe cambiare in seguito all'inserimento di ulteriori documenti disponibili a valle delle ispezioni future.

La Figura 2 semplifica graficamente il significato dei risultati delle due prove sopra descritte.

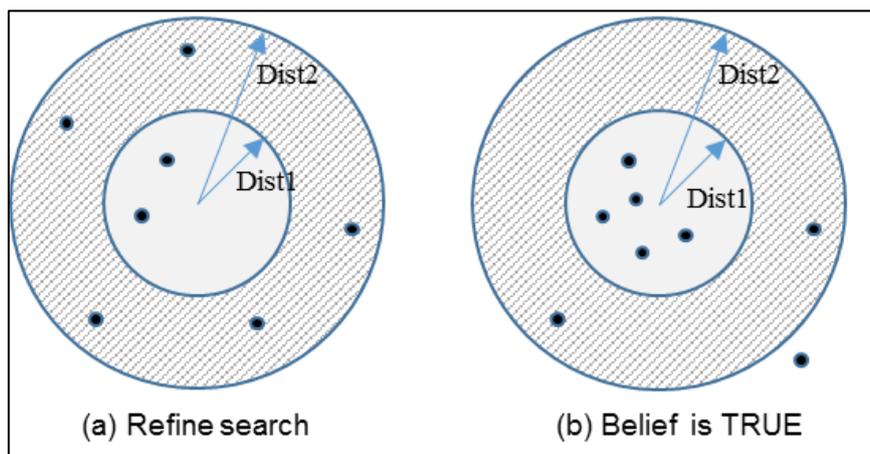


Figura 2. Schema grafico delle condizioni per raffinare la ricerca (a) o confermare la validità della convinzione (b).

In entrambe le immagini, il cerchio bianco è l'insieme dei documenti che sono in stretta prossimità con la convinzione/argomento cercati, mentre il cerchio più esterno corrisponde alla zona grigia. Pertanto, il caso illustrato nella Figura 2 (a) rappresenta le condizioni non certe e richiede che si effettuino ulteriori sforzi e miglioramenti per trovare concetti più appropriati per le operazioni di ricerca. La seconda situazione, mostrata nella Figura 2 (b),

significa che la convinzione che è stata sottoposta ad esame ha frequenze rilevanti nelle schede dell'esperienza operativa presenti nel repository e pertanto si può considerare vera.

5. Ricerche su alcune “convinzioni” comuni

L'applicazione della metodologia descritta nel paragrafo precedente ha coinvolto alcuni degli ispettori Inail, tra cui gli autori. Il test della metodologia è stato eseguito sui documenti raccolti nel corso delle campagne ispettive 2016 e 2017; al momento, i documenti disponibili coprono due terzi degli stabilimenti Seveso di soglia superiore presenti in Italia.

La ricerca è iniziata con un confronto tra gli ispettori per individuare quali fossero le convinzioni più comuni. Gli argomenti presi in considerazione spaziano dall'aggiornamento tecnologico alle esigenze di sicurezza; oltre ai rischi emergenti, sono state anche verificate alcune situazioni che in linea di massima si potrebbero considerare “mature” ovvero che normalmente non ci si aspetterebbe di ritrovare come causa di un evento sia dal punto di vista tecnico (è il caso della manutenzione delle attrezzature) che della normale gestione delle attività lavorative.

Di seguito sono riportate le convinzioni esaminate (*Cerca*) ed i risultati ottenuti (*Risultato*), sia in forma discorsiva che tabellare. Le tabelle da 1 a 4, presenti nei relativi sotto paragrafi, riportano i risultati delle ricerche evidenziando il valore di prossimità, l'identificazione del documento e i riepiloghi dinamici. I riepiloghi sono stati riportati eliminando le informazioni esplicite eventualmente riconducibili alle aziende. I diversi colori evidenziano le parole chiave corrispondenti ai diversi concetti cercati.

5.1 Il sistema di misurazione e indicazione del livello

Cerca: Come analizzato da Ansaldi et al. (2016) [6], a causa del loro mancato o errato funzionamento questi dispositivi sono ancora coinvolti nelle segnalazioni di quasi incidenti, pur rappresentando una configurazione ben nota ed avendo un utilizzo consolidato [7]. È, quindi, comune la consapevolezza e la convinzione che l'installazione dei sistemi di misurazione del livello sia necessaria e che il loro funzionamento e la loro corretta manutenzione svolgano un ruolo importante nella sicurezza delle apparecchiature.

Risultato: Quattro documenti attestano l'assenza del dispositivo, ma tutti si riferiscono ad un periodo non recente (2005-2013) e ad attrezzature che contengono acque reflue. Le esperienze operative riguardanti malfunzionamenti di misuratori/indicatori di livello applicati ad apparecchiature atmosferiche sono 16; tutti i casi riportano la fuoriuscita ed il rilascio di sostanze pericolose. Di queste esperienze, in 5 casi sono intervenute le barriere protettive messe in campo per mitigare le conseguenze dell'evento ovvero il bacino di contenimento ed i rilevatori di esplosività a causa dello sviluppo di una notevole quantità di vapori.

La tabella 1 indica i risultati di 2 esperienze operative che hanno riguardato problemi di sovrappressione; nello specifico entrambe, anche se in modo diverso, riportano un malfunzionamento del dispositivo.

Nel caso A.01 a causa del sovra riempimento due sostanze sono venute in contatto provocando un surriscaldamento e, quindi, l'aumento della pressione.

Nel caso A.02, il malfunzionamento del dispositivo ha causato il sovra riempimento di un recipiente che non era stato completamente scaricato, provocando un aumento di pressione. In entrambi i casi sono intervenute le barriere protettive, rispettivamente il disco di rottura e la valvola di sicurezza.

Prox	ID	Risultati
0.90	A.01	Fuori servizio livello...A causa del malfunzionamento del livello si è verificato il sovrariempimento dell'apparecchio Dxxx, con interessamento della linea di polmonazione e ingresso del XXX nell'apparecchio Dxxx contenente il YYY ...Il contatto tra le due sostanze ha causato il surriscaldamento e il conseguente incremento di pressione, con intervento della valvola di sicurezza ...
0.85	A.02	Intervento del disco di rottura delle colonne di abbattimento sfiati del reattore. Causa malfunzionamento del livello radar il reattore non ha scaricato completamente e, riempiendosi con la ripresa successiva, causava il riempimento e la rottura del disco di rottura per alta pressione...

Tabella 1. Casi di malfunzionamento di misuratori e indicatori di livello

5.2 La corrosione

La corrosione degli impianti e delle attrezzature è un problema molto importante che è stato indicato in maniera esplicita anche nella nuova Direttiva Seveso III. Il meccanismo si manifesta soprattutto con il degrado e la rimozione del materiale di superficie di un componente e comporta, tra gli effetti più comuni, l'assottigliamento (generale o localizzato) del materiale stesso. La gestione di tale fenomeno è affidata a controlli specifici, a verifiche ed ad attività di manutenzione. Il fenomeno, in linea di massima, è tenuto sotto osservazione dai gestori degli impianti, ma si ritiene che continui a determinare problemi e a rappresentare la causa di eventi incidentali. Infatti, in più di 60 esperienze operative sono stati trovati riferimenti a problemi causati dalla corrosione ed, in tutti i casi, viene evidenziata la carenza dei controlli e della scarsa manutenzione. Di seguito sono riportate due situazioni specifiche: la corrosione sotto coibentazione e l'errata progettazione e/o la messa in posa delle attrezzature.

Cerca: La corrosione sotto la coibentazione indica il fenomeno corrosivo delle tubazioni, dei serbatoi o di altre attrezzature che si verifica in presenza di acqua al di sotto del materiale isolante. Il fenomeno è conosciuto, ma si vuole verificare se si manifestano ancora eventi incidentali legati a questa causa e con quali conseguenze.

Risultato: I risultati, elencati nella tabella 2, riportano il fenomeno di corrosione esterna, con conseguenza di perdita di sostanze pericolose, in cui sono coinvolte tubazioni o recipienti coibentati. Non si evince un preciso riferimento alla presenza di acqua come causa della corrosione, ma in B.01 e B.02 si indicano esplicitamente dei problemi al rivestimento (*danneggiamento*) e alla guaina (*scollata*), da cui deriva l'importanza di controlli più accurati della condizione del rivestimento.

Prox	ID	Risultati
0.90	B.01	Perdita dalla linea ex-aspirazione, in servizio gasolio, in un tratto interrato al di sotto della recinzione. A seguito delle ispezioni effettuate, la causa riscontrata è la corrosione esterna in corrispondenza di danneggiamento localizzato del rivestimento bituminoso della tubazione ...
0.90	B.02	Fuoriuscita di ipoclorito dal serbatoio. La rottura per corrosione non era prevedibile ...In seguito è stato verificato che la guaina interna si era scollata, lasciando passare la soluzione sul metallo esterno, e provocandone la corrosione e la formazione di un foro ...
0.65	B.03	Perdita di GPL da presa inferiore del livello del recipiente. Dai rilievi di ispezione effettuati è emerso che le cause dell'evento sono da attribuire a "corrosione sotto coibente" del tronchetto della presa di livello inferiore; tutti gli altri componenti ispezionati sono risultati in condizioni prive di particolari criticità ...

Tabella 2. Casi di corrosione sotto coibentazione

Cerca: La progettazione e la messa in posa delle attrezzature può rendere difficoltoso il controllo della corrosione; la ricerca ha estrapolato i documenti che possono rilevare la

correlazione suddetta. Le informazioni ottenute sono utili nel caso in cui il gestore implementi successive modifiche impiantistiche.

Risultato: I risultati, riportati nella tabella 3, mostrano che nelle schede analizzate il fenomeno della corrosione può essere legato alla mancata e/o errata manutenzione delle attrezzature (controlli dello spessore del mantello dei serbatoi o delle tubazioni, dello stato delle coibentazioni), ad un'analisi dei rischi poco efficace oppure ad una errata progettazione e/o posa in opera delle stesse.

Ciò è più evidente nel caso C.14 in cui l'errata progettazione è relativa all'utilizzo di una tubazione di materiale non compatibile con la sostanza da trasportare. Nei casi C.05 e C.04, invece, la corrosione dell'attrezzatura non è stata gestita poiché non rilevata a causa dell'accesso difficoltoso da parte degli operatori nella zona in cui si è manifestata. In entrambi i casi le tubazioni interessate erano ubicate in cunicoli che non consentivano un accesso agevole al personale che avrebbe dovuto effettuare i controlli.

Infine, l'evento C.15 evidenzia che l'attrezzatura è stata aggredita da corrosione a causa di un'errata posa in opera della struttura di sostegno della stessa a fronte della quale non è stato effettuato un controllo dello stato.

Prox	ID	
0.75	C.14	Perdita di vapori di acido cloridrico. ... verificata una perdita di vapori di acido cloridrico dal tubo di adduzione dell'acqua della guardia idraulica ... è stato verificato che la causa della perdita era dovuta alla corrosione del tubo di adduzione in acciaio... sostituito il tubo : da acciaio a polietilene. ... Mancati controlli dello stato di corrosione ...
0.66	C.05	Rilascio per rottura da fessurazione dell' oleodotto 16". ... il personale addetto ai normali controlli notava una iridescenza da idrocarburi sulla superficie dell'acqua la causa del rilascio di OCD ¹ è nella fessurazione per corrosione dell' oleodotto ... cunicolo di contenimento dell' oleodotto ... Difficoltà nell'effettuazione delle ispezioni in cunicolo...
0.66	C.04	Modesto sversamento di OCD in torrente. Modesta fuoriuscita di OCD dall' oleodotto da 12" La perdita si è determinata a causa del cedimento di una delle selle di appoggio dovuta a corrosione tra la parte inferiore dell' oleodotto e la sella di appoggio con relativo imbarcamento della tubazione e conseguente fessurazione... Difficoltà di effettuazione delle ispezioni in quanto non presenti punti agevoli di verifica...
0.57	C.15	Fuoriuscita olio combustibile dal serbatoio di stoccaggio X. Fessurazione alla base del serbatoio per mancanza o danneggiamento della sigillatura del trincarino sul basamento del serbatoio che ha provocato infiltrazione e ristagno di acqua piovana con conseguente innesco di corrosione . La fuoriuscita è rimasta circoscritta nel bacino di contenimento del serbatoio Fallimento delle procedure di manutenzione e controlli di qualità in ingresso...

Tabella 3. Casi di progettazione e posa in opera di attrezzature

5.3 Dischi di rottura

Cerca: I dischi di rottura fanno parte delle barriere di sicurezza poste a protezione dei recipienti in pressione ed hanno la funzione di impedire che un improvviso aumento di pressione, tra l'interno e l'esterno del recipiente su cui sono montati, lo danneggi o, nei casi peggiori, lo faccia esplodere. La ricerca si è focalizzata sulle cause esterne al processo che possono comportare una sovrappressione del recipiente e, perciò, l'attivazione del disco di rottura. Tra le cause è stata ipotizzata la mancanza di tensione.

Risultato: I tre documenti trovati, elencati nella tabella 4, riportano che in tutti i casi il disco di rottura si è attivato e che il suo funzionamento è correlato in origine ad una mancanza di tensione. In particolare, nei casi D.01 e D.03 l'interruzione di energia elettrica è stata dovuta ad un corto circuito, nel caso D.02 ad un evento atmosferico. In due casi su tre, la mancanza

¹ OCD Olio Combustibile Denso.

di tensione ha inficiato sul funzionamento dei reattori presenti nello stabilimento facendo aumentare la pressione degli stessi e facendo intervenire i dischi di rottura sulle linee dedicate. In tutti i casi, inoltre, l'impianto elettrico non risultava ben protetto. Nel caso D.02 l'evento esterno (*forte temporale*) è stato indicato come causa della mancanza di tensione e l'attivazione del disco di rottura ha determinato una perdita di prodotto. Nello stesso caso è evidente la mancata attuazione di adeguate procedure di gestione, oltre che l'assenza di un impianto di cogenerazione idoneo a far fronte alle interruzioni di alimentazione elettrica. L'insieme di queste condizioni ha comportato il blocco di tutte le attività dello stabilimento.

Sim.	ID	
0.90	D.01	Rottura PSD sul reattore R1. Rottura di un disco di rottura, sul reattore R1, causato da un cortocircuito ... L'interruzione di tensione ha generato la sovrappressione sul reattore XX, con conseguente rottura del PSD a protezione dello stesso ...
0.90	D.02	Mancanza di EE e apertura del disco di rottura del reattore R9. I reattori in sintesi non manifestavano problemi, solo il reattore R9 andando in condizione di alta pressione vedeva correttamente l'intervento del dispositivo di protezione (disco di rottura) e il rilascio di circa 1000 kg di prodotto a BD3 ...La causa è stata individuata in un evento esterno (forte temporale) che ha determinato il blackout elettrico e contemporanea fermata per guasto precedente del cogeneratore in fase di manutenzione ...
0.67	D.03	Rottura PSD sul reattore R1. Rottura di un disco di rottura, sul reattore R1, causato da un cortocircuito ... Dopo aver riarmato il termico di una pompa XX, si è verificato un cortocircuito che ha fatto intervenire le protezioni elettriche a monte determinando il fuori tensione di una sezione d'impianto ...

Tabella 4. Casi di attivazione disco di rottura per mancanza di tensione nell'impianto

6. Risultati

I casi descritti rappresentano un esempio di come la documentazione raccolta nel corso delle ispezioni consenta di effettuare delle prime ricerche evidenziando aspetti che, attraverso un confronto incrociato, assumono un significato diverso rispetto alla lettura dell'evento riportata dal gestore nel format dell'esperienza operativa.

La tabella 5 rappresenta una sintesi delle ricerche effettuate a fronte di assunzioni iniziali che si è ipotizzato essere delle convinzioni comuni.

Nella tabella sono riportati la convinzione iniziale, cosa è stato estratto dal repository ed una breve descrizione degli eventi.

Convinzione	Risultati della ricerca	Descrizione
Malfunzionamento di misuratori e indicatori di livello	<ul style="list-style-type: none"> • Funzionamento fallito o errato • Mancanza del dispositivo 	Fuoriuscita di sostanze pericolose dovuta a sovra riempimento in seguito ad aumento della pressione. Il misuratore/indicatore di livello non ha funzionato o ha funzionato in maniera errata, sono intervenute le misure protettive.
Corrosione: carenza di controlli e scarsa manutenzione	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosione sotto coibentazione per presenza di acqua al di sotto del materiale isolante 	Perdita di sostanze pericolose in cui sono coinvolte tubazioni o recipienti coibentati in seguito a danneggiamenti del rivestimento o scollamento della guaina.
	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosione in seguito a progettazione e posa in opera di attrezzature 	Danneggiamenti delle attrezzature a causa di analisi dei rischi inadeguata (utilizzo di materiale non compatibile con la sostanza), mancata e/o errata manutenzione delle stesse attrezzature non facilmente raggiungibili dal personale addetto ai controlli.
Attivazione del disco di rottura per cause esterne	Mancanza di tensione nell'impianto	Sovrappressione in seguito a mancanza di tensione principalmente a causa di impianti non protetti o inadeguati.

Tabella 5. Sintesi dei casi studio

I risultati mostrano in maniera evidente che aspetti ormai considerati consolidati o soggetti a numerosi studi ed analisi, si presentano ancora come criticità di tipo tanto tecnico che gestionale e rappresentano problematiche ricorrenti per le quali sono necessari miglioramenti ed approfondimenti.

È il caso del funzionamento dei misuratori/indicatori di livello (in un caso addirittura assenti, se pur in un solo caso da contestualizzare comunque alla ricerca effettuata), della carenza dei controlli e della scarsa manutenzione delle attrezzature. Questo aspetto, critico e ben noto agli ispettori Seveso coinvolti nelle attività di controllo del SGSPiR, è stato confermato dai risultati della ricerca effettuata a più ampio spettro su documenti specifici relativi ai near miss. Pertanto, questo argomento deve essere ulteriormente approfondito non soltanto nel corso delle ispezioni, ma anche attraverso strumenti diversi che mirino ad aumentare la consapevolezza dei gestori in tutte le fasi di gestione dell'impianto.

Per quanto riguarda la corrosione, è stata analizzata attraverso ricerche specifiche che hanno evidenziato la necessità di indagare aspetti non strettamente connessi all'evolversi del fenomeno ma che risalgono ad aspetto di carattere progettuale e gestionale.

La ricerca sui dischi di rottura, invece, rappresenta un esempio interessante di come, partendo da una convinzione di carattere generale, come il verificarsi di cause esterne, si possano ottenere informazioni specifiche su un aspetto non noto o che non si pensava fosse significativo, come nel caso dell'interruzione di tensione che si è dimostrato essere abbastanza ricorrente. Nel merito, inoltre, è doveroso evidenziare le criticità, sia di tipo gestionale che tecnico, riguardanti gli impianti di energia elettrica.

7. Conclusione

È noto che l'analisi dell'esperienza operativa si sostanzia nell'insieme di informazioni che si traducono nell'identificazione delle barriere tecniche, operative e gestionali (procedure/istruzioni operative) che sono correttamente intervenute per arrestare l'evolversi dell'evento o che non hanno funzionato o sono risultate assenti.

La ricerca presentata è in una fase iniziale, ma gli esiti delle applicazioni descritte possono essere considerati esplicativi del potenziale conoscitivo presente nei documenti delle ispezioni. Analisi più raffinate saranno disponibili man mano che il numero di documenti sarà maggiore.

I risultati rappresentano un'utile dimostrazione di come le ricerche possano essere effettuate per argomenti specifici, non strettamente tecnici, ma anche di carattere gestionale ed organizzativo. In questa fase, si deve tenere conto del fatto che i documenti raccolti non includono gli stabilimenti Seveso di soglia inferiore, sottoposti ugualmente ad ispezione del SGSPiR, che sono presenti sul territorio nazionale in numero quasi uguale a quelli di soglia superiore e che costituiscono, quindi, un bacino informativo di pari importanza e rilevanza. Va evidenziato, inoltre, che le convinzioni proposte sono state raccolte attraverso interviste informali; successivamente si potrà pensare ad un metodo strutturato per ottenere le intuizioni e, quindi, le ipotesi di ricerca da gruppi di esperti.

Le informazioni che è possibile trarre dall'approccio descritto potranno essere di supporto nell'attività di ispezione per l'individuazione di eventuali criticità, ma anche di indirizzo nell'attività di formazione per il miglioramento continuo in azienda.

Attualmente la volontà di dare rilevanza alla documentazione "Seveso" ed, in particolare all'esperienza operativa è stata posta all'attenzione del Coordinamento nazionale ex art. 11 del D.lgs. 105/15 nell'ambito del quale è stato proposto un gruppo di lavoro costituito da rappresentanti di Enti e Amministrazioni competenti con lo scopo elaborare indicazioni operative specifiche per gli addetti del settore.

8. Bibliografia

- [1] Gnoni, M. G., Andriulo, S., Maggio, G., Nardone, P. (2013). Lean occupational” safety: an application for a near-miss management system design. *Safety science*, 53, 96-104.
- [2] Andriulo, S., Gnoni, M. G. (2014). Measuring the effectiveness of a near-miss management system: An application in an automotive firm supplier. *Reliability Engineering & System Safety*, 132, 154-162.
- [3] Gnoni, M. G., & Saleh, J. H. (2017). Near-miss management systems and observability-in-depth: Handling safety incidents and accident precursors in light of safety principles. *Safety science*, 91, 154-167.
- [4] Zhou, C., Ding, L., Skibniewski, M. J., Luo, H., & Jiang, S. (2017). Characterizing time series of near-miss accidents in metro construction via complex network theory. *Safety science*, 98, 145-158.
- [5] OmniFind www.ibm-omnifind-yahoo-edition.en.softonic.com
- [6] Ansaldi S., Agnello P., Bragatto P., 2016, Incidents triggered by failures of level sensors, *Chemical Engineering Transactions*, 53, 223-228 DOI: 10.3303/CET1653038.

Attività di controllo nel settore del GPL e GNL: risultanze delle analisi condotte sulle istruttorie tecniche e sulle ispezioni SGS per alcuni stabilimenti a rischio di incidente rilevante

R. Marrazzo¹, F. Vazzana¹

¹ Ispra - Servizio per i Rischi e la Sostenibilità Ambientale delle Tecnologie, delle Sostanze Chimiche, dei Cicli Produttivi e dei Servizi Idrici e per le Attività Ispettive

Sommario

Il presente articolo ha per oggetto le risultanze emerse dall'analisi delle attività di controllo, svolte dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e dal Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) nell'ambito dell'attuazione del d.lgs. 105/2015, implementazione italiana della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti (c.d. "Seveso III"), su alcuni stabilimenti nazionali del settore del GPL (Gas di Petrolio Liquefatto) e del GNL (Gas Naturale Liquefatto).

Sono in particolare presentate le principali conclusioni delle valutazioni dei Rapporti di Sicurezza (RdS) e delle ispezioni sui Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS) condotte su alcuni casi-studio appartenenti alle seguenti tipologie di attività industriali:

- stoccaggio e distribuzione cittadina di GPL;
- stoccaggio sotterraneo di GPL;
- azienda di stoccaggio multi-sito di GPL;
- terminale di stoccaggio e rigassificazione di GNL.

Sono quindi fornite alcune estrapolazioni circa le criticità riscontrate, del settore del GPL e del GNL, in merito alle conformità delle attività di controllo di:

- valutazione dei RdS, da un punto di vista strutturale, organizzativo e di completezza documentale;
- ispezioni SGS, in termini di attività di training, controllo operativo e gestione dell'emergenza.

1. Introduzione

L'Ispra, nell'ambito del SNPA, è coinvolta ed impegnata nelle attività di valutazione e controllo ambientali afferenti, tra gli altri, ai settori della prevenzione dei RIR, in attuazione del d.lgs. 105/2015 (recepimento italiano della direttiva 2012/18/UE, c.d. Seveso III) [1].

Per le attività concernenti le direttive Seveso e relativa attuazione italiana, l'Ispra, in qualità di organo tecnico previsto dal d.lgs. 105/2015, fornisce supporto tecnico-scientifico al Ministero dell'Ambiente e delle Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) mediante: lo sviluppo di criteri e metodologie per l'analisi della sicurezza di sistemi industriali complessi, per la valutazione delle conseguenze di incidenti rilevanti, per la valutazione integrata del rischio industriale ed ambientale nelle aree critiche per complessità e/o elevata concentrazione di attività e sostanze pericolose; la partecipazione ad attività a carattere internazionale (EU; OECD; cooperazioni bilaterali); il coordinamento tecnico e le attività di indirizzo delle agenzie regionali per la protezione ambientale (ARPA), nell'ambito del SNPA; la collaborazione con altre Autorità ed organi tecnici competenti nel settore della sicurezza dei rischi industriali (Ministero Interni; Dipartimento Protezione Civile; Ministero Infrastrutture).

L'Ispra procede inoltre alla implementazione e gestione dell'inventario nazionale degli stabilimenti RIR e relativi data base, ai sensi dell'art. 5 c. 3 del decreto in parola, ed in particolare quelli riguardanti la raccolta delle informazioni sulle procedure e sugli esiti di

valutazione dei RdS, secondo l'art. 17 c. 4 del d.lgs. 105/2015, e sulle ispezioni. Con riferimento a questo ultimo aspetto, tra gli altri, il SNPA ISPRA/ARPA effettua ispezioni sui SGS degli stabilimenti RIR su base regolare, ai sensi dell'art. 27, per consentire un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione applicati nello stabilimento al fine di prevenire gli incidenti rilevanti o limitarne le conseguenze, oppure a seguito di un incidente rilevante, ai sensi dell'art. 26 del d.lgs. 105/2015, ai fini della raccolta e comunicazione alla Commissione europea di informazioni previste specificatamente dalla direttiva.

2. L'oggetto dell'analisi

2.1 Il settore del GPL e del GNL: la situazione italiana

Le sostanze pericolose GPL e GNL sono comprese tra le sostanze previste nell'Allegato 1 – Parte 2 del D. Lgs. 105/2015, ovvero le c.d. "sostanze pericolose specificate", secondo le seguenti soglie quantitative che comportano l'assoggettabilità agli obblighi previsti per gli stabilimenti di SI - Soglia Inferiore e di SS - Soglia Superiore (Fig. 1).

Colonna 1	Numero CA9	Colonna 2	Colonna 3
Sostanze pericolose		Quantità limite (t) ai fini dell'applicazione dei:	
		Requisiti SI	Requisiti SS
18. Gas liquefatti infiammabili, categoria 1 o 2 (compreso GPL), e gas naturale	---	50	200

Figura 1. Soglie di assoggettabilità del GPL e del GNL

Assumendo una densità media per il GPL e per il GNL pari rispettivamente a 530 kg/m³ e 460 kg/m³, è possibile stimare approssimativamente i seguenti requisiti di assoggettabilità: SI: 94 m³ (GPL) / 109 m³ (GNL); SS: 377 m³ (GPL) / 435 m³ (GNL).

Per quanto riguarda la situazione italiana, relativamente agli stabilimenti soggetti al D. Lgs. 105/2015, secondo i dati aggiornati al 30/06/2018 presenti nell'Inventario nazionale degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante [2], si evince la presenza di 1000 siti soggetti (480 di SI e 520 di SS), dei quali risultano: 251 siti appartenenti al settore del GPL (produzione, imbottigliamento, distribuzione e stoccaggio); 5 siti appartenenti al settore del GNL (stoccaggio, rigassificazione e distribuzione) [3].

L'intero settore del GPL e del GNL rappresenta un quarto degli stabilimenti RIR del Paese (ca. il 25%), una fetta rilevante della realtà produttiva italiana, come del resto indicato nella figura seguente, in cui sono riportati i settori industriali principali soggetti al D. Lgs. 105/2015 (Fig. 2).

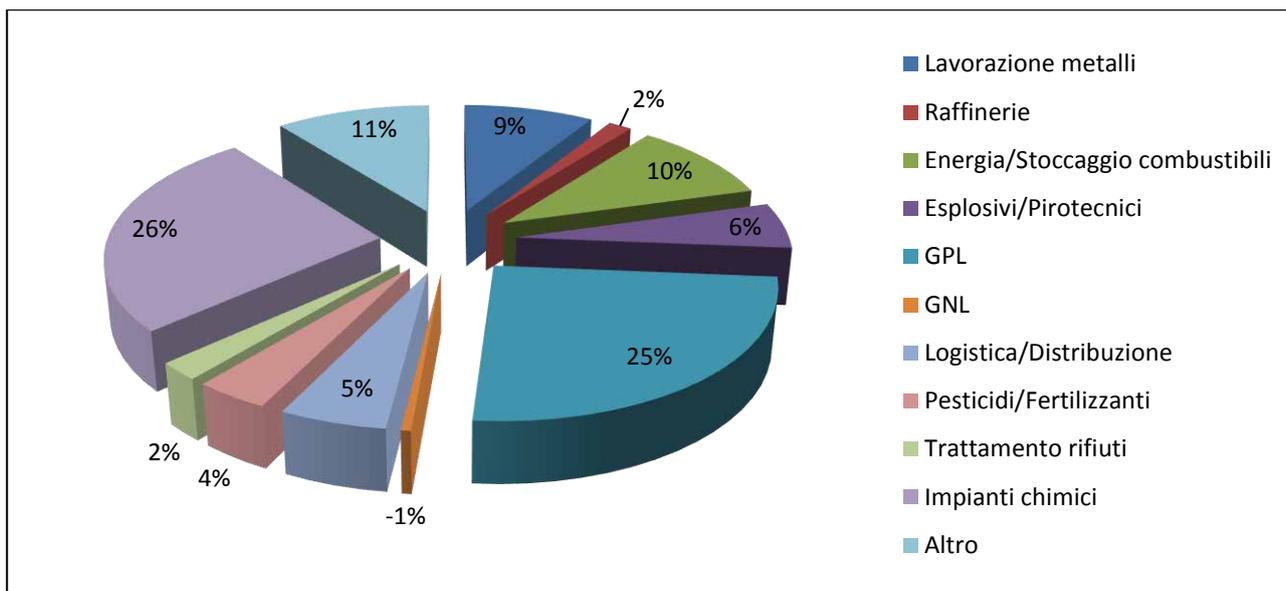


Figura 2. Stabilimenti Seveso: la situazione italiana

2.2 Stabilimenti del settore del GPL e del GNL soggetti all'analisi: un campione di alcune tipologie nazionali

Ai fini dell'analisi condotta sulle risultanze delle istruttorie tecniche sui RdS e delle ispezioni SGS, nell'ambito del settore del GPL e del GNL, è stato selezionato un campione di n. 5 stabilimenti appartenenti ad alcune tipologie comuni di installazioni nazionali, di cui si riportano, nel seguito, le caratteristiche funzionali principali:

- Deposito di GPL e distribuzione cittadina (300 t di GPL in inventario)
 - ricezione di GPL tramite ATB (20 t) attraverso compressori;
 - stoccaggio di GPL (propano/butano/miscela) in serbatoi ricoperti;
 - possibilità di miscelazione di GPL mediante il trasferimento interno di prodotto tra serbatoi;
 - vaporizzazione di GPL tramite vaporizzatori ad acqua calda e odorizzazione;
 - riduzione di pressione a distribuzione cittadina di GPL mediante pompe.
- Deposito sotterraneo di GPL (22.000 t di GPL in inventario)
 - ricezione di GPL tramite navi refrigerate (3.000 t – 21.000 t) attraverso le pompe di bordo;
 - riscaldamento e misurazione del prodotto;
 - stoccaggio di GPL in serbatoi sotterranei (caverne in uno strato di argilla);
 - denaturazione ed odorizzazione del GPL estratto dai serbatoi sotterranei;
 - invio di ATB (22 t) e ferrocisterne (45 t) per la distribuzione;
 - trasferimento di GPL agli stabilimenti vicini.
- Deposito di GPL di compagnia multi-sito – n. 2 siti (400 t di GPL, in media, in inventario)
 - ricezione di GPL tramite ATB attraverso compressori;
 - stoccaggio di GPL (propano/butano/miscela) in serbatoi fuori terra e/o ricoperti;
 - imbottigliamento di GPL in bombole e relative attività di manutenzione;
 - caricamento di ATB di GPL mediante pompe e invio di mezzi e bombole per la distribuzione.
- Terminale di stoccaggio e rigassificazione di GNL offshore (120.000 t di GNL in inventario)
 - Ricezione del GNL, mediante navi refrigerate, attraverso pompe di bordo e bracci di carico;

- Stoccaggio criogenico del GNL in serbatoi ancorati a terra per gravità (GBS – Gravity Based Structure);
- Rigassificazione del GNL a GN tramite vaporizzatori ad acqua di mare (ORV – Open Rack Vaporizers) e scambiatori glicole-acqua (WHR - Waste Heat Recovery);
- Invio e misurazione del GN a terra mediante pipeline sottomarina (c.a. 15 km).

3. I controlli nazionali sugli stabilimenti RIR: le istruttorie tecniche sui RdS

3.1 Risultanze tecniche delle attività di gestione dell'inventario nazionale

Per quanto riguarda i controlli sugli stabilimenti RIR nel settore del GPL e del GNL, nel presente capitolo sono sintetizzate le risultanze tecniche delle attività di controllo riportate nell'inventario degli stabilimenti nazionali [4], strumento già previsto in regime di attuazione del precedente decreto di recepimento della direttiva Seveso II (art. 15 c. 4 del D. Lgs. 334/99 e s.m.i.) [5], aggiornate a tutto il periodo di vigenza del decreto in parola.

Nell'ambito delle attività connesse alla procedura per la valutazione del Rapporto di Sicurezza (RdS), ai sensi dell'art. 17 c. 4 del D. Lgs. 105/2015, si è proceduto ad estrapolare una serie di informazioni e dati, tratti dagli atti adottati dai Comitati Tecnici Regionali (CTR), al fine di riportare le principali criticità emerse in occasione dei controlli in tema di istruttorie del RdS nel settore del GPL e del GNL.

Si rammenta, al riguardo, che nell'atto che conclude l'istruttoria del RdS, il Parere Tecnico Conclusivo (PTC), sono indicate le valutazioni tecniche finali, le eventuali prescrizioni integrative e, qualora le misure adottate dal gestore per la prevenzione e per la limitazione delle conseguenze degli incidenti rilevanti siano nettamente insufficienti, è disposta la limitazione o il divieto di esercizio.

3.2 Tipologia di prescrizioni emesse in occasione delle istruttorie tecniche sui RdS

L'analisi condotta sugli atti connessi alla valutazione dei RdS di stabilimenti del settore del GPL e del GNL, ha permesso di estrapolare una serie di spunti tecnici di interesse circa la tipologia di prescrizioni emesse in occasione dei PTC in seguito alla chiusura delle istruttorie per il campione selezionato di n. 5 stabilimenti appartenenti alle 4 tipologie comuni di installazioni nazionali su menzionate [6].

Si ritiene utile premettere una tabella esplicativa (Fig. 3) circa le risultanze tecniche, in termini di distanze di danno connesse agli scenari incidentali ipotizzati nei RdS, emerse a conclusione delle istruttorie in oggetto.

STABILIMENTI	SCENARI E DISTANZE DI DANNO (m)										
	LIVCE (bar)			Flash Fire (-)		Jet Fire (kW/m ²)			Pool Fire (kW/m ²)		
	I (0.3)	II (0.07)	III (0.03)	I (LFL)	II (% LFL)	I (12.5)	II (5)	III (3)	I (12.5)	II (5)	III (3)
Deposito di GPL e distribuzione cittadina				70	110						
Deposito sotterraneo di GPL	360	370	450	260	350	150	160	170	70	70	70
Deposito di GPL di compagnia multi-sito				70	110	40	50	70			
Terminale di stoccaggio e rigassificazione di GNL				290	420	60	100	130	20	40	60

Figura 3. Scenari e distanze di danno

Con specifico riferimento alle predette prescrizioni, è possibile distinguere le stesse in tre macro-settori, a seconda che la richiesta di ottemperanza, con le relative tempistiche

indicate nei PTC, interessi principalmente la sfera impiantistico – strutturale dello stabilimento, il sistema organizzativo – gestionale posto in essere dal gestore ai fini della prevenzione degli incidenti rilevanti, la completezza e verifica documentale. Relativamente al campione di stabilimenti presi in considerazione, si evidenzia quanto segue:

- Deposito di GPL e distribuzione cittadina
 - Prescrizioni a carattere impiantistico – strutturale: sistema di controllo dell'allineamento statico dei serbatoi di stoccaggio; valvole di shut-off manuali, a monte delle valvole di sicurezza dei serbatoi, liberamente operabili e non piombate; doppie valvole sui punti di prelievo campioni delle pipeline a valle dei serbatoi; interventi di manutenzione sul sistema di copertura dei serbatoi.
 - Prescrizioni sui sistemi organizzativo – gestionali: sistema di comunicazione ed allarme per garantire il blocco del traffico su strada (area ad elevata letalità); procedura di emergenza per l'introduzione di acqua nei serbatoi.
- Deposito sotterraneo di GPL
 - Prescrizioni a carattere impiantistico – strutturale: interventi tecnici per il miglioramento delle condizioni di sicurezza del punto di scarico della nave e della sala controllo incendi presso il pontile.
 - Prescrizioni sui sistemi organizzativo – gestionali: procedura di emergenza per il punto di scarico della nave e relativa connessione con il comando locale dei VVF.
 - Prescrizioni in termini di completezza e verifica documentale: qualificazione ed esperienza professionale dei consulenti progettuali; analisi sismica dello stoccaggio sotterraneo; analisi storica incidentale per siti di stoccaggio sotterraneo; HazOp per il punto di scarico della nave; effetto domino sugli stabilimenti costieri vicini.
- Deposito di GPL di compagnia multi-sito – n. 2 siti
 - Prescrizioni a carattere impiantistico – strutturale: raddoppio della connessione tra le pompe AI (antincendio) e la riserva d'acqua; innalzamento della soglia del locale adibito al trasformatore elettrico contenente olio diatermico.
 - Prescrizioni in termini di completezza e verifica documentale: approfondimento circa la presenza di elementi vulnerabili attorno allo stabilimento; corretta geo-referenziazione dei punti-sorgente degli scenari incidentali con impatto all'esterno dello stabilimento.
- Terminale di stoccaggio e rigassificazione di GNL offshore
 - Prescrizioni a carattere impiantistico – strutturale: ripristino dei blocchi di sicurezza del carro-ponte Boil Off Gas (BOG).
 - Prescrizioni sui sistemi organizzativo – gestionali: controlli computerizzati sulla calibrazione dei rilevatori di infiammabili ai serbatoi; attività di Informazione-Formazione-Addestramento (IFA) per il personale AI impegnato sull'elisuperficie.
 - Prescrizioni in termini di completezza e verifica documentale: documentazione tecnica relativa all'ancoraggio dei filtri dell'acqua di mare AI; possibili effetti sugli scenari di rischio associati al regime di bassa riconsegna di GN alla rete nazionale (Low Send-out).

3.3 Quadro di riferimento normativo per le istruttorie tecniche sui RdS

Per quanto concerne le valutazioni tecniche dei RdS di stabilimenti appartenenti al settore del GPL, a corredo di quanto riportato nel presente capitolo, si evidenziano nel seguito i

principali strumenti legislativi, volti alla semplificazione delle attività condotte dalle AA.CC., ivi incluse le Agenzie del SNPA, al fine di fornire un quadro di riferimento per tali attività:

- d.lgs. 105/2015 – Allegato C “Criteri, dati e informazioni per la redazione e la valutazione del Rapporto di sicurezza e del Rapporto preliminare di sicurezza”. Sono riportati i criteri per la redazione dei RdS, ivi inclusi le informazioni sullo stabilimento, la sicurezza impiantistica, i mezzi di emergenza e di intervento.
- d.m. 9 maggio 2001 “Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante”. Esso tratta le tematiche di pianificazione ed utilizzo del territorio per tutte le tipologie di stabilimenti, con specifica attenzione alla categorizzazione degli impianti, ai valori di soglia per i differenti impatti, ecc.
- d.m. 15 maggio 1996 “Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas di petrolio liquefatto (G.P.L.)”. Esso riporta i criteri di analisi e valutazione dei RdS per il GPL, con la caratterizzazione degli stoccaggi, la valutazione degli scenari, i valori di soglia, gli adeguamenti impiantistici per il controllo dei rischi.
- d.m. 13 ottobre 1994 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 m³ e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg”. Esso fornisce criteri di sicurezza AI per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio di nuovi depositi di GPL (sopra i 5 m³). In esso sono definiti, in particolare, gli elementi pericolosi dei depositi, quali: bracci di carico; serbatoi; aree di stoccaggio di bombole (piene e o vuote); pompe, compressori e livelli metrici; impianto di imbottigliamento; vaporizzatori; ATB e ferro cisterne. Tali elementi sono inoltre utilizzati per definire differenti distanze di sicurezza, che devono essere rispettate in fase di progettazione e gestione operativa dei depositi. Sono quindi previste misure organizzative, che pongono l'accento sul training del personale con specifici programmi di IFA per figure chiave impegnate in attività di carico/scarico e imbottigliamento [7].

4. I controlli nazionali sugli stabilimenti RIR: ispezioni sui SGS

4.1 Risultanze tecniche delle ispezioni effettuate ai sensi dell'art. 27 del d.lgs. 105/2015

Nell'ambito delle attività di controllo sugli stabilimenti RIR si è successivamente proceduto all'analisi degli esiti di circa 70 ispezioni effettuate sul territorio nazionale nell'arco temporale 2011-2017, previste attualmente dall'art. 27 del d.lgs. 105/2015, ma svolte fino al 2015 in regime di vigenza del precedente decreto di recepimento della direttiva (art. 25 del d.lgs. 334/99 e s.m.i. e d.m. 5 novembre 1997 “Criteri e metodi per l'effettuazione delle ispezioni agli stabilimenti di cui al d.p.r. 17 maggio 1988, n. 175, e successive modificazioni”), negli stabilimenti nazionali appartenenti al settore del GPL e del GNL, sulla scorta di informazioni e dati archiviati nella banca dati informatica gestita dall'Ispra.

Dalla lettura dei rapporti finali di ispezione, presenti nella banca dati, è possibile estrapolare informazioni inerenti a criticità maggiormente ricorrenti, riscontrati dalle Commissioni ispettive, in merito all'esame del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR), sia in termini di proposte di prescrizioni (non conformità maggiori) che di raccomandazioni (non conformità minori) per il miglioramento del SGS stesso.

Sono in particolare approfonditi, negli stabilimenti RIR del settore del GPL e del GNL, gli elementi fondamentali per l'attuazione del SGS-PIR, individuati nella lista di riscontro

utilizzata per le ispezioni e basata sugli 8 “pilastri” principali che sostanziano il SGS, come previsto dall’allegato B del d.lgs. 105/2015.

4.2 Analisi quantitativa delle non conformità riscontrate

I grafici che seguono mostrano le risultanze in termini quantitativi delle non conformità riscontrate, differenziate, secondo i dettami normativi, tra raccomandazioni (Fig. 4) e proposte di prescrizioni (Fig. 5). Dalla lettura dei dati si rileva, in generale, un andamento con picchi percentuali di non conformità per gli elementi del SGS connessi al training del personale – IFA (punto 2 della lista di riscontro), al controllo operativo e manutenzione (punto 4), alla pianificazione dell’emergenza (punto 6), come ulteriormente approfondito nel prosieguo.

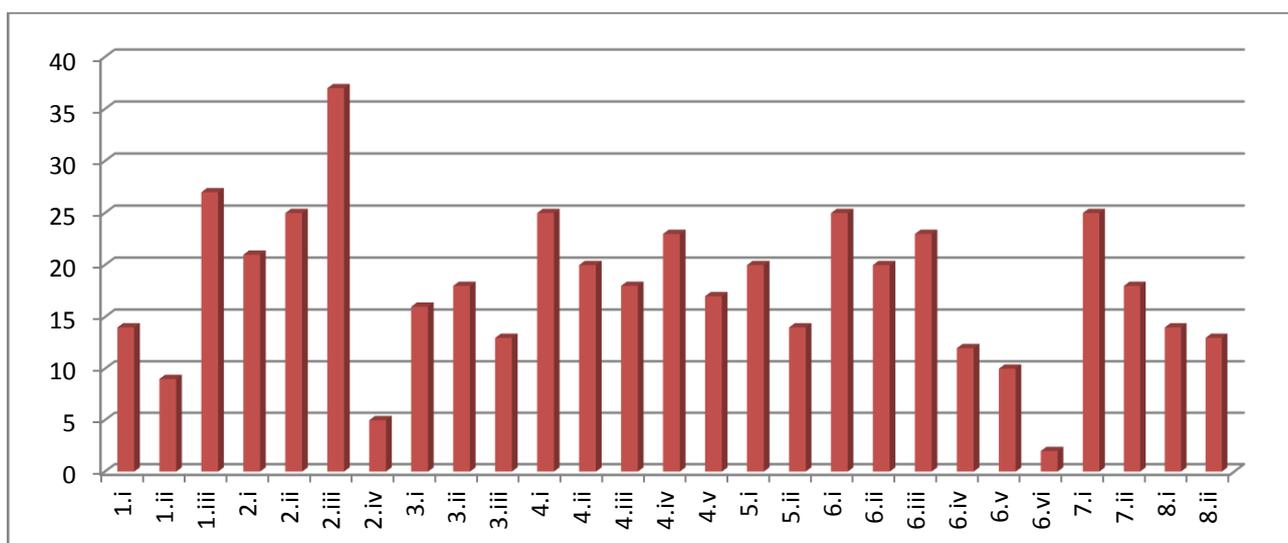


Figura 4. Raccomandazioni emerse dalle ispezioni nel settore GPL-GNL

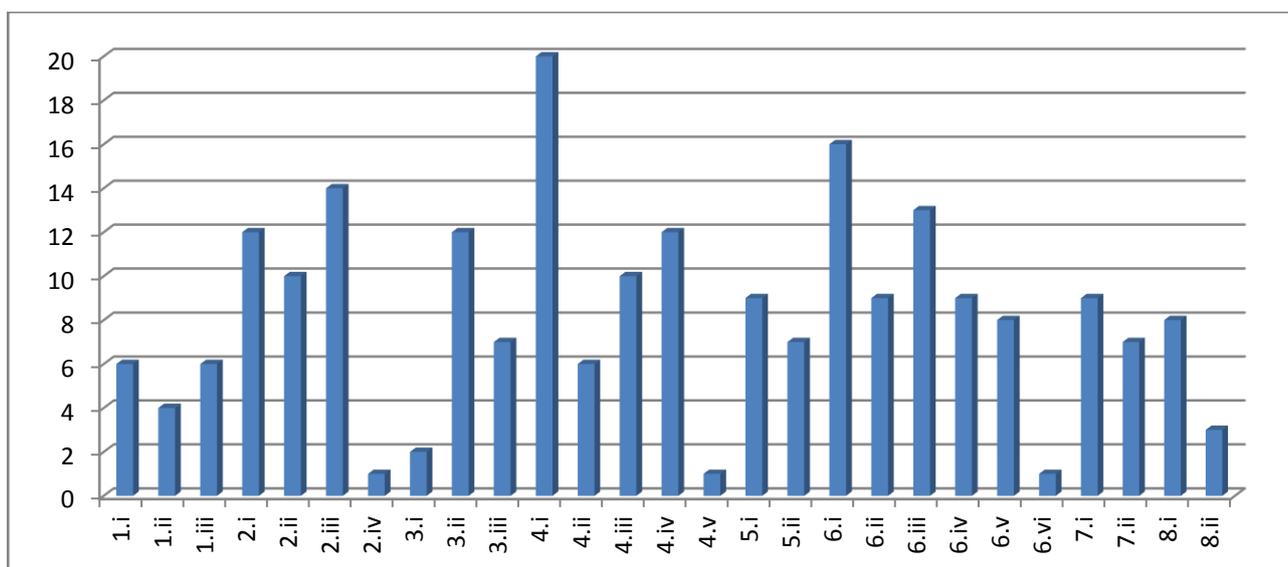


Figura 5. Proposte di prescrizioni emerse dalle ispezioni nel settore GPL-GNL

4.3 Analisi qualitativa degli elementi del SGS-PIR

Prendendo come riferimento gli otto elementi principali del SGS-PIR, per gli stabilimenti appartenenti al settore del GPL e del GNL, sono stati esaminati i seguenti elementi

significativi: training del personale; controlli e manutenzioni; pianificazione delle emergenze. Relativamente al campione di stabilimenti presi in considerazione, l'analisi qualitativa sugli elementi del SGS su menzionati è riportata nel seguito, in termini di non conformità emerse [6].

- Deposito di GPL e distribuzione cittadina
 - Training del personale: distribuzione sistematica ai lavoratori di documentazione aggiornata; consultazione dei rappresentanti dei lavoratori; rispetto della periodicità stabilita dei programmi; verifica dell'apprendimento per lavoratori e ditte terze.
 - Controllo operativo e manutenzione: identificazione degli elementi tecnici critici e conseguente pianificazione dei programmi manutentivi; aggiornamento delle procedure di manutenzione; aggiornamento del manuale operativo con le condizioni anomale; approfondimento ed implementazione della procedura dei PdL (Permessi di Lavoro).
 - Piano di emergenza interno, organizzazione, esercitazioni: revisione del PEI (Piano di Emergenza Interna) e consultazione dei lavoratori; definizione dei ruoli di tutte le unità coinvolte nell'emergenza; definizione di tutti i DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) previsti per i lavoratori; documentazione tecnica di supporto in tutti i reparti.
- Deposito sotterraneo di GPL
 - Training del personale: sottolineare gli aspetti relativi alla Seveso e alla PIR nelle attività di IFA; IFA anche a seguito di variazioni normative e miglioramento delle conoscenze tecniche e di natura gestionale.
 - Controllo operativo e manutenzione: aggiornamento della procedura di gestione della documentazione con riferimento alla presenza di documentazione tecnica presso tutti i reparti.
 - Piano di emergenza interno, organizzazione, esercitazioni: procedura per la gestione del sito a seguito di incidente; supporto alle investigazioni esterne, inclusa l'attività di report sugli eventi e la salvaguardia delle prove oggettive.
- Deposito di GPL di compagnia multi-sito – n. 2 siti
 - Training del personale: distribuzione sistematica ai lavoratori di documentazione aggiornata; rispetto della periodicità stabilita dei programmi; verifica dell'apprendimento per le ditte terze; criteri di qualificazione dei formatori.
 - Controllo operativo e manutenzione: garantire la registrazione digitale degli interventi manutentivi; aggiornamento del manuale operativo con riferimento alle tecnologie attualmente presenti in sito; indicazione nella procedura dei PdL dei ruoli e responsabilità di tutto il personale coinvolto.
 - Piano di emergenza interno, organizzazione, esercitazioni: revisione del PEI (procedure di intervento; squadra di emergenza); procedure nelle ore notturne (tempistica di intervento; comunicazioni); disponibilità di DPI e sistemi di protezione previsti per i lavoratori; corretta definizione delle vie di evacuazione dal sito.
- Terminale di stoccaggio e rigassificazione di GNL offshore
 - Training del personale: distribuzione sistematica ai lavoratori di documentazione aggiornata; programma di IFA con specificazione della periodicità e delle tematiche; consultazione dei rappresentanti dei lavoratori; verifica dell'apprendimento per le ditte terze.
 - Controllo operativo e manutenzione: identificazione dei sistemi tecnici critici, come risultato del RdS, e conseguente pianificazione dei programmi manutentivi; garantire la registrazione digitale degli interventi manutentivi;

aggiornamento del manuale operativo con le condizioni anomale; completare i moduli previsti dalla procedura dei PdL.

- Piano di emergenza interno, organizzazione, esercitazioni: revisione del PEI e consultazione dei lavoratori; criteri di scelta del numero di unità della squadra di emergenza; pianificazione delle simulazioni di emergenza di sito; posizionamento delle boe di salvataggio previste per i lavoratori.

4.4 Quadro di riferimento normativo per le ispezioni SGS

Per quanto concerne le ispezioni SGS su stabilimenti appartenenti al settore del GPL, a corredo di quanto riportato nel presente capitolo, oltre a quanto già evidenziato nel precedente capitolo 3, si evidenziano nel seguito i principali strumenti legislativi, volti alla semplificazione delle attività condotte dalle AA.CC., ivi incluse ISPRA e le Agenzie del SNPA, al fine di fornire un quadro di riferimento per tali attività:

- d.lgs. 105/2015 – Allegato H “Criteri per la pianificazione, la programmazione e lo svolgimento delle ispezioni”. Vengono forniti criteri e procedure per la conduzione delle ispezioni, essendo presente, tra gli altri, una specifica check-list per ispezioni SGS-PIR in stabilimenti ad elevata standardizzazione (depositi di GPL); in essa, infatti, sono semplificati alcuni “item”, tra cui l’organizzazione del management, il controllo della documentazione, il controllo delle attrezzature, la pianificazione dell’emergenza.
- d.m. 15 maggio 1996 “Procedure e norme tecniche di sicurezza nello svolgimento delle attività di travaso di autobotti e ferrocisterne”. Sono presenti riferimenti alla procedura per il trasferimento da ATB di GPL e ferrocisterne, con specifica attenzione al posizionamento dei veicoli, ai sistemi di protezione AI, al manuale operativo.
- d.lgs. 128/2006 “Riordino della disciplina relativa all’installazione e all’esercizio degli impianti di riempimento, travaso e deposito di GPL, nonché all’esercizio dell’attività di distribuzione e vendita di GPL in recipienti, a norma dell’articolo 1, comma 52, della legge 23 agosto 2004, n. 239”. Tale decreto, sebbene non specifico per la tematica RIR, in quanto relativo alla regolamentazione del sistema di distribuzione nazionale del GPL, costituisce comunque un riferimento di rilievo per tutti gli impianti del settore. Esso, infatti, è finalizzato ad aumentare il livello di sicurezza del settore del GPL introducendo requisiti precisi per le compagnie di distribuzione, coprendo sia aspetti amministrativi delle installazioni che di esercizio dei depositi di GPL e del sistema di distribuzione. Il decreto, in particolare, impone l’allargamento, di alcuni obblighi connessi all’implementazione della direttiva Seveso (PPIR e SGS), agli impianti di riempimento, trasferimento e stoccaggio di GPL (al disotto della soglia di 50 t), imponendo a questi stessi, tra gli altri, anche il regime delle ispezioni (a cura delle Autorità Regionali) [7].

5. Conclusioni e linee di indirizzo

L’analisi condotta sugli atti connessi alla valutazione dei RdS di stabilimenti del settore del GPL e del GNL, prendendo a riferimento il campione di n. 5 stabilimenti appartenenti ad alcune tipologie comuni di installazioni nazionali, ha permesso di estrapolare una serie di aspetti comuni emersi nelle attività svolte dalle AA.CC., ivi incluse le Agenzie del SNPA.

Per quanto concerne gli scenari e le zone di danno, a seguito delle valutazioni tecniche condotte su tali stabilimenti, è possibile affermare che le esplosioni (UVCE) si attestano nell’ordine dei 500 m, mentre gli incendi variano tra i 100 m e i 400 m (flash fire), i 100 m e i 200 m (jet fire), e i 100 m (pool fire).

In relazione alle richieste e prescrizioni emerse da tali valutazioni istruttorie, si possono evincere le seguenti conclusioni in tema di:

- impianti e strutture: pompe e valvole di sicurezza; equipaggiamenti di sicurezza presso i punti di trasferimento prodotti; controlli sui serbatoi di stoccaggio;
- organizzazione e gestione: procedure di emergenza ai punti di trasferimento e presso i serbatoi; sistemi di comunicazione;
- documentazione: analisi sismica; effetti domino; elementi vulnerabili ed impatti all'esterno; scenari di rischio connessi alla distribuzione di GN.

In merito alle ispezioni SGS-PIR, l'analisi condotta sulle attività svolte dalle AA.CC. ivi incluse ISPRA e le Agenzie del SNPA su stabilimenti del settore del GPL e del GNL, prendendo a riferimento il campione di n. 5 stabilimenti appartenenti ad alcune tipologie comuni di installazioni nazionali, ha altresì consentito di evidenziare una serie di aspetti comuni, in tema di non conformità derivanti dall'esame dei SGS implementati, tanto di natura tecnica, quanto di natura gestionale:

- attività di training: documentazione aggiornata; periodicità dei programmi; consultazione dei lavoratori; verifica dell'apprendimento;
- controllo operativo: identificazione dei sistemi tecnici critici; registrazione degli interventi manutentivi; aggiornamento del manuale operativo; completezza della procedura dei PdL;
- pianificazione dell'emergenza: revisione del PEI e consultazione; squadra di emergenza e simulazione; DPI e sistemi di protezione per i lavoratori; gestione e investigazione post incidentale.

6. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose", GU Serie Generale n.161 del 14/07/2015 - Suppl. Ordinario n. 38.

[2] <http://www.minambiente.it/pagina/inventario-nazionale-degli-stabilimenti-rischio-di-incidente-rilevante-0> (30/06/2018).

[3] <http://www.seveso.sinanet.apat.it/> (30/06/2018).

[4] <https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/inventario-seveso/login.php> (30/06/2018).

[5] Decreto Legislativo 17 agosto 1999, n. 334 "Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose", GU n. 228 del 28/09/1999 - S.O. n.177.

[6] R. Marrazzo. Controlling activities in the LPG and LNG sector: findings of safety reports assessments and SMS inspections for some national establishments. Atti del Workshop (European Commission Committee of Competent Authorities – Joint Research Centre) *Mutual Joint Visit (MJV) 2017 - Risk management and enforcement on Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Liquefied Natural Gas (LNG) sites. Nicosia (Cyprus). 26 – 28 Settembre 2017.*

[7] F. De Cecco. Safety in the Italian LPG and LNG industry. Atti del Workshop (European Commission Committee of Competent Authorities – Joint Research Centre) *Mutual Joint Visit (MJV) 2017 - Risk management and enforcement on Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Liquefied Natural Gas (LNG) sites. Nicosia (Cyprus). 26 – 28 Settembre 2017.*

Il sistema di gestione della sicurezza e l'utilizzo della root cause analysis applicati ad un evento incidentale

A. Busseni¹, L. Baldioli¹

¹ HydroChem Italia Srl

1. Introduzione

1.1 Sintesi dell'evento incidentale

Il giorno 20/01/2017 durante una attività routinaria di messa a riciclo di un serbatoio contenente un prodotto finito si è avuto, all'interno di un'area cordolata d'impianto, un rilascio di prodotto organico clorurato liquido.

Il rilascio è stato causato dalla rottura di un soffiutto in teflon posto tra la valvola di fondo del serbatoio di stoccaggio e la sua pompa di riciclo. L'evento, durato alcune decine di minuti, è stato gestito tramite l'immediata attivazione del Piano di Emergenza Interno di Stabilimento.

Tutto il prodotto fuoriuscito, sia a causa dell'alta temperatura di solidificazione che grazie all'utilizzo di polvere assorbente e idrossido di calcio, è stato contenuto all'interno dei limiti cordolati dell'impianto evitando, in questo modo, rilasci nella rete delle acque bianche e minimizzando il rilascio in atmosfera che, comunque, si è limitato alle zone contigue all'impianto stesso. Il personale, che in accordo con il Piano di Emergenza Interno è intervenuto, non ha riportato infortuni di alcun genere.

Nei giorni successivi all'evento incidentale si è provveduto ad informare le Autorità interessate (Mattm, Arpa, Ispra) e alla completa bonifica dell'area con il conseguente ripristino dei luoghi e della produzione.

Per analizzare nel dettaglio le possibili cause che hanno portato alla rottura del soffiutto si è proceduto ad incaricare una società specializzata nell'esecuzione di Root Cause Analysis (RCA) – TECSA Srl di Pero (MI). La RCA è un tipo di analisi basata su un approccio metodologico che presenta l'incidente come l'evento finale non voluto di un percorso che parte dalle cosiddette latent condition (condizioni organizzative e di contesto del lavoro con lacune, inefficienze ed errori di tipo progettuale) e latent failure (condizioni concrete in cui gli individui si trovano ad operare).

Il risultato dell'analisi è stato gestito da un gruppo di lavoro interno (Servizi Salute/Sicurezza/Ambiente, Produzione, Manutenzione e Acquisti) che ha proceduto a mettere in atto tutte le raccomandazioni in modo tale da implementare il sistema di gestione della sicurezza legato alla specifica attività ed apparecchiatura.

2. Sviluppo della root cause analysis (rca)

2.1 Metodologia dell'analisi RCA dell'evento incidentale

L'Analisi RCA dell'evento incidentale (EI) è stata condotta dagli Analisti RCA seguendo la seguente metodologia:

- Raccolta di informazioni e dati preliminari dell'EI e del Rapporto dell'EI alle Autorità;
- Classificazione dell'EI sulla base delle informazioni e dei dati disponibili;
- Assegnazione dell'incarico di Analisti RCA ad esperti di processo, sicurezza di processo, controllo di processo, analisi di rischio, normativa;
- Interviste da parte degli Analisti RCA del personale di Produzione e Manutenzione in linea dello Stabilimento ai fini della raccolta di informazioni e dati sull'EI;
- Raccolta dati e documenti di Progetto per Analisi RCA;

- Analisi RCA dei dati e documenti di Progetto;
- Identificazione dei principali fattori causali (FC) dell'EI, sulla base dell'Analisi RCA dei guasti delle apparecchiature e delle problematiche relative alle prestazioni del personale in campo della Produzione e della Manutenzione;
- Identificazione delle cause alla radice (root cause) di ciascun fattore causale dell'evento incidentale in relazione a supervisione, gestione, procedure, progettazione, ingegneria, costruzione, fabbricazione, hardware e software, fattori sistemici, ispezioni e collaudi, problemi di comunicazione, altre cause di valutazione oggettiva¹;
- Identificazione di possibili interventi di miglioramento, definiti dagli Analisti RCA come Raccomandazioni, finalizzati al non ripetersi dell'EI (riduzione o azzeramento della frequenza di accadimento) e/o alla riduzione della severità delle conseguenze.

2.2 Documentazione di riferimento dell'analisi RCA dell'evento incidentale

La Documentazione di Riferimento dell'Analisi RCA è costituita da:

- Comunicazioni alle/dalle Autorità
- Rapporto di Sicurezza (RdS)
- Rapporto di Incidente
- Dati Operativi (in forma di tabulati, trend e rapporti di eventi a DCS)
- Documentazione di Progetto
- Planimetria
- Specifiche
- Dati Analitici
- Scheda di Sicurezza del Prodotto
- Scheda Tecnica Soffietto
- Procedure
- Piano di Emergenza.

La Documentazione di Riferimento dell'Analisi RCA ha compreso anche materiale fotografico.

2.3 Cause alla radice e raccomandazioni RCA dell'evento incidentale

L'Analisi RCA dell'evento incidentale è stata condotta dagli Analisti RCA sulla base delle informazioni raccolte nelle Interviste al personale di Produzione e Manutenzione e dei dati e della documentazione di riferimento della analisi stessa.

Come da Metodologia RCA l'Analisi RCA dell'evento incidentale ha condotto alla elaborazione del Diagramma dei Fattori Causali dell'Evento Incidentale (si veda allegato 1 pag.10) dove sono rappresentati in appositi blocchetti uno o più eventi risultanti, incluso

- l'evento incidentale vero e proprio,
- l'evento o gli eventi iniziatori,
- gli eventi della sequenza incidentale,
- le eventuali condizioni (ad es. fallimento o mancanza protezioni),
- gli eventuali fattori concomitanti,
- le condizioni a latere riportate dagli operatori di Reparto nelle interviste, come pure Elementi di Nota, Osservazioni e Conclusioni Logiche degli Analisti RCA.

Ogni blocchetto del Diagramma dei Fattori Causali dell'Evento Incidentale riporta sia la fonte delle informazioni e dati contenuti, sia il tempo registrato o stimato, laddove possibile, dell'evento riportato.

¹ Cause di valutazione soggettiva escluse dalla RCA riguardano competenza e adeguatezza del personale e cultura aziendale, o comunque legate alla ricerca e identificazione di responsabilità individuali.

Le Cause alla Radice sono state individuate dagli Analisti RCA in relazione a supervisione, gestione, procedure, progettazione, ingegneria, costruzione, fabbricazione, hardware e software, fattori sistemici, ispezioni e collaudi, problemi di comunicazione, altre cause di valutazione oggettiva. Per ogni causa alla radice di ciascun fattore causale sono stati identificati possibili interventi di miglioramento, definiti dagli Analisti RCA come Raccomandazioni, finalizzati al non ripetersi dell'Evento Incidentale (riduzione o azzeramento della frequenza di accadimento) e/o alla riduzione della severità delle conseguenze dello stesso.

2.4 Conclusioni dell'analisi RCA dell'evento incidentale

La causa primaria dell'evento incidentale costituito dalla perdita di contenimento di prodotto cloroaromatico 2,4-DCBTC dal soffierto in teflon posto sulla linea di aspirazione di P6004 è stato, con grande probabilità, ascrivito alla espansione termica del prodotto intrappolato e solidificatosi dopo la chiusura, per motivi di manutenzione, del vapore ai traccianti della linea di aspirazione e mandata P6004.

Riaperto il vapore ai traccianti in tarda mattinata del giorno dell'EI il prodotto solidificato si è fuso in modo disomogeneo a causa di diversi fattori come:

- il differente comportamento dei componenti quali il materiale della tubazione (nickel), il materiale del soffierto (teflon), il materiale delle flange, lo spessore della tubazione, lo spessore delle flangiature, il materiale delle guarnizioni,
- l'effettiva superficie di contatto dei traccianti,
- la presenza di tratti scoibentati, la presenza di tratti non tracciati, lo spessore della coibentazione, gli eventuali punti morti

Tutto ciò ha determinato un intrappolamento del fluido contenuto nel corpo pompa P6004 tra mandata e aspirazione. Infatti pur risultando la pompa P6004 in marcia, con le valvole manuali in aspirazione e mandata aperte, solo nel momento in cui il solido formatosi nel corpo valvola di fondo D6003 si è fuso la temperatura di fondo D6003 è andata aumentando a causa del contatto del sensore di temperatura sul fondo del serbatoio D6003 con le parti di liquido via via più calde a causa della stratificazione termica.

L'andamento registrato della temperatura di fondo D6003 fornisce anche la prova della solidificazione del prodotto in linea, in quanto la pompa (cap. 50 m³/h) ricircolando senza interruzioni per 33 minuti (tralasciando tre tentativi di ricircolazione compiuti nelle tre ore precedenti) avrebbe dovuto aver ricircolato l'intero volume del prodotto (16 m³ ca.) omogeneizzandone la temperatura.

L'espansione termica del prodotto nel passaggio da stato solido a temperatura ambiente (max. del 20.01.2017 + 8 °C) alla temperatura del vapore di tracciatura pari a 140 °C è pari al 9-10%. Pertanto l'intrappolamento del prodotto e il riscaldamento con fusione disomogenea della linea di aspirazione e mandata P6004, hanno ingenerato una espansione termica con spinta assiale sul soffierto stesso e al raggiungimento del limite massimo di espansione assiale pari a 28 mm, con spinta radiale, che infatti ha determinato la rottura di entrambe gli anelli di rinforzo e la rottura del soffierto stesso (si veda immagine n.2)

Ulteriore contributo alla espansione termica è stato dato dalla pompa a trascinamento magnetico P6004, che marciando a mandata chiusa (a causa della formazione di solido in mandata) ha dissipato potenza idraulica pari a 2 kWh/h nel prodotto intrappolato nel corpo pompa per 33 minuti. La particolare friabilità del prodotto 2,4-DCBTC solido e la girante aperta di P6004 hanno di fatto impedito lo scatto del termico per sovraccarico del motore all'avviamento della pompa pur in presenza di prodotto solidificato.



2. Foto soffietto

2.5 Raccomandazioni in merito ai Fattori causali

Per ogni fattore causale, riportato nel Diagramma dei Fattori Causali dell'Evento Incidentale, sono state analizzate le cause intermedie e le cause alla radice.

Si riporta, di seguito, lo sviluppo di due fattori causali (Fattori causali 1 e 2) e le conseguenti raccomandazioni di miglioramento [1].

FATTORE CAUSALE CF #1

- Rottura del soffietto in teflon sulla linea di aspirazione della pompa P6004 dal Serbatoio D6003

Cause Intermedie e Cause alla Radice

- Rottura del soffietto in teflon per usura nel tempo
 - Componente critico (soffietto in teflon) non sostituito al termine della vita utile attesa (supposta inferiore a 15 anni)
 - Il soffietto in teflon non incluso come componente critico nel Piano di Manutenzione Periodica
 - La vita utile e le Restrizioni d'Uso del soffietto in teflon non specificate dal Fornitore
 - Il soffietto in teflon non incluso come componente critico nel Piano di Ispezioni e Collaudi Periodici basata sul Rischio (RBI)
 - Il Sistema di Gestione della Manutenzione non prevede il Piano di Manutenzione Periodica dei componenti critici
 - Il Sistema di Gestione della Sicurezza, Salute e Ambiente non indirizza il Sistema di Gestione della Manutenzione sulle problematiche di cui sopra
- Rottura del soffietto in teflon per operazione impropria
 - Completa solidificazione² del prodotto all'interno della valvola di fondo D6003, del soffietto in teflon, della tubazione in aspirazione P6004, della valvola manuale in

² Nelle notti del 18 e 19 Gennaio 2017 a Verbania la temperatura ambiente è scesa ad una minima di -7°C.

aspirazione P6004, del corpo pompa P6004, della valvola manuale in mandata P6004, della tubazione di mandata P6004 e della linea di ricircolazione P6004 per la presa campione

- Intercettazione del vapore di tracciatura della linea di aspirazione e mandata P6004 eseguita senza aver effettuato il drenaggio della linea stessa
 - Chiusura del vapore di tracciatura della linea di aspirazione e mandata P6004 non segnalata sul Registro Consegne Cambio Turno
 - Istruzioni di Lavoro (IL) non previste per la messa fuori servizio dei sistemi di tracciatura di tubazioni soggette a solidificazione del prodotto
 - Istruzioni di Lavoro (IL) non previste per la registrazione dei lavori di manutenzione in corso sul Registro Consegne Cambio Turno
 - Il Sistema di Gestione della Sicurezza, Salute e Ambiente non indirizza le Istruzioni di Lavoro sulle problematiche di cui sopra
- Rottura del soffietto in teflon per movimento assiale/radiale/angolare eccedente i limiti massimi costruttivi (ipotesi scartata)

L'ipotesi è stata totalmente scartata dal Responsabile della Manutenzione Meccanica in quanto non è stato riscontrato dopo l'EI un disallineamento significativo a monte o a valle del soffietto in teflon (dopo 15 anni di esercizio senza problemi di questo tipo).

RACCOMANDAZIONI IN MERITO AL FATTORE CAUSALE CF #1

- Richiedere al Fornitore del soffietto in teflon la vita utile e le Restrizioni d'Uso.
- Identificare il soffietto in teflon come componente critico e inserirlo nel Piano di Manutenzione Periodica per la sostituzione del componente critico sulla base del tempo di lavoro e la vita utile.
- Inserire il soffietto in teflon come componente critico nel Piano di Ispezione Periodica basata sul Rischio (RBI).
- Coibentare il soffietto con materassino isolante per conservazione del calore al fine di una pronta esecuzione della ispezione periodica (vedi sopra).
- Verificare che il tracciante del vapore a B.P. a 140 °C non entri in contatto diretto con il soffietto in teflon per minimizzarne il rischio di rottura plastica o di rottura per deformazione causata da eccessivo gradiente termico.
- Verificare che la temperatura di termostatazione del soffietto in teflon e della linea di aspirazione e mandata P6004 sia monitorata per evitare il raffreddamento e la solidificazione del prodotto in caso di mancanza di vapore di tracciatura o dello scarico della condensa. In caso di mancanza di vapore di tracciatura, per evitarne la solidificazione, il prodotto andrà drenato dalla linea di aspirazione e mandata P6004.
- Alimentare il vapore a B.P. alla camicia del serbatoio D6003 con loop automatico di controllo temperatura di fondo (TIC-6017) ed una valvola di controllo sulla alimentazione del vapore, allo scopo di evitare innalzamenti rapidi e significativi di temperatura del soffietto (shock termico) all'avviamento della ricircolazione del prodotto.
- Elaborare le Istruzioni di Lavoro (IL) di messa fuori esercizio per manutenzione dei sistemi di tracciatura di tubazioni soggette a solidificazione del prodotto.
- Elaborare le Istruzioni di Lavoro (IL) per la registrazione dei lavori di manutenzione in corso sul Registro Consegne Cambio Turno.

FATTORE CAUSALE CF #2

- Perdita di contenimento incontrollata dal serbatoio D6003 di 24 t (intera capacità stoccata nel serbatoio) di 2,4 DCBTC e di azoto di polmonazione attraverso il soffiutto in teflon sulla linea di aspirazione della pompa P6004 rotto (vedi CF #1)

Cause Intermedie e Cause alla Radice

- Ritardata rilevazione della perdita di contenimento del prodotto nell'Area D6003
 - Rivelatori di Gas Tossico (HCl) per allarme di alta concentrazione di gas tossico (HCl) in aria ambiente non installati nell'Area D6003 e P6004
 - Rivelazione di gas tossico (HCl) in aria ambiente nell'Area D6003 e P6004 non prevista nel Sistema di Rivelazione Incendio e Gas
 - Il Sistema di Gestione della Sicurezza, Salute e Ambiente non indirizza il Sistema di Rivelazione Incendio e Gas sulle problematiche di cui sopra
- Ritardata rilevazione della caduta di livello del prodotto contenuto in D6003
 - Trasmettitore di livello LT-6009 nel serbatoio D6003 messo fuori-servizio per minimizzare gli sfiati di azoto di gorgogliamento contenente cloro e vapori di HCl dal serbatoio D6003 a Termocombustore³ (TC)
 - Non conformità alle Istruzioni di Lavoro (IL03) per il monitoraggio del livello di prodotto in D6003 introdotta per prassi
 - Il Sistema di Gestione delle Modifiche non applicato alle Istruzioni di Lavoro (IL03)
 - Il Sistema di Gestione della Sicurezza, Salute e Ambiente non indirizza il Sistema di Gestione delle Modifiche sulle problematiche di cui sopra
 - Impossibilità di intercettazione rapida della perdita di contenimento dal soffiutto in teflon sulla linea di aspirazione della pompa P6004
 - Impossibilità di chiusura della valvola manuale di fondo D6003 per limitare la perdita di contenimento di prodotto⁴ da D6003
 - Le Istruzioni di Lavoro (IL91) "Procedure operative relative alle ipotesi incidentali significative" per l'Impianto CLAR non contemplano la chiusura della valvola di fondo D6003 in tempi rapidi e da posizione sicura per perdita di contenimento significativa⁵

RACCOMANDAZIONI IN MERITO AL FATTORE CAUSALE CF #2

- Prevedere rivelatori di gas tossico (HCl) in campo nell'area sottostante il serbatoio D6003, in prossimità del soffiutto in teflon sulla linea di aspirazione P6004 e in prossimità della pompa P6004 e allarmi a Sistema Rivelazione Incendio e Gas per alta e altissima concentrazione di gas tossico (HCl) in aria ambiente.
- Prevedere l'attuazione da remoto della valvola di fondo D6003 con comando di apertura e chiusura da DCS e comando di chiusura di emergenza in campo (in zona sicura) e fine corsa di apertura e chiusura.

³ La minimizzazione degli sfiati da D6003 è stata associata a minore corrosione nel tempo dei tubi del TC.

⁴ L'Operatore munito degli opportuni DPI durante la perdita di contenimento del prodotto dal soffiutto in teflon rotto (flangiato sulla valvola stessa) non ha potuto chiudere la valvola di fondo D6003 a causa di getto di prodotto a temperatura sino a 125 °C e di ridotta visibilità per formazione di nebbie acide. La valvola manuale di fondo D6003 presenta difficile manovrabilità per la difficoltà di accesso nell'Area D6003 e per la ridotta operabilità ergonomica. Per questa ragione la valvola è lasciata normalmente aperta durante tutte le fasi di esercizio del serbatoio D6003.

⁵ Stimata una portata di fuoriuscita del prodotto dal soffiutto in teflon rotto pari a 35 kg/sec circa.

- Prevedere logica permissiva di avviamento pompa P6004 per valvola di fondo D6003 automatica aperta (fine corsa apertura).
- Valutare la sostituzione del trasmettitore di livello LT-6009 nel serbatoio D6003 con trasmettitore senza gorgogliamento di azoto.

3. Conclusioni

Il risultato dell'analisi è stato gestito da un gruppo di lavoro interno (HSE, PROD, MANU, ACQU) che ha proceduto a mettere in atto le raccomandazioni in modo tale da implementare il Sistema di Gestione della Sicurezza legato alla specifica attività ed apparecchiatura ed evitare, quindi, il ripetersi di un evento incidentale simile.

Le modifiche sono state gestite attuando una procedura interna specifica denominata *“PG10 - Gestione delle modifiche di stabilimento”* che prevede un iter ben definito di valutazione e autorizzazione delle modifiche proposte e che vede coinvolte, ognuna per quanto di competenza, le principali funzioni di Stabilimento come la Direzione, il servizio HSE, la Produzione, l'ufficio manutenzione e quello preposto agli acquisti.

Alla fine dell'iter di valutazione sono state autorizzate, oltre alle modifiche derivanti dalle raccomandazioni, una serie di ulteriori modifiche migliorative come:

- Riduzione della sezione della tubazione di fondo da DN150 a DN80.
- Installazione di un soffietto in teflon corazzato DN80 facilmente ispezionabile.
- Potenziamento della tracciatura della tubazione di fondo e, in particolare, potenziamento della tracciatura sulla valvola di fondo del serbatoio.
- Installazione di un livello radar sul pozzetto interno con soglia di allarme “alto livello” posta ad una altezza minima di riempimento del bacino di contenimento. L'allarme interviene sulla chiusura della valvola di fondo.
- Riduzione della temperatura della camicia del serbatoio D6003 a 100 °C ottenuta togliendo la valvola di spurgo condense e quindi portando il vapore alla pressione atmosferica.

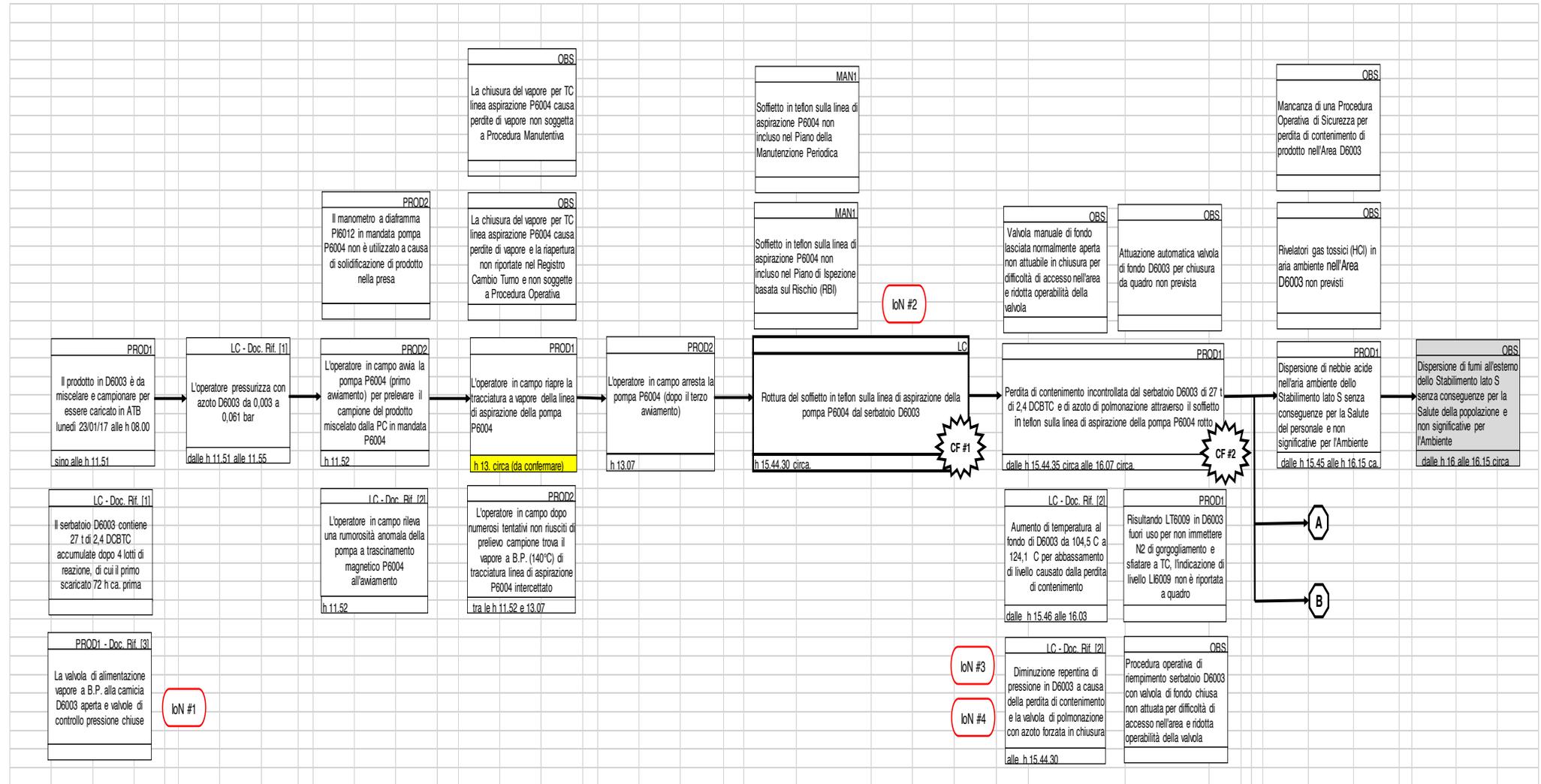
In parallelo alle modifiche impiantistiche sono state svolte prove di laboratorio per verificare la compatibilità e la reattività di alcuni metalli presenti all'interno della sezione di impianto (ferro, alluminio, acciaio) con il prodotto in varie condizioni operative (prodotto caldo e in presenza di acqua oppure di calce, prodotto puro senza l'aggiunta di nessuna altra sostanza, ecc.). Le prove hanno dimostrato che il ferro possiede una forte reattività una volta entrato in contatto con il prodotto.

Per tale motivo si è proceduto a sostituire, per esempio, le griglie in ferro dei pozzetti con altre in AISI316.

4. Bibliografia

[1] Autore TECSA Srl – TECnologia per la Sicurezza e l'Ambiente - Relazione Tecnica – Root Cause Analysis (RCA) – Analisi delle Cause alla Radice dell'Evento Incidentale “Rilascio di prodotto liquido clorurato dalla linea di aspirazione della pompa P6004” avvenuto in data 20.01.2017 nell'Unità di Fotoclorurazione. – Emissione Marzo 2017

5. Allegato 1 - Diagramma dei fattori causali dell'evento incidentale



Analisi delle criticità gestionali all'origine di incidenti rilevanti recentemente occorsi in Italia – casi di sovrappressione in ambienti totalmente confinati

F. Delli Quadri¹

¹ ISPRA - Servizio per i Rischi e la Sostenibilità Ambientale delle Tecnologie, delle Sostanze Chimiche, dei Cicli Produttivi e dei Servizi Idrici e per le Attività Ispettive

Sommario

L'analisi dell'esperienza storica degli incidenti industriali costituisce una fonte basilare da cui estrapolare importanti lezioni tecniche e gestionali da apprendere, sia per i gestori delle industrie a rischio di incidente rilevante, sia per le pubbliche Amministrazioni impegnate nelle attività di controllo. L'analisi di tali eventi costituisce da sempre un'attività fondamentale nell'ambito delle funzioni di prevenzione e controllo del rischio nelle aree industriali svolte dal Settore VAL-RTEC-IND di Ispra, sia per ottenere e monitorare una visione panoramica della situazione incidentale a livello nazionale, sia per focalizzare l'attenzione su specifici aspetti di interesse relativi alle diverse tipologie di rischio presenti nelle realtà industriali Seveso, dove la presenza di sostanze pericolose risulta determinante come fattore aggravante nella possibilità di accadimento/evoluzione di incidente. A tal proposito, il lavoro focalizza l'attenzione, nell'ambito della tematica del *rischio pressione associato a presenza di sostanza pericolosa*, sullo specifico aspetto *rischio di sovrappressione* in ambienti totalmente confinati (apparecchiature, sistemi) inclusi quelli funzionanti a pressione atmosferica. Per tali ambienti infatti la dinamica della sovrappressione risulta senz'altro indice di anomalia di processo/funzionamento/gestione, che introduce quindi il *rischio pressione* nel sistema sebbene l'esercizio normale dello stesso sia previsto a pressione atmosferica. Il problema è critico se si considera che da prove sperimentali eseguite su miscele di comuni gas, combustibili ed aria è stato osservato che il valore massimo della pressione raggiunta in seguito ad un'esplosione in ambiente completamente confinato non dipende dal volume del contenitore, in particolare è stato riscontrato che tale valore risulta essere pari a circa otto volte il valore della pressione della miscela prima dell'innesco. Ne consegue una potenzialità di effetto molto severa in termini di danni prodotti a persone e impianti circostanti.

La ricerca delle cause di radice e carenze gestionali a monte della sovrappressione diventa quindi fondamentale per comprendere e prevenire tali tipologie di incidenti che, in sistemi semplici con condizioni di esercizio sostanzialmente non critiche, non risultano normalmente ipotizzati nell'analisi di rischio. Il lavoro approfondisce infatti 2 casi incidentali rilevanti mortali occorsi negli ultimi anni in stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/15 ubicati in territorio nazionale, accomunati dalla dinamica di esplosione da sovrappressione da innesco di miscela infiammabile sviluppatasi all'interno di serbatoi/containers.

1. Introduzione

La criticità dei casi incidentali simili ai 2 esempi trattati nel presente lavoro, accomunati dalla dinamica di esplosione da sovrappressione da innesco di miscela infiammabile sviluppatasi all'interno di serbatoi/containers, risiede principalmente nel fatto che, a fronte della semplicità impiantistica del processo e delle apparecchiature coinvolte, gli stessi eventi non sono mai stati ipotizzati nell'analisi di sicurezza, e pertanto neanche gestiti a livello di adozione delle necessarie misure preventive e mitigative, tecniche e gestionali. Si aggiunge una eccessiva confidenza dell'operatore con l'impianto, anch'essa sostenuta dalla semplicità delle apparecchiature e delle operazioni da svolgere. Infine una carenza nella conoscenza radicale della pericolosità delle sostanze trattate, e del loro

comportamento anomalo in situazioni fuori-programma. Per tali ragioni gli effetti sono risultati devastanti, con la presenza di decessi in entrambi i casi causati dagli effetti di onda d'urto dell'esplosione, così come di ustioni da incendio connesso con l'esplosione della miscela infiammabile.

2. Caso incidentale 1 – esplosione di serbatoio atmosferico di equalizzazione in stabilimento farmaceutico

L'incidente si è verificato in uno stabilimento dedicato alla fabbricazione di prodotti farmaceutici di base mediante procedimento chimico-biologico e produce, a ciclo continuo, antibiotici in bulk utilizzando processi come la fermentazione, la bioconversione, la filtrazione e l'estrazione, la sintesi chimica. I prodotti farmaceutici sono ottenuti in polvere, ad alto grado di purezza. L'apparecchiatura origine dell'evento è un serbatoio equalizzatore TK ubicato nella sezione trattamento reflui provenienti dal recupero solventi dell'impianto per la produzione di Rifamicina O. Tale produzione parte dalla preparazione del brodo di coltura, in cui vengono inoculati microrganismi in grado di sintetizzare la Rifamicina B. Dopo la fermentazione dall'inoculo, il brodo viene trasferito ad un serbatoio di stoccaggio contenente solvente, e durante il trasferimento è dosato in linea persolfato di sodio per ossidare la Rifamicina B a Rifamicina O.

2.1. Descrizione serbatoio di equalizzazione TK (origine dell'evento)

È un serbatoio atmosferico realizzato in Fe360, di capacità totale pari a 320 m³, di diametro interno pari a 7,62 m e altezza dal fondo al massimo livello di liquido pari a 7,90m. Il serbatoio è di forma cilindrica verticale a fondo piano e con tetto fisso autoportante di forma conica, con sfiato di diametro 8" posto sul tetto in posizione centrale; è dotato inoltre di un agitatore fisso ad elica laterale in posizione radiale, e di sistema di immissione, distribuzione ed estrazione aria come da progetto originario (non attivo al momento dell'incidente). Il serbatoio ha la funzione di polmone di stoccaggio e di equalizzazione del "brodo esausto strippato" (BES), ovvero del refluo derivante dalla produzione di antibiotico rifamicina, e proveniente direttamente dal reparto di estrazione della rifamicina. Tale refluo entra nel serbatoio con un contenuto organico consistente (carico di carbonio COD di 80g/l). Il serbatoio TK, come da progetto realizzato in conformità alle Norme API 650, è corredato di un sistema di insufflazione dell'aria attraverso uno sparger fissato sul fondo ad una altezza di circa 500 mm. Il progetto prevedeva una ossigenazione della massa liquida mediante insufflazione di aria compressa, e un sistema di aspirazione, collocato sullo sfiato posto sul tetto, dei gas formati e dell'aria immessa sul fondo del serbatoio. La depressione all'interno del serbatoio era assicurata da ventilatori centrifughi che evitavano il rilascio in atmosfera di sostanze maleodoranti inviandole al trattamento biologico. In passato è stato effettuato il revamping dell'impianto di equalizzazione a valle del quale il suddetto sistema di insufflaggio aria fu ciecatto poiché ritenuto 'aggiuntivo' all'elica di agitazione laterale, e responsabile di formazione di schiuma e di odori sgradevoli. A seguito della corrosione del fondo del TK, 8 anni dopo sono state apportate manutenzioni e rifatto il fondo del serbatoio previo preventivo svuotamento e bonifica. Dopo la manutenzione è stato ricollocato sul fondo il sistema di insufflamento dell'aria come progettato all'inizio dell'installazione, senza tuttavia mai attivarlo. Inoltre, non era mai stato messo in funzione il sistema di aspirazione collocato sullo sfiato, sempre perché ritenuto corresponsabile della formazione di schiuma ed odori.

2.2. Dinamica dell'incidente

Nel corso di un intervento di modifica programmato sulla linea di alimentazione al serbatoio TK, durante lavori di tipo "a caldo" sul serbatoio si è verificata una esplosione

confinata del serbatoio, con proiezione del tetto a distanza di circa 20 m: l'esplosione ha determinato la morte di un operatore esterno ed il ferimento di 4 altri operatori (3 esterni + 1 interno), tutti impegnati nell'intervento di modifica. Scopo dell'intervento era quello di modificare la linea di alimentazione del BES nel TK (figura 1) con inserimento di uno stacco per il collegamento di una tubazione proveniente dal reparto fermentazione al fine di convogliare, nello stesso serbatoio TK, il refluo BES derivante dalla prova sperimentale di fermentazione effettuata per la nuova produzione di antibiotico Spiramicina.

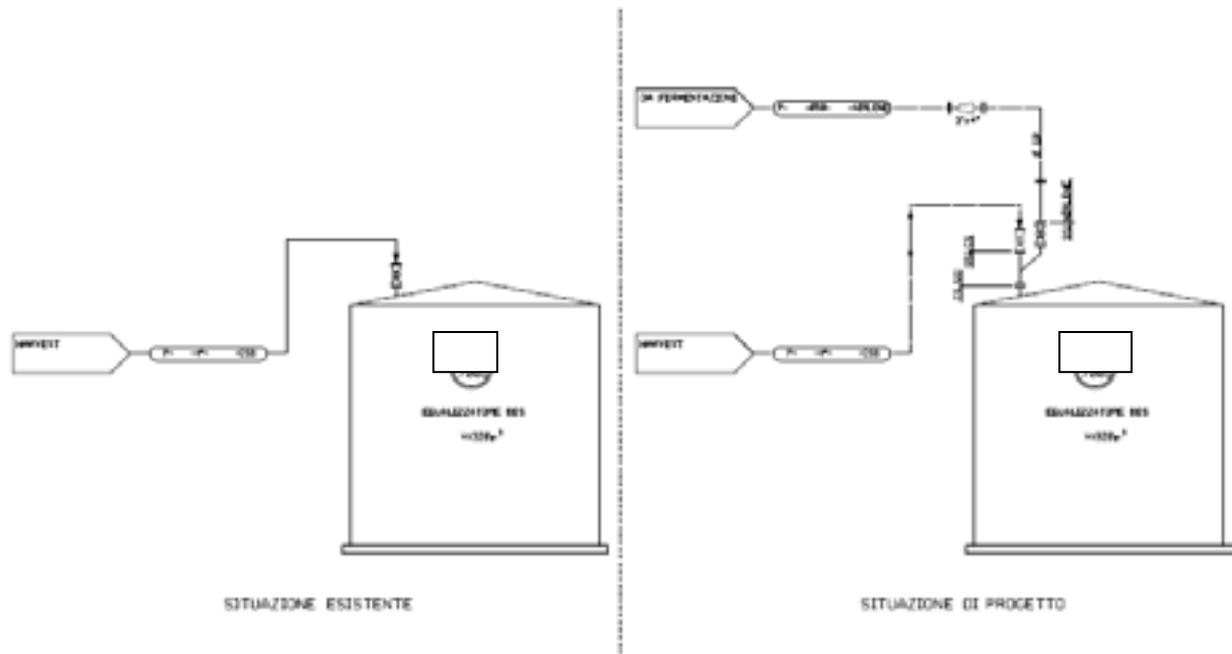


Figura 1



Figure 2 - 3

La linea d'alimentazione BES era stata svuotata dal refluo proveniente dal reparto distilleria. Lo sfiato del serbatoio collocato sulla sommità del tetto era aperto come di sua natura. Il serbatoio era pieno per circa 50% del suo volume. 5 operatori erano impegnati nell'esecuzione del lavoro, 4 dipendenti da ditta esterna e uno interno. Gli operatori della ditta esterna avevano scollegato la linea di alimentazione BES rimuovendo la valvola di intercettazione sul bocchello di ingresso posto sul tetto del serbatoio TK, senza previa chiusura con flangia cieca del bocchello. Un operatore era posizionato sul tetto del TK in prossimità della flangia del bocchello aperto; gli altri operatori si trovavano sulla passerella di accesso al tetto del serbatoio. Stavano quindi iniziando a tagliare il tubo esistente con una mola circolare; probabilmente al contatto della mola elettrica con la tubazione, le scintille prodotte hanno provocato l'innesco di atmosfera esplosiva, non prevista ma

presente all'interno del serbatoio; si è quindi verificata una esplosione confinata CVE all'interno del serbatoio, con proiezione del tetto (effetto missile) a circa 20 metri di distanza (figure 2-3). Per effetto dell'onda d'urto l'operatore posizionato sul tetto è stato sbalzato, con effetti letali, sul tetto del serbatoio adiacente; frammenti del tetto 'missile' del serbatoio sono stati proiettati in alto sugli altri 4 operatori posizionati sulla passerella; i tubi collegati alla cupola del serbatoio (linea sparger di immissione aria collegato alla cupola del serbatoio) sono stati proiettati anch'essi a notevole di distanza (circa 60 m). È stata attivata l'emergenza interna con intervento del personale addetto alla gestione dell'emergenza, che ha prestato immediato soccorso al personale infortunato, inviato all'ospedale vicino. Contemporaneamente è iniziata la ricerca dell'operatore esterno disperso che mancava all'appello e, dopo circa 15 minuti, il suo corpo è stato rinvenuto sul tetto del serbatoio adiacente.



Figura 4

2.3. Cause dirette dell'incidente

Sulla base delle informazioni raccolte in fase di sopralluogo MARS della Commissione ISPRA-INAIL-CNVV ex Art. 26 del d.lgs. 105/15 e dei risultati dell'indagine giudiziaria condotta sull'esplosione, si elencano di seguito le cause dirette ipotizzate e considerate plausibili:

- A. nel serbatoio era presente una miscela esplosiva di gas/vapori, innescata dal taglio della tubazione eseguito con uso di una mola elettrica;
- B. tale miscela di gas/vapori infiammabili è stata prodotta da una fermentazione anaerobica del BES presente nel serbatoio TK, avvenuta attraverso diversi tipi di batteri non facilmente identificabili (poiché dopo l'esplosione il BES è venuto a contatto con l'aria a seguito dell'asportazione del tetto del serbatoio);
- C. tale fermentazione anaerobica è stata resa possibile dall'accumulo e permanenza nel tempo di fanghi e reflui pesanti su fondo e pareti del serbatoio, a causa di assenza di idoneo sistema di miscelazione. Le analisi eseguite sul refluo BES (fase liquida e solida) confermerebbero la formazione, a seguito della fermentazione anaerobica, di idrogeno, metano, solfuro di carbonio, tiometano, carbonil solfuro e altri gas solforati infiammabili, che dunque sarebbero fra i componenti della miscela gas/vapori esplosiva presente all'interno del serbatoio TK. La fase solida (fanghi e reflui BES rinvenuti nel fondo del serbatoio e sulle pareti laterali – fig. 4) formata per sedimentazione dei componenti organici e inorganici più pesanti del BES (residui), tra cui micelio morto, ha funzionato da matrice base di proliferazione di batteri anaerobici non previsti, che hanno trasformato biochimicamente il residuo organico del BES (concentrato del liquido), in presenza di ioni zolfo derivanti dai persolfati, in composti volatili infiammabili (componenti della miscela infiammabile). La fermentazione è probabilmente avvenuta attraverso diversi tipi di batteri non facilmente identificabili in quanto dopo l'esplosione il

liquido (refluo) presente nel serbatoio è venuto a contatto con l'aria a seguito dell'asportazione del tetto del serbatoio stesso.

2.4. Cause indirette o di radice e carenze gestionali SGS connesse

In corrispondenza alle cause dirette ipotizzabili di cui al paragrafo precedente è possibile estrapolare cause 'di radice', legate agli aspetti gestionali del Sistema di Gestione della Sicurezza ex d.lgs.105/15 e all'applicazione della normativa sulla Sicurezza sul Lavoro ex d.lgs. 81/08 e s.m.i. che, sulla base delle informazioni raccolte hanno avuto un ruolo nel verificarsi dell'evento stesso e nella sua evoluzione. Per quanto attiene la Direttiva ATEX (ultima versione ATEX 2014/34/UE) esiste l'obbligo per il datore di lavoro della valutazione dei rischi di formazione di atmosfere esplosive, con individuazione attraverso adeguata analisi delle aree a diverso livello di rischio. In funzione del livello di rischio inoltre, vanno utilizzate attrezzature marchiate ATEX ed adottate altre misure preventive incluse segnaletica e formazione del personale. L'azienda aveva in generale ottemperato alla normativa, affidandosi ad una ditta di consulenza specialistica: tuttavia l'area trattamento acque reflue provenienti da produzione di rifamicina non era stata considerata a rischio di esplosione. Pertanto l'applicazione della normativa, pur se eseguita, non si è rivelata adeguata per via di tale errore che certamente si poteva evitare: la formazione di biogas da fermentazione di reflui organici, seppure in settori diversi, è un fenomeno comunque noto, anche se poco probabile. Sarebbe stato dunque più corretto classificare l'area di interesse come zona 3, cioè "Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva", per la quale le misure richieste dalla classificazione ATEX sarebbero probabilmente state sufficienti ad evitare l'evento. Per quanto attiene gli elementi SGS coinvolti, evidenziati anche in fase di ispezione SGS condotta nello stabilimento, vengono di seguito discussi.

- **Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti ed analisi di rischio:** inadeguata identificazione e aggiornamento della pericolosità connessa con il BES e con il relativo processo di trattamento eseguito. In particolare non era prevista la caratterizzazione del BES all'ingresso del serbatoio (assenza di rapporti di prova di analisi chimiche del BES in ingresso al TK, oltre che in uscita, in modo da poter raffrontare la composizione del BES a monte e a valle del serbatoio). Non è stato valutato il rischio esplosione e non è stata presa in considerazione la possibilità che si potesse formare una atmosfera esplosiva all'interno del TK per fermentazione anaerobica della Biomassa presente nel BES. Nell'analisi di rischio condotta sull'impianto era emersa non critica l'unità di trattamento acque reflue della produzione di rifamicina O, in particolare del processo di equalizzazione all'interno del serbatoio TK, e dunque non era stata effettuata l'analisi di dettaglio (es. con Hazop) che avrebbe certamente rilevato alcune possibili ipotesi incidentali.
- **Adegamenti impiantistici per la riduzione del rischio:** le condizioni di esercizio del serbatoio TK non erano conformi a quelle specificate sul manuale operativo da progetto, poiché non era attivo il sistema di insufflaggio aria interno che aveva duplice importante funzione:
 - garantire la presenza sufficiente di ossigeno in fase liquida per evitare lo sviluppo di attività biologiche anaerobiche con produzione di biogas esplosivo;
 - garantire una corretta e completa miscelazione del BES liquido all'interno del serbatoio, realizzata all'epoca solo tramite elica laterale di dimensioni evidentemente ridotte rispetto al diametro del serbatoio, evitando l'accumulo dei fanghi organici nel fondo e sulle pareti del serbatoio. Tale accumulo si è prodotto nell'arco degli ultimi 2 anni.
- **Controllo operativo e procedure di manutenzione:** l'innesco della miscela esplosiva è stato causato dalla inosservanza della procedura sui permessi di lavoro aziendale che prevedeva, nel caso di "lavori a caldo" in situ, le seguenti azioni preventive di sicurezza:

- valutazione, prima della emissione del p.d.I a caldo, della eventualità che il lavoro possa essere effettuato senza l'uso di fiamme libere, ed esame della possibilità di rimozione e trasporto dell'apparecchiatura in un'area non pericolosa;
- preventiva bonifica dell'apparecchiatura;
- ventilazione dei recipienti;
- controlli esplosimetrici delle aree confinate per individuazione presenza gas infiammabili;
- isolamento meccanico della apparecchiatura.

In particolare, le misure precauzionali operative da adottarsi nell'ambito dell'effettuazione di "lavori a caldo" non sono state attuate prima dell'espletamento dei lavori, durante i quali si è verificato l'evento incidentale. La mera applicazione della procedura sul p.d.I. aziendale, pur in assenza di adeguata analisi di rischio, avrebbe potuto evitare l'evento incidentale.

- **Addestramento/formazione del personale:** la mancata applicazione della procedura sui p.d.I. non è solo connessa ad un fattore umano di inattenzione degli operatori che eseguivano il lavoro e che quindi non hanno seguito le misure di sicurezza preventive indicate nella procedura stessa, ma anche ad una carenza di formazione degli stessi operatori, riscontrata in campo dal componente VVF che ha seguito le operazioni di soccorso durante intervista. Inoltre nella procedura p.d.I. viene chiaramente esplicitato che 'qualunque sistema di isolamento deve essere sempre approvato dal Supervisore del processo interessato', e pertanto il mancato isolamento era stato evidentemente approvato dal supervisore, come si vede nel modulo p.d.I. compilato, dunque emerge anche una carente formazione del supervisore. Infine la superficialità con cui sono stati compilati e gestiti i moduli dei permessi di lavoro costituisce un ulteriore indicatore della carente formazione e cultura della sicurezza del personale interno ed esterno coinvolto nell'evento.
- **Gestione delle modifiche:** l'intervento oggetto dei lavori era da considerarsi come una modifica impiantistica anche se temporanea (non era la soluzione definitiva) e pertanto oggetto di una adeguata valutazione dei rischi e pianificazione degli interventi. Una HSE review era stata effettuata il giorno prima della modifica ma non sono stati valutati i rischi possibili connessi con la modifica. Anche per l'intervento di modifica conseguente al revamping effettuato in passato, di cieatura del sistema di insufflaggio aria interno al serbatoio, non era stata stata effettuata analisi di rischio. In entrambi i casi una preventiva e adeguata analisi del rischio avrebbe potuto evitare l'incidente.

3. Caso incidentale 2 – esplosione di un fusto metallico durante scolo di infiammabile

Si è verificato in uno stabilimento dove si svolge attività di tipo commercio all'ingrosso e distribuzione di prodotti chimici e petrolchimici, quali acetati, solventi e diluenti e formulazione di miscele di solventi. L'azienda ha come principali clienti le società farmaceutiche. L'approvvigionamento dei prodotti è effettuato prevalentemente dal vettore esclusivo X-Autostrasporti. Una volta in stabilimento, i prodotti sono scaricati e stoccati in serbatoi interrati, nei quali vengono trasferiti dalle autobotti per gravità, con sistemi a circuito chiuso e collegamento a mezzo di manichetta flessibile. Il deposito è costituito da un parco di 50 serbatoi interrati per uso commerciale, più 3 serbatoi interrati di gasolio ad uso interno. Vi sono 3 capannoni utilizzati per lo stoccaggio in fusti dei diversi prodotti:

Capannone A:	Prodotti infiammabili e/o tossici, tossici per l'ambiente (es. Acetato di butile, Toluene, Acetone, Alcool etilico, Alcool metilico, Cicloesano ecc.);
Capannone B:	Prodotti non infiammabili e/o tossici (clorurati, es. Cloruro di metilene, Percloroetilene, ecc.)
Capannone C:	Prodotti infiammabili e/o tossici per l'ambiente (es. Esano, Eptano, Oli medi, acqua ragia minerale, acqua ragia dearomatizzata, oli lubrificanti ecc.)

I prodotti in vendita, distribuiti sempre per lo più dalla ditta X-Autotrasporti, escono dallo stabilimento prevalentemente in forma sfusa mediante autobotti, e in misura minore in forma imballata (in fusti metallici da 200 litri) mediante autocarri a cassone. In quest'ultimo caso i prodotti sono prelevati dai rispettivi serbatoi ed infustati. L'infustamento dei prodotti infiammabili, sia singoli sia miscelati in base alle formulazioni richieste, è effettuato nei capannoni appositamente predisposti, ovvero capannone A e C.

3.1. Descrizione impianto ed apparecchiatura origine dell'evento

L'evento ha avuto origine all'interno del capannone A, in cemento armato e dell'estensione di circa 600 m², ove avviene l'infustamento dei prodotti infiammabili acetati (tra cui l'acetato di butile coinvolto nell'evento). Il capannone è protetto da un impianto di spegnimento manuale a pioggia. Il capannone è classificato area con possibile presenza di atmosfere esplosive (zona 2) ai sensi della Direttiva ATEX. All'interno del capannone i fusti sono stoccati su rulliere, dove permangono in attesa di essere caricati su automezzi tramite carrello elevatore, per il successivo conferimento al cliente (fig.5). Vi sono inoltre due postazioni di carico esattamente simmetriche, denominate D1 e D2, ognuna alimentata da 2 linee di trasferimento prodotti e dotata di 2 pistole di carico, bilancia, pinza di messa a terra, aspiratore ad azionamento manuale. Nello specifico, nella postazione D1, una pistola è collegata alla linea alimentata dalla pompa ausiliaria posta esternamente al capannone sotto la pensilina D; questa è la linea di interesse per l'incidente. L'altra pistola, sempre in postazione D1, è collegata alle linee alimentate dai 14 serbatoi interrati n.1-14 posti esternamente al capannone. Il prodotto può essere trasferito dai serbatoi interrati al Capannone A o attraverso linee dedicate o (in caso di specifiche di purezza del prodotto particolarmente elevate, come nel caso in esame) attraverso contenitori mobili (cisternette da 1000 l o ATB). In tal caso l'acetato di butile segue, nello specifico, il percorso sotto indicato:

- trasferimento da serbatoio interrato n. 40 a cisternette da 1 m³ in circuito chiuso su pensilina B con braccio di carico;
- spostamento manuale su carrello delle cisternette riempite dalla pensilina B alla pensilina D, in corrispondenza della pompa ausiliaria posta esternamente al capannone A, la quale trasferisce i prodotti alla postazione D1 di infustamento tramite pipeline (fig. 6);
- infustamento del prodotto in postazione D1 dentro il capannone A, ove è avvenuto l'evento.



Figure 5 – 6

Nell'operazione di infustamento, dopo aver provveduto a collegare il bordo superiore del fusto con la pinza di messa a terra, acceso l'aspiratore e posizionato in corrispondenza dell'apertura del fusto, l'operatore procede con il riempimento dello stesso previo inserimento ed apertura della pistola ed attivazione della pompa. Nel caso della

postazione D1 con pistola connessa alla pompa ausiliaria esterna, l'operatore comanda la pompa e l'aspiratore mediante una pulsantiera posta in prossimità della bilancia. Il fusto da riempire proviene da una rulliera sita in quota (linea trasferimento fusti vuoti, fig.7) sulla quale scorrono i fusti vuoti, provenienti dalla zona magazzino. Il fusto vuoto è calato su una rulliera a piano pavimento, da cui è movimentato su una seconda rulliera che lo conduce alla bilancia, che funge anche da postazione di riempimento e pesatura. Il fusto, una volta riempito, è spostato su una terza rulliera, in comune alle due postazioni di riempimento e montata su binario, che consente il trasferimento del fusto pieno nell'area di stoccaggio all'interno del capannone stesso. L'impianto di travaso solventi opera in modo tale da garantire che la velocità del prodotto nelle tubazioni non superi il valore di 1m/s (condizione empirica da adottare in caso di liquidi in tubazioni che sboccano in contenitori in genere, per evitare la generazione di cariche elettrostatiche pericolose). L'apparecchiatura origine dell'evento è dunque il fusto metallico da 200 l, omologato ADR, dotato di apertura di carico da 2" e sfiato vent, verniciato esternamente.

3.2. Dinamica dell'incidente

Verso le ore 11.30, mentre un operatore autista, dipendente di ditta terza X-Autotrasporti (ditta storica che effettua servizio di trasporto in esclusiva per la società), stava svolgendo l'attività di infustamento di acetato di butile, o più probabilmente durante lo scolo della linea d'infustamento, si è verificato l'innesco dei vapori all'interno del fusto in lavorazione, che ne ha provocato l'esplosione. Il fondo del fusto si è staccato, per effetto della pressione sviluppata dalla deflagrazione al suo interno, riversando con violenza il liquido contenuto, ormai in fiamme, in parte a terra ed in parte addosso all'operatore che, trasportato in ospedale per ustioni sull'80% del corpo, è deceduto dopo 15 giorni. Il conseguente incendio si è propagato con modesta entità, perché essenzialmente alimentato solo dal liquido sversato.



Figura 7

La quantità di liquido coinvolta stimata è dell'ordine del contenuto della linea di travaso, dalla pompa ausiliaria sita in banchina esterna D fino alla pistola di erogazione, quantità corrispondente appunto alla fase finale di infustamento (scolo). Data la dimensione della linea (lunghezza circa 22 metri e diametro 1 1/2") questa quantità è dell'ordine di 25 litri max, pari a 22kg. L'incendio è stato domato nell'arco di pochi minuti con l'utilizzo dell'impianto fisso di estinzione, posto nel locale infustamento, e l'utilizzo degli idranti esterni da parte della squadra di emergenza interna. I vigili del fuoco del Comando Provinciale VVF, chiamati in soccorso, sono giunti tempestivamente sul posto quando l'incendio era stato già estinto, ed hanno terminato l'intervento di messa in sicurezza ed emergenza in pochi minuti.

3.3. Cause dirette dell'incidente

L'analisi delle cause dell'evento, supportata da indagine giudiziaria, ha consentito di formulare le seguenti ipotesi:

a. cause di innesco della miscela infiammabile all'interno del fusto:

- l'esplosione del fusto è da addebitarsi all'innesco dell'atmosfera infiammabile sviluppatasi al suo interno, che normalmente si forma sopra il pelo libero di un liquido infiammabile, quale è l'Acetato di Normal Butile (punto di infiammabilità + 27°C) in fase di travaso al momento dell'incidente. Infatti i fusti in attesa di riempimento sono pieni d'aria e non appena ha inizio l'introduzione del liquido, questo contestualmente evapora; sia la tensione di vapore dell'Acetato di butile (15 hPa a 20°C) che il rateo di evaporazione (BUAC7=1) sono piuttosto alti, dunque è possibile che quasi immediatamente la concentrazione dei vapori entri nel campo d'infiammabilità, creando di fatto i presupposti per un'esplosione. Detto questo, l'innesco della miscela infiammabile è stato probabilmente dovuto ad una scarica elettrostatica, conseguente ad inefficace contatto della pinza di messa a terra con il fusto. La pinza, infatti, non era dotata di sistema di interblocco, sistema che consente il trasferimento del prodotto nel fusto solo in caso di messa a terra verificata. Inoltre l'attacco della pinza sul bordo verniciato del fusto (unico punto possibile di contatto) riduce ulteriormente l'efficacia della continuità del collegamento equipotenziale, specie se ricostruito più volte a seguito di rigenerazione del fusto stesso. Infine non era presente, nell'area infustamento, alcun sistema di rilevazione di atmosfere potenzialmente pericolose.
- L'incidente è avvenuto probabilmente durante lo scolo della linea d'infustamento, con innesco dei vapori all'interno del fusto in lavorazione, che ne ha provocato l'esplosione. Nella fase di scolo dei residui di acetato, infatti, è maggiore il rischio di formazione di atmosfera esplosiva nello spazio interno del fusto sopra al pelo libero della fase liquida, essendo piccola la quantità di liquido infustata. In tali condizioni è più probabile che la miscela infiammabile rientri nel campo di infiammabilità.

b. cause di 'aggravamento' danni e mancata mitigazione:

- importante aspetto emerso a riguardo è legato alla formazione dell'addetto infortunato, il cui mansionario per la qualifica di autista non prevede, come anche dichiarato dal gestore, l'esecuzione di operazioni di infustamento di prodotti. Nel dettaglio l'addetto era stato prima dipendente della ditta e successivamente della X-Autotrasporti (da 1 mese e mezzo circa prima dell'incidente). Era stato assunto con la qualifica di autista dalla prima azienda e le condizioni contrattuali sono state mantenute inalterate con il passaggio alla seconda azienda. Il mansionario dei soggetti ricoprenti la qualifica di autista comprende operazioni quali caricare e scaricare le cisterne e i fusti presso l'azienda e presso i clienti finali, condurre l'automezzo loro affidato e provvedere alla manutenzione ordinaria dello stesso. Sotto il profilo formale, dunque, egli non era formato per effettuare operazioni di infustamento di liquidi infiammabili, anche se è possibile che egli fosse a conoscenza delle modalità di esecuzione dell'operazione, almeno per affiancamento con altri operatori.
- Si osserva inoltre, come ulteriore causa di 'aggravamento' che ha portato al decesso dell'operatore, che tale decesso poteva probabilmente essere evitato se lo stesso operatore avesse regolarmente indossato tutti i DPI (tuta, casco ...) previsti per l'operazione di infustamento, in particolare la tuta antistatica ignifuga, che avrebbe protetto la parte del corpo seriamente ustionata dalle fiamme. L'operatore deceduto, al momento dell'esplosione, indossava solo scarpe e guanti antistatici, ma era sprovvisto di tuta, casco ed occhiali. Si aggiunge infine che, il giorno dell'incidente, la mancanza di utilizzo dei DPI da parte dell'operatore non era stata notata/richiamata né dai colleghi operatori, impegnati in altre operazioni di trasferimento, comunque

interfacciatisi con l'infortunato, né dalla direzione che supervisiona le operazioni, presente quel giorno dentro gli uffici.

3.4. Cause indirette o di radice e carenze gestionali SGS connesse

Dalle informazioni raccolte e dalla ricostruzione della dinamica dell'evento ipotizzata, è possibile riflettere su possibili cause di radice che sono verosimilmente da ricondursi a carenze gestionali che hanno determinato l'evento:

a. elementi gestionali legati alle cause innesco:

- necessità di garantire adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione del rischio per l'attività specifica di infustamento liquidi infiammabili e, in generale, per il trasferimento dei liquidi pericolosi all'interno dello stabilimento. Necessità di adozione delle migliori tecnologie disponibili per i sistemi di sicurezza adottati in tale fase, nonché di misure di sicurezza adeguate in linea anche con le prescrizioni del CTR formulate in merito all'incidente:
- prevedere, tra le operazioni preliminari all'infustamento, la verifica dell'effettivo collegamento equipotenziale del contenitore mobile da riempire. Qualora tale operazione avesse esito negativo, deve essere precluso l'avvio delle pompe utilizzate per l'infustamento;
- prevedere l'interdizione dell'operazione di infustamento anche per le seguenti condizioni:
 1. malfunzionamento o mancata attivazione dell'impianto di aspirazione a servizio dell'area di infustamento;
 2. rilevazione di atmosfere infiammabili nella suddetta area mediante installazione di un sistema di rilevazione di vapori infiammabili;
 3. raggiungimento del massimo grado di riempimento nel contenitore mobile in funzione della sostanza da infustare.

Necessaria riflessione su modalità di esecuzione di questa fase di attività (scolo) più idonee alla prevenzione della formazione di atmosfere esplosive.

- Necessità di revisione dell'analisi di sicurezza eseguita dall'azienda, con considerazione di tutte le ipotesi incidentali in area infustamento, inclusa la fase finale di scolo; una corretta e completa analisi avrebbe portato alla individuazione di misure di sicurezza più adeguate a prevenire e/o mitigare l'evento occorso.
- Necessità di aggiornare il documento di valutazione del rischio esplosione garantendo l'adeguatezza, rispetto alla classificazione delle aree con pericolo di esplosione, di tutte le attrezzature in esse installate.

b. Elementi gestionali legati alle cause di 'aggravamento' danni e mancata mitigazione dell'evento:

- necessità di garantire una corretta definizione di ruoli e mansioni sia del personale operativo (coordinamento ed esecuzione lavori) che del personale dirigente (supervisione dei lavori);
- necessità di rivedere piano e attività di formazione ed addestramento del personale interno ed esterno, anche ai fini di migliorare l'interfaccia operatore-impianto, in relazione ai ruoli e mansioni ridefiniti secondo il punto precedente.

Una adeguata implementazione di SGS prevede, in termini di formazione dei lavoratori interni ed esterni, che il personale di azienda sia stato formato sulle attività di analisi delle situazioni incidentali, per l'individuazione delle cause di tipo tecnico, organizzativo e gestionale, che a seguito delle attività di formazione ed addestramento siano verificati l'efficacia dell'addestramento ed il grado di consapevolezza raggiunto, e che anche le ditte terze che lavorano in stabilimento abbiano opportunamente svolto l'attività di formazione per i propri addetti e ne venga verificata l'efficacia. In termini di fattore umano ed interfaccia operatore-impianto, l'SGS prevede l'esistenza e l'attuazione di programmi di addestramento ed esercitazioni per migliorare il

comportamento dell'operatore; che l'organizzazione dei turni di lavoro e delle mansioni siano tali da considerare i rischi dovuti a stress lavoro-correlato a cui sono sottoposti i lavoratori; e che siano posti in atto meccanismi di verifica del mantenimento delle idonee condizioni psicofisiche.

4. Conclusioni - criticità gestionali ed elementi comuni emersi dal raffronto dei 2 casi incidentali

Il rischio di sovrappressione all'interno di apparecchiature che lavorano con sostanze pericolose, indipendentemente dalle normali condizioni operative e dai parametri operativi di esercizio, va comunque considerato nell'analisi di rischio effettuata dal gestore, ed analizzato come anomalia di processo e di gestione, al fine consentire la formulazione tutte le necessarie misure tecniche e gestionali preventive per il verificarsi di esplosioni, conseguenti al suddetto rischio. L'analisi dei casi, effettuata dapprima singolarmente e poi in termini comparati, seguendo la dinamica incidentale nonché lo sviluppo dei due scenari, conduce alla evidenziazione di elementi di criticità simili cui sono associabili carenze gestionali SGS analoghe e di peso sostanziale, espressi nella tabella A che segue, a dispetto della semplicità impiantistica e di processo dei contesti considerati.

Tabella A - Criticità gestionali ed elementi comuni emersi dal raffronto dei 2 casi incidentali

Aspetti di dinamica ed analisi della sovrappressione in ambiente totalmente confinato	CASO incidentale 1	CASO incidentale 2	NOTE
Apparecchiatura origine dell'evento	Serbatoio atmosferico equalizzatore realizzato in Fe360, di capacità totale pari a 320 m3, di diametro interno pari a 7,62 m e altezza dal fondo al massimo livello di liquido pari a 7,90m. Il serbatoio è di forma cilindrica verticale a fondo piano e con tetto fisso autoportante di forma conica, con sfiato di diametro 8" posto sul tetto in posizione centrale; è dotato inoltre di agitatore fisso ad elica laterale in posizione radiale, e di sistema di immissione, distribuzione ed estrazione aria.	Fusto metallico da 200 l, dotato di apertura di carico da 2" e sfiato vent, verniciato esternamente.	Ambiente totalmente confinato. Semplicità impiantistica del processo e delle apparecchiature coinvolte. Effetti risultati devastanti, con la presenza di decessi causati da effetti di onda d'urto dell'esplosione, piuttosto che di ustioni da incendio connesso con l'esplosione della miscela infiammabile.
Dinamica incidente - esplosione da sovrappressione da innesco di miscela infiammabile sviluppatasi all'interno di serbatoi/containers	Nel corso di un intervento di modifica programmato sulla linea di alimentazione al serbatoio TK, che conteneva brodo esausto di fermentazione strippato (BES) proveniente dal reparto Distilleria del processo di produzione Rifamicina, durante lavori di tipo "a caldo" sul serbatoio si è verificata una esplosione confinata del serbatoio, con proiezione del tetto a distanza di circa 20 m: l'esplosione ha determinato la morte di un operatore esterno ed il ferimento di 4 altri operatori (3 esterni + 1 interno), tutti impegnati nell'intervento di modifica.	Mentre un operatore autista, dipendente di ditta terza, stava svolgendo l'attività di infustamento di acetato di butile, o più probabilmente durante lo scolo della linea d'infustamento, si è verificato l'innesco dei vapori all'interno del fusto in lavorazione, che ne ha provocato l'esplosione. Il fondo del fusto si è staccato, per effetto della pressione sviluppata dalla deflagrazione al suo interno, riversando con violenza il liquido contenuto, ormai in fiamme, in parte a terra ed in parte addosso all'operatore che, trasportato in ospedale per ustioni sull'80% del corpo, è deceduto dopo 15 giorni.	Incidenti occorsi durante operazione effettuata in presenza di ditta esterna, direttamente coinvolta e colpita in modo letale dagli effetti dell'esplosione.
Sovrappressione determinata da anomalia di processo /funzionamento /gestione, che introduce il rischio pressione nel sistema sebbene l'esercizio normale dello stesso sia previsto a pressione atmosferica.	La miscela esplosiva di gas infiammabili è stata prodotta nel serbatoio dalla fermentazione anaerobica della fase solida BES contenuta, resa possibile dall'accumulo e permanenza nel tempo di fanghi e reflui pesanti a causa di assenza di idoneo sistema di miscelazione. La fase solida ha funzionato da matrice base di proliferazione di batteri anaerobici non previsti, che hanno trasformato biochimicamente il residuo organico del BES (concentrato del liquido), in presenza di ioni zolfo derivanti dai persolfati, in composti volatili infiammabili (componenti della miscela infiammabile). La fermentazione è probabilmente avvenuta attraverso diversi tipi di batteri non facilmente identificabili.	L'incidente è avvenuto durante lo scolo della linea d'infustamento. Nella fase di scolo dei residui di acetato, è maggiore il rischio di formazione di atmosfera esplosiva nello spazio interno del fusto sopra al pelo libero della fase liquida, essendo piccola la quantità di liquido infustato. In tali condizioni è più probabile che la miscela infiammabile rientri nel campo di infiammabilità.	Anomalia di processo/ gestione: <ul style="list-style-type: none"> • fermentazione inattesa • formazione di miscela infiammabile in fase di scolo.
Innesco miscela di gas/vapori infiammabile	Taglio della tubazione eseguito con uso di una mola elettrica.	Scarica elettrostatica, conseguente ad inefficace contatto della pinza di messa a terra con il fusto.	Innesco da scintilla o da scarica elettrostatica.
Cause dirette	Nel serbatoio era presente una miscela esplosiva di gas/vapori, innescata dal taglio della tubazione eseguito con uso di una mola elettrica. La miscela di gas/vapori infiammabili è stata prodotta dalla fermentazione anaerobica del BES presente nel serbatoio TK, avvenuta attraverso diversi tipi di batteri non facilmente identificabili. La fermentazione anaerobica del refluo BES è stata resa possibile dall'accumulo e permanenza nel tempo di fanghi e reflui pesanti su fondo e pareti del serbatoio, a causa di assenza di idoneo sistema di miscelazione.	L'innesco della miscela infiammabile all'interno del fusto è stato probabilmente dovuto ad una scarica elettrostatica, conseguente ad inefficace contatto della pinza di messa a terra con il fusto. La pinza non era dotata di sistema di interblocco, sistema che consente il trasferimento del prodotto nel fusto solo in caso di messa a terra verificata. Inoltre l'attacco della pinza sul bordo verniciato del fusto (unico punto possibile di contatto) riduce ulteriormente l'efficacia della continuità del collegamento equipotenziale, specie se ricostruito più volte a seguito di rigenerazione del fusto stesso.	
Cause di radice e carenze gestionali a monte della sovrappressione			

ATEX	L'area trattamento acque reflue provenienti da produzione di rifamicina non è stata considerata a rischio di esplosione.	Il capannone è classificato area con possibile presenza di atmosfere esplosive (zona 2) ai sensi della Direttiva ATEX. Tuttavia è emersa la necessità di aggiornare il documento di valutazione del rischio esplosione garantendo l'adeguatezza, rispetto alla classificazione delle aree con pericolo di esplosione, di tutte le attrezzature in esse installate.	Classificazione ATEX assente o non adeguata.
Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti	Inadeguata identificazione e aggiornamento della pericolosità connessa con il BES e con il relativo processo di trattamento eseguito. In particolare non era prevista la caratterizzazione del BES all'ingresso del serbatoio (assenza di rapporti di prova di analisi chimiche del BES in ingresso al TK, oltre che in uscita, in modo da poter raffrontare la composizione del BES a monte e a valle del serbatoio). La sottovalutazione della pericolosità del BES ha indotto in errore nella valutazione ATEX. Non è stato valutato il rischio esplosione e non è stata presa in considerazione la possibilità che si potesse formare una atmosfera esplosiva all'interno del TK per fermentazione anaerobica della Biomassa presente nel BES. Nell'analisi di rischio condotta sull'impianto era emersa non critica l'unità di trattamento acque reflue della produzione di rifamicina O, in particolare del processo di equalizzazione all'interno del serbatoio TK, e dunque non era stata effettuata l'analisi di dettaglio (es. con Hazop) che avrebbe certamente rilevato alcune possibili ipotesi incidentali.	Mancata considerazione nell'analisi di sicurezza di tutte le ipotesi di incidente in area infustamento, inclusa la fase finale di scolo; l'analisi eseguita dall'azienda infatti si limitava, come evidenziato anche dal CTR nel suo verbale di sopralluogo, alle sole ipotesi di rottura per caduta fusto e successivo sversamento. Una corretta e completa analisi avrebbe portato alla individuazione di misure di sicurezza più idonee ed adeguate a prevenire e/o mitigare l'evento occorso.	Eventi non ipotizzati nell'analisi di sicurezza, e pertanto non gestiti a livello di adozione delle necessarie misure preventive e mitigative, tecniche e gestionali. Il rischio di sovrappressione all'interno di apparecchiature che lavorano con sostanze pericolose, indipendentemente dalle normali condizioni operative e dai parametri operativi di esercizio, va comunque considerato nell'analisi di rischio, ed analizzato come anomalia di processo e di gestione, al fine consentire la formulazione di tutte le necessarie misure tecniche e gestionali preventive per il verificarsi di esplosioni, conseguenti al suddetto rischio.
Adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione del rischio	A valle del revamping dell'impianto di equalizzazione il sistema di insufflaggio aria fu ciecato poiché ritenuto 'aggiuntivo' all'elica di agitazione laterale, e responsabile di formazione di schiuma e di odori sgradevoli. Il sistema non fu più riattivato, così come non fu mai messo in funzione il sistema di aspirazione collocato sullo sfianto, sempre perché ritenuto corresponsabile della formazione di schiuma ed odori. Le condizioni di esercizio del serbatoio TK non erano conformi a quelle specificate sul manuale operativo da progetto, poiché non era attivo il sistema di insufflaggio aria interno che aveva duplice importante funzione.	Mancata considerazione, tra le operazioni preliminari all'infustamento, della verifica dell'effettivo collegamento equipotenziale del contenitore mobile da riempire. Qualora tale operazione avesse esito negativo, deve essere precluso l'avvio delle pompe utilizzate per l'infustamento. Mancata considerazione dell'interdizione dell'operazione di infustamento anche per le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> • malfunzionamento o mancata attivazione dell'impianto di aspirazione a servizio dell'area di infustamento; • rilevazione di atmosfere infiammabili nella suddetta area mediante installazione di un sistema di rilevazione di vapori infiammabili; • raggiungimento del massimo grado di riempimento nel contenitore mobile in funzione della sostanza da infustare. Infine non è presente, nell'area infustamento, alcun sistema di rilevazione di atmosfere potenzialmente pericolose.	Una carente analisi di rischio comporta necessariamente una carente corrispondente considerazione degli adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione del rischio
Controllo operativo e procedure di manutenzione	La procedura interna "Permesso di Lavoro" non è stata rispettata. In particolare, le misure precauzionali operative da adottarsi nell'ambito dell'effettuazione di "lavori a caldo" non sono state attuate prima dell'espletamento dei lavori, durante i quali si è verificato l'evento incidentale. La mera applicazione della procedura sui permessi di lavoro aziendale, pur in assenza di adeguata analisi di rischio, avrebbe potuto evitare l'evento incidentale.	Le procedure operative relative all'attività di infustamento non prevedevano di: <ul style="list-style-type: none"> • inserire tra le operazioni preliminari all'infustamento, la verifica dell'effettivo collegamento equipotenziale del contenitore mobile da riempire. Qualora tale operazione avesse esito negativo, deve essere precluso l'avvio delle pompe utilizzate per l'infustamento; • inserire l'interdizione dell'operazione di infustamento anche per le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> ○ malfunzionamento o mancata attivazione dell'impianto di aspirazione a servizio dell'area di infustamento; ○ rilevazione di atmosfere infiammabili nella suddetta area mediante installazione di un sistema di rilevazione di vapori infiammabili; 	Carenza nelle procedure operative o in termini di contenuto delle procedure o in termini di rispetto delle stesse.

		<ul style="list-style-type: none"> ○ raggiungimento del massimo grado di riempimento nel contenitore mobile in funzione della sostanza da infustare. 		
Addestramento /formazione personale. Fattore umano.	del	<p>la mancata applicazione della procedura sui permessi di lavoro, che comunque appare non precisa nella definizione di 'apparecchiature' da sottoporre a ciecatura in caso di lavoro a caldo, non è solo connessa ad un fattore umano di inattenzione degli operatori che eseguivano il lavoro e che quindi non hanno seguito le misure di sicurezza preventive indicate nella procedura stessa, ma anche ad una carenza di formazione degli stessi operatori, riscontrata in campo dal componente VVF che ha seguito le operazioni di soccorso durante intervista. Inoltre nella procedura p.d.l. viene chiaramente esplicitato che 'qualunque sistema di isolamento deve essere sempre approvato dal Supervisore del processo interessato', e pertanto il mancato isolamento era stato evidentemente approvato dal supervisore, come si vede nel modulo p.d.l. compilato, dunque emerge anche una carente formazione del supervisore.</p> <p>Infine la superficialità con cui sono stati compilati e gestiti i moduli dei permessi di lavoro costituisce un ulteriore indicatore della carente formazione e cultura della sicurezza del personale interno ed esterno coinvolto nell'evento.</p>	<p>Assenza di corretta definizione di ruoli e mansioni sia del personale operativo (coordinamento ed esecuzione lavori) che del personale dirigente (supervisione dei lavori), necessità di rivedere piano e attività di formazione ed addestramento del personale interno ed esterno, anche ai fini di migliorare l'interfaccia operatore-impianto, in relazione ai ruoli e mansioni ridefiniti.</p> <p>Nello specifico, carenza nella formazione dell'addetto infortunato, il cui mansionario per la qualifica di autista non prevede l'esecuzione di operazioni di infustamento di prodotti.</p> <p>Inoltre il decesso poteva probabilmente essere evitato se lo stesso operatore avesse regolarmente indossato tutti i DPI (tuta, casco ...) previsti per l'operazione di infustamento, in particolare la tuta antistatica ignifuga, che avrebbe protetto la parte del corpo seriamente ustionata dalle fiamme. La mancanza di utilizzo dei DPI da parte dell'operatore non era stata notata/richiamata né dai colleghi operatori, impegnati in altre operazioni di trasferimento, comunque interfacciatisi con l'infortunato, né dalla direzione che supervisiona le operazioni, presente quel giorno dentro gli uffici.</p>	<p>Carenza nella conoscenza radicale della pericolosità delle sostanze trattate, e del loro comportamento anomalo in situazioni fuori-programma.</p> <p>Eccessiva confidenza degli operatori, compresi gli esterni, con l'impianto, sostenuta dalla semplicità delle apparecchiature e delle operazioni da svolgere.</p>
Gestione modifiche	delle	<p>L'intervento oggetto dei lavori era da considerarsi come una modifica impiantistica anche se temporanea (non era la soluzione definitiva) e pertanto oggetto di una adeguata valutazione dei rischi e pianificazione degli interventi. Una HSE review era stata effettuata il giorno prima della modifica ma non sono stati valutati i rischi possibili connessi con la modifica.</p> <p>Inoltre a seguito del revamping dell'impianto di equalizzazione effettuato in precedenza, il sistema di insufflaggio aria fu cieco poiché ritenuto 'aggiuntivo' all'elica di agitazione laterale, e responsabile di formazione di schiuma e di odori sgradevoli. Il sistema non fu più riattivato, così come non fu mai messo in funzione il sistema di aspirazione collocato sullo sfiato, sempre perché ritenuto corresponsabile della formazione di schiuma ed odori.</p>	<p>Il mansionario dei soggetti ricoprenti la qualifica di autista comprende operazioni quali caricare e scaricare le cisterne e i fusti presso l'azienda e presso i clienti finali, condurre l'automezzo loro affidato e provvedere alla manutenzione ordinaria dello stesso. Sotto il profilo formale, dunque, essi non sono formati per effettuare operazioni di infustamento di liquidi infiammabili, anche se conoscono le modalità di esecuzione dell'operazione almeno per affiancamento con altri operatori.</p> <p>Da quanto sopra emerge una carenza nella gestione di modifica gestionale relativa alla variazione immediata, effettuata all'occorrenza e in assenza della necessaria preparazione, delle mansioni dell'autista, in contrasto con quanto previsto dal mansionario.</p>	<p>Inadeguata gestione della modifica, sia impiantistica che gestionale, sotto il profilo del riesame del rischio.</p>

Bibliografia

- [1] NFPA 68, Guide for Venting of Deflagrations, Ed. 1994
 [2] Loss Prevention in the Process Industries, F.P. Lees, Ed. 1996
 [3] Relazioni sopralluoghi e_MARS ex Art. 26 d.lgs. 105/15 – ISPRA/INAIL/CNVVF

Metodo ad indici per la valutazione dei rischi in fase di esercizio delle attrezzature e/o insiemi a pressione

A. Muratore¹, V. Nastasi², F. Di Rocco³

¹ Inail - Uot di Piacenza

² Inail - Uot di Palermo

³ Inail - Uot di Verona

Sommario

Quasi sempre nei luoghi di lavoro e in particolare nelle PMI il Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) redatto ai sensi dell'art. 28 del d.lgs. 81/08 e s.m.i., non fa riferimento alle attrezzature/insiemi a pressione (attrezzature di lavoro rientranti a pieno nel Titolo III capo I del TU) per l'aspetto della valutazione dei rischi. Nei casi migliori i DVR riportano gli estremi delle certificazioni (CE-PED) e delle verifiche di legge previste dal d.m. 329/04 e dal d.m. 11/4/2011.

La finalità del presente lavoro consiste nel proporre un metodo ad indici di valutazione dei rischi in fase di esercizio delle attrezzature/insiemi a pressione visti come attrezzature di lavoro presenti in una data azienda che tenga conto della categoria di rischio PED, del luogo di installazione, delle modalità di utilizzo e di manutenzione, ecc. Oltre a valutare le attrezzature soggette agli obblighi delle verifiche considereremo nella nostra analisi anche le attrezzature in pressione che sebbene non soggette ad obbligo di denuncia/verifica perché esonerate dall'art. 2 del d.m. 329/04 sono fonti di rischi in ambito aziendale (per es. scoppi, ecc.). Dal risultato di tale valutazione discendono gli opportuni interventi di prevenzione e/o protezione al fine di ridurre il rischio.

Scopo di tutto è prevedere un'apposita sezione del DVR che tratti la valutazione dei rischi delle attrezzature/insiemi a pressione al fine di migliorare la sicurezza e la salute dei lavoratori nonché esimere il datore di lavoro da responsabilità per una eventuale assenza o non completa valutazione dei rischi.

1. Introduzione

Capita spesso nei luoghi di lavoro, soprattutto nelle Piccole e Medie Imprese (PMI), che il Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) redatto ai sensi dell'art. 28 del d.lgs. 81/08 e smi (TU), non faccia riferimento alle attrezzature/insiemi a pressione (attrezzature di lavoro rientranti a pieno nel Titolo III capo I del TU) per l'aspetto della valutazione dei rischi. Nei casi migliori i DVR riportano gli estremi delle certificazioni (CE-PED) e delle verifiche di legge previste dal d.m. 329/04 e dal d.m. 11/4/2011.

È evidente che le attrezzature e/o insiemi a pressione introducono un rischio specifico nei luoghi di lavoro (anche se correttamente certificate CE-PED e verificate periodicamente) che dipende dalle modalità di utilizzo, dal luogo dove sono installate, dal tipo d'impianto, dal fluido contenuto, ecc. e spesso ciò varia da azienda ad azienda. Infatti una stessa tipologia di attrezzatura/insieme a pressione in funzione del contesto aziendale dove è installata/o porta a livelli di rischio differenti.

L'art. 71 del d.lgs. 81/08 e smi, prevede che il datore di lavoro nello scegliere un'attrezzatura tenga conto dei rischi propri della stessa anche in relazione al luogo di installazione, all'interferenza eventuale con altre attrezzature presenti e alle modalità di utilizzo previste nel contesto aziendale. Inoltre bisogna considerare che diverse attrezzature/insiemi a pressione possono richiedere interventi di pulizia, di manutenzione, atti a garantire nel tempo la permanenza dei requisiti di sicurezza. Per alcune di queste attrezzature è necessario agire dall'interno (nel caso in cui siano presenti passi d'uomo,

portelle, ecc.), in quest'ultimi casi chiaramente si tratta di spazi confinati, e dunque si deve effettuare la valutazione dei rischi specifica per le attività di manutenzione ai sensi del d.p.r. 177/2011.

Scopo del presente lavoro è quello di proporre un metodo ad indici di valutazione dei rischi in fase di esercizio delle attrezzature/insiemi a pressione visti come attrezzature di lavoro presenti in una data azienda. Si parte dal censimento di tutte le attrezzature/insiemi a pressione con le relative certificazioni CE-PED presenti nel luogo di lavoro, peraltro necessario anche per fare un piano di manutenzione e verifiche periodiche conformi ai requisiti del d.lgs. 329/2004 e del d.m. 11/4/2011; si prosegue per ogni attrezzatura con una valutazione dei rischi specifica, tenendo conto della categoria di rischio PED, del fluido contenuto, di eventuali interferenze tra le attrezzature, del luogo di installazione, delle modalità di utilizzo e di manutenzione, ecc. Inoltre si esaminerà la casistica di attrezzature in pressione che sebbene non soggette ad obbligo di denuncia/verifica perché escluse dall'art. 2 del d.m. 329/04 devono essere attenzionate dal datore di lavoro perché sono fonti di rischi in ambito aziendale per es. esplosioni, ecc. Dal risultato di tale valutazione discendono gli opportuni interventi di prevenzione e/o protezione al fine di ridurre il rischio.

Alla luce di quanto sopra esposto, occorre inserire il risultato dell'analisi in una specifica sezione del DVR che tratta la valutazione dei rischi delle attrezzature/insiemi a pressione, con la finalità di migliorare la sicurezza e la salute dei lavoratori nonché esimere il datore di lavoro da responsabilità per l'assenza o la non completa valutazione dei rischi.

2. Gestione in fase di esercizio della sicurezza delle attrezzature e/o insiemi a pressione

Gestire in fase di esercizio la sicurezza delle attrezzature e/o insiemi a pressione significa da parte del datore di lavoro puntualizzare una serie di aspetti fondamentali che vanno ben oltre il rispetto della direttiva di prodotto PED. Infatti anche se gli art. 70 e 71, Titolo III del TU non riportano in alcuna parte l'obbligo di valutare i rischi delle attrezzature di lavoro (e quindi anche delle attrezzature in pressione), si trovano sempre in detti articoli indicazioni sulla conformità e sulla scelta delle attrezzature di lavoro. Ma a rafforzare la scelta di eseguire in modo completo la valutazione di tutti i rischi in ambito lavorativo (oltre le sentenze della magistratura) intervengono i dettati del Titolo I del TU ed in particolare:

- Articolo 15 del TU – “Misure generali di tutela” al comma 1 si elencano le misure generali di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro riportando al punto a): “la valutazione di tutti i rischi per la salute e sicurezza”. Infatti se non si esegue la valutazione dei rischi non si può di conseguenza determinare il livello dello stesso e dire se è accettabile o meno ed eventualmente porre in essere gli interventi di prevenzione e/o protezione.
- Articolo 28 del TU – “Oggetto della valutazione dei rischi” al comma 1 si evidenzia: “La valutazione di cui all'articolo 17, comma 1, lettera a), anche nella scelta delle attrezzature di lavoro e delle sostanze o delle miscele chimiche impiegate, nonché nella sistemazione dei luoghi di lavoro, deve riguardare tutti i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori...”.

Assodato che il datore di lavoro deve valutare tutti i rischi a cui sono esposti i lavoratori e quindi anche i rischi derivanti dall'esercizio delle attrezzature e/o insiemi a pressione (attrezzature di lavoro a tutti gli effetti) bisogna che lo stesso, per queste tipologie di attrezzature segua una serie di passaggi per una gestione in sicurezza in tutte le fasi di esercizio:

A) Riscontro della conformità iniziale (Art. 70 Capo I, Titolo III del d.lgs. 81/08 e s.m.i.), con particolare riferimento alla certificazione CE-PED e alle istruzioni operative rilasciate dal fabbricante;

B) Effettuazione degli interventi di Manutenzione (Art. 71 c. 4 del d.lgs. 81/08 s.m.i.), dei Controlli (Art. 71 c. 8 e 9 del Capo I, Titolo III del d.lgs. 81/08 s.m.i.) e delle Verifiche (Art. 71 c. 11 e seguenti del Capo I, Titolo III d.lgs. 81/08 s.m.i. e dal d.m. 11/04/2011), al fine di mantenere integri ed efficienti tutti gli elementi atti a garantire la conformità iniziale;

C) Valutazione dei rischi (Art. 28 Titolo I e Art. 71 c. 2 Capo I Titolo III, d.lgs. 81/08 e s.m.i.) in cui il Datore di Lavoro deve prendere in considerazione all'atto della specifica attività lavorativa:

- a) le condizioni e le caratteristiche specifiche del lavoro da svolgere,
- b) rischi presenti nell'ambiente di lavoro,
- c) rischi derivanti dall'impiego delle attrezzature e degli impianti stessi,
- d) rischi derivanti da interferenze con le altre attrezzature già in uso.

Tale valutazione dei rischi va estesa anche alla sicurezza e salute durante gli interventi di pulizia e di manutenzione, al fine di tutelare non solo gli addetti alla manutenzione ma anche gli altri possibili lavoratori e/o persone esposte.

Nel presente lavoro ci soffermeremo sul punto C), dando per: riscontrato ed effettuato da parte del datore di lavoro quanto previsto dal punto A) e dal punto B) sopra richiamati in modo sintetico.

3. Metodo ad indici per la valutazione del rischio in fase di esercizio delle attrezzature e/o insiemi a pressione

Tale metodo assegna un valore quantitativo al livello di rischio "R" di un fenomeno pericoloso composto dalla gravità del danno o magnitudo "D" e dalla probabilità "P" che questo si verifica:

$$R = D \times P \quad (1)$$

La relazione di sopra se pur semplice nella sua concezione è di difficile utilizzo in pratica al fine di determinare il livello di rischio di ciascuna attrezzatura e/o insieme a pressione. Pertanto si propone un metodo ad indice che permette di determinare il livello del rischio tramite la relazione:

$$IR = ID \times IP \quad (2)$$

- IR, Indice di rischio complessivo dell'attrezzatura o insieme a pressione;
- ID, Indice di gravità del danno;
- IP, Indice di probabilità del danno.

Si evidenzia che in tale metodo rientrano tutte le tipologie di attrezzature e/o insiemi a pressione (recipienti, generatori di vapore, scambiatori, tubazioni, ecc.).

3.1 Indice di gravità del danno "ID"

L'indice di gravità del danno viene messo in relazione ai seguenti sottoindici:

- Ic, indice di categoria;
- Ig, indice gruppo del fluido;
- lia, indice interazione attrezzature.

In particolare "ID" è funzione della somma dei sottoindici Ic, Ig, lia:

$$ID = f (Ic + Ig + Iia) \quad (3)$$

L'assegnazione dei valori numerici ai sottoindici sopra elencati, avviene tenendo conto di quanto riportato nelle tabelle che seguono:

- Tabella 1, si propone di suddividere in 6 valori l'indice di categoria "Ic" mettendolo in relazione alla possibile dimensione del danno e alla categoria di rischio PED;
- Tabella 2, si propone di mettere in relazione "Ig" con il gruppo del fluido contenuto nell'attrezzatura o insieme;
- Tabella 3, si propone di mettere in relazione "Iia" con la possibilità che la presenza nelle vicinanze di altre attrezzature a pressione possano amplificare il livello del danno (es. avarie dell'attrezzatura in esame che può generare danni su altre attrezzature in pressione limitrofe e viceversa);

Ic	Categoria di rischio PED	Dimensione del Danno
6	IV	ALTO – Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità delle attrezzature in pressione e delle aree circostanti (es. rientranti nella Direttiva Seveso)
5	IV	MEDIO - ALTO – Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità delle attrezzature in pressione e degli elementi direttamente collegati
4	III	MEDIO – Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità delle attrezzature in pressione e degli elementi direttamente collegati
3	II	MEDIO - BASSO – Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità delle parti principali attrezzature in pressione
2	I	BASSO – Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità delle parti principali delle attrezzature in pressione
1	Attrezzature a pressione non soggette ad obbligo di denuncia/verifica perché escluse dall'art. 2 del DM 329/04	MOLTO BASSO - Gli eventi connessi possono compromettere l'integrità di alcune parti delle attrezzature in pressione

Tabella 1. Indice di categoria "Ic"

Ig	Gruppo del fluido	Pericolosità del fluido
1	1	PERICOLOSO – Classificazione secondo CLP
0	2	NON PERICOLOSO – Classificazione secondo CLP

Tabella 2. Indice di gruppo "Ig"

Iia	Possibilità di interazione con altre attrezzature a pressione limitrofe	Tipologia di interazione
1	SI	Interazione tra più attrezzature a pressione limitrofe
0	NO	Nessuna interazione tra le attrezzature a pressione

Tabella 3. Indice interazione attrezzature "Iia"

A questo punto si è in grado di determinare l'Indice di danno "ID" tramite la formula (3) i cui valori sono riportati nella seguente tabella 4:

lc + lg + lia	Entità del danno	ID = f (lc + lg + lia)
7, 8	Molto grave	6
5, 6	Grave	5
4	Media	4
3	Lieve	3
2	Bassa	2
1	Molto bassa	1

Tabella 4. Indice di gravità del danno "ID"

3.2 Indice di probabilità del danno "IP"

L'indice di probabilità che il danno si verifichi viene messo in relazione dei seguenti sottoindici:

- le , indice durata dell'esposizione;
- lpa , indice probabilità di accadimento dell'evento pericoloso, tenendo conto anche degli eventi naturali (sisma, vento, inondazioni, ecc...)
- lpe , indice probabilità di evitare o limitare il danno.

Quindi "IP" è funzione della somma dei sottoindici le , lpa , lpe :

$$IP = f (le + lpa + lpe) \quad (4)$$

L'assegnazione dei valori numerici ai sottoindici sopra elencati, avviene tenendo conto di quanto riportato nelle tabelle che seguono:

- Tabella 5, si propone di mettere in relazione " le " con la durata dell'esposizione e con la frequenza di lavoro delle attrezzature a pressione;
- Tabella 6, si propone di mettere in relazione " lpa ", tenendo conto anche delle cause naturali, con le misure di prevenzione e/o protezione attuate;
- Tabella 7, si propone di mettere in relazione " lpe " con il fattore di rischio percepito, le istruzioni operative e la formazione dei lavoratori.

le	Durata dell'esposizione	Frequenza
5	H24/365	Ciclo continuo
4	40 h/settimana	Tempo pieno
3	20 h/settimana	Tempo parziale
2	8 h/settimana	1 giorno a settimana
1	4 h/settimana	½ giorno a settimana

Tabella 5. Indice di esposizione " le "

Ipa	Possibilità che l'evento si verifichi	Esistenza di misure di prevenzione. Possibili interferenze con altre lavorazioni
5	Occorre attendersi che l'evento accada	Non ci sono misure di prevenzione esistenti. Istruzioni operative del fabbricante non adottate. Interferenze con altre lavorazioni non considerate
4	Ci si può attendere che l'evento accada	C'è un inizio di misure prevenzione. Istruzioni operative del fabbricante parzialmente adottate. Interferenze con altre lavorazioni non considerate
3	L'evento è possibile	Misure parzialmente adottate. Istruzioni operative del fabbricante sufficientemente adottate. Ubicazione delle attrezzature in pressione in locali tecnici se previsto dalle norme vigenti (generatore di vapore). Interferenze con altre lavorazioni considerate
2	Evento concepibile, ma insolito	Misure adottate. Bassa probabilità di rischi da eventi naturali. Ubicazione delle attrezzature in pressione in locali tecnici. Basse interferenze con altre lavorazioni
1	Evento difficilmente concepibile	Misure conformi allo stato della tecnica, eventualmente prevedendo ridondanti accessori di sicurezza. Molto bassa la probabilità di rischi da eventi naturali. Ubicazione delle attrezzature in pressione in locali tecnici. Nessuna interferenza con altre lavorazioni

Tabella 6. Indice di probabilità di accadimento di un evento pericoloso "Ipa"

Ipe	Percezione del fattore di rischio della presenza di attrezzature in pressione	Formazione specifica sul rischio pressione
5	Fattore di rischio non percettibile. Assenza di istruzioni operative	Assenza di formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione
4	Fattore di rischio poco percettibile. Istruzioni operative poco chiare soprattutto negli interventi di manutenzione e pulizia	Insufficiente formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione
3	Fattore di rischio poco percettibile. Sufficienti istruzioni operative anche negli interventi di manutenzione e pulizia	Sufficiente formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione, sia per l'esercizio che per gli interventi di pulizia e manutenzione
2	Fattore di rischio percettibile. Sufficienti istruzioni operative anche negli interventi di manutenzione e pulizia	Sufficiente formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione, sia per l'esercizio che per gli interventi di pulizia e manutenzione
1	Fattore di rischio percettibile. Idonee istruzioni operative anche negli interventi di manutenzione e pulizia	Buona formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione, sia per l'esercizio che per gli interventi di pulizia e manutenzione

Tabella 7. Indice di probabilità di evitare o limitare il danno "Ipe"

A questo punto si è in grado di determinare l'Indice di probabilità di evitare o limitare il danno "IP" tramite la formula (4), i cui valori sono riportati nella seguente tabella 8:

le + lpa + lpe	Definizione della probabilità	IP = f (le + lpa + lpe)
15	Molto frequente	6
13,14	Frequente	5
11,12	Occasionale	4
9,10	Rara	3
6,7,8	Improbabile	2
1,2,3,4,5	Quasi impossibile	1

Tabella 8. Indice di probabilità "IP"

3.3 Indice di rischio complessivo dell'attrezzatura o insieme a pressione "IR"

Determinati i valori di "ID" ed "IP" della specifica attrezzatura e/o insieme a pressione, in funzione della formula (2) su riportata siamo in grado di determinare l'indice di rischio complessivo dell'attrezzatura o insieme a pressione "IR". Si riporta graficamente il tutto in una apposita matrice di rischio con ordinate IP e ascisse ID (tabella 9).

6	12	18	24	30	36
5	10	15	20	25	30
4	8	12	16	20	24
3	6	9	12	15	18
2	4	6	8	10	12
1	2	3	4	5	6

Tabella 9. Matrice di Rischio: ID (ascisse) e IP (ordinate)

3.4 Indice di rischio IR, giudizio sintetico del rischio con i relativi interventi di prevenzione e/o protezione dei rischi

Determinato il livello di rischio complessivo della specifica attrezzatura o insieme a pressione si è in grado di dare un giudizio sintetico sul tipo di rischio che la/o stessa/o determina in fase di esercizio, in riferimento a ciò il datore di lavoro predispone in maniera più o meno immediata gli interventi di prevenzione e/o protezione.

IR ≥ 24	Rischio grave	Sicurezza non garantita. Prevedere interventi immediati di prevenzione e/o protezione. Non iniziare le lavorazioni.
10 < IR < 24	Rischio medio	Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.
IR ≤ 10	Rischio accettabile	Monitorare il livello di sicurezza e se possibile migliorarlo.

Tabella 10. Relazione tra indice di rischio IR e giudizio sintetico del rischio con i relativi interventi di prevenzione e/o protezione

4. Casi studio

Per tutti i casi studio di seguito riportati, si ipotizza che sia stato riscontrato ed effettuato da parte del datore di lavoro quanto previsto dai punti A) e B) indicati nel paragrafo 2 del presente lavoro e si concentra l'attenzione su quanto indicato nel punto C).

Caso 1: Insieme generatore di vapore installato con altre attrezzature a pressione

Insieme generatore di vapore marcato CE PED, installato in locale tecnico con altre attrezzature a pressione, presso azienda alimentare senza sorveglianza continua: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(5+0+1) \times f(4+2+3) = 5 \times 3 = 15$, **Rischio medio** -> Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.

In questo caso intervenendo sull'indice lpe, per es. portando il valore ad 1 (tramite la creazione di idonee istruzioni operative e una buona formazione dei lavoratori sul rischio pressione) si riesce a ridurre l'indice di rischio IR al valore 10 ottenendo un rischio accettabile.

Caso 2: Generatore di vapore installato in locale con altre attrezzature a pressione

Generatore di vapore, costruito con la normativa previgente la direttiva PED, installato in locale tecnico con altre attrezzature a pressione, presso azienda alimentare con sorveglianza continua: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(5+0+1) \times f(4+3+2) = 5 \times 3 = 15$, **Rischio medio** -> Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.

In questo caso intervenendo sull'indice lpe, per es. portando il valore ad 1 (tramite la creazione di idonee istruzioni operative e una buona formazione dei lavoratori sul rischio pressione) si riesce a ridurre l'indice di rischio IR al valore 10 ottenendo un rischio accettabile. Inoltre in questo caso si potrebbe programmare la sostituzione del vecchio generatore con un nuovo insieme di generazione di vapore rientrando nel caso precedente.

Caso 3: Generatore di vapore installato in locale senza altre attrezzature a pressione

Generatore di vapore, costruito con la normativa previgente la direttiva PED, installato in locale tecnico senza altre attrezzature a pressione, presso caseificio con sorveglianza continua: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(5+0+0) \times f(3+2+2) = 5 \times 2 = 10$, **Rischio accettabile** -> Monitorare il livello di sicurezza e se possibile migliorarlo.

Caso 4: Serbatoio ad aria compressa utilizzato in impianto di simulazione

Attrezzatura composta da unico corpo principale, utilizzata per la simulazione di casi utili alla formazione di giovani tecnici nel settore petrolifero, cat. PED II, non sono presenti reazioni chimiche. Possibile interazione tra più attrezzature a pressione limitrofe. Evento incidentale concepibile, ma insolito. Fattore di rischio poco percettibile. Sufficienti istruzioni operative. Sebbene l'attrezzatura è in categoria II il livello di rischio è medio: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(3+0+1) \times f(3+3+3) = 4 \times 3 = 12$, **Rischio medio** -> Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.

In questo caso intervenendo sul sottoindice lpe, per es. portando il valore ad 1 (tramite la creazione di idonee istruzioni operative e una buona formazione dei lavoratori sul rischio pressione) si riesce a ridurre l'indice di rischio IR al valore 8 ottenendo un rischio accettabile, oppure stesso risultato si ottiene intervenendo sul sottoindice lpa, per es. portando il valore ad 1 (per es. adottando ridondanti accessori di sicurezza, per es. pressostato di sicurezza oltre alla valvola di sicurezza), inoltre volendo si può intervenire su entrambi i sotto indici portando il valore dell'indice IR al valore 4.

Caso 5: Serbatoio contenente aria e poliolo inserito in industria chimica

Attrezzatura usata in industria chimica a rischio incidente rilevante, cat. PED III, non sono presenti reazioni chimiche, misure conformi allo stato della tecnica, non vi sono rischi da interazione, buona formazione specifica dei lavoratori sul rischio pressione. Sebbene l'attrezzatura è in categoria III e si trova in un'azienda RIR il livello di rischio è accettabile: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(4+0+0) \times f(4+1+1) = 4 \times 2 = 8$, **Rischio accettabile** -> Monitorare il livello di sicurezza e se possibile migliorarlo.

Caso 6: Serbatoio criogenico installato presso azienda ospedaliera

Serbatoio criogenico di ossigeno installato, prima dell'entrata in vigore della nuova classificazione sismica, in prossimità di un secondo serbatoio criogenico, in una centrale di produzione di aria medica per azienda ospedaliera: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(5+1+1) \times f(3+3+1) = 6 \times 2 = 12$, **Rischio medio** -> Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.

In questo caso intervenendo sul sottoindice lpa, per es. portando il valore ad 1 (per es. adottando ridondanti accessori di sicurezza, nuovo ancoraggio antisismico, ecc...) si riesce a ridurre l'indice di rischio IR al valore 6 ottenendo un rischio accettabile.

Caso 7: Generatore di vapore escluso ai sensi art. 2 del D.M. 329/04

Generatore di vapore escluso ai sensi art. 2 del D.M. 329/04 (60lt x 4,5 bar) che alimenta un impianto termico tramite scambiatore a serpentino, tale impianto termico, presente presso un mattatoio, è a servizio del processo industriale: $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(1+0+1) \times f(4+3+4) = 2 \times 4 = 8$, **Rischio accettabile** -> Monitorare il livello di sicurezza e se possibile migliorarlo.

Caso 8: Serbatoio schiumogeno per impianto antincendio

Attrezzatura usata come serbatoio schiumogeno a servizio dell'impianto antincendio, presente in azienda a rischio di incidente rilevante. $IR = ID \times IP = f(lc+lg+lia) \times f(le+lpa+lpe) = f(6+0+0) \times f(1+3+5) = 5 \times 3 = 15$, **Rischio medio** -> Sicurezza da migliorare. Prevedere interventi di prevenzione e/o protezione.

Casi studio	lc	lg	lia	le	lpa	lpe	ID	IP	IR
Caso 1	5	0	1	4	2	3	5	3	15
Caso 2	5	0	1	4	3	2	5	3	15
Caso 3	5	0	0	3	2	2	5	2	10
Caso 4	3	0	1	3	3	3	4	3	12
Caso 5	4	0	0	4	1	1	4	2	8
Caso 6	5	1	1	3	3	1	4	3	12
Caso 7	1	0	1	4	3	4	2	4	8
Caso 8	6	0	0	1	3	5	5	3	15

Tabella 11. Sintesi dei casi studio con calcolo dell'indice di rischio

5. Conclusioni

Il presente lavoro nasce con lo spirito di voler mettere a fattor comune alcuni degli elementi fondamentali del "rischio pressione" ed è stato sviluppato dopo aver appreso dalla stampa il verificarsi sempre più frequente di incidenti durante le fasi di utilizzo o di

manutenzione di attrezzature a pressione, ed in particolare anche di incidenti che hanno coinvolto attrezzature in pressione non soggette ad obbligo di denuncia/verifica perché escluse dall'art. 2 del d.m. 329/04.

Dall'esame dei casi a cui abbiamo applicato il metodo sopra proposto, emerge che a parità di tipologie di attrezzature e/o insiemi a pressione si possono avere livelli di rischio diversi in funzione del contesto aziendale dove sono installate/i. Inoltre anche attrezzature con categoria PED bassa e/o escluse dagli obblighi di verifica di messa in servizio se non opportunamente utilizzate e mantenute possono comportare rischi non trascurabili per i lavoratori. Il metodo descritto nei paragrafi precedenti, sebbene sicuramente da perfezionare, vuole essere uno strumento in più a disposizione dei datori di lavoro, RSPP e professionisti del settore, che consenta, in particolare per le PMI, di fare una valutazione specifica del "rischio pressione" al fine di prevedere un'apposita sezione del DVR che tratti la valutazione dei rischi delle attrezzature/insiemi a pressione in modo da migliorare la sicurezza e la salute dei lavoratori, nonché esimere il datore di lavoro da responsabilità per una eventuale assenza o non completa valutazione dei rischi ai sensi dell'art. 28 del d.lgs. 81/08 e s.m.i.

Si ringrazia l'ing. Giuseppe Sferruzza per il contributo fornito al presente lavoro.

6. Bibliografia

- [1] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000 n 93 "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di Attrezzature a Pressione" GU n 91 del 18/04/2000, SO N 62/L.
- [2] Decreto Legislativo 15 febbraio 2016 n 26 "Attuazione della direttiva 2014/68/UE in materia di Attrezzature a Pressione" GU n 53 del 04/03/2016.
- [3] Decreto Ministero Attività Produttive 1/12/2004 n 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature a pressione art. 19 del d.lgs. 93/2000".
- [4] Decreto Legislativo 9/4/2008, n. 81 "Testo Unico Sicurezza Lavoro" e smi.
- [5] V. Nastasi. Manuale Sicurezza negli Impianti. Edizione Grafill.

La gestione di attività del S.N.P.A.¹ che possono richiedere l'accesso in ambienti confinati o sospetti di inquinamento.

M. G. Marchesiello¹, C. Zonato², M. Albertazzi³, M. Pirozzi⁴, C. Console⁴

¹ Arpa Emilia Romagna

² Arpa Piemonte

³ Arpa Liguria

⁴ Inail - Dit

Sommario

Il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (S.N.P.A.) ha fra le sue missioni lo svolgimento di attività di monitoraggio, ispezione, verifica e controllo sul territorio, collegate sia alla protezione dell'ambiente sia all'effettuazione delle verifiche e ispezioni dell'integrità di impianti e attrezzature in accordo alle normative di legge.

Il personale impiegato si può trovare, in alcune circostanze, a dover effettuare l'attività accedendo a luoghi definiti come confinati o sospetti di inquinamento ai sensi del d.lgs. 81/08 o assimilabili.

In questo lavoro viene presentato un documento, elaborato dal tavolo di lavoro della "Rete nazionale dei referenti" in tema di Igiene e sicurezza presente all'interno del S.N.P.A. in collaborazione con esperti di Inail, del Spsal² di Reggio Emilia e del Pisl³ di Grosseto. In tale documento sono definite le condizioni e modalità di accesso in sicurezza in ambienti confinati e/o sospetti d'inquinamento, o a questi assimilabili, sono individuati i limiti di intervento, le procedure operative e le verifiche preliminari all'accesso a luoghi confinati e/o sospetti di inquinamento o definibili come tali ed è definito un programma di formazione specifica da inserire tra gli argomenti dell'aggiornamento periodico del personale interessato.

1. Introduzione

Il Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (S.N.P.A.) è stato istituito attraverso la legge n.132 del 28 giugno 2016 – *istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA)* – e tale provvedimento è entrato in vigore il 14 gennaio 2017.

In tale legge, si riafferma la centralità delle Agenzie Ambientali che costituiscono il "Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente", rafforzando e armonizzando le loro funzioni. Molte sono state le norme che hanno interessato, ampliandole, le attività delle Agenzie Ambientali, soprattutto nell'ultimo decennio; l'evoluzione normativa ha portato finalmente all'approvazione della legge 132/2016.

Ancor prima dell'approvazione della legge n.132/2016 e sempre di più dopo la sua emanazione, il Sistema delle Agenzie si è andato via via consolidando e, soprattutto attraverso Ispra, si sono sviluppate forme di coordinamento tra le varie Agenzie come tavoli tecnici, collaborazioni, gemellaggi e gruppi di lavoro.

In effetti, finora erano coesistite realtà differenti tra Arpa (Agenzia Regionale per la protezione dell'Ambiente) e Appa (Agenzia Provinciale per la protezione dell'Ambiente), con 200 sedi operative sul territorio nazionale e circa 10.000 operatori. Tali componenti del "Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente" (S.N.P.A.) pur avendo un'origine

¹ Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente.

² Servizio Prevenzione e Sicurezza Ambienti di Lavoro.

³ Prevenzione Igiene e sicurezza nei luoghi di lavoro.

comune e condividendo compiti fondamentali di monitoraggio, analisi, valutazione, ispezione, controllo e report pubblico sull'ambiente, svolgono le proprie attività istituzionali in modo non ancora omogeneo a causa delle consistenti differenze, dovute principalmente ad una dislocazione geografica e quindi alle specificità del territorio regionale di appartenenza e della loro organizzazione interna. A tale scopo, sin dall'istituzione delle diverse Agenzie e nel corso degli anni, è cresciuta l'esigenza di avviare un processo di comparazione fra le diverse realtà per la gestione di questioni sovragionali e per l'armonizzazione di nuovi approcci, standard, tecniche e metodiche, al fine di ottimizzare le risorse predisponendo anche un sistema sinergico di reti e servizi.

In particolare l'ISPRA, attraverso il Consiglio Federale e il Centro Interagenziale Igiene e Sicurezza sul Lavoro, promuove un'azione di benchmarking interno ed esterno, per raccordare e integrare soluzioni e scelte, realizza programmi di formazione, predispone e pubblica materiale informativo, linee guida e altri documenti.

1.1 Problematiche connesse alle attività del S.N.P.A. in ambienti confinati

In tale contesto si inserisce il Tavolo di Lavoro istituito nell'ambito del S.N.P.A. per la condivisione delle problematiche connesse allo svolgimento di attività istituzionali in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento o a loro assimilabili da parte di personale con la funzione di vigilanza, ispezione, monitoraggio e controllo territoriale e che non è "esecutore di lavori in ambienti confinati e/o sospetti d'inquinamento" e quindi non destinatari delle prescrizioni del d.p.r. 177/2011, come imprese.

L'obiettivo del tavolo di lavoro era pertanto la stesura di un documento d'indirizzo contenente le linee comportamentali che i tecnici del S.N.P.A. devono tenere nel caso in cui ci si trovi di fronte ad attività che possono prevedere l'accesso ad ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento o a loro assimilabili, nel rispetto dei criteri e prescrizioni del d.lgs.81/08.

I contenuti tecnici del documento provengono in parte da pubblicazioni sulla materia, cui si rimanda, presentate da diversi Enti e Istituzioni ed elencati nella bibliografia. Tale scelta nasce dalla consapevolezza che molti, se non tutti gli argomenti tecnici operativi sul tema (come la tipologia e le caratteristiche dei dispositivi di protezione individuali (DPI) e collettiva (DPC), i sistemi di sicurezza e quelli di emergenza), sono stati già ampiamente trattati ed approfonditi in relazione alle tematiche riguardanti le attività svolte dalle imprese che operano in ambienti confinati o sospetti di inquinamento ai sensi del d.p.r. 177/2011.

La parte innovativa del lavoro è riferita alle attività che deve svolgere il personale del S.N.P.A. che non è esecutore di lavori in ambienti confinati e/o sospetti d'inquinamento e quindi non è destinatario, come il personale delle imprese, delle prescrizioni del d.p.r. 177/2011, ma ha funzione di vigilanza, ispezione, monitoraggio e controllo territoriale e si trova ad operare anche in ambienti che non sono esplicitamente ricompresi negli articoli del d.lgs. 81/2008, ma ne presentano caratteristiche assimilabili. Pertanto, tenuto conto delle prescrizioni più generali legate alla sicurezza e salute dei lavoratori previste dal d.lgs. 81/2008, particolare attenzione va prevista, nella fase di rilascio dell'idoneità alla mansione del personale che può trovarsi a dover operare in ambienti confinati o sospetti di inquinamento, mentre informazione, formazione e addestramento dovranno essere mirati alla sensibilizzazione del personale relativamente al pericolo di trovarsi in situazioni sospette e, soprattutto, al riconoscimento delle caratteristiche che fanno rientrare gli ambienti oggetto di sopralluogo nella categoria di "assimilabili" ai confinati.

Il documento, attualmente in fase di elaborazione finale, individua i limiti d'intervento, esplicita i divieti, definisce le linee di indirizzo per le procedure operative e organizzative che tengono anche conto delle dotazioni strumentali e dei DPI e DPC necessari, indica quando organizzare la gestione delle situazioni di emergenza, stabilisce le verifiche preliminari all'accesso eventuale a luoghi confinati o sospetti di inquinamento o a questi

assimilabili e definisce infine un programma di formazione specifica dedicato sia ai lavoratori, preposti e dirigenti del S.N.P.A. sia ai componenti dei Servizi di Prevenzione e Protezione.

2. Applicabilità della legislazione alle attività del S.N.P.A.

L'art. 1 comma 2 del d.p.r. 177/11 "Finalità e ambito di applicazione", definisce che il decreto si applica ai lavori effettuati in ambienti sospetti d'inquinamento di cui agli articoli 66 e 121 del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, e negli ambienti confinati di cui all'allegato IV, punto 3, del medesimo decreto legislativo; inoltre l'art. 2 del d.p.r. 177/11 "Qualificazione nel settore degli ambienti sospetti d'inquinamento o confinati", definisce la qualificazione delle imprese che operano nel settore degli ambienti sospetti d'inquinamento o confinati.

In questo ambito normativo, il personale che ha compiti ispettivi e in particolare quello del S.N.P.A., svolgendo esclusivamente attività di ispezione, verifica, monitoraggio e controllo, non è un esecutore di specifici lavori in ambito di ambienti confinati e/o con sospetto d'inquinamento o a questi assimilabili con questa premessa, pertanto ad esso si applica solo quanto previsto dal d.lgs. 81/08 con particolare riferimento alle attività oggetto del presente documento e non quanto riportato nel d.p.r. 177/11.

3. Individuazione di ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento

Il d.lgs. 81/2008 elenca, negli artt. 66, 121 e nell'allegato IV, semplicemente ed in modo specifico un numero limitato di luoghi che possono essere ambienti confinati e/o ambienti sospetti di inquinamento senza esplicitamente indicare che si tratta di esemplificazioni non esaustive. Inoltre la normativa italiana di riferimento non fornisce una definizione chiara di ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento; questo determina una incertezza nella gestione di situazioni ad elevato rischio che rende difficoltosa la prevenzione e proteggere da danni la salute e la sicurezza dei lavoratori.

Per tale motivo nel documento predisposto dal Tavolo di Lavoro S.N.P.A. si danno indicazioni sulle caratteristiche che un ambiente di lavoro può avere per essere assimilabile a "confinato e/o sospetto d'inquinamento", in modo che i tecnici in fase di sopralluogo possano individuarlo, riconoscere i pericoli e, consapevolmente, prendere le necessarie precauzioni.

Sostanzialmente un ambiente può essere identificato confinato e/o sospetto d'inquinamento quando si verifica anche una sola delle seguenti caratteristiche:

- lo spazio è circoscritto,
- gli accessi sono difficoltosi o limitati,
- la ventilazione è sfavorevole,
- è possibile la presenza di agenti chimici pericolosi,
- i luoghi non sono stati progettati per la permanenza continua di persone.

In alcuni casi, quali attività di verifica periodica interna di attrezzature a pressione (come serbatoi, reattori, caldaie, etc.), l'ambiente confinato è facilmente riconoscibile e a priori si può programmare l'intervento tenendo conto di tutte le precauzioni necessarie.

In altri casi, (ad esempio sopralluoghi in cunicoli, prelievi d'acqua in grotte con sorgenti sulfuree, etc.) è molto più difficile identificare un ambiente confinato e/o sospetto d'inquinamento, anche perché le condizioni di lavoro possono cambiare da un'ispezione all'altra o nel corso dello stesso sopralluogo.

Al fine di individuare se un ambiente è identificabile come spazio confinato e/o sospetto d'inquinamento o a questi assimilabile, è quindi stato predisposto e riportato nel

documento del S.N.P.A. uno specifico e dettagliato “*Schema decisionale*”, che può essere di supporto sia al Dirigente, in fase di programmazione dell’attività, che al tecnico in sede di sopralluogo.

3.1 Siti presidiati e non presidiati

Le misure procedurali/organizzative per la prevenzione del verificarsi di situazioni rischiose nel corso di attività con potenziale presenza di ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento devono tener conto dello specifico sito oggetto del sopralluogo. Si deve infatti distinguere se l’attività viene condotta in un sito presidiato, quale può essere uno stabilimento industriale, oppure non presidiato, quale potrebbe essere un rio tombinato, una galleria ecc.

Nel documento predisposto in ambito S.N.P.A., si distinguono pertanto i siti oggetto delle attività ispettive, di controllo e monitoraggio territoriale in due tipologie:

- *Sito presidiato*: sito in cui è presente un Responsabile al quale fare riferimento e sul quale ricadono gran parte delle attribuzioni relative alle procedure di messa in sicurezza del sito preventivamente all’esecuzione del lavoro da parte dei tecnici SNPA e di organizzazione degli interventi in caso di emergenza.
- *Sito non presidiato*: sito in cui non è presente un Responsabile: in questo caso tutte le misure di tutela ricadono completamente sul S.N.P.A. Come conseguenza, assume particolare importanza la fase di programmazione dell’attività ed il coinvolgimento del Dirigente e del Preposto sui requisiti preliminari da verificare in sede di sopralluogo. In caso di inaspettata individuazione di un ambiente assimilabile a confinato e mancata programmazione di quanto necessario per un accesso sicuro, potrà essere necessario interrompere l’attività in attesa di predisporre quanto necessario.

Tale suddivisione è importante per definire i compiti e le responsabilità nell’effettuazione delle attività che dovranno essere svolte da parte dei tecnici del S.N.P.A.

4. Attività degli operatori S.N.P.A.

Di seguito si riporta prima un elenco, *esemplificativo e non esaustivo*, di tipologie di ambienti confinati e/o con sospetto d’inquinamento o a questi assimilabili e successivamente un elenco, sempre non esaustivo, delle attività delle Agenzie suddivise fra quelle effettuate in “luoghi presidiati” e quelle in “luoghi non presidiati”. Infatti è possibile che, durante lo svolgimento delle loro attività, gli operatori del S.N.P.A. si trovino di fronte a situazioni riconducibili a spazi confinati e/o sospetti d’inquinamento o a questi assimilabili e quindi per prima cosa occorre che gli operatori, siano in grado di riconoscerli e valutare se esistano soluzioni alternative all’ingresso in tali ambienti.

Ambienti confinati e/o con sospetto d’inquinamento o a questi assimilabili: ambienti con ventilazione insufficiente, apparecchiature di impianto, apparecchiature termiche (caldaie a tubi di fumo ecc.), autocisterne, bacini, cabinati, caldaie, cave e miniere sottosuolo, cisterne, discariche, fosse di manutenzione veicoli, fosse settiche, gallerie autostradali e ferroviarie, gallerie di servizio (via tubi), allevamenti in batteria, impianti di depurazione (con zone caratterizzate da un’elevata concentrazione di gas e/o da una carenza di ossigeno), intercapedini, locali tecnici seminterrati (ad esempio camerette stradali), macchine eoliche, percorsi sotterranei, pozzetti e fognature, stive e altri locali di natanti, reattori, serbatoi, silos, stive di natanti, vasche di prima pioggia, vasche interrate, vasche trattamento acque, zone di stoccaggio dei rifiuti, et..

Attività delle Agenzie in luoghi presidiati: svolgimento, presso stabilimenti industriali, di

campionamenti di emissioni gassose e liquide, interventi su matrici varie (suoli, rifiuti ecc.), ispezioni e controlli su apparecchiature e impianti a pressione e impianti termici, etc.

Attività delle Agenzie in luoghi non presidiati: sono svolte in tali siti monitoraggi ambientali, campionamenti di matrici ambientali, misurazioni e prospezioni, etc.

5. Requisiti del personale

Secondo i criteri previsti dal d.lgs. 81/08 e sulla base dell'analisi dei rischi effettuata caso per caso, è necessario che il personale impegnato in attività con potenziale ingresso in ambienti confinati e/o con sospetto di inquinamento o assimilabili abbia specifici requisiti atti a garantire la sua sicurezza nello svolgimento dell'attività in campo.

In particolare il personale impiegato deve possedere:

- esperienza e capacità professionali;
- conoscenza dello specifico lavoro da svolgere;
- consapevolezza del rischio presente negli ambienti confinati o con sospetto di inquinamento;
- formazione specifica sui rischi presenti in tali ambienti e sugli interventi in emergenza negli stessi;
- formazione ed addestramento sui DPI assegnati con particolare attenzione a quelli di 3^a categoria;
- idoneità alla mansione specifica, ai sensi del d.lgs. 81/08, rilasciata dal Medico Competente almeno annualmente mediante opportuni accertamenti effettuati secondo le previsioni del protocollo di sorveglianza sanitaria.

6. Procedura di accesso in ambiente confinato o con sospetto di inquinamento

Nel documento predisposto dal Tavolo di lavoro S.N.P.A. ed attualmente in via di completamento, sono contenute linee di indirizzo per l'individuazione delle procedure operative/organizzative da attuare.

Nel caso di accesso in ambienti confinati e/o con sospetto inquinamento o assimilabili, presso siti presidiati (per esempio in uno stabilimento industriale), alcune delle attività individuate sono a carico del Datore di Lavoro/Responsabile della ditta ospitante.

Particolare cura va prevista nella fase di programmazione dell'attività e vengono individuate tre fasi, parimenti importanti, per la realizzazione dell'intervento.

Le tre fasi descritte sono di seguito riassunte.

I^a Fase conoscitiva

Prevede attività progettuali e svolgimento di sopralluoghi conoscitivi e attività di coordinamento fra i vari soggetti interessati e comprende responsabilità sia a carico di S.N.P.A. sia del Datore di Lavoro del sito quando presidiato.

II^a Fase di preparazione

La fase di preparazione deve comprendere almeno le attività di seguito dettagliate:

- Riunione preliminare di coordinamento;
- Segregazione dell'area di lavoro (ove necessario);
- Isolamento da fonti pericolose di energia e materia (ove necessario);
- Predisposizioni per l'ingresso/uscita (ove necessario);
- Analisi preliminare atmosfera interna;
- Bonifica e ventilazione (ove necessario);

- Analisi finale atmosfera interna;

III^ Fase di lavoro

La fase di lavoro si divide almeno nelle due principali attività qui sotto elencate:

- Compilazione di specifica lista di controllo preventiva (nel documento è fornita una specifica lista di controllo);
- Svolgimento dell'attività all'interno dell'ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento secondo specifiche prescrizioni a tutela della salute e sicurezza dei lavoratori.

Tra le misure preventive che indicate nel documento in via di approvazione elaborato dal Tavolo di lavoro S.N.P.A., si individua come prioritaria la verifica dell'esistenza di una modalità alternativa all'ingresso per la conduzione dell'attività di verifica, monitoraggio e controllo da parte dei tecnici.

Sostanzialmente, una volta individuata l'esistenza di uno spazio confinato, l'accesso degli operatori S.N.P.A. in tali zone deve avvenire solamente previa verifica dell'impossibilità di eseguire le attività dall'esterno.

Ad esempio, come misure alternative all'ingresso in apparecchiature soggette a verifica periodica incominciano ad essere utilizzate tecniche per l'esame visivo assistito (ad esempio con l'impiego di endoscopio e fibre ottiche) oppure per l'esame visivo remoto (ad esempio utilizzo di fotografie, sistemi video, sistemi automatizzati o robotizzati).

In alcuni casi particolari è esplicitamente previsto il divieto dell'ingresso nello spazio confinato: ad esempio qualora la geometria dell'ambiente confinato renda necessaria per l'accesso e l'uscita, l'esecuzione di manovre che non permetterebbero un efficace e tempestivo recupero di un operatore in difficoltà (es. caldaie a tubi di fumo di potenzialità inferiore a 10 ton/h, reattori con accessori interni particolari) l'utilizzo di tecniche alternative all'ingresso si rende obbligatorio.

7. I dispositivi di protezione individuale, di allarme e di salvataggio

Indipendentemente dalla tipologia dell'ambiente confinato e/o sospetto d'inquinamento o a questi assimilabili, e dalle diverse attività istituzionali svolte, nel documento viene individuata la dotazione minima di DPI e di dispositivi di sicurezza, di cui i lavoratori del S.N.P.A. devono essere dotati, e che può essere di seguito sintetizzata in:

- elmetto di sicurezza;
- indumenti anti impigliamento e/o antistatici;
- occhiali di sicurezza;
- scarpe di sicurezza;
- guanti di protezione;
- apparecchio portatile per la misurazione dell'ossigeno ed eventualmente per la valutazione della presenza di gas (multigas);
- eventualmente fit - test preventivo se è necessario l'utilizzo di un facciale.

7.1 Mezzi e dispositivi di salvataggio

Per quanto riguarda le caratteristiche degli equipaggiamenti di soccorso (si ricorda che, ove non diversamente indicato, in caso di siti presidiati gli stessi vengono messi a disposizione dall'azienda visitata), esse dipendono dalla tipologia di ambienti confinati e/o con sospetto inquinamento o assimilabili e dal tipo di emergenza cui si deve far fronte; ovviamente il personale interessato deve essere formato ed eventualmente addestrato al loro uso. In base alle casistiche conosciute si potrebbero rendere necessari tutti o alcuni dei seguenti presidi (è evidenziato che l'elenco seppur completo può non essere

esaustivo):

- dispositivi di allarme sonoro portatili per avvisare le persone delle zone circostanti sulla necessità di assistenza;
- disponibilità di telefoni o radio per poter diramare l'allarme;
- imbracatura di sicurezza (DPI in dotazione al tecnico del S.N.P.A.);
- dispositivi meccanici (tripode con dispositivi anticaduta e recuperatore o attrezzatura simile) per recuperare l'eventuale infortunato;
- fonte di aria per la ventilazione dell'ambiente confinato (es.: un tubo collegato alla rete di aria compressa del sito);
- dispositivo di ventilazione (ventilatore esterno di aspirazione con tubazioni flessibili o similari);
- erogatori di aria a pressione positiva o sistemi di erogazione dell'aria posti all'esterno;
- dispositivi di monitoraggio dell'ossigeno anche per la squadra di soccorso al fine di controllare le condizioni all'interno dell'ambiente confinato;
- telo di scorrimento in PVC;
- barella per portare l'infortunato fuori dall'ambiente confinato.

8. Procedure di emergenza e salvataggio

Nel documento in corso di preparazione vengono, inoltre, individuate le fasi per la definizione delle necessarie procedure di emergenza. Gli aspetti rilevanti, descritti nel dettaglio all'interno del documento, sono di seguito riassunti.

8.1 Piano di emergenza

La procedura di emergenza e salvataggio, che deve sempre essere prevista progettata e realizzata dall'azienda visitata in caso di siti presidiati, deve essere predisposta nell'ambito di uno specifico *piano di emergenza* che permetta di attivare un pronto allertamento e un soccorso idoneo, efficace e tempestivo.

In caso di siti non presidiati è responsabilità del Dirigente S.N.P.A. in sede di programmazione dell'attività e del tecnico in sede di sopralluogo evitare qualunque situazione che possa mettere a rischio la conduzione in sicurezza dell'attività.

Vanno comunque previste azioni preventive, da progettare in sede di programmazione e da attuare nel corso dello svolgimento dell'attività, quali il continuo monitoraggio dell'atmosfera (misura dell'ossigeno presente ed eventualmente valutazione della presenza di gas a seconda delle situazioni), la costante comunicazione con personale che rimane all'esterno dello spazio confinato (dotazione di radio o cellulare), etc.

8.2 Gestione dell'emergenza

La gestione dell'emergenza è effettuata dal Responsabile dell'intervento (dell'azienda visitata, in caso di siti presidiati) e comprende:

- Fase di allarme: sia dei soccorsi interni che degli enti esterni;
- Fase di recupero: che può avvenire con o senza accesso all'ambiente confinato e/o sospetto d'inquinamento o a questi assimilabili, da parte dei soccorritori;
- Fase di trasporto: dalla zona dell'emergenza a luogo sicuro e/o presso posto di soccorso.

Nel caso di siti non presidiati, l'obiettivo è non trovarsi mai nella situazione di dover gestire un'emergenza, eventualmente riconoscendo che è opportuno interrompere l'attività ed evitare di introdursi nello spazio confinato.

Qualora si renda necessario, il personale che si trova all'esterno e che perde il contatto

con il personale all'interno è responsabile dell'attivazione degli Enti esterni di soccorso.

9. Programmi formativi

Tenuto conto che la sicurezza degli operatori è strettamente legata alla informazione, formazione e addestramento ricevuti e che la consapevolezza dei rischi potenziali è requisito fondamentale per lo svolgimento delle attività, l'ultima parte del documento predisposto dal Tavolo di lavoro S.N.P.A. riporta una proposta formativa per le figure coinvolte nelle attività interessanti ambienti confinato e/o sospetti d'inquinamento o a questi assimilabili.

Per poter procedere a programmi formativi personalizzati e mirati all'effettiva attività svolta dal personale SNPA sarebbe necessario procedere ad un censimento delle attività e, se possibile, ai siti visitati periodicamente dal personale di ciascuna Agenzia, in modo da individuare con certezza il personale che normalmente è incaricato di effettuare attività con ingresso in spazi confinati (ad esempio tecnici incaricati delle verifiche periodiche interne di attrezzature a pressione, quali serbatoi, reattori, caldaie, etc.).

Per tale personale vanno previsti obbligatoriamente specifici programmi formativi e di addestramento, in particolare sull'utilizzo di DPI di terza categoria, e specifica sorveglianza sanitaria, normalmente annuale, da parte del Medico Competente.

Come già riportato al paragrafo 3 del presente lavoro, in alcuni casi è difficile individuare a priori se un ambiente oggetto di monitoraggio e/o controllo può identificarsi come confinato o sospetto d'inquinamento, anche perché le condizioni di lavoro possono cambiare da una volta all'altra o nel corso dello stesso sopralluogo.

Pertanto, tutto il personale S.N.P.A. che potenzialmente esegue attività in esterno finalizzata a monitoraggio, verifica e controllo di matrici ambientali deve essere formato al fine di essere in grado di poter individuare la presenza di un ambiente confinato e/o sospetto d'inquinamento o a questi assimilabili durante lo svolgimento delle proprie attività in modo da poter richiedere l'attivazione delle fasi previste al paragrafo 6.

Un supporto in tal senso viene fornito attraverso lo *Schema decisionale*, riportato nel documento del tavolo di lavoro S.N.P.A. La sua applicazione può essere utile nell'individuare ambienti potenzialmente confinati e/o sospetti di inquinamento e nell'implementazione dell'elenco dei siti conosciuti che ciascuna Agenzia dovrà predisporre.

Si evidenzia infine l'opportunità che anche il personale dei Servizi di Prevenzione e Protezione delle diverse Agenzie venga specificatamente formato sul tema, al fine di migliorare le proprie competenze sulla materia.

Nel documento sono quindi definiti i programmi formativi per:

- i lavoratori del S.N.P.A. che possono normalmente accedere ad un ambiente confinato e/o sospetto d'inquinamento o a questi assimilabili;
- tutti i lavoratori del S.N.P.A. che potenzialmente eseguono attività in esterno finalizzata a monitoraggio, verifica e controllo di matrici ambientali
- i loro Dirigenti
- i loro Preposti
- il personale dei SPP

10. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un documento, elaborato dallo specifico Tavolo di Lavoro istituito nell'ambito del S.N.P.A., relativo alle problematiche connesse allo svolgimento di attività istituzionali in ambienti confinati o sospetti di inquinamento o assimilabili da parte di personale con la funzione di vigilanza, ispezione, monitoraggio e

controllo territoriale che non sono esecutori di “lavori in ambienti confinati e/o sospetti d’inquinamento” e quindi destinatari delle prescrizioni del d.p.r. 177/2011.

In tale documento, attualmente in fase di ultima elaborazione ed approvazione finale, sono definite le condizioni e modalità di accesso in sicurezza in ambienti confinati e/o sospetti d’inquinamento, o a questi assimilabili, sono individuati i limiti di intervento, le procedure operative e le verifiche preliminari all’accesso ed è definito un programma di formazione specifica da inserire tra gli argomenti dell’aggiornamento periodico del personale interessato.

L’obiettivo futuro è proporre la possibile condivisione delle procedure elaborate nell’ambito delle attività peculiari del S.N.P.A. anche con altri Enti di controllo e vigilanza che possono trovarsi ad operare in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento o assimilabili in modo da estendere modalità di lavoro, censimento di località e attività potenzialmente a rischio e messa in sicurezza dei lavoratori della P.A. che non sono destinatari delle prescrizioni del d.p.r. 177/2011.

11. Bibliografia

- [1] Gestione del rischio di infortuni legati agli ambienti confinati – Inail - CONSEL Allegato 3 alle Linee di Indirizzo SGSL AR;
- [2] Manuale illustrato per lavori in ambienti sospetti di inquinamento o confinati ai sensi dell’art. 3, comma 3, del d.p.r. 177/2011 – Inail ed. 2013;
- [3] Indicazioni operative in materia di sicurezza ed igiene del lavoro per i lavori in ambienti confinati - Regione Emilia-Romagna - Comitato Regionale di Coordinamento art. 7 d.lgs. 81/08 – Ed. aprile 2015;
- [4] Ambienti Confinati-Linee di indirizzo - Regione Piemonte - Comitato Regionale di Coordinamento art. 7 d.lgs. 81/08;
- [5] Buone prassi per la tutela della salute e della sicurezza degli operatori del Sistema Agenziale impegnati nelle emergenze di origine naturale e/o antropica – Ispra Manuali e linee guida 79/2012 ISBN: 978-88-448-0538-8.

Fenomeno di incollaggio nell'intervento delle valvole di sicurezza, approfondimento nel caso del GPL

F. Di Rocco¹, F. Panin², E. Artenio³, A. Rinaldini³, D. Carli⁴, R. Frighetto⁴, M. Marangoni⁵

¹ Inail - Uot di Verona

² Inail - Uot di Padova

³ Inail - Dit

⁴ Centrogas

⁵ Madas

Sommario

L'art.3 del d.m. 29/02/88, poi modificato nel campo d'applicazione dal d.m. 23/09/04, impone la sostituzione biennale delle valvole di sicurezza a protezione dei serbatoi di GPL di volume inferiore ai 13 mc. Le nuove valvole, prima dell'installazione, devono essere verificate a banco da un funzionario Inail, questo ha permesso un buon monitoraggio delle stesse ed un approfondimento delle loro anomalie, in particolar modo ha messo in evidenza la diffusione di un fenomeno chiamato "incollaggio", ovvero un ritardo di apertura, sul primo intervento dell'accessorio di sicurezza, rispetto alla pressione di taratura, che si riscontra dopo un certo periodo di inattività, in genere appunto all'atto della verifica biennale.



Figura 1. Serbatoi di GPL verticali e orizzontali dal mazzo ai 13 metri cubi

Introduzione

Le sempre più stringenti restrizioni sulle emissioni accompagnate da ordinanze municipali e provinciali, incentivi sugli eco-combustibili e le oscillazioni del prezzo di energia e combustibili, hanno incrementato le immatricolazioni delle auto a GPL del 27% dal 2016 al 2017, arrivando a poco meno di 130k su un circolante di 2,3mln, e la tendenza in aumento è destinata a mantenersi.

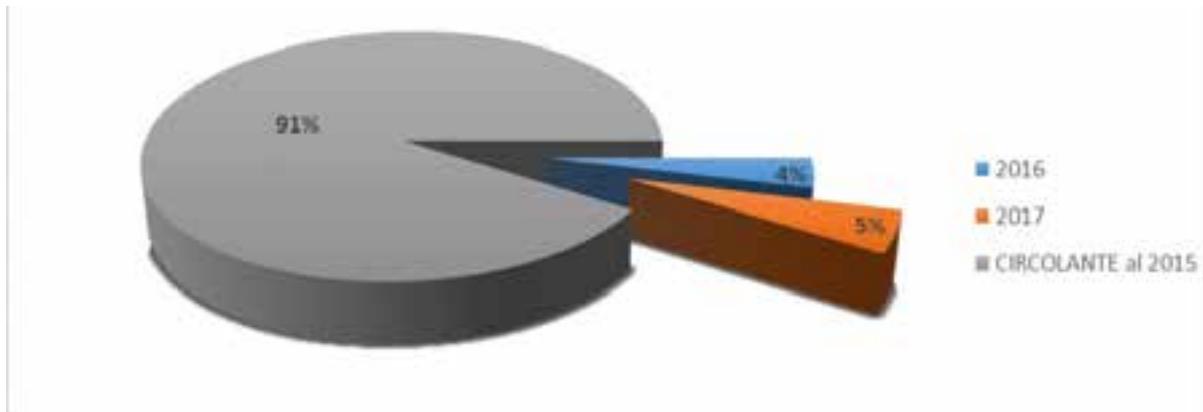


Grafico 1. Parco auto circolante alimentato a GPL

Delle 3,4 milioni di tonnellate di GPL utilizzate lo scorso anno circa il 50% è stato ad uso autotrazione, ciò fa supporre che l'incremento di immatricolazioni implicherà nel tempo un incremento nei consumi e quindi nelle installazioni di serbatoi per la distribuzione; l'incremento nelle pompe a GPL avviene per lo più installando nuovi serbatoi senza sostituire i vecchi prima di un rientro dell'investimento effettuato.

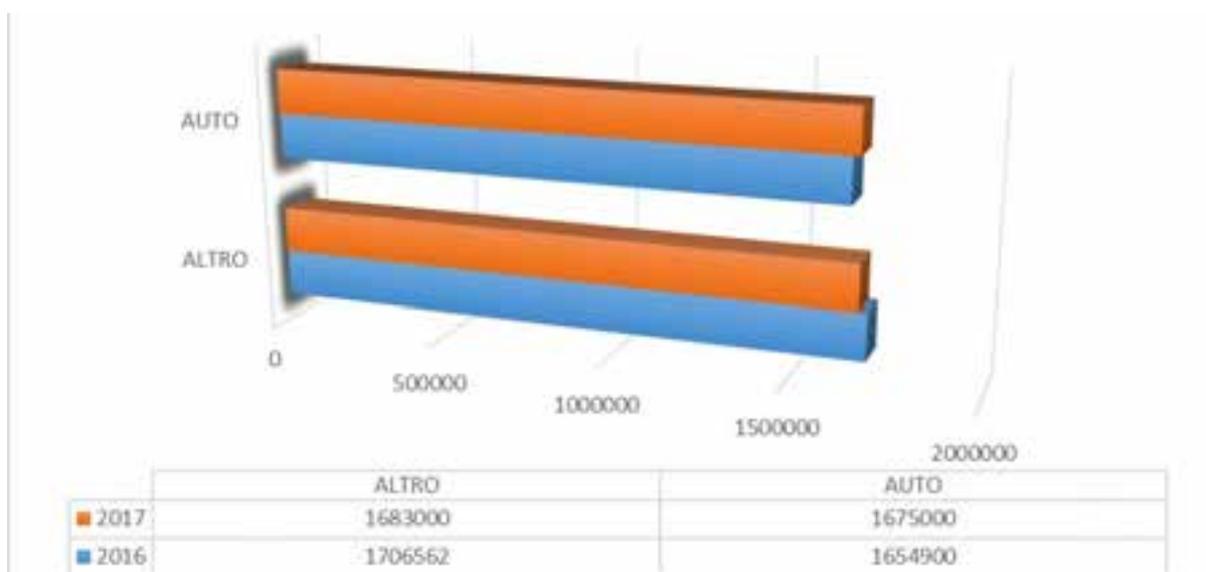


Grafico 2. Consumi di GPL per autotrazione ed altro, a confronto 2016 e 2017

Considerando quanto detto è necessaria un'alta affidabilità delle valvole di sicurezza a protezione degli stessi serbatoi, fortunatamente l'attuale periodicità di verifica elevata diminuisce di molto la probabilità di guasto ma, visto l'invecchiamento delle attrezzature, è necessario che le valvole siano affidabili.

1. La valvola di sicurezza

1.1 La struttura

La struttura delle valvole di sicurezza per attrezzature a GPL è riportata in figura 2, dove dai diversi modelli e misure si nota la costanza di pochi robusti componenti.

Il materiale utilizzato per i componenti è riportato in tabella 2, ovviamente viene utilizzato un materiale anti-scintillante come l'ottone per tutti quei componenti che potrebbero dare adito a sfregamento e produzione di scintille.

COMPONENTI	MATERIALI	RIF. SU FIG. 2
Ghiera di regolazione	ottone	1
Molla	acciaio	2
Otturatore	ottone	3
Guarnizione dell'otturatore (<i>tampone</i>)	NBR (<i>Nitrile Butadiene Rubber</i>)	4
Corpo valvola	ottone	5

Tabella 1. Elenco componenti e relativi materiali di una valvola di sicurezza



Figura 2. Elenco componenti e relativi materiali di una valvola di sicurezza

1.2 Il funzionamento

Il funzionamento della valvola di sicurezza per il GPL è analogo a quello per altri settori, con la differenza che la pressione di bollo delle attrezzature è quasi la stessa per tutti i tipi, di conseguenze anche per le valvole di sicurezza la taratura prevalente è una, quella a 17,65 bar.

2. Analisi malfunzionamenti – prove sulle valvole

La prassi per la verifica della taratura delle valvole di sicurezza per il GPL è sintetizzabile in pochi punti

1. le valvole vengono provate in grandi lotti, una per una, o a campione,
2. vengono montate sull'attacco di un banco di prova e sollecitate in pressione per intervenire in breve tempo
3. solitamente la sollecitazione è realizzata con una rapida rampa in pressione di aria compressa o azoto.

Durante le verifiche delle valvole di sicurezza il fenomeno dell'incollaggio, si manifesta solitamente intorno al 10% con punte del 30% sul campione di taratura

Il fenomeno non è legato alla corretta regolazione della ghiera che insiste sulla molla, ovvero non è legato alla corretta taratura e non è detto che in una successiva verifica non interessi anche quelle valvole per le quali in un primo momento non si era manifestato.

L'insicurezza dovuta al fenomeno ha portato ad un approfondimento sulle sue possibili cause con le prove a seguire.

2.1 L'esperienza delle prove sulle valvole

Per accentuare quei fattori che potrebbero determinare il fenomeno dell'incollaggio sono state effettuate diverse varianti

- Varianti sulle rampe di pressione per sollecitare l'intervento
 - i. 0-22,5 bar 5 secondi
 - ii. 0-19 bar 13 secondi
 - iii. 0-19 bar 10 secondi
- Varianti ambientali
 - A. Valvola appena tarata (circa 17,65 bar) e a temperatura ambiente
 - B. Valvola lasciata al sole estivo e provata ancora calda
 - C. Valvola tenuta in frigorifero e provata ancora fredda

La combinazione di queste varianti ha dato luogo a 5 prove:

1. Combinazione i-A
2. Combinazione ii-B a distanza di una settimana dalla prova 1
3. Combinazione iii-B a distanza di una settimana dalla prova 2
4. Combinazione iii-C a distanza di una settimana dalla prova 3
5. Combinazione iii-C a distanza di due settimane dalla prova 4

Ogni prova consta di due verifiche di intervento per ogni valvola:

- I. una prima prova
- II. una prova successiva dopo che tutte le valvole sono state sollecitate

Nel grafico 3 sono evidenziati gli scarti delle prove successive rispetto alla prova 1 con inversione di segno, più un picco risulta positivo maggiore è lo scarto negativo rispetto alla prova 1 della stessa valvola, ad esempio se la valvola X ha uno scarto di 0,65 nella prova 3 vuol dire che in quella prova è intervenuta a 17 mentre nella 1 a 17,65.

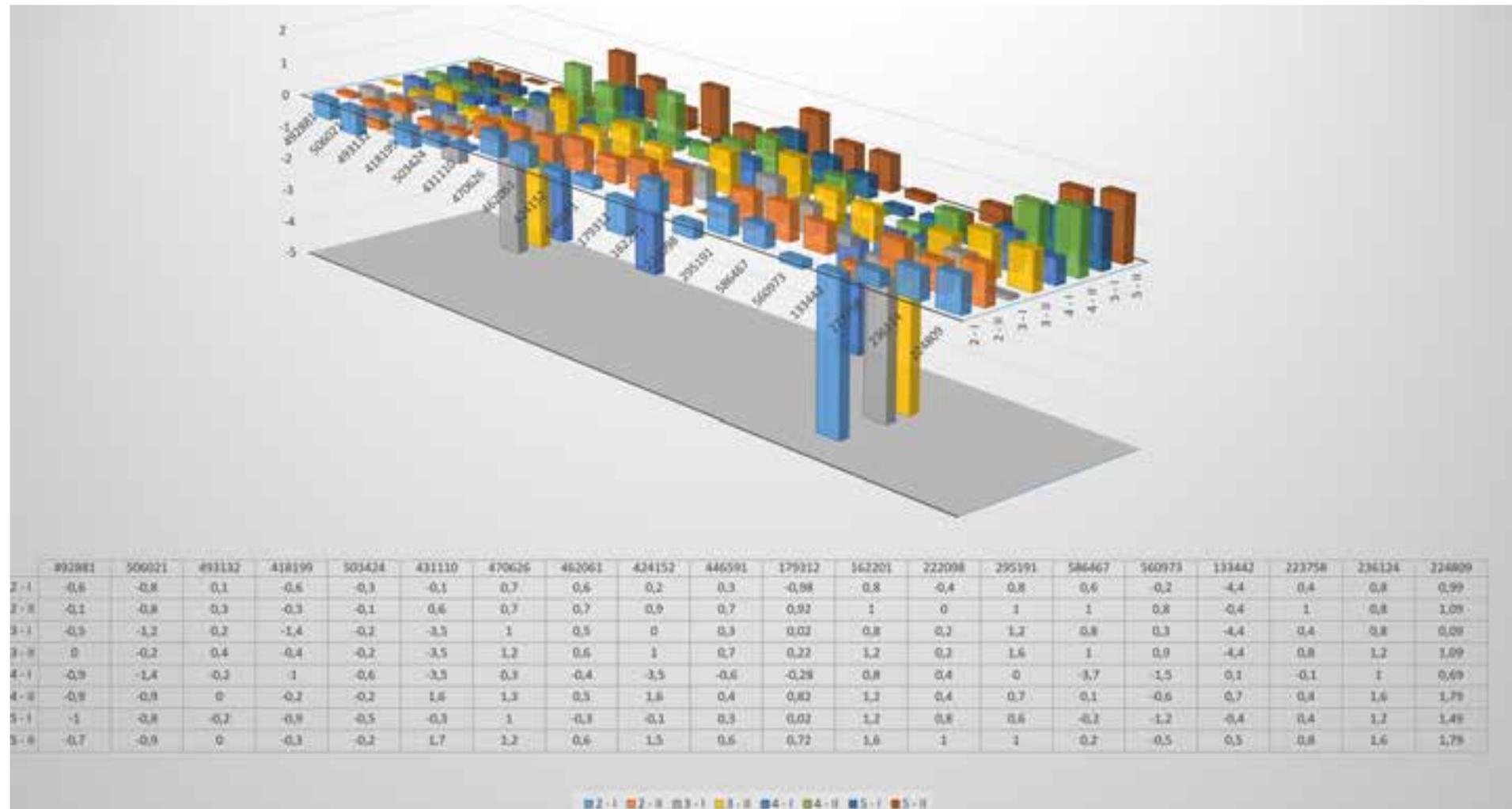


Grafico 3. Prove sulle valvole variando le rampe d'apertura e la temperatura delle valvole

Le prove evidenziano una costante differenza tra l'intervento I e l'intervento II, in modo marcato e inconfondibile, in qualche caso con variazioni importanti.

Dal punto di vista della sicurezza è essenziale che già il primo intervento sia in un intervallo ragionevolmente piccolo intorno alla pressione di taratura e che il fenomeno dell'incollaggio si verifichi il meno possibile.

Dal grafico 3 si evince che, mentre il fenomeno dell'incollaggio è aumentato nella prova 4, nella prova 3 le valvole "incollate" al primo intervento sono rimaste incollate anche al secondo intervento e per alcune il fenomeno si ripete nel primo intervento di più prove.

Un dato frequente, ed evidenziato in queste prove nella differenza tra la prova 2 e la prova 3, è la relazione tra la velocità della rampa e la percentuale di valvole "incollate".

Prima delle prove sintetizzate nel grafico 3 sono state svolte prove con rampe ancora più lente su valvole che risultavano incollate:

1. la valvola non interviene se sollecitata con una rampa 0-19 bar 5 secondi
2. la valvola viene immagazzinata senza ulteriori sollecitazioni per una settimana
3. la valvola viene sollecitata ad una rampa 0-19 in 30 secondi e interviene.

2.2 Conclusioni sulle prove

Da quanto emerso dalle prove sintetizzate nel grafico 3 e da altre di cui si è tenuta nota durante l'attività di verifica della taratura si evince che:

- La quasi totalità delle valvole, sollecitate al banco con qualsivoglia rampa, effettua un primo intervento a pressione maggiore o uguale rispetto al secondo
- La durata della rampa di pressione del banco prova incide in modo rilevante sulla percentuale di valvole "incollate" riscontrate durante una verifica
- La durata del riscaldamento delle valvole incide negativamente sul numero delle valvole incollate, ovvero più la valvola rimane al caldo più il fenomeno dell'incollaggio si manifesta

2.3 Ipotesi sulle cause di incollaggio

Nella ricerca di cause plausibili si è indagato su cause derivanti da fattori legati al funzionamento della valvola che è così sintetizzabile:

1. Il fluido in pressione spinge il **tampone** superando la pressione della molla
2. L'**otturatore** si alza "pattinando" sulla parte interna del corpo della valvola

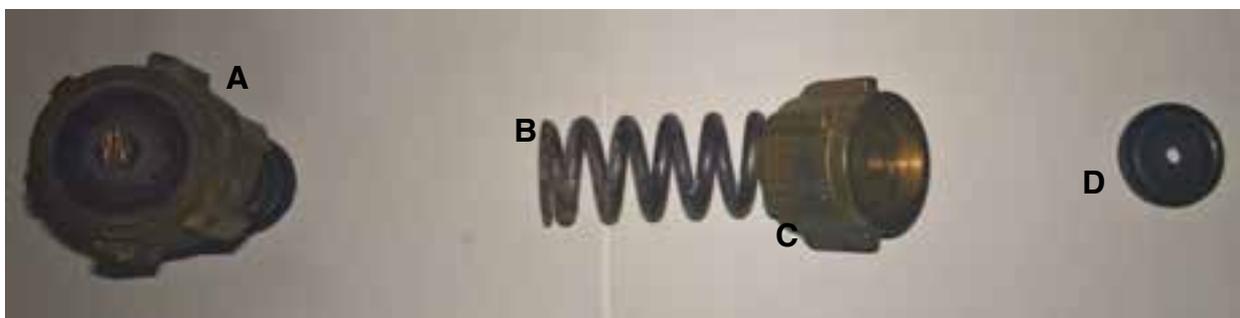


Figura 3. Foto di Molla(B) – Otturatore(C) – Tampone(D) assiemati (A) o separati

2.3.1 Ipotesi sull'otturatore

Nello spostamento dell'otturatore corpi estranei potrebbero impedirne il movimento, per questo si è confrontato il comportamento delle valvole nei diversi centri di taratura che:

- Sabbiano e spazzolano prima di tarare

- Spazzolano e puliscono internamente ed esternamente con aria compressa

Il fenomeno dell'incollaggio si manifesta in entrambi i centri in percentuali simili, si è così scartata l'ipotesi di difficoltà nel "pattinamento" dell'otturatore sul corpo valvola.

L'ipotesi che ci siano impedimenti nella corsa dell'otturatore tali da determinare il fenomeno dell'incollaggio è da scartare; se in alcuni casi l'intervento delle valvole libera in aria frammenti di alveari o altro ma l'intervento risulta corretto in altri, visibili nel grafico 3, il fenomeno si ripete a distanza di tempo su valvole immagazzinate (pulite).

2.3.2 Ipotesi sul tampone

Il tampone è realizzato in NBR, il comportamento di questa gomma, ovvero la capacità di cambiare o meno le proprie caratteristiche fisiche una volta a contatto con sostanze di qualsivoglia natura, induce a pensare sia coinvolta nel fenomeno dell'incollaggio.

Per la definizione delle compatibilità si è ricercato sui siti dei maggiori produttori, seppure alcune sostanze fossero presenti su tutti i siti, magari a volte con il nome del gruppo di appartenenza ed altre con il nome della singola sostanza, sempre come ben tollerate o viceversa non tollerate, alcune sostanze erano presenti ma con diverse relazioni di compatibilità; le differenze nelle compatibilità sono probabilmente dovute a mescole create con additivi o varianti di processo diverse da produttore a produttore.

Riguardo le compatibilità/incompatibilità comuni a tutti i produttori visionati, concordano che la gomma resista:

- ✓ bene ad idrocarburi alifatici (es.: metano, butano, propano), oli min. e veg., acqua
- ✓ male ad idrocarburi clorurati ed aromatici (es.: benzene), esteri, vapore. butadiene, acido solforico

Ad una prima lettura la scelta della NBR sembrerebbe perfetta, e quindi non necessario un ulteriore approfondimento ma, le esperienze raccolte, propenderebbero proprio per un'accurata indagine in questa direzione; inoltre, la NBR, risulta essere una gomma che, seppure bene tolleri gli oli minerali, presenterebbe variazioni in dimensioni e rigidità con alcune sostanze.

La norma americana ASTM, prevede che vengano fatti test ad immersione in fluidi con annotazione di peso e spessore preventiva e successiva all'immersione

- D471-16
- D5662-17
- F146-12

La NBR a contatto con alcuni fluidi tende a gonfiarsi, la costrizione del tampone nell'otturatore induce a pensare che se l'aumento di volume avviene durante la chiusura un fenomeno di interferenza tra tampone e sede possa far aumentare la pressione necessaria per l'intervento.

Un approfondimento sulla produzione del GPL mirerà a verificare che impurità in produzione, e additivi prima della vendita, siano compatibili con la NBR.

3. II GPL

La composizione esatta del GPL è difficile da fornire, persino le sue principali componenti, propano e butano, variano a seconda dei fornitori e per lo stesso fornitore possono cambiare nel corso del tempo da fornitura a fornitura, per questo si seguirà il GPL dalla produzione alla distribuzione.

3.1 Produzione

La produzione del GPL, principalmente del propano, avviene:

- Per separazione dal metano tramite liquefazione
- Per separazione dal petrolio
 - Per evaporazione prima, separandolo dai tagli più pesanti
 - Per liquefazione poi, separandoli dai gas più leggeri

Durante questo processo i “tagli” non sono netti e in un taglio si possono trovare anche piccole percentuali del successivo e del precedente.

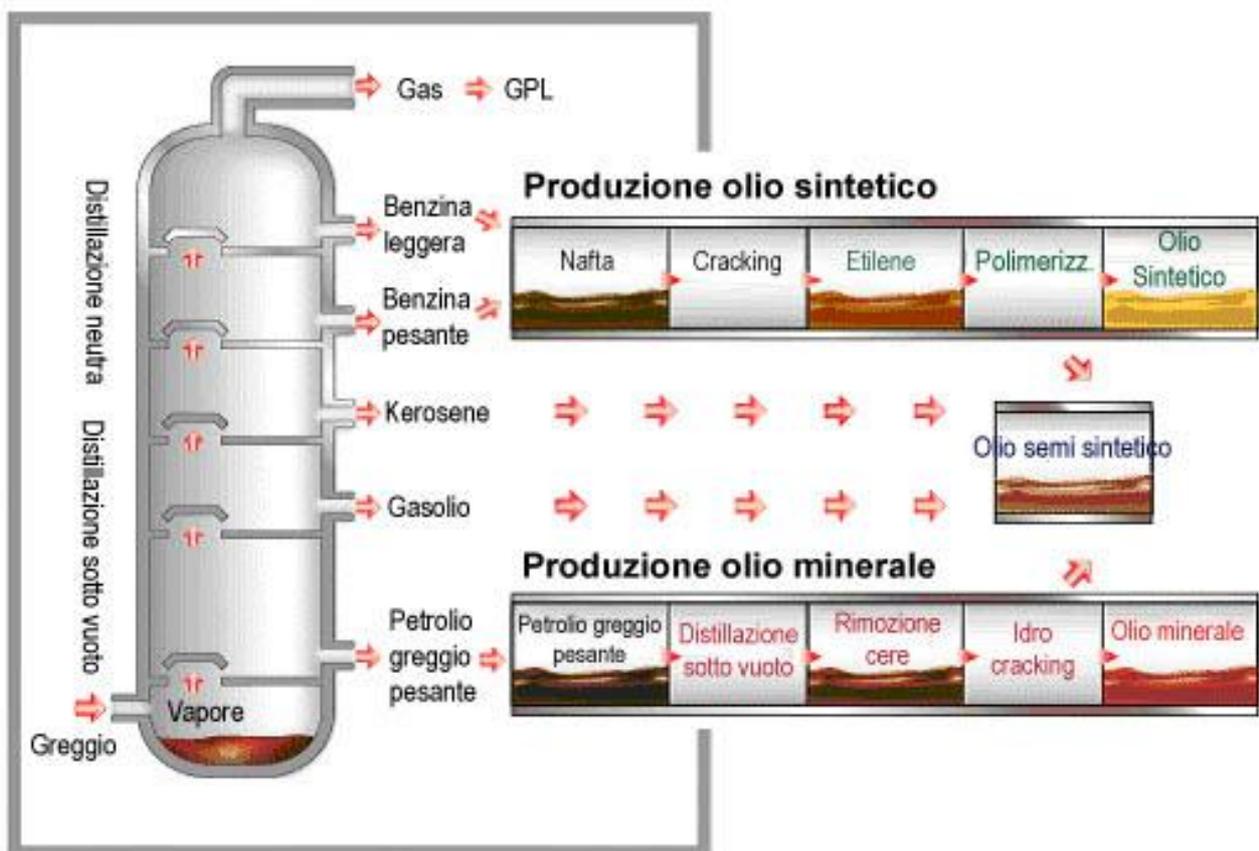


Figura 4. Un esempio dei tanti possibili processi di raffinazione del petrolio

3.2 Distribuzione

Al prodotto raffinato vengono poi aggiunti additivi come olefine, soprattutto per l'autotrazione, per migliorarne la qualità in relazione all'utilizzo.

3.3 Conclusioni

Paraffine ed Olefine sono compatibili e ben tollerate dalla NBR. Viceversa non alcune molecole del taglio precedente, come ad esempio il butadiene e benzene, per questo si sono effettuate le prove su oli sintetici che ne sono composti.

4. Analisi malfunzionamenti – prove sui tamponi

Si è proceduto con una prova sui tamponi visto che eventuali variazioni in volume e rigidità possono sicuramente produrre interferenza con la sede e determinare un aumento della pressione necessaria all'apertura.

4.1 L'esperienza delle prove sulle valvole

La prova effettuata consiste in:

1. Estrazione dei tamponi da valvole dismesse
2. Rilievo del diametro del tampone
3. Immersione in un olio sintetico per circa 2 settimane (la D5662 prevede 240 ore)
 - a. Olio circuito idraulici
 - b. Olio circuito freni
 - c. Olio sintetico per compressori
 - d. Olio per motori diesel e super (15/40)
4. Rilievo del diametro del tampone

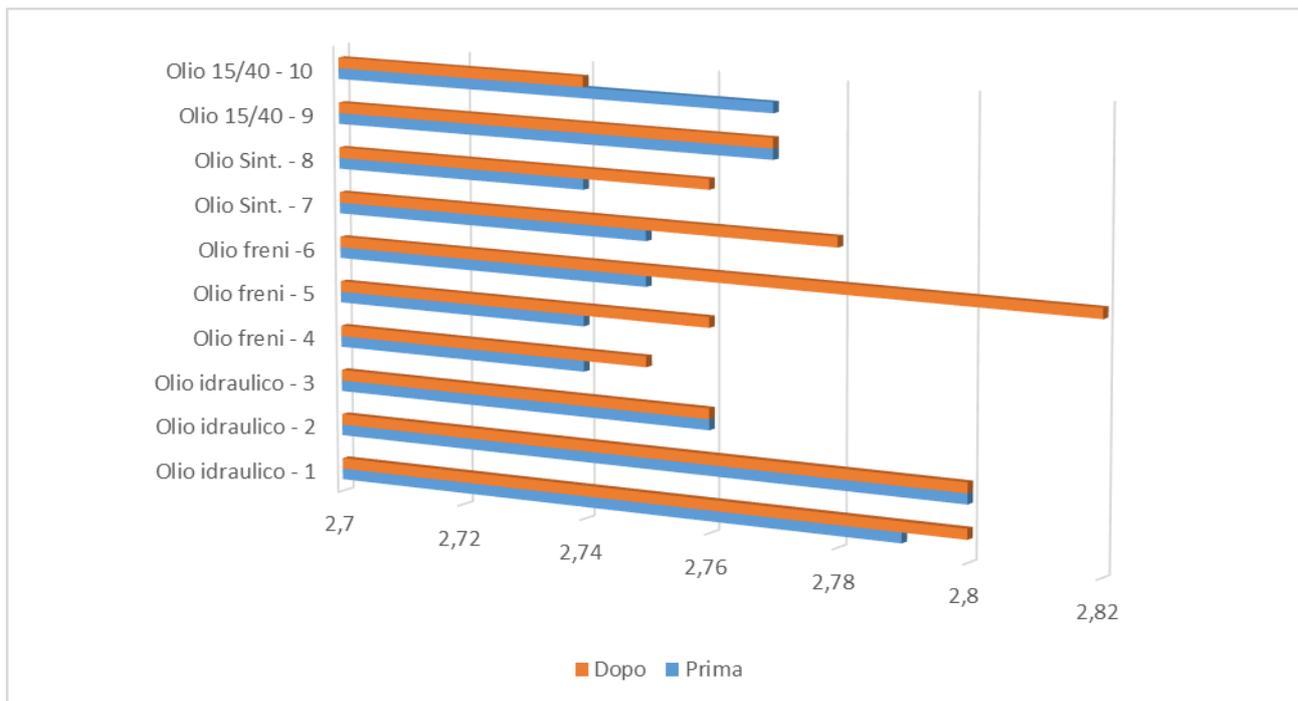


Grafico 4. Diametro (in cm) dei tamponi rilevato prima e dopo l'immersione in oli sintetici

4.2 Conclusioni sulle prove

I risultati di queste prove, sintetizzati nel grafico 4, hanno evidenziato che l'immersione in olio provoca variazioni fisiche soprattutto per certi tipi di olio

- Olio freni
- Olio sintetico per compressori

I componenti dell'olio dei freni sono difficilmente ricollegabili al GPL, viceversa il sintetico tra i suoi componenti ne ha alcuni dal taglio appena precedente al GPL, nel frazionamento del petrolio (figura4), ciò vuol dire che il GPL, non quello separato dal metano, potrebbe reagire con la NBR a causa di alcune sue impurità.

4.3 Ipotesi sulle cause di incollaggio

Per dare il giusto significato alle prove riportate in questa memoria si ricordare che:

- Le valvole sono normalmente installate con tampone a contatto con fase gas
- Le impurità sono inferiori allo 0,1%

Un fenomeno simile a quello delle prove è il rigonfiamento del tampone di alcune elettrovalvole per GPL (fase liquida) tale da comprometterne la funzionalità; le prove eseguite sui tamponi sono servite ad enfatizzare in breve tempo una reazione che per dare gli stessi effetti sulle installazioni ne richiederebbe molto di più.

L'olio sintetico, come riassunto nello schema di figura 4, viene prodotto nella fase di cracking di tagli appena inferiori al propano butano e pentano ed ha spesso additivi di taglio simile, questi e/o altre impurità e/o additivi (es. *odorizzatori*), presenti nel GPL, potrebbero, nel tempo, essere causa del fenomeno dell'incollaggio.

Per quanto inizialmente la gomma risponda bene alle sollecitazioni meccaniche, eventuali modifiche fisiche e geometriche, determinate dalla reazione con sostanze presenti nel GPL, potrebbe essere le responsabili di interferenze tra tampone e sede.

I grafici presentati sono finalizzati alla rilevazione di tendenze di comportamento, ma anche in base a questi sono possibili spunti di approfondimento che potrebbero essere:

- Prove su valvole nuove
- Modellizzazione *corpo valvola-molla-otturatore* senza tampone
- Confronto tra le rampe per le quali non si manifesta l'incollaggio e la rampa di aumento pressione in caso di aumento temperatura
- Studio banchi prova automatici compatibili con rampe lente e grossi lotti
- Analisi delle gomme compatibili con tutte le sostanze potenzialmente presenti nel GPL di qualunque provenienza esso sia
- Analisi delle alternative sul mercato alle valvole di sicurezza qui presentate
- Studio di configurazioni alternative e innovative di valvole di sicurezza

5. Bibliografia

[1] d.m. 29/02/88 G.U. "Norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m³."

[2] d.m. 23/09/04 G.U. "Modifica del decreto del 29 febbraio 1988, recante norme di sicurezza per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas, di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 5 m³ e adozione dello standard europeo EN 12818 per i serbatoi di gas di petrolio liquefatto di capacità inferiore a 13 m³"

[3] Assoliquigas, sito web <http://assogasliquidi.federchimica.it/ILGPL/InumeridelGPL.aspx>

[4] Standard ASTM D471-16 "Standard Test Method for Rubber Property—Effect of Liquids¹"

[5] Standard ASTM D5662-17 "Standard Test Method for Determining Automotive Gear Oil Compatibility with Typical Oil Seal Elastomers¹"

[6] Standard ASTM F146-12 "Standard Test Methods for Fluid Resistance of Gasket Materials"

[7] La Chimica e l'Industria - ISSN 2532-182X - 2017, 4(5), giugno

La manutenzione nell'industria 4.0: assistenza ed implementazione

M. Di Nardo¹, G. Formato², L.C. Santillo³

¹ Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della produzione industriale - Università di Napoli Federico II

² Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della produzione industriale - Università di Napoli Federico II

³ Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della produzione industriale - Università di Napoli Federico II

Sommario

In questi anni si sta assistendo alla quarta rivoluzione industriale, sintetizzata nella sigla 4.0. Tale rivoluzione comprende sia lo sviluppo di tecnologie esistenti che l'implementazione di nuove. Alla base del nuovo modello abbiamo l'implementazione dei sistemi dei sistemi di sensori, i quali per essere abbinati alla nuova tecnologia devono essere più precisi ed efficienti. La nuova tecnologia si basa su "big data", "internet of things", "reti neurali" e "augmented reality". La manutenzione e il fattore umano conservano un ruolo fondamentale. Come in ogni modello industriale non si può prescindere dalla manutenzione sia ordinaria che straordinaria; in questo lavoro la manutenzione verrà definita come ibrida tra "preventiva" e "su condizione", prendendo gli aspetti positivi di una e dell'altra. Si proporrà un'implementazione della stessa nel paradigma di industria 4.0 tramite nuove interfacce uomo-macchina (supportata dall'augmented reality) che consentirà interventi anche da remoto. Tutto ciò si collega quindi al ruolo dell'uomo nell'industria 4.0 che, a prima vista, sembra ridursi, ma in realtà vengono richieste nuove competenze sempre maggiori. In quest'ottica, le nuove modalità di implementazione della manutenzione consentono di ottimizzare i processi organizzativi.

Key-Words: Industria 4.0, Manutenzione, Augmented Reality, Fattore umano.

1. Introduzione

Le norme UNI EN 13306, UNI 9910 e UNI 10147 definiscono manutenzione la combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un'entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta. La manutenzione si divide in ordinaria e straordinaria. La manutenzione ordinaria può essere "ciclica", "migliorativa", "predittiva", "preventiva", "su condizione". In questi anni si sta assistendo alla quarta rivoluzione industriale che è sintetizzata nella sigla "Industria 4.0". L'innovazione che si sta apportando si basa sull'implementazione dei *sistemi di sensori, big data, internet of things e reti neurali*; tutto ciò supportato da una *rete wireless* di collegamento che consente un intervento/un comando da remoto. La manutenzione entra in gioco ovunque sia in uso un bene fisico e con questo nuovo modello di industria, in cui le macchine abbinata a software diventano tecnologicamente più avanzate, non si può prescindere da una sua evoluzione. È allora possibile utilizzare il termine "Manutenzione 4.0" per ribaltare questi concetti sulla manutenzione per far sì che si integri nel modo più efficiente all'interno del nuovo modello di industria. L'obiettivo di quest'evoluzione è quello, classico ma fondamentale, di minimizzare tempi e costi tramite l'ottimizzazione dei processi. Si parla di una riduzione del MTTR (Mean Time To Repair, ovvero tempo medio richiesto per la riparazione di un componente) tramite l'azzeramento del "lead-time", inteso come tempo di risposta ad un evento. Ciò che si intende fare è una manutenzione che sta a cavallo tra "preventiva" e "su condizione" e che prende gli aspetti migliori di entrambe le

tipologie. Grazie ai nuovi concetti di “Machine Learning” e “Big Data”, insieme allo sviluppo parallelo di algoritmi in reti neurali, si è capaci di analizzare questi dati in tempi brevissimi per fornire soluzioni in “real time”. Ed è proprio il real time un obiettivo che si cerca di raggiungere. Per far ciò, oltre ad un software avanzato, c'è bisogno di un sofisticato quanto preciso sistema di sensori per la rilevazione dei dati in tempo reale che devono essere forniti come input della rete neurale; proprio questi sono un'ulteriore sfida per il 4.0 perché se si vogliono fare delle rilevazioni sempre più precise ci sarà bisogno di un'ulteriore avanzamento tecnologico dei sensori [1]. Una volta costituita la rete, c'è bisogno di un'interfaccia semplice ma efficace capace di mostrare i dati all'utilizzatore. Lo sviluppo delle interfacce si sta orientando sempre più verso l'uso della realtà aumentata; il suo ruolo sarà quello di semplificare i processi. Tutto ciò viene calato in un contesto dove il “real time” abbraccia fortemente la sicurezza ovvero quello delle *apparecchiature a pressione*. Con la rivoluzione industriale e lo sviluppo delle macchine, le attrezzature a pressione hanno assunto sempre più un ruolo fondamentale nel campo della produzione e dell'applicazione industriale. Tale settore comprende una vasta gamma di prodotti che vanno dagli estintori alle caldaie per impianti industriali. [6] In particolare si prenderà ad esempio una caldaia a tubi di fumo, a media pressione e a medi volumi d'acqua. Nei paragrafi successivi si evidenzieranno i vantaggi ricavabili da questa implementazione e in che modo si intende attuarla; i vantaggi saranno legati a vari aspetti della produzione come riduzione tempi e costi ma anche legati al fattore umano che ha sempre più bisogno di essere regolarizzato per poter portare ad un incremento della produttività nel nuovo mondo dell'industria 4.0.

2. Manutenzione 4.0 e rete neurale

Nell'introduzione si è parlato di una manutenzione che sta a cavallo tra preventiva e su condizione ed è di questo paragrafo che ci si occuperà di chiarire il concetto; l'obiettivo che ci si pone è, come pre-annunciato, quello di una riduzione i tempi e quindi i costi della manutenzione. L'intervento manutentivo è preventivo. L'obiettivo che si pone non è però una manutenzione ciclica ma, senza dubbio, una manutenzione. È definita manutenzione 4.0 in quanto è associata ad un sistema di sensori che in maniera continua rileva i dati relativi alla macchina e li trasmette in real time ad un sistema che ne verifica la condizione. Questo sistema manutentivo genera vari vantaggi:

- Riduzione dei fermi macchina rispetto ad una manutenzione ciclica andando ad aumentare il tempo in cui la macchina genera un utile e una riduzione diretta del costo manutentivo perché diminuisce il numero degli interventi.
- Riduzione dei costi e dei tempi rispetto ad una manutenzione a guasto in quanto, quando avviene l'intervento, l'intervento risulta essere di una severità (quindi costo) inferiore e probabilmente genererà un tempo di fermo di quella macchina minore.

Un dato da controllare è controllato da un numero molto elevato di sensori ma ognuno di questi lavora separatamente; questa rete viene detta “nodo di sensori”. I nodi di sensori fanno parte di un sistema informatico più grande detto “sensor network”, nel quale confluiscono tutte queste rilevazioni. Il sensor network non è solo uno strumento di trasmissione perché al suo interno è presente il “Machine Algorithm” che elabora i dati e li classifica. Nel caso in cui il dato viene definito critico ed è necessario intervenire l'algoritmo genererà un segnale contenente i dati del problema e si estrarrà dal “Cloud Server” la risoluzione del problema. Il Cloud Server è un big data management system, contenente una mole di dati molto vasta. L'output viene poi trasferito ad un'interfaccia di visualizzazione, attraverso un segnale wireless che può essere di tipo http (Hypertext Transfer Protocol), per essere facilmente visualizzato. Il segnale trasmesso, in quanto wireless, può arrivare sia ad una postazione fissa sia ad un device mobile. Tale rete con l'aumento dei cicli di acquisizione dati e rilevazione anomalie acquisisce sempre più esperienza e capacità di

rilevazione preventiva [1]; è proprio in questa caratteristica che ci si distanzia da una manutenzione su condizione. La continua rilevazione di una caratteristica non ha solo la funzione di un controllo costante dell'apparecchiatura ma anche quello di controllare l'evoluzione dei suoi dati e prevenire con largo anticipo il raggiungimento di valori critici. Tutto ciò è possibile grazie al "Machine Learning" che è quella parte dell'algoritmo che è capace di aumentare l'esperienza del Cloud Server con l'aumento del numero delle rilevazioni e fornire un output sempre più preciso.

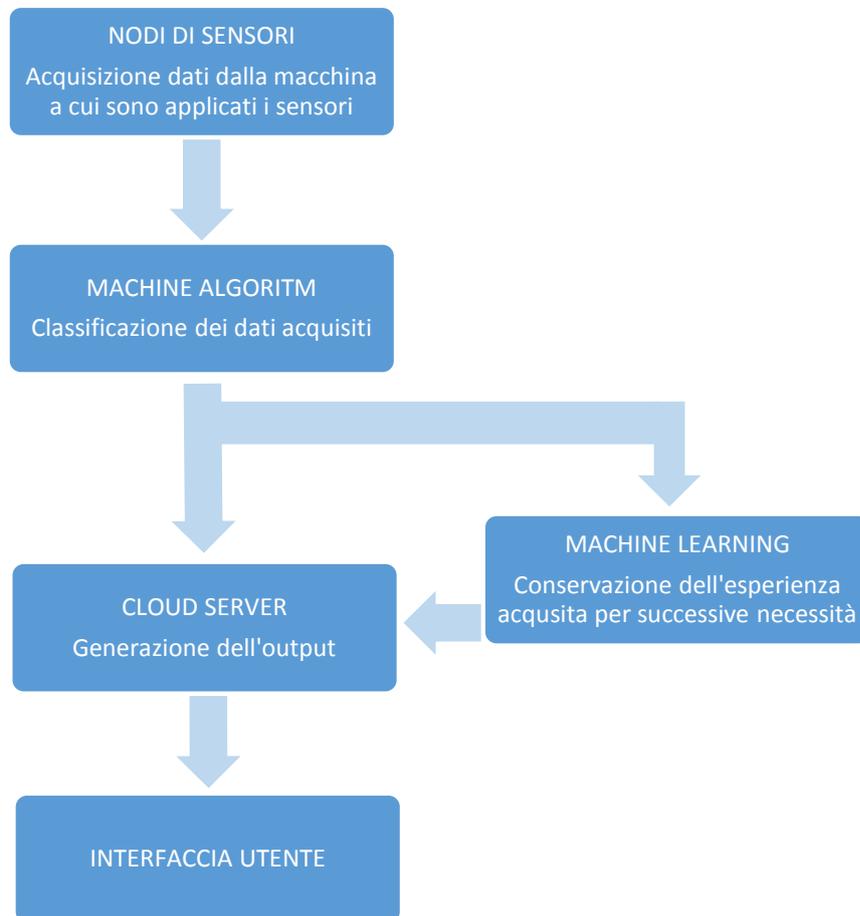


Figura 1. Schema del modello 4.0

Tuttavia c'è da sottolineare che i guasti casuali non possono essere in alcun modo portati a zero ma si può certamente ridurli quanto più possibile. Nella figura seguente si visualizzerà quanto esposto precedentemente. Inutile negare che questo sistema richiede degli investimenti iniziali maggiori sia in termini di sensori che tecnologia che in risorse di ricerca che siano capaci di implementare l'algoritmo legato al sistema neurale. L'algoritmo ha la capacità di implementarsi da solo, proprietà molto importante, ma per essere avviato ha bisogno di una mole di dati in archivio molto grande per far sì che sia subito operativo ed affidabile. C'è allora bisogno di un grande lavoro sperimentale in laboratorio per creare il Cloud Server. Questa è sì una complicazione, ma non va vista solo in quanto tale perché riporta all'utilizzo, anche per la tecnologia 4.0, del fattore umano.

3. Il ruolo dell'uomo nel nuovo modello di industria

Al centro di una rivoluzione industriale c'è sempre il ruolo dell'uomo e come evolvono le sue mansioni al suo interno. Un fattore da valutare è sicuramente l'occupazione e se ci sarà una sua inflessione. A prima vista, il sistema precedentemente descritto porta ad una

diminuzione degli occupati a favore dello sviluppo della rete neurale; in realtà ciò non avviene. Il ruolo dell'uomo cambia ma non diminuisce. Come precedentemente accennato, ci sarà bisogno di nuovi ricercatori capaci di ampliare in laboratorio l'esperienza della rete neurale tramite prove fisiche. Tali prove devono simulare i vari scenari che possono verificarsi e devono essere legate e specializzate in funzione all'apparecchiatura alla quale devono essere abbinati; questo è un lavoro, molto laborioso, che richiede alta competenza sia teorica che pratica. Come si vedrà, ci sarà bisogno di progettisti capaci di creare le interfacce che verranno poi utilizzate dagli operatori. Saranno necessari un maggior numero di operatori specializzati capaci di utilizzare le nuove tecnologie. La formazione darà agli operatori delle conoscenze avanzate rispetto a quelle che hanno al momento; l'argomento su cui si focalizzerà la formazione sarà a livello di lettura di interfaccia e rapporto uomo-macchina, quindi non di un'eccessiva complicatezza. Approfondiamo ora quali sono le caratteristiche che deve avere l'operatore per rapportarsi con questo nuovo modello di industria e in che modo esso può essere di supporto e di miglioramento al modello stesso. L'essere umano all'interno di un sistema complesso è inteso come un ente con capacità cognitive, capace di commettere errori ma anche di migliorare il sistema stesso; proprio in questo senso è proiettato l'uomo all'interno di questo nuovo modello. L'obiettivo che ci si propone è quello di ridurre la libertà dell'uomo di commettere errori ma di lasciare invariata la sua capacità di apportare migliore. È possibile fare ciò fornendo all'operatore un processo da seguire per ogni sua azione. Ciò potrebbe far pensare che l'uomo e il suo lavoro diventa standardizzato, quindi monotono e limitato, ma ciò non deve succedere perché l'essere umano se posto in un ambiente statico diventa meno produttivo e aumenta la facilità di commettere errori e si riduce la sua libertà nel migliorare il sistema; il contrario di ciò che si desidera. Fornendo all'uomo un processo standardizzato si dà la capacità ad esso di specializzarsi su più fronti e compiere azioni diverse tra loro; in questo modo è favorita la sua flessibilità all'interno del sistema produttivo. Inoltre si aumentano le proprie responsabilità il che giova al morale del singolo operatore e fa sviluppare le sue capacità. È in questo modo che il "Fattore Umano" torna a favore di un'azienda facendo aumentare la produttività in maniera significativa perché è proprio questo il fattore che grava di più sulle perdite. Per far ciò, c'è bisogno della prima citata formazione del singolo operatore per far in modo che il proprio know how si arricchisca. Un aspetto da non sottovalutare della formazione dell'operatore è che questo porta ad aumentare gli stimoli di lavoro sulla singola persona e fa sentire l'operatore parte di un progetto che l'intera azienda basa su di lui. Tutto ciò andrà ad aumentare il "well being" e si ribalterà, ancora una volta, sulla produzione. [9][10][11][12][13]

4. Attrezzature a pressione

Secondo la direttiva PED [4] si definiscono "*Attrezzature a pressione*" recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza ed accessori a pressione, compresi, se del caso, elementi annessi a parti pressurizzate, quali flange, raccordi, manicotti, supporti, alette mobili. La direttiva è riferita alle apparecchiature con pressione massima ammissibile superiore a 0.5bar in quanto le attrezzature sottoposte a una pressione inferiore o pari a 0,5 bar non presentano rischi significativi connessi alla pressione. Più nel particolare viene definito un recipiente come un alloggiamento progettato e costruito per contenere fluidi pressurizzati; esso comprende gli elementi annessi diretti sino al dispositivo previsto per il collegamento con altre attrezzature. Un recipiente può essere composto di uno o più scomparti. Si è scelto l'analisi di un'apparecchiatura a pressione facente parte di un impianto a vapore tecnologico in quanto sono molto usati in ambito industriale per assicurare energia termica indispensabile per le trasformazioni di processo o per il funzionamento di specifiche apparecchiature oltre che per il riscaldamento dello stabile. [5] Un impianto a vapore

comprende un generatore, una linea di distribuzione e degli apparecchi utilizzatori oltre che tutti gli accessori per la sicurezza lungo tutta la linea. I rischi collegati ai generatori di vapore sono da cercare tra le sue grandezze fondamentali:

- Potenza o carico → può essere espressa o mediante la portata di vapore prodotta [kg/h] oppure tramite il carico termico erogato [Kw].
- Pressione nominale (di bollo) e pressione di esercizio → rappresentano rispettivamente la massima pressione alla quale può funzionare il generatore e la pressione alla quale viene fatto funzionare teoricamente; entrambe si misurano in [bar].
- Temperature massime e minime [K] per le quali le attrezzature sono state progettate, secondo specifica del fabbricante.

Uno dei parametri più importanti per un'attrezzatura a pressione è il fluido che scorre in essa, in questo caso si ha vapore tecnologico che è definito *non pericoloso* in quanto non è tossico, non radioattivo, non aggressivo dal punto di vista chimico. La sua pericolosità è infatti unicamente connessa con la pressione a cui il vapore viene prodotto. Si conclude tale introduzione sulle apparecchiature a pressione facendo riferimento alla direttiva PED che dice: “È necessario aumentare l'efficienza e la trasparenza della procedura di notifica e, in particolare, adattarla alle nuove tecnologie”. È proprio in questo senso che allo ci si muoverà, ovvero per adattare alla tecnologia la rilevazione dei rischi e più in particolare favorire e semplificare l'immediata manutenzione delle attrezzature. Si prenderà ad esempio una caldaia a medio volume d'acqua (a tubi di fumo).

4.1 Caldaia a medio volume d'acqua (a tubi di fumo)

Una caldaia a medio volume d'acqua (tra 70 e 130 l/mq) e a media pressione (tra 1 e 15 bar) rappresenta un'evoluzione della caldaia a grande volume d'acqua in quanto riducono gli ingombri e aumentano la superficie di scambio termico e quindi la potenza. Tale aumento è ottenuto tramite piastre tubiere forate su cui sono mandrinati tubi di fumo con cui i prodotti della combustione vengono riciclati all'interno della massa d'acqua presente in caldaia; le caldaie a grandi volumi d'acqua non hanno tubi di fumo. La superficie di scambio termico diventa allora proporzionale al numero di tubi presenti sulla piastra e quindi alla superficie della piastra stessa ossia il quadrato del diametro. Come in figura 2 il bruciatore è posto sul davanti ed i gas caldi dopo aver percorso il focolare invertono il proprio moto nella camera di inversione posteriore. Si ha anche una camera di inversione anteriore e poi si ritorna ad una seconda camera di inversione posteriore per effettuare l'ultima inversione per essere poi inviati al camino. Oltre il fascio tubiero e la camera di inversione, i componenti principali di tali caldaie sono il focolare, quindi la camera di combustione, il duomo, il corpo cilindrico, il camino, la muratura, il surriscaldatore, l'economizzatore e i portelli di ispezione.

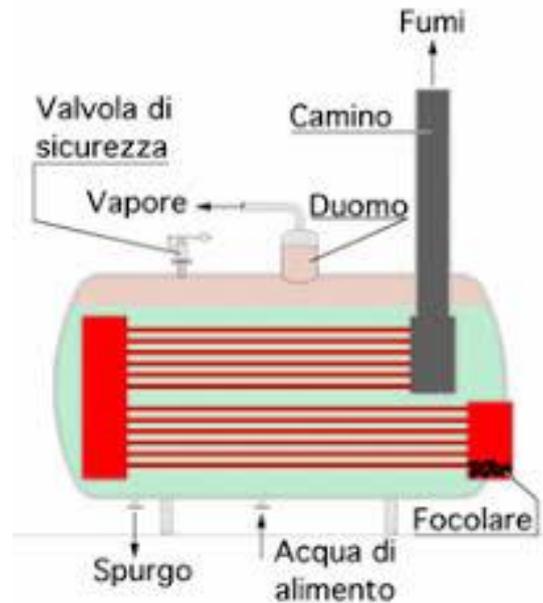


Figura 2. Caldaia a medio volume d'acqua (a tubi di fumo)

Tra le metodologie di manutenzione di tali caldaie c'è la visita interna e consiste in un esame visivo delle parti del generatore accessibili ed ispezionabili tanto internamente che esternamente. In altri termini consiste in un controllo visivo delle membrature principali (fasciame e fondi), lato acqua e lato fumi, delle relative giunzioni saldate, di quelle parti soggette a incrostazioni, di quelle parti poste in prossimità dell'ingresso dell'acqua ed anche delle parti soggette a variazioni del livello dell'acqua durante il funzionamento. In queste operazioni un operatore entra nella caldaia attraverso le aperture a disposizione (passo d'uomo, passo di testa, passo di mano, foro d'ispezione). [8]

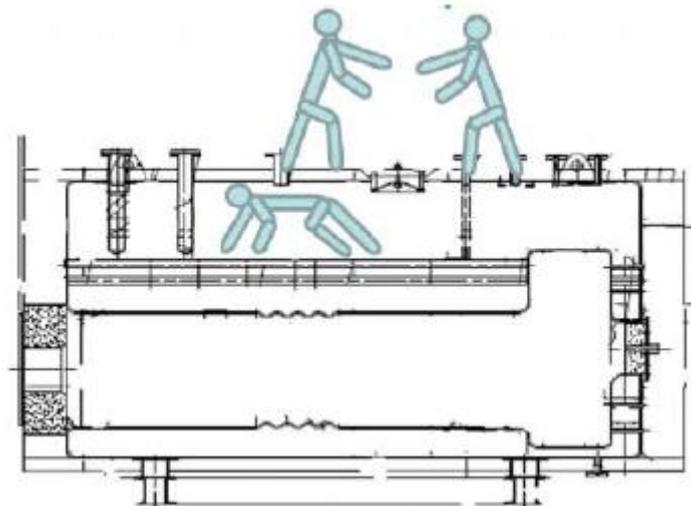


Figura 3. Rappresentazione di un'ispezione interna [8]

5. Analisi dei rischi

Ai fini dell'indagine statistica, un'utile fonte è l'Ispesl, che detiene una banca dati aggiornata sugli infortuni mortali verificatisi in Italia negli ultimi anni. Infatti nel 2005 ha istituito un archivio degli infortuni, che consente di estrapolare le dinamiche più frequenti, da utilizzare come punto di partenza dei programmi operativi di intervento in funzione delle emergenze

emerse. Il modello “*Sbagliando s’impara*”, in breve SSI, rientra tra i modelli ad albero delle cause e consente di esporre in maniera strutturata e standardizzata la dinamica infortunistica, ovvero la sequenza degli eventi e circostanze che hanno portato il verificarsi dell’infortunio. Sulla base di tale modello, vanno identificati i *determinanti*, ovvero i fattori di rischio che concorrono al verificarsi di un incidente aumentandone la probabilità di accadimento, e gli eventuali *modulatori*, cioè quei fattori che, ininfluenti sulla probabilità di accadimento dell’incidente, sono però in grado d’impedire, attenuare o anche peggiorare il danno biologico che ne consegue. Dunque, dalla banca dati messa a disposizione dall’Istituto, vengono prelevati ed analizzati tutti i casi di infortuni mortali che si sono verificati a partire dall’anno 2005, durante l’impiego di attrezzature a pressione. Ai fini un’indagine statistica, un’utile fonte è l’ISPESL, che detiene una banca dati aggiornata sugli infortuni mortali verificatisi in Italia negli ultimi anni. Infatti nel 2005 ha istituito un archivio degli infortuni, che consente di estrapolare le dinamiche più frequenti, da utilizzare come punto di partenza dei programmi operativi di intervento in funzione delle emergenze emerse. Il modello „*Sbagliando s’impara*”, in breve SSI, rientra tra i modelli ad albero delle cause e consente di esporre in maniera strutturata e standardizzata la dinamica infortunistica, ovvero la sequenza degli eventi e circostanze che hanno portato il verificarsi dell’infortunio. Sulla base di tale modello, vanno identificati i *determinanti*, ovvero i fattori di rischio che concorrono al verificarsi di un incidente aumentandone la probabilità di accadimento, e gli eventuali *modulatori*, cioè quei fattori che, ininfluenti sulla probabilità di accadimento dell’incidente, sono però in grado d’impedire, attenuare o anche peggiorare il danno biologico che ne consegue. Dunque, dalla banca dati messa a disposizione dall’Istituto, vengono prelevati ed analizzati tutti i casi di infortuni mortali che si sono verificati a partire dall’anno 2005, durante l’impiego di attrezzature a pressione.

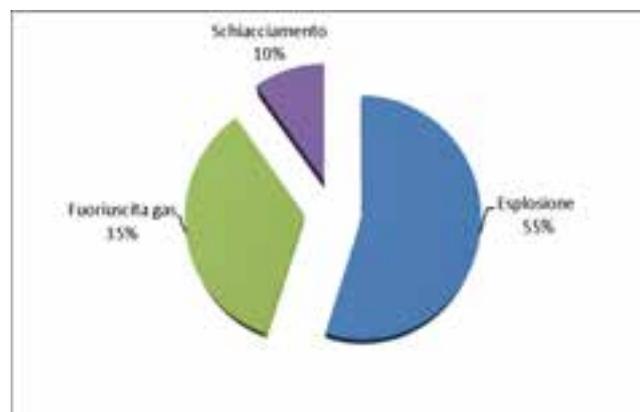


Figura 4. Distribuzione delle cause di morte dovute alle apparecchiature a pressione [6]

Dunque, la causa più ricorrente di morte dovuta all’utilizzo delle apparecchiature a pressione è costituita dal fenomeno dell’esplosione. Inoltre, è facile osservare che nella maggior parte dei casi l’incidente è stato provocato da un fattore di rischio che ha aumentato la probabilità di accadimento dell’evento (determinante) e non dai modulatori, che risultano ininfluenti su tale probabilità. Ciò fa supporre che il modo per minimizzare e gestire il rischio legato all’utilizzo delle attrezzature a pressione sia spostare l’attenzione dell’analisi proprio sui determinanti e concentrarsi sullo studio delle strategie per ridurre tali eventi.

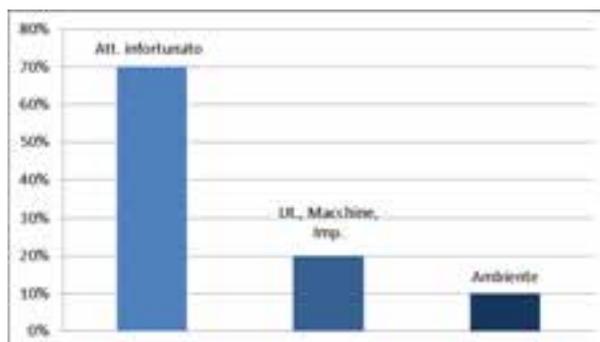


Figura 5. Frequenza di accadimento di ciascun fattore di rischio [6]

Dal grafico è evidente che la causa che ricorre più frequentemente sia proprio un'azione errata dell'infortunato, che concorre per circa il 70% delle volte a provocare la sua stessa morte. Il limite di un tale risultato risiede, tuttavia, nel fatto che si sono considerate le frequenze di accadimento in senso assoluto, attribuendo lo stesso peso e la stessa gravità ai fattori di rischio che intervengono. [6] La realtà invece richiede un esame più accurato di tali cause, considerando che l'evento finale è dovuto ad una combinazione di fattori, non tutti ugualmente influenti sul danno (morte dell'operatore) [7]. Gli errori ad un guasto sono pratiche scorrette e mancanza di formazione. La soluzione che si propone guardando questi dati è legata quindi ad una procedurizzazione della manutenzione che, come già detto, semplifica il lavoro dell'operatore e ne riduce gli eventi non voluti. Questa procedurizzazione impatta anche sulla formazione in quanto per attuare l'implementazione l'operatore deve sottoporsi ad un corso che da una parte spiega la procedura e l'interfaccia ma che dall'altra aiuti a conoscere in maniera più approfondita quali sono le criticità della macchina che si sta utilizzando.

6. Modello di implementazione della manutenzione

L'implementazione che si vuole apportare prevede un'interfaccia dinamica e non più statica ovvero un'interfaccia capace di adattarsi alle esigenze dell'operatore che ne necessita. Ipotizziamo, come da dati ricavati precedentemente, che si ha una depressione all'interno dei tubi della caldaia, ciò creerebbe una sovrappressione in camera di combustione e potrebbe portare all'esplosione. I sensori rilevano tale depressione e, come nel modello mostrato precedentemente, ne valutano l'evoluzione. Se il "sensor network" valuta la crescita di tale depressione come critica, si procede con l'operazione manutentiva. Il sistema 4.0 applicato al generatore di vapore non stopperà ancora la produzione in quanto questo è ancora capace di produrre, ma la fermerà soltanto quando le condizioni diventeranno estreme. Ritorniamo al segnale di depressione crescente che il sistema mostra e comunica all'operatore tramite una classica interfaccia. L'implementazione prevede che l'operatore, che si trova in quel momento a lavorare sulla caldaia e accortosi del segnale, dà il via alla procedura di manutenzione. Per una miglior visione dei fatti ci si riporta alla figura 1 in cui è schematizzato l'algoritmo. Il sistema di manutenzione 4.0, una volta avviata la procedura, conosce la soluzione tramite l'esperienza accumulata in esso e preleva da un archivio big data un video che mostra in che modo andare ad effettuare l'operazione. Per tali ragioni si è richiamato nei paragrafi precedenti il ruolo dell'ingegnere di progetto che deve essere capace di fornire alla macchina un buon archivio affinché possa avvenire tale procedura. I video devono essere, come è semplice pensare, molto chiari ma non si lascia ad essi tutta la responsabilità in quanto l'operatore è chiamato ad una conoscenza specializzata della macchina su cui lavora. Ecco, che come richiamato precedentemente, seppur la conoscenza che deve avere l'operatore va ad aumentare, la procedura si semplifica e diventa molto più chiara; si riducono in questo modo il numero delle variabili non controllate.

L'operatore si preparerà ad effettuare l'operazione di manutenzione e darà il via al video. Tale operazione è possibile grazie alla tipologia di manutenzione precedentemente descritta perché valuta l'evoluzione del dato analizzato e non genera subito il fermo macchina; consente quindi di prepararsi ad effettuare l'operazione e seguire le indicazioni del video. Il video è pensato come segmentato in modo tale che l'operatore possa eseguire le operazioni seguendo gli step dettati dal sistema di manutenzione; ovviamente se più operazioni devono essere eseguite in maniera sequenziale non verranno segmentate. A questo punto l'operatore non deve far altro che seguire le indicazioni del video e agire, fermando la macchina, su quella parte che causa la depressione. Come detto precedentemente, gli operatori continueranno a mettere in pratica le proprie conoscenze tecniche e teoriche ma saranno supportati da una tecnologia che li coadiuva.

7. Conclusioni

L'implementazione descritta è adattabile in maniera particolare ad un generatore di vapore in quanto sono apparecchiature che, nonostante l'imprinting del 4.0, non possono prescindere dalla presenza dell'uomo, in quanto sono indispensabili per le numerose apparecchiature industriali che usufruiscono di energia sotto forma di vapore e per la loro manutenzione. Si è fatta notare poi la pericolosità di tali macchine facendone un'analisi dei rischi e successivamente si è applicata la metodologia di una manutenzione. Quest'ultima è stata abbinata ad un sistema standardizzato e semplice per garantire la sicurezza di funzionamento dal quale si possono ricavare grandi vantaggi. Con questo lavoro si vuole dare, oltre al semplice esempio della depressione riportato, un'implementazione teorica su come è possibile fare un'analisi più ampia di tale apparecchiature e renderle più sicure; si fa notare quindi che ci sono ampie possibilità di sviluppo di tale procedura di standardizzazione in sicurezza della manutenzione. Si è allora introdotto un sistema dinamico, quale il video, per apportare un passo avanti alle interfacce statiche o quasi statiche del 4.0. I vantaggi ricavati da tale implementazione sono stati descritti e si possono notare lungo tutto il lavoro in quanto sono spalmati sull'intera struttura industriale, nonostante ciò vale la pena riassumerli come conclusione. L'implementazione proposta si traduce in una standardizzazione dei processi, data da una procedura video, quindi i principali vantaggi sono la riduzione del MTTR tramite l'azzeramento del "lead-time", riduzione fermi macchina rispetto ad una manutenzione ciclica, riduzione costi e tempi rispetto ad una manutenzione a guasto e l'aumento della sicurezza; ognuno dei vantaggi previsti si ribalta sui costi e su una loro riduzione, in maniera diretta o indiretta. L'aumento del fattore sicurezza è ottenuto proprio grazie alla standardizzazione che riduce gli errori umani, che come visto sono la principale causa di incidenti sul lavoro. Con tale implementazione il fattore umano non è solo standardizzato ma è migliorato grazie all'aumento del well-being del personale di manutenzione; l'aumento del well-being è ottenuto grazie all'evoluzione del ruolo dell'operatore nel nuovo sistema di manutenzione. Oltre a questi vantaggi che possono definirsi diretti ce ne sono altri due che hanno la propria importanza. Il primo è la non riduzione degli impieghi nonostante l'uso di una manutenzione di tipo 4.0. Il secondo è un'ulteriore spinta evolutiva sulle interfacce uomo-macchina; queste passano da una tipologia statica (immagini) o quasi statica (modelli 3D rototraslabili), ad una tipologia dinamica (appunto video) nel quale vengono fatti notare all'operatore che esegue l'operazione di manutenzione quali sono gli aspetti critici.

8. Bibliografia

- [1] Eckart Uhlmann, Abdelhakim Laghmouchia, Claudio Geiserta, Eckhard Hohwieler, 2017, *Decentralized Data Analytics for Maintenance in Industrie 4.0*, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology – IPK Berlin, Germany
- [2] Norme UNI EN 13306, UNI 9910, UNI 10147.
- [3] Riccardo Masoni, Francesco Ferrise, Monica Bordegoni, Michele Gattullo, Antonio e. Uvac, Michele Fiorentino, Ernesto Carrabba, Michele Di Donato, 2017, *Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality*, Politecnico di Milano, school of industrial and information Engineering.
- [4] Direttiva 2014/68/UE del parlamento europeo e del consiglio del 15 maggio 2014.
- [5] M. Gallo, 2016, *Corso impianti industriali e sistemi di produzione*, Dipartimento di ingegneria dei materiali e della produzione - Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Napoli Federico II.
- [6] M.gallo, D. Miele, D.R.Montella, P. Natale, 2012, *L'analisi dei rischi residui nell'uso delle apparecchiature a pressione: lo sviluppo di pratiche gestionali in ottica di miglioramento continuo*, Dipartimento di ingegneria dei materiali e della produzione - Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Napoli Federico II.
- [7] Wintle JB, Kenzie BW, Amphlett GJ, Smalley S. *Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management*, HSE Books Crown Norwich 2001.
- [8] G. De Gennaro, M. De Musso, A. De Sandre, D. Zamboni, G. Condolo, G. Lapenta, *La visita interna delle attrezzature a pressione: valutazione dei rischi per la sicurezza degli operatori. Caso studio – SAFAP 2016*.
- [9] Taylor FW, 1911. *The Principles of Scientific Management*. Harper, New York.
- [10] Murrel 1949, *The Ergonomics Society*, London.
- [11] Wiener, 1954. *The Human Use of Human Beings*, Boston.
- [12] Hollnagel, 2013, *Human factors/ergonomics as a systems discipline? “The human use of human beings” revisited*, University of Southern Denmark, Denmark.
- [13] John R. Wilson, 2013, *Fundamentals of systems ergonomics/human factors*, Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham (UK).

Procedura di ispezione e verifica di impianti ed attrezzature in ambienti sospetti di inquinamento o confinati

C. Gremita¹, G. Lodroni¹, R. Spairani¹, L. Di Donato², E. D'Alessandri²

¹ UOC PSAL ATS Pavia

² Inail - Dit

Sommario

La ormai nota pericolosità degli ambienti confinati, ha chiamato in causa anche il personale di vigilanza e ispezione che a vario titolo può trovarsi a dover accedere a tali ambienti.

Diventa quindi fondamentale la predisposizione di procedure che definiscano modalità operative per effettuare sia le ispezioni che le verifiche di impianti ed attrezzature in ambienti confinati anche al fine di rendere il più possibile omogeneo il comportamento degli operatori definendo standard metodologici e qualitativi di riferimento.

A riguardo la U.O.C PSAL (Unità Operativa Complessa - Prevenzione e Sicurezza Ambienti di Lavoro) dell'ATS di Pavia (Agenzia di Tutela della Salute) ha predisposto una specifica procedura il cui campo di applicazione comprende tutti gli interventi ispettivi, effettuati su richiesta o programmati di iniziativa, che comportano un'ispezione e/o verifica di impianti o attrezzature in ambienti confinati.

Le istruzioni contenute in procedura sono da intendersi come vincolanti e imprescindibili per ottenere effettivi risultati di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, per gli operatori che devono valutare e decidere le azioni conseguenti l'attività ispettiva, al fine di perseguire obiettivi di omogeneità e trasparenza nei comportamenti. Sono inoltre espresse indicazioni per le quali l'operatore è in grado di stabilire con certezza quando non è possibile effettuare un accesso.

Destinatario della procedura è tutto il personale PSAL di vigilanza e ispezione adeguatamente informato, formato, addestrato ed in possesso di idoneità specifica alla mansione con particolare riferimento al possibile ingresso in ambienti confinati.

Naturalmente queste attività ispettive riguardano anche altre Amministrazioni quali l'Inail con la quale si sta collaborando al fine di giungere ad un documento condiviso e di dettaglio.

1. Introduzione

Il servizio PSAL di Pavia ha provveduto a redigere una specifica procedura per i propri operatori per diversi motivi: gli operatori dei servizi PSAL sono in primis dei lavoratori e pertanto devono essere tutelati come prevede il D.Lgs 81/08; gli operatori PSAL nell'esercizio delle proprie funzioni di personale di vigilanza, operando in maniera corretta assolvono l'obbligo etico di dare il buon esempio ed infine, anche se non per minore importanza, le attività a rischio elevato, quali quelle che prevedono l'ingresso all'interno di spazi confinati, necessitano di procedure operative per il controllo e la gestione del rischio.

2. Normativa di riferimento

Norme, linee guida, internazionali e nazionali hanno fornito diverse definizioni di spazio confinato e/o sospetto di inquinamento; nella definita procedura del servizio PSAL di Pavia si tiene conto, fundamentalmente, di quanto definito nell'ambito del d.lgs. 81/08 e con riferimento alle aziende oggetto di verifica da parte degli operatori, del d.p.r. 177/2011.

Anche se non è possibile fornire un elenco esaustivo di attività o luoghi con ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento né delle situazioni di pericolo correlate, si riportano alcuni esempi delle situazioni a rischio più probabili.

Con riferimento al d.lgs.81/2008 sono definiti:

- ambiente sospetto di inquinamento di cui agli articoli 66 e 121 del d.lgs. 81/08 e s.m.i.: pozzi neri, fogne, camini, fosse, gallerie e in generale in ambienti e recipienti, condutture, caldaie e simili - ove sia possibile il rilascio di gas deleteri - pozzi, fogne, cunicoli, camini e fosse in genere;
- ambiente confinato di cui all'allegato IV, punto 3 del d.lgs. 81/2008 e s.m.i.: le tubazioni, le canalizzazioni e i recipienti, quali vasche, serbatoi e simili, in cui debbano entrare lavoratori per operazioni di controllo, riparazione, manutenzione o per altri motivi dipendenti dall'esercizio dell'impianto o dell'apparecchio.

Per ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento s'intende uno spazio circoscritto, caratterizzato da limitate aperture di accesso e da una ventilazione naturale sfavorevole, in cui può verificarsi un evento incidentale importante, che può portare ad un infortunio grave o mortale, in presenza di agenti chimici pericolosi (ad esempio, gas, vapori, polveri). Fra essi si possono citare (ad esempio):

- serbatoi di stoccaggio
- silos
- recipienti di reazione
- vasche
- fogne
- fosse biologiche

Altri ambienti che presentano pericoli e rischi ad essi assimilabili sono ad esempio:

- camere con aperture in alto
- depuratori
- camere di combustione nelle fornaci e simili
- canalizzazioni varie
- camere non ventilate o scarsamente ventilate.

Per questi ultimi, non rientranti "*nell'elenco di cui agli articoli del d.lgs.81*" è ancora più importante lavorare in un'ottica di analisi e valutazione dei rischi a cui possono essere esposti gli operatori.

3. Scopo della procedura

La definizione della procedura di intervento negli spazi confinati da parte di operatori del servizio di vigilanza, ha un duplice scopo:

1. definisce le modalità operative per effettuare le ispezioni e le verifiche di impianti ed attrezzature;
2. si propone di prevenire cause di incidenti e/o infortuni derivanti dall'accesso imprudente, migliorare la qualità dell'intervento e rendere il più possibile omogeneo il comportamento degli operatori dell'U.O.C PSAL definendo anche standard metodologici e qualitativi di riferimento.

4. Materiali e metodi

Per la definizione della procedura è stato prioritariamente formato un gruppo di lavoro costituito dal Direttore PSAL, RLS aziendale (rappresentante dei lavoratori per la sicurezza, appartenente peraltro allo PSAL), ingegnere chimico PSAL, servizio di

prevenzione aziendale finalizzato all'approfondimento tematico ed alla raccolta di documentazione utile. Infine con l'obiettivo di condividere tale documento a livello Nazionale si sono sentiti esperti dell'Inail, coautori del presente articolo, in attesa di formalizzare un gruppo di lavoro più ampio per perseguire tale condivisione.

I punti di seguito descritti fanno parte integrante del testo della procedura.

4.1 Pianificazione e programmazione delle attività di ispezioni in ambiente sospetto di inquinamento o confinato

La pianificazione e programmazione costituiscono gli strumenti utilizzati dal direttore della U.O.C. PSAL, con il coinvolgimento di tutti gli operatori, per l'espletamento delle attività di ispezioni e/o verifica di impianti ed attrezzature in ambienti sospetti di inquinamento o confinati previa valutazione dell'opportunità di tali interventi.

La pianificazione degli interventi del personale tecnico è definita dai coordinatori di sede e tutte le uscite dalla sede di servizio devono essere preventivamente segnalate al rispettivo coordinatore o suo sostituto.

Gli operatori addetti alle attività ispettive svolgono i compiti assegnati adottando comportamenti coerenti con l'attività da eseguire e secondo quanto contenuto nella procedura.

Gli interventi di ispezione sono effettuati solo da operatori in possesso di idoneità specifica alla mansione ed adeguatamente informati, formati, addestrati.

4.2 Pianificazione e programmazione delle attività di verifica in ambiente sospetto di inquinamento o confinato

Gli interventi di effettuazione di verifiche periodiche sono soggette a richiesta da parte delle aziende.

Su indicazioni regionali l'attività di verifica deve essere programmata tenendo conto dei settori considerati prioritari da parte della Regione stessa. Le richieste di verifica che giungono al servizio vengono in primis gestite dal direttore UOC PSAL che, valutata l'opportunità di effettuazione, destina la richiesta al dirigente ingegnere gestore della linea di attività il quale valuterà la procedibilità di ogni singola pratica come da indicazioni contenute in procedura.

Tali interventi vengono di norma effettuati da un solo operatore PSAL (Prevenzione e Sicurezza Ambienti di Lavoro) e pertanto diventa indispensabile l'applicazione rigorosa della procedura.

4.3 Azioni preliminari all'intervento di verifica di impianti ed attrezzature identificabili come ambienti sospetti di inquinamento o confinati

La ditta richiedente, contestualmente all'atto di richiesta di verifica di impianti o attrezzature, proprio in ragione di una maggior sicurezza per gli operatori è tenuta a compilare la check list N.1 "informazioni relative all'ambiente sospetto di inquinamento o confinato" (figura 1) che integra la procedura, e produrre la documentazione richiesta.

Tali adempimenti devono ritenersi parte integrante della richiesta di verifica.

La parziale e/o incompleta compilazione della suddetta check list N.1 e/o parziale o incompleta documentazione prodotta comporta automaticamente il rigetto dell'istanza e l'interruzione dei termini del procedimento da parte del servizio PSAL.

Il dirigente incaricato, al quale afferisce la linea di attività, valutata la completezza e la correttezza della documentazione prodotta della ditta, trasmette la pratica al coordinatore territoriale il quale la assegna all'operatore tecnico incaricato.

Figura 1

Check list N. 1- informazioni relative all'ambiente sospetto di inquinamento o confinato
(Compilare a cura del richiedente se è previsto l'accesso)

Tipologia ambiente oggetto del sopralluogo _____

Luogo _____

Ragione sociale, p. IVA, indirizzo (timbro della Ditta): _____ _____	
Attività svolta _____	Codice ATECO N. _____

		Si	No	Non applicabile	Note
1	E' stata elaborata una specifica procedura di lavoro, derivante dall'analisi di tutti i rischi presenti nell'ambiente in relazione alle possibili attività, inclusa nella Valutazione dei Rischi, e comprensiva delle fasi di assistenza e salvataggio della persona, gestione di una eventuale emergenza e coordinamento con il sistema di emergenza del SSN e VVFF (allegare procedura lavoro). DPR 177/11 art. 3.3 - DLgs 81/08 art. 29				
2	Generalità del rappresentante/preposto del Datore di lavoro richiedente con funzioni di indirizzo e coordinamento dell'attività da svolgere. Cognome..... Nome..... Qualifica..... DPR 177/11 art. 3.2				
3	Il personale addetto all'emergenza ed al primo soccorso idoneo alla mansione è stato formato, informato ed addestrato adeguatamente. DPR 177/11 art. 2				
4	Le aperture ed i percorsi per l'accesso hanno dimensioni tali da poter consentire una rapida uscita e l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi tenuto conto dell'equipaggiamento indossato. DLgs 81/08 artt. 66,119 - All. IV 3.1				
5	L'ambiente da ispezionare ha contenuto in precedenza agenti chimici (indicare quali ed allegare schede di sicurezza o, se non previste, informazioni sulla loro natura e sulla loro pericolosità per la sicurezza, la salute e l'ambiente) DLgs 81/08 art. 29 - All.IV 3.2.1, 3.11.3				
6	L'ambiente da ispezionare sarà completamente bonificato con le modalità di seguito riportate. DLgs 81/08 artt. 29, 66,121				
7	Sono presenti rivestimenti od altro materiale contenente sostanze dannose per la salute (in caso affermativo indicare se è stata effettuata la valutazione del rischio). DLgs 81/08 art. 29				
8	Sono presenti altri fattori di rischio (es. rischi fisici, antinfortunistici, strutturali, ecc.). In caso affermativo fornire opportune indicazioni. DLgs 81/08 art. 29				
9	E' necessario l'impiego di DPI specifici in aggiunta a quelli normalmente adottati (elmetto, occhiali, guanti, tuta, scarpe antinfortunistiche, cintura di sicurezza). DLgs 81/08 artt. 66, 121				
10	E' necessario garantire un efficace sistema di ventilazione con aria non contaminata dell'attrezzatura/ambiente oggetto di ispezione interna. In caso affermativo indicare le caratteristiche tecniche. DLgs 81/08 artt. 66, 121 - All. IV 3.2.1				

11	Prima di accedere e durante l'accesso è prevista l'effettuazione di controlli della concentrazione di ossigeno, dell'esplosività e dell'eventuale presenza di agenti chimici e fisici in diversi punti. In caso affermativo fornire le necessarie indicazioni. DPR 177/11 art. 3.3 - DLgs 81/08 artt. 63, 66, 121 - All. IV 2.1.8.2				
12	La zona sarà delimitata con apposita segnaletica indicante la presenza di ambiente sospetto di inquinamento o confinato ed il divieto di accesso ai non addetti al lavoro. DLgs 81/08 art. 63 - All. IV 1.4.8				
13	L'ambiente da ispezionare sarà adeguatamente ed efficacemente isolato dal resto dell'impianto con flange cieche e/o dagli spazi limitrofi mediante compartimentazione od altro efficace sistema. DLgs 81/08 art. 63 - All. IV 3.2.2				
14	Se sono previsti presidi antincendio, indicare la tipologia. DLgs 81/08 art. 63 - All. IV 4				
15	L'impianto di messa a terra, l'impianto elettrico A.D. e l'impianto di protezione contro le scariche atmosferiche sono regolarmente verificati secondo le periodicità previste dal DPR 462/01. DLgs 81/08 art. 86 - DPR 462/01 artt. 4, 7				
16	Le attrezzature meccaniche ed elettriche saranno messe fuori servizio e collegate all'impianto di messa a terra. DLgs 81/08 art. 29				
17	Tutte le apparecchiature, attrezzature e gli eventuali utensili utilizzati sono conformi alla Direttiva ATEX, se necessario. DLgs 81/08 art. 63 - All. IV 3.3				
18	Gli organi meccanici dotati di movimento saranno bloccati in posizione di sicurezza. DLgs 81/08 artt. 29, 71.6				
19	Il ponteggio allestito è corredato dal Pi.M.U.S., Autorizzazione Ministeriale ed eventuale progetto. DLgs 81/08 artt. 131, 133, 134, 136				
20	Il luogo dell'ispezione sarà sufficientemente illuminato con dispositivi di tipo SELV e se necessario, conformi alla Direttiva ATEX. DLgs 81/08 artt. 63, 121 - All. IV 1.10.2, 1.10.5				
21	Sarà garantito un efficace sistema di comunicazione tra l'interno e l'esterno dell'ambiente confinato, come di seguito indicato : DLgs 81/08 art. 121				

NOTE La parziale od incompleta compilazione del modulo e/o presentazione della documentazione richiesta, comporta il rigetto dell'istanza e l'interruzione dei termini del procedimento.

Non applicabile (situazione o rischio non presente)

Il Datore di Lavoro (o suo rappresentante)

4.4 Azioni preliminari all'intervento di ispezione in ambiente sospetto di inquinamento o confinato

In attività di vigilanza programmata, il dirigente e il tecnico assegnatario della pratica valuteranno il rischio di presenza di ambienti sospetti di inquinamento o confinati e provvederanno, una volta entrati in azienda, a compilare in collaborazione con il datore di lavoro o suo delegato la check list n. 2 "informazioni relative all'ambiente sospetto di inquinamento o confinato" (figura 2).

Qualora dalla compilazione della check list N.2 dovessero emergere rischi per la salute e la sicurezza gli operatori procederanno all'attività di ispezione senza accedere all'ambiente sospetto di inquinamento o confinato e successivamente procederanno alla valutazione di eventuali violazioni e difformità alla normativa.

In caso contrario l'ispezione in ambiente confinato deve essere eseguita secondo le procedure di sicurezza (derivante dall'analisi di tutti i rischi presenti in tale ambiente ed inclusa nella valutazione dei Rischi aziendale) previste ed elaborate dall'azienda verificando nel contempo che le persone in assistenza agli operatori abbiano la dovuta idoneità, formazione, informazione ed eventualmente addestramento.

Figura 2

Check list N. 2 - Informazioni relative all'ambiente sospetto di inquinamento o confinato

(compilare a cura dell'operatore che esegue la verifica)

Attività prevista: vigilanza verifica impianti/attrezzature

Tipologia ambiente confinato oggetto del sopralluogo _____

Luogo _____ Data _____ Ora _____

Operatore/i _____

Preposto incaricato dall'Azienda _____

Ragione sociale, p. IVA, indirizzo (timbro della Ditta): _____

Attività svolta _____ Codice ATECO N. _____

		Si	No	Non applicabile	Note
1	Per lo svolgimento dell'attività è necessario accedere all'ambiente confinato o sospetto di inquinamento oppure sono disponibili mezzi alternativi di ispezione aventi efficacia equivalente ai fini dell'ispezione/verifica. (in quest'ultimo caso indicare quali)				(1) (2)
2	E' stata elaborata una specifica procedura di lavoro, derivante dall'analisi di tutti i rischi presenti nell'ambiente in relazione alle possibili attività, inclusa nella Valutazione dei Rischi, e comprensiva delle fasi di assistenza e salvataggio della persona gestione di una eventuale emergenza e coordinamento con il sistema di emergenza del SSN e VVFF.				(1) (2)
3	Sono presenti il rappresentante/preposto del Datore di lavoro richiedente con funzioni di indirizzo e coordinamento dell'attività da svolgere e l'addetto posizionato all'esterno, in continuo contatto visivo o per mezzo di un adeguato e testato sistema di comunicazione con l'operatore situato all'interno. Cognome..... Nome..... Qualifica.....				(1) (2)
4	Il personale idoneo addetto all'emergenza ed al primo soccorso ha ricevuto informazione, formazione ed addestramento adeguati è presente sul luogo.				
5	Le aperture ed i percorsi per l'accesso hanno dimensioni tali da poter consentire una rapida uscita e l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi, tenuto conto dell'equipaggiamento indossato.				(1) (2)
6	L'ambiente da ispezionare ha contenuto in precedenza agenti chimici.				(1)
7	L'ambiente da ispezionare è stato completamente bonificato e non presenta residui o tracce di agenti chimici allo stato solido (scorie, depositi, polvere), liquido o gassoso.				(1) (2) (3)
8	Sono presenti rivestimenti od altro materiale contenente sostanze dannose per la salute.				(1)
9	Sono presenti altri fattori di rischio (es. rischi fisici, antinfortunistici, strutturali, ecc.).				(1) (2)
10	Sono disponibili DPI specifici in aggiunta a quelli normalmente impiegati (elmetto, occhiali, guanti, tuta, scarpe antinfortunistiche, cintura di sicurezza)				(1) (2)
11	E' garantito un efficace sistema di ventilazione rispondente a quanto indicato dalla ditta richiedente.				(1) (2)

12	Prima di accedere e durante l'accesso vengono effettuati controlli della concentrazione di ossigeno, dell'esplosività e dell'eventuale presenza di agenti chimici, fisici in diversi punti dell'ambiente confinato.				(1) (3)
13	Sono a disposizione apparecchi portatili di misurazione in continuo di gas specifici diversi dall'ossigeno.				(1) (3)
14	La zona è stata delimitata con apposita segnaletica indicante la presenza di ambiente sospetto di inquinamento o confinato ed il divieto di accesso ai non addetti al lavoro.				(2)
15	L'ambiente da ispezionare è stato adeguatamente ed efficacemente isolato dal resto dell'impianto con flange cieche e/o dagli spazi limitrofi mediante compartimentazione od altro efficace sistema.				(1) (2)
16	Sono presenti i presidi antincendio previsti.				(1) (2)
17	L'impianto di messa a terra, l'impianto elettrico A.D. e l'impianto di protezione contro le scariche atmosferiche sono regolarmente verificati secondo quanto previsto dal DPR 462/01.				(1)
18	Le attrezzature meccaniche ed elettriche sono state messe fuori servizio e collegate all'impianto di messa a terra.				(1) (2)
19	Tutte le apparecchiature, attrezzature e gli eventuali utensili utilizzati sono conformi alla Direttiva ATEX.				(1) (2)
20	Gli organi meccanici dotati di movimento sono stati bloccati in posizione di sicurezza.				(1) (2)
21	Il ponteggio allestito è corredato dal Pi.M.U.S., Autorizzazione Ministeriale ed eventuale progetto.				(1) (2)
22	L'ambiente è sufficientemente illuminato con dispositivi adeguati per garantire la sicurezza e l'efficacia dell'ispezione/verifica				(1) (2)
23	E' garantito un efficace sistema di comunicazione tra l'interno e l'esterno dell'ambiente confinato.				(1) (2) (3)
24	L'autorizzazione all'accesso al luogo confinato è firmata dal preposto e registrata sul permesso di lavoro.				(1)

NOTE

Non applicabile (situazione o rischio non presente)

L'ispezione si effettua solo se sono soddisfatti tutti i punti della check list

- (1) Esame documentale
- (2) Verifica in loco
- (3) Verifica strumentale

Il Datore di Lavoro
(o suo rappresentante)

Il Verificatore

4.5 Accesso in ambiente sospetto di inquinamento o confinato

Prima di effettuare l'accesso ad un ambiente confinato o sospetto di inquinamento l'operatore deve:

1. in caso di verifica di impianti e attrezzature acquisire il permesso di lavoro (o modulo autorizzativo) e compilare la Check list N.2 (Allegato 2), controfirmata dal datore di lavoro o da un suo delegato;
2. attivare l'apparecchio portatile di misurazione in continuo della concentrazione di ossigeno e dell'esplosività (in dotazione all'operatore ATS) e verificare che il valore del contenuto di ossigeno risulti all'incirca pari al 21% vol e che il livello di esplosività LEL (limite inferiore di esplosività) sia pari a 0% vol; verificare inoltre la validità della taratura degli strumenti;
3. attivare l'apparecchio portatile di misurazione in continuo della concentrazione di gas tossici, nocivi e/o pericolosi (forniti dall'azienda) e verificare che il livello dei contaminanti sia inferiore ai valori minimi di esposizione professionale (VLEP);

4. accertarsi dell'esistenza di una progettazione dell'emergenza per il salvataggio di operatori non collaboranti all'interno di ambienti confinati o sospetti di inquinamento;
5. verificare che sia stata attivata la ventilazione prevista da mantenere per tutto il tempo di permanenza all'interno dell'ambiente confinato; comunque, prima di rientrare, si dovrà compiere nuovamente un controllo dell'atmosfera ambientale;
6. utilizzare DPI (dispositivi di protezione individuale) ed attrezzature di lavoro adeguati ed idonei secondo la tipologia dell'ambiente oggetto dell'ispezione/verifica, in modo appropriato secondo l'addestramento ricevuto; in particolare indossare una semimaschera quando è accertata, o non può essere esclusa, la presenza di gas, vapori tossici/nocivi o polveri/aerosol e quando non è possibile assicurare un'efficiente areazione ed una completa bonifica dell'ambiente confinato, oppure, in caso di presenza di gas irritanti, una maschera a pieno facciale che consenta la protezione anche degli occhi al fine di garantire una specifica protezione delle vie respiratorie per gli inquinanti presenti. Tali maschere devono avere dispositivi filtranti adeguati e idonei, con filtri antigas/vapori/particolati. Il filtro deve essere appropriato (tipo e classe) per i contaminanti e le concentrazioni presenti. Le normali maschere con filtri antigas, pur dotate di filtri specifici per le sostanze tossiche, non sono adeguate alle operazioni in luoghi confinati, laddove oltre alla presenza di sostanze irritanti, tossiche o nocive, vi possa essere carenza di ossigeno; in tal caso è necessario adottare un Dispositivo di Protezione delle vie respiratorie di tipo isolante. Valutare l'ipotesi del fit-test;
7. verificare che, l'eventuale sorgente autonoma di energia (gruppo elettrogeno) sia collocata in posizione idonea, tenendo conto dell'emissione di fumi che possono entrare nell'ambiente confinato e della gestione dei luoghi conduttori ristretti in conformità alle norme tecniche di riferimento;
8. dotarsi di segnalatore acustico tipo "cicala o tromba" (in dotazione all'operatore ATS), e similmente l'operatore esterno di segnalatore acustico (tromba, cicala, suoneria), al fine di garantire e mantenere attivo un adeguato sistema di comunicazione, sonoro, vocale o visivo in modo da permettere all'operatore impegnato all'interno dell'ambiente confinato di tenersi in contatto con quelli all'esterno, e di lanciare l'allarme in caso di emergenza;
9. verificare l'attuazione delle misure di emergenza, la disponibilità del personale e dei mezzi di soccorso ed, in particolare, la presenza sul posto della persona addetta al primo soccorso.

4.6 Strumentazione in dotazione agli operatori PSAL

La strumentazione a disposizione dell'operatore incaricato di accedere agli spazi confinati consiste normalmente nella dotazione delle seguenti attrezzature da parte di ATS:

- Analizzatore in continuo multifunzione (CO, O₂, H₂S, LEL)
- Avvisatore acustico

L'analizzatore multifunzione viene sottoposto a taratura annuale mentre l'efficienza dell'avvisatore acustico viene periodicamente verificata.



Analizzatore multifunzione



Avvisatore acustico



ricetrasmittenti atex



escape mask

In casi particolari, l'azienda richiedente le ispezioni, può mettere a disposizione dell'operatore ulteriore strumentazione e DPI in funzione della particolarità dell'ambiente confinato (maschere a facciale con filtri antipolvere o combinato, escape mask, ricetrasmittenti atex, ...).

5. Analisi degli interventi dopo l'introduzione della procedura

A far data dal 2014, tutti gli interventi degli operatori PSAL che prevedono il rischio di presenza di ambienti sospetti di inquinamento o confinati, sono soggetti all'applicazione della procedura che è stata formalmente inserita tra le procedure previste nel DVR aziendale.

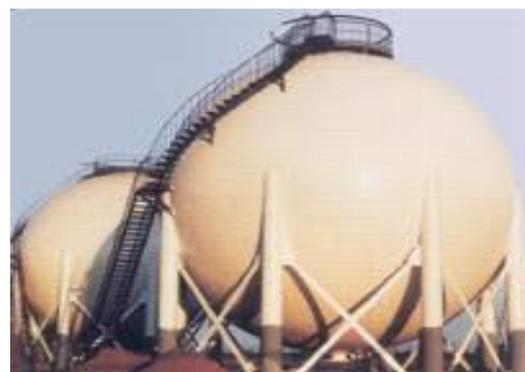
5.1 Tipologie di ambienti confinati oggetto di ispezione dopo l'introduzione della procedura

L'attività comportante l'accesso agli ambienti confinati è finora consistita nelle verifiche di impianti ed attrezzature richieste dalle aziende, in particolare impianti di messa a terra, anti-deflagranti ed attrezzature a pressione. Per i primi la verifica degli impianti di messa a terra ed AD (anti-deflagranti), ha comportato l'accesso ad una fossa contenente pompe azionate da motori elettrici, mentre per le attrezzature a pressione la verifica di integrità è consistita, tra l'altro, nell'esame visivo delle lamiere dal lato interno. Da rilevare che, all'interno della sfera per GPL (gas di petrolio liquefatto) è stato allestito un ponteggio per poter accedere alla sommità della stessa, mentre il passo d'uomo per l'accesso al recipiente è posizionato nella parte inferiore. In sintesi, gli ambienti confinati ispezionati sono risultati essere appartenenti alle seguenti tipologie:

- a) serbatoio cilindrico interrato per GPL (1 ispezione)
- b) serbatoio cilindrico installato all'aperto per GPL (8 ispezioni)
- c) sfera per GPL (2 ispezioni)
- d) fossa contenente pompe di sollevamento (1 ispezione)



Serbatoi cilindrici per GPL



Sfere per GPL



Serbatoio per GPL interrato in stazione di servizio carburanti



Fossa contenente pompe di sollevamento

6. Risultati e conclusioni

La procedura, nel suo schema generale, si applica a tutti gli interventi ispettivi a far data dal 2014 effettuati su richiesta o programmati di iniziativa della U.O.C. PSAL, che comportano un'ispezione e/o verifica di impianti o attrezzature in ambienti sospetti di inquinamento o ambienti confinati.

Si precisa che le istruzioni in procedura sono da intendersi come vincolanti sugli elementi rilevanti e imprescindibili per ottenere effettivi risultati di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro per gli operatori che devono valutare e decidere le azioni conseguenti l'attività ispettiva, anche al fine di perseguire obiettivi di omogeneità e trasparenza nei comportamenti.

La sorveglianza sanitaria mirata al rischio di ingresso in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento, ha portato alla non idoneità a questa specifica mansione di due operatori del servizio che pertanto sono stati esonerati da tale attività (entrambi operatori addetti alle verifiche periodiche).

La procedura, pubblicata sul sito aziendale e presentata a suo tempo ai componenti del comitato ex art. 7 del d.lgs. 81/08, ha di fatto obbligato le aziende ad una maggior presa di coscienza della problematica che ha di fatto portato a due grossi risultati:

1. una sensibile riduzione delle ispezioni interne rispetto al passato grazie alla ricerca e all'utilizzo di mezzi alternativi per l'effettuazione, in particolare delle verifiche periodiche (telecamere, macchine fotografiche, endoscopi, specchi, ecc.), messi a disposizione dalle aziende;
2. efficace attività di prevenzione in quanto, applicando la procedura, con l'invio alle aziende della check list N.1 (tabella 1), queste si sono viste costrette a rivedere, non solo gli aspetti legati agli obblighi normativi, ma soprattutto gli aspetti sostanziali di applicazione, in particolare del d.p.r. 177/2011 (presenza in tutti i casi di personale aziendale formato e presente durante tutte le operazioni, messa in opera di tutte le procedure per gestire le eventuali emergenze, invio puntuale di tutta la documentazione richiesta dal servizio PSAL).

Per quanto riguarda invece le criticità emerse, questi si possono così sintetizzare:

1. le imprese hanno manifestato difficoltà nel dichiarare quanto indicato nelle check list N. 1 e 2 – p.to 4 e 5 ("le aperture ed i percorsi per l'accesso hanno dimensioni tali da consentire una rapida uscita e l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi, tenuto contro dell'equipaggiamento indossato") per le oggettive e tecniche difficoltà di recupero attraverso i passi d'uomo standard; meglio sarebbe modificare in: "le aperture denominate passi d'uomo ed i percorsi per l'accesso hanno

dimensioni regolamentari stabilite dalle norme tecniche vigenti al momento della costruzione";

2. occorre pertanto modificare le check list N. 1 e 2 in modo tale che venga verificata più puntualmente l'esistenza di una progettazione dell'emergenza per il salvataggio di operatori non collaboranti all'interno di ambienti confinati o sospetti di inquinamento;
3. in caso di accesso agli autoclavi per la fermentazione del vino, una volta determinato il tenore di O₂, l'accesso può essere limitato fino all'altezza della cintura dell'operatore in quanto la superficie interna è rivestita da vernice epossidica riflettente il fascio luminoso. In casi più favorevoli (volumi minori, superficie in acciaio inox), è sufficiente introdurre uno specchio di discrete dimensioni ed una lampada di buona intensità luminosa (min. 500 lux).

Per quanto riguarda l'accesso agli spazi confinati per la verifica dell'impianto ATEX non sono emerse particolari criticità.

5. Bibliografia

[1] Decreto del Presidente della Repubblica n.177 del 14 Settembre 2011 recante il regolamento relativo alle norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinati, a norma dell'art.6 comma 8 lettera g) del Decreto Legislativo n. 81/08;

[2] Manuale illustrato per lavori in ambienti sospetti di inquinamento o confinati ai sensi dell'art. 3 comma 3 del d.p.r 177/2011

[3] Decreto Legislativo n. 81/08 ed in particolare artt. 66 e 121 e allegato IV, punto 3 del medesimo Decreto;

[4] Decreto del Presidente della Repubblica n.462 del 22 Ottobre 2001;

[5] Decreto Ministeriale 11/04/2011 n. 111;

[6] Linee Guida Ispesl: "Rischi specifici nell'accesso ai silos, vasche e fosse biologiche, collettori fognari, depuratori e serbatoi utilizzati per lo stoccaggio ed il trasporto di sostanze pericolose";

[7] Norma UNI 10449:2008 "Criteri per la formulazione e gestione del permesso di lavoro".

La sicurezza durante le operazioni di avviamento del *Neutral Beam Test Facility*

A. Tonti¹, L. Ricciardi¹, L. Campanile¹, F. Panin², V. Toigo³, S. Dal Bello³

¹ Inail-Dit

² Inail-Uot Padova

³ Consorzio RFX

Sommario

L'Inail collabora da anni al progetto ITER concernente la costruzione di un reattore sperimentale a fusione nucleare. Si tratta di un progetto internazionale che vede la partecipazione di Unione Europea (con l'aggiunta della Svizzera), Stati Uniti, Russia, Corea, Giappone, Cina ed India, per un totale di 35 nazioni.

Oltre all'impianto principale sono in costruzione, in diversi Paesi, impianti pilota destinati ai test di specifiche parti o componenti. In Italia è prevista la realizzazione di un impianto pilota per la generazione dei "neutri ad alta energia", particelle non dotate di carica elettrica, destinate a produrre gli ioni necessari al riscaldamento del gas contenuto nel reattore, fino alla temperatura di 150 milioni di gradi Celsius, temperatura necessaria per attivare la reazione di fusione.

L'impianto, ospitato presso l'Area della Ricerca del Cnr di Padova, è realizzato dal Consorzio RFX, il quale ha curato il progetto e la realizzazione; in aggiunta è responsabile per l'avviamento, la messa a regime e le successive fasi di test.

L'Inail ed il Consorzio RFX in questa fase del progetto stanno collaborando per l'avviamento in sicurezza del generatore di ioni SPIDER ed per i primi test in pressione con gas SF₆ per l'iniettore di ioni da 1MV denominato MITICA.

1. Introduzione al progetto ITER

ITER (*cammino* in latino) è uno dei progetti più ambiziosi del mondo, realizzato nel sud della Francia. 35 nazioni stanno collaborando per costruire il *tokamak* avente dimensioni decuplicate rispetto allo Joint European Torus - JET (fino ad oggi il più grande mai realizzato, installato in Inghilterra). ITER prevede la realizzazione di un reattore progettato per dimostrare la fattibilità della fusione nucleare su larga scala e la possibilità di produrre energia senza emissioni di carbonio sfruttando lo stesso principio che alimenta il sole e le stelle.

ITER sarà il primo impianto a fusione in grado di mantenere attiva la fusione nucleare fino a 3600 s (fino ad oggi il massimo è stato 390 s, raggiunti nel reattore Tore Supra in Francia), e di produrre energia netta, ovvero energia in quantità superiore a quella necessaria per l'attivazione della reazione nucleare.

La quantità di energia da fusione che un *tokamak* è capace di produrre è un risultato diretto del numero di reazioni di fusione che avvengono nel suo nucleo. Più grande è il reattore, più grande è il volume di plasma e maggiore è il potenziale di energia che può essere prodotta. Con un volume del plasma dieci volte maggiore rispetto alla più grande macchina costruita fino ad oggi, ITER Tokamak sarà uno strumento sperimentale in grado di generare plasmi più lunghi e meglio confinati.

La fusione è la fonte di energia del sole e delle stelle. Temperature altissime e forte gravità sono elementi essenziali al centro di questi corpi stellari, in cui i nuclei di idrogeno si scontrano, si fondono in più pesanti atomi di elio e rilasciano enormi quantità di energia nel processo.

Tre condizioni devono essere soddisfatte per ottenere la fusione in laboratorio:

- altissima temperatura (dell'ordine di 150.000.000 °C, tenendo conto che non è possibile ottenere la gravità presente nel nucleo delle stelle, pertanto occorre aumentare la temperatura);
- sufficiente densità di particelle del plasma (per aumentare la probabilità che si verifichino le collisioni);
- sufficiente tempo di confinamento (per contenere il plasma, che ha una propensione a espandersi, in un volume definito).

A temperature estreme, gli elettroni sono separati dai nuclei ed il gas diventa un plasma, spesso indicato come il quarto stato della materia. Il plasma da fusione fornisce l'ambiente in cui elementi leggeri possono fondersi e produrre energia.

2. Il Neutral Beam Test Facility

Per ottenere il riscaldamento del plasma fino alle altissime temperature previste per il progetto ITER, si utilizzano due sistemi di riscaldamento ausiliario, uno a radiofrequenza (RF) e l'altro a iniezione di neutri.

L'iniezione di fasci energetici di atomi neutri (fino a 1 MeV) sarà uno dei metodi primari utilizzati per riscaldare il plasma e per guidare la corrente di plasma all'interno di esso. Il progetto richiede per ciascun iniettore di neutri fino a 16,5 MW di potenza. Inizialmente sono previsti due iniettori, con la possibilità di eventuale aggiunta di un terzo iniettore. Il design generale degli iniettori ha preso forma nel corso degli ultimi 17 anni ed ora è basato su una sorgente di ioni negativi a radio frequenza, il cui concetto è stato sviluppato presso i laboratori dell'IPP di Garching Germania, e un acceleratore elettrostatico derivato da acceleratori di ioni negativi sviluppati dalla Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ora *Agency for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)*. Nel corso degli ultimi anni, il concetto di base del sistema è stato ulteriormente perfezionato e sviluppato.

Il progetto ITER richiede, quindi, un sistema di riscaldamento aggiuntivo rispetto ai sistemi a radiofrequenza, costituito da due iniettori di neutri, ognuno in grado di fornire un'energia di 1 MeV tramite accelerazione elettrostatica applicata ad un fascio di ioni negativi di deuterio di 40 A, che, successivamente neutralizzati, forniscono al plasma una potenza di circa 16.5 MW per un'ora. Questi valori non sono mai stati sperimentalmente provati, pertanto è stato deciso di costruire una *Test Facility*, denominata *PRIMA (Padova Research on ITER Megavolt Accelerator)*, illustrata in figura 1, in corso di realizzazione a Padova. PRIMA comprende una sorgente full-size di ioni negativi, SPIDER, ed un prototipo in scala uno a uno dell'iniettore di ITER, MITICA, con l'obiettivo di sviluppare e mettere a punto gli iniettori di riscaldamento da installare in ITER.



Figura 1. Il complesso di edifici di PRIMA che ospiterà i due esperimenti SPIDER e MITICA

L'impianto è realizzato con il contributo principale dell'Unione europea, attraverso l'Agenzia Europea per ITER (F4E, della Commissione Europea), ITER stesso ed il Consorzio RFX che ospita l'impianto. L'Agenzia del Giappone e l'Agenzia dell'India per ITER (JADA e INDA) partecipano alla realizzazione di PRIMA.

Questa memoria offre una panoramica dello stato di sviluppo dei principali componenti di MITICA e di SPIDER, attualmente in fase di avvio, e un'analisi dei problemi più critici dal punto di vista dei componenti in pressione.

3. Il progetto MITICA

MITICA è un prototipo scala 1:1 dell'iniettore a fascio neutro di ITER, identico ad ITER HNB, compreso il sistema di alimentazione e la linea di trasmissione ad alta tensione.

Nella Figura 2 viene rappresentato uno spaccato del contenitore in vuoto, *vacuum vessel*, con vista sui componenti interni.

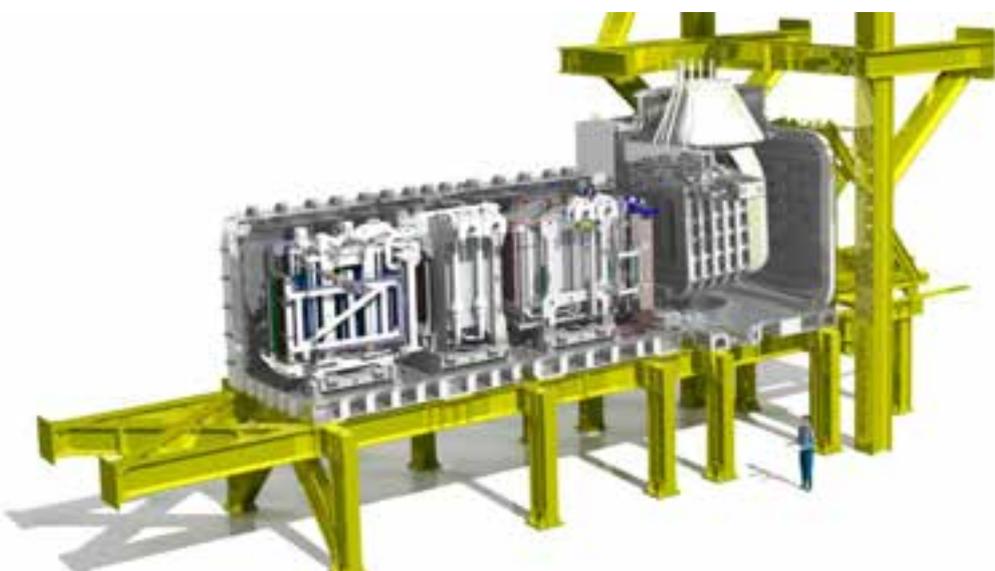


Figura 2. Vista sui componenti interni all'iniettore MITICA. Da destra a sinistra: Sorgente ionica ed acceleratore, neutralizzatore, filtro ioni residui (RID), calorimetro



Figura 3. Disegno 3D delle alimentazioni elettriche di MITICA, compresa la *Transmission Line* e il *Vacuum Vessel*

La Figura 4 mostra un disegno in 3D del sistema di alimentazioni elettriche di MITICA. Nel disegno vengono messi in evidenza alcuni elementi fondamentali:

- Piattaforma ad alta tensione 1 MV (HVD1) - Gabbia di Faraday che ospita l'ISEPS (*Ion Source and Extraction Power Supplies*), l'installazione è stata completata nel 2017 ed il test di accettazione finale a 1,2 MV è previsto per Gennaio 2019;
- ISEPS, per il quale è stato revisionato il progetto a marzo 2017 e l'installazione sarà ultimata verso la fine del 2018;
- Componenti JADA, installati a partire da Dicembre 2015 fino al secondo trimestre del 2018. I primi test di isolamento in HV sono stati effettuati in Settembre 2018;
- Impianto di movimentazione e stoccaggio gas SF₆, installato nel 2017, ma con consegna degli impianti nel luglio 2018;
- AGPS-CS, installazione completata all'inizio del 2018 e *commissioning* nel secondo trimestre 2018;
- GRPS:RIDPS, attualmente in produzione ed installazione prevista entro il terzo trimestre del 2018.

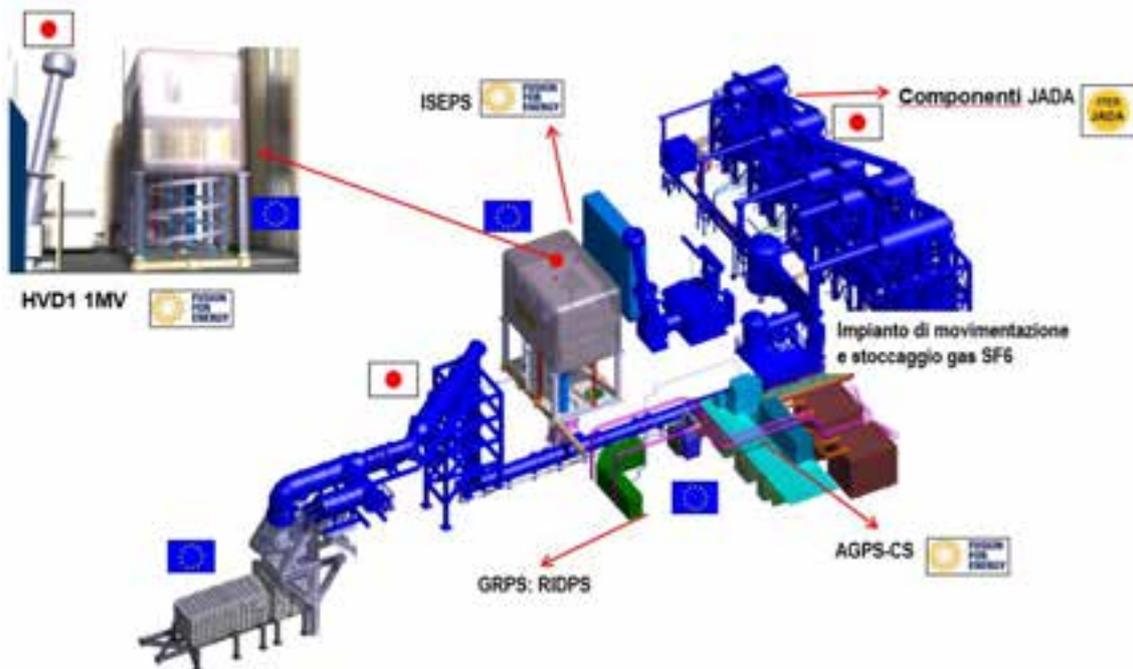


Figura 4. Sistema di alimentazione elettrica MITICA



Figura 5. MITICA *power supply*: alcune foto testimonianti le fasi di avanzamento della sua installazione

Nel dettaglio la figura sottostante raffigura una panoramica dei componenti di Alta Tensione (HV) all'interno della sala per Alta Tensione (*High Voltage Hall*) al termine delle attività di installazione di HVD1, alla fine del 2017.



Figura 6. MITICA High Voltage Hall

Nel 2018 non è stata eseguita alcuna attività, ad eccezione dell'installazione delle fibre ottiche di MITICA ISEPS, CODAS (*COntrol and Data Acquisition System*) e Interlock da parte del team NBTF che ha richiesto lo smantellamento parziale delle tubazioni HVD.

Nel 2018 è stata completata l'installazione dei componenti JADA e nel corso del primo trimestre sono stati effettuati i test preliminari e le verifiche.

A partire dal terzo trimestre del 2018 è iniziata la preparazione dei componenti per le prove di alta tensione, procedendo con il riempimento di gas N2 per i controlli preliminari e quindi dell'impianto di movimentazione e stoccaggio.

Nella fase di caricamento del gas SF6 ed in occasione dei test d'isolamento, particolare attenzione va data alle procedure di sicurezza, andando ad analizzare i rischi connessi di seguito elencati:

- Rischio pressione;
- Rischio temperatura;
- Rischio elettrico;
- Rischi connessi all'utilizzo dei fluidi, principalmente all'uso dell'impianto di caricamento del gas SF6, ma anche dei fluidi refrigeranti e di quelli per l'impianto criogenico.

I primi test di alta tensione con alimentazione di prova sono stati avviati ad Agosto 2018.

Nell'ambito del WP2018 diverse sono state le attività eseguite su MITICA CODAS e Interlock, riassumibili in tali punti:

- definizione e aggiornamento dei requisiti per MITICA Plant System CODAS provenienti da ISEPS, AGPS, GRPS, GVS, raffreddamento e impianto criogenico;
- *follow-up* dei sistemi di controllo per gli approvvigionamenti MITICA in esercizio (ISEPS, AGPS, GRPS, GVS, Raffreddamento e Cryo Plant);
- preparazione di miniCODAS per MITICA AGPS SAT;
- preparazione ed esecuzione di SAT per la messa in servizio di MITICA AGPS;
- supporto nella finalizzazione dell'interfaccia di MITICA/PRIMA Cooling Plant con MITICA CODAS.

4. Il Progetto SPIDER

SPIDER è il prototipo della sorgente di ioni negativi dell'HNB. In Figura 7 è raffigurata una vista interna della camera da vuoto, in particolare della sorgente ionica dotata di acceleratore a 100kV e del calorimetro ad alta risoluzione (STRIKE).

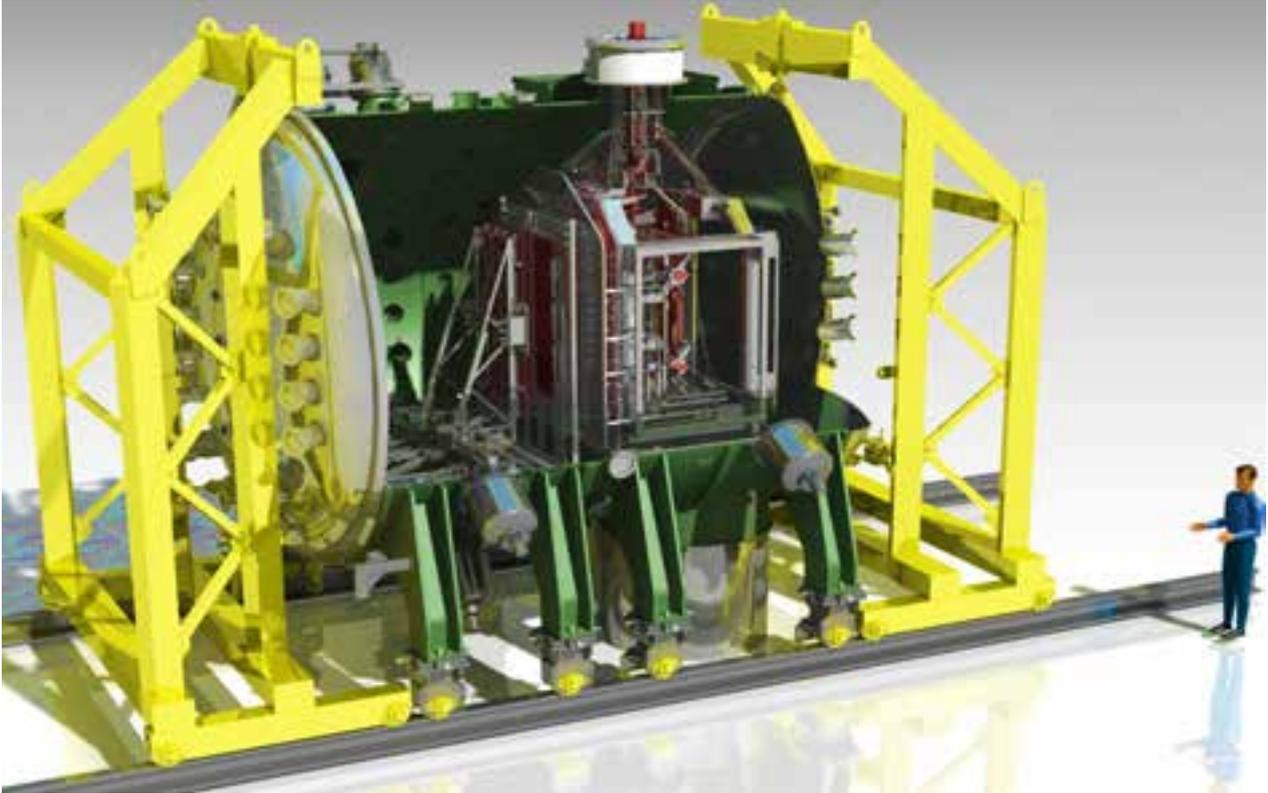


Figura 7. SPIDER. Vista interna alla camera da vuoto

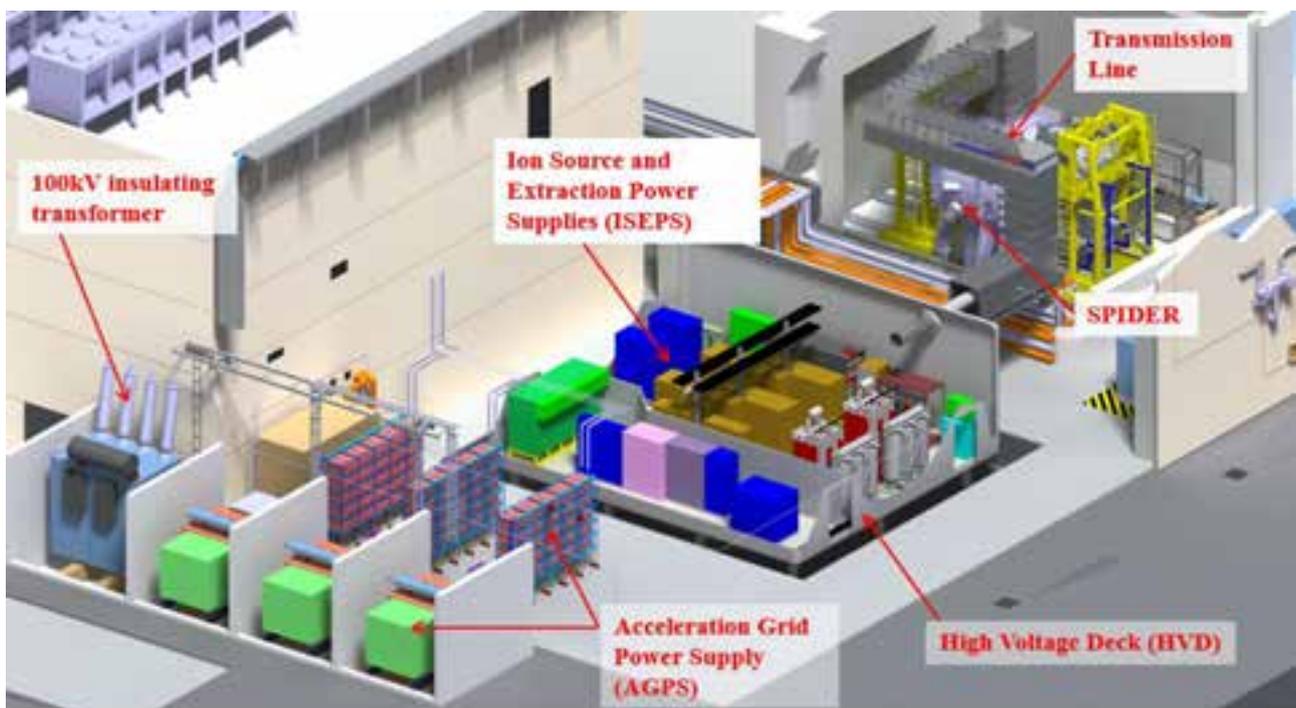


Figura 8. Disegno 3 D delle alimentazioni elettriche di SPIDER

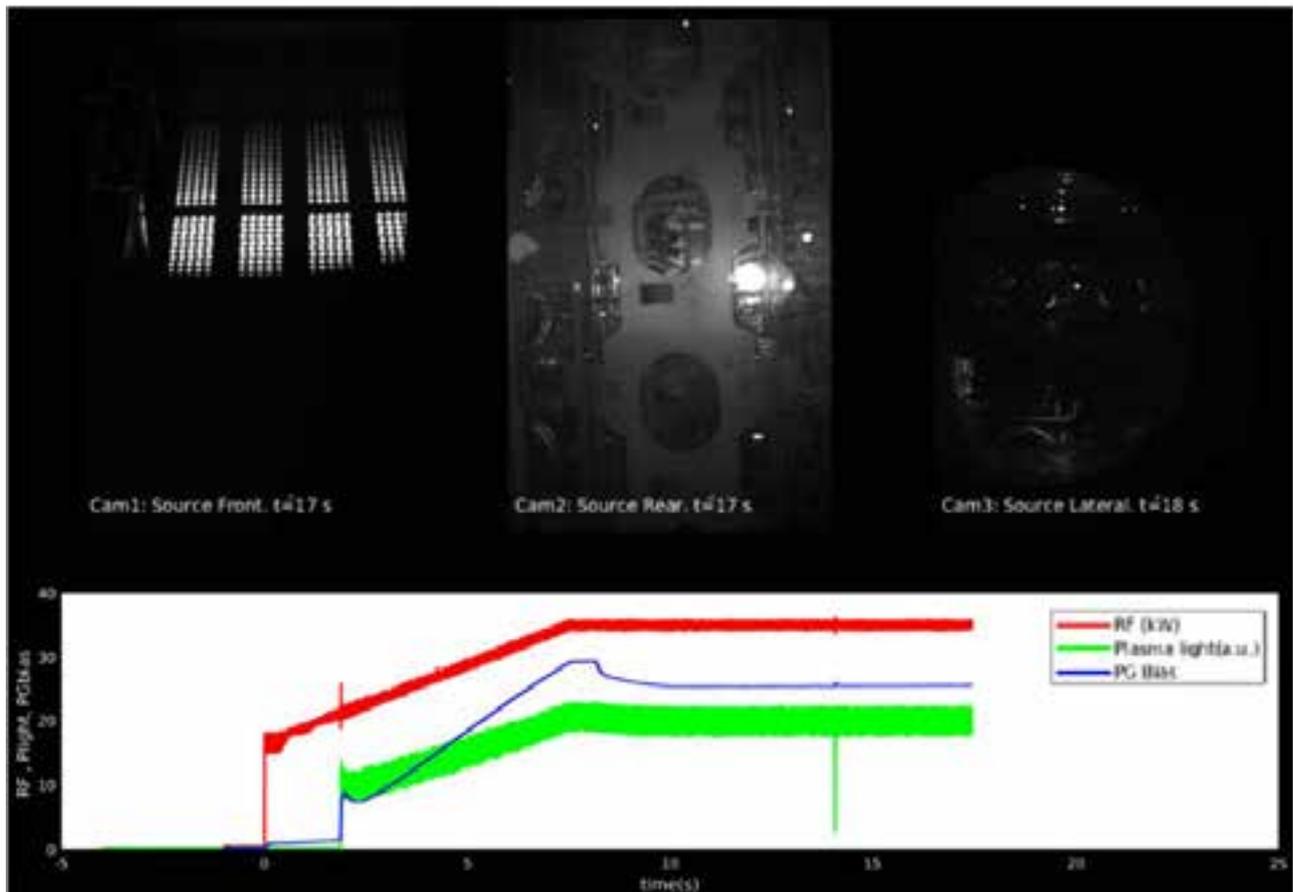


Figura 9. SPIDER. Il primo plasma generato il giorno dell'inaugurazione di SPIDER

SPIDER non è dotato di recipienti a pressione ricadenti nel campo di applicazione del decreto ministeriale 1/12/1980.

5. Problemi e soluzioni

Ciò che rende unica la realizzazione di questo progetto sono: il voltaggio e la potenza molto elevati con funzionamento in corrente continua, i problemi di fisica ed ingegneria legati alla generazione del fascio, alcuni problemi tecnologici specifici dovuti a condizioni di lavoro termo-meccaniche ed elettriche molto pesanti. Questi requisiti, essendo molto gravosi, richiedono continui studi in tutte le fasi di realizzazione, dalla progettazione concettuale alla messa in servizio.

Il mantenimento della tensione nell'acceleratore del fascio di ITER e MITICA è riconosciuto come uno dei problemi più critici. I complessi sistemi di estrazione e accelerazione, formati da elettrodi polarizzati a differenti potenziali, devono operare in vuoto o in gas a bassa pressione, in regime impulsivo con durate anche molto elevate (fino a 3600 s) e con correnti ioniche elevate (40-46A).

Per quanto riguarda gli aspetti tecnologici legati alla costruzione dei componenti, i problemi da affrontare devono essere di natura diversa.

Alcuni miglioramenti sono stati introdotti nella progettazione di MITICA per la soluzione delle criticità connesse alla realizzazione della sorgente di ioni negativi e dell'acceleratore, problemi emersi nel corso delle analisi dettagliate o in relazione ai più recenti risultati ottenuti dai dispositivi sperimentali operanti nei laboratori di IPP e di QST (centri di ricerca sulla fusione presenti rispettivamente in Germania ed in Giappone).

I miglioramenti consentiranno, tra l'altro, una sostanziale riduzione del carico termico sulle griglie, che dovrebbe rimanere al di sotto dei limiti accettabili per il funzionamento a impulsi lunghi (3600 s) e garantire la durata a fatica delle griglie (50.000 cicli on/off).

Per quanto concerne la fase di assemblaggio, invece, i problemi riscontrati sino ad ora sono legati a SPIDER e sono di seguito dettagliati.

The SPIDER *Beam Source* presenta una non-conformità sul segmento numero 4 della *Grounded Grid* (GG4) in termini di **tenuta sottovuoto** del circuito idraulico.

Una perdita di He si trova su un'articolazione eterogenea tra la piastra di rame e il collettore di acciaio, probabilmente causata da sollecitazioni indotte durante il processo di saldatura dei collettori idraulici.



Figura 10. Schema segmento GG4

Pertanto è stata predisposta l'acquisizione di un nuovo segmento GG4, che prevede minori sollecitazioni sui due collettori idraulici.

6. L'accordo di collaborazione Consorzio RFX – INAIL nella fase di avvio dell'NBTF

La fase di costruzione dei componenti in alta tensione di MITICA è stata ultimata in Giappone.

I componenti trasferiti in Italia sono installati nell'impianto di Padova, gestito dal Consorzio RFX. Attualmente il Consorzio sta seguendo attività di collaudo e messa in servizio, propedeutici all'avvio della fase sperimentale.

Il coinvolgimento dell'Inail in tale progetto costituisce un riconoscimento della competenza ad oggi maturata dall'Istituto nel settore. D'altra parte il ruolo dell'Inail è strettamente connesso con la funzione istituzionale di punto di riferimento per la sicurezza sul lavoro, con particolare riguardo alle condizioni degli addetti ai lavori ovvero agli addetti alla gestione dell'impianto.

L'accordo di collaborazione è finalizzato principalmente allo studio, alla ricerca e sviluppo ed alla sperimentazione dell'utilizzazione in sicurezza del *Neutral Beam Test Facility*.

In relazione alla missione istituzionale dell'Inail, l'accordo di collaborazione tra l'Inail ed il Consorzio RFX riguarda:

- problematiche relative alla "sicurezza sul lavoro", incluse le misure generali di tutela ed ogni altro aspetto regolato dalla normativa nazionale di settore, focalizzando l'attenzione sulle problematiche di sicurezza correlate con questa specifica attività;
- utilizzo delle attrezzature di lavoro, di cui all'allegato VII del d.lgs.81/08, del d.m.11/04/2011 ed altre rientranti in normative nazionali diverse (ad esempio per sollevamento persone);
- utilizzo delle attrezzature a pressione, di cui al d.lgs.93/00 e s.m.i. (direttiva PED), al d.m.329/04, allo stesso d.m.11/04/2011.

Per quanto riguarda le attrezzature a pressione contenenti parti elettriche attive, l'accordo di collaborazione in oggetto permetterebbe di sviluppare procedure specifiche, innovative rispetto alla normativa vigente, inclusa un'analisi dei rischi completa, non prevista dal d.m.1/12/1980 riguardante i rischi pressione e temperatura. In particolare:

- Dispositivi e accessori di sicurezza dedicati;
- Verifica dei contenitori funzionanti a pressioni inferiori alla pressione atmosferica (contenitori sotto-vuoto, con pressione relativa -1 bar, contenenti parti elettriche attive);
- Attrezzature a pressione che non rientrano nel campo di applicazione del d.m.1/12/1980, sia pur inserite nello stesso impianto;
- Installazioni accessorie pressurizzate con fluidi diversi dall'esafluoruro di zolfo (SF6).

L'attività prevista nell'accordo ha una durata di tre 3 anni, rinnovabile.

Allo stato è già iniziata una collaborazione per definire i dispositivi di sicurezza da installare sui componenti pressurizzati ad alta tensione. Successivamente è stata avviata un'attività di *review* inerente il documento per la valutazione del rischio sismico.

7. Conclusioni

Sono stati compiuti progressi sostanziali nella realizzazione della *Neutral Beam Test Facility*. Edifici ed impianti ausiliari di PRIMA sono stati completati. L'installazione di impianti comuni ai due esperimenti, quali impianto di raffreddamento ed impianto da vuoto ed immissione gas, sono in fase di completamento e collaudo. Gli impianti sperimentali di SPIDER: *Vessel*, HVD, linea di trasmissione, sistemi di alimentazione ISEPS e AGPS, controllo e protezione sono in fase di completamento e sono iniziate le fasi di collaudo e messa in servizio. La sorgente ionica, che costituisce il cuore del sistema, è in fase di assemblaggio presso la ditta costruttrice e verrà installata a partire dalla fine del 2018. Il progetto di tutti i componenti e sistemi di MITICA si è concluso. Per quanto riguarda i componenti in alta tensione di fornitura giapponese, la loro realizzazione e il collaudo in fabbrica sono pressoché conclusi, mentre la fase di installazione dei componenti si è conclusa a metà 2018. I primi test di isolamento a 1.2MV sono stati eseguiti con successo in Settembre 2018. La messa in servizio integrata e la prima fase sperimentale seguiranno al completamento dell'impianto.

Criticità sono state affrontate per finire il progetto dell'iniettore MITICA e specifici piani R&D che richiedono lo sviluppo di nuovi codici, sono stati lanciati per affrontare le criticità residue, con risultati efficaci. È stato raggiunto un progresso significativo nella soluzione di alcuni problemi tecnologici.

È stato avviato un accordo di collaborazione tra RFX ed Inail per conseguire obiettivi comuni di ricerca, con particolare riguardo all'attuazione di misure specifiche di sicurezza per il *Neutral Beam Test Facility*.

8. Bibliografia

- [1] Toigo V. et al. Progress in the realization of the PRIMA Neutral Beam Test Facility. *Nuclear Fusion* (ed. IAEA). 2015; 55.
- [2] Watanabe K. et al. Design of a -1MV dc UHV power supply for ITER NBI. *Nuclear Fusion*. (ed. IAEA). Vienna. 2009; 49.
- [3] Grisham L.R. et al. Recent improvements to the ITER neutral beam system design. *Elsevier. Fusion Engineering and Design*. 2012; 87:1805–1815.
- [4] Umeda N., Taniguchi M., Kashiwagi M., Dairaku M., Hanada M., Tobar H., Watanabe K., Sakamoto K., Inoue T. Development of 1MeV accelerator and HV bushing at JAEA toward ITER Neutral Beam System. *Elsevier. Fusion Engineering and Design*. 2009; 84:1875–1880.

- [5] Sonato P. et al. The ITER full size plasma source device design. *Elsevier. Fusion Engineering and Design*. 2009; 84:1875–1880.
- [6] Sonato P. et al. Status of PRIMA, the test facility for ITER neutral beam injectors. *American Institute of Physics, Third International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources*. Jyväskylä, Finlandia, Settembre 3–7, 2012.
- [7] Decreto ministeriale 1 dicembre 1980, Disciplina dei contenitori a pressione di gas con membrane miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche (G.U. 11 febbraio 1981, n. 40)
- [8] Decreto ministeriale 10 settembre 1981 Modificazioni al decreto ministeriale 1° dicembre 1980, relativo alla "disciplina dei contenitori a pressione di gas con membrane miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche" (G.U. 16 ottobre 1981, n. 285).
- [9] Toigo V., Tonti A. et al. The PRIMA Test Facility: SPIDER and MITICA test-beds for ITER neutral beam injectors, *New Journal of Physics* 19.2017.

Gestione integrata della sicurezza negli stabilimenti industriali ad alta affidabilità con la piattaforma SmartBench

M.E. Biancolini¹, M. G. Gnoni², A. Marzani³, M. F. Milazzo⁴, R. Setola⁵, S. Anastasi⁶, C. Mennuti⁶, P. Bragatto⁶

¹ Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

² Università del Salento

³ Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

⁴ Università degli Studi di Messina

⁵ Università Campus Bio-Medico di Roma

⁶ Inail - Dit

Sommario

Le tecnologie Smart stanno svolgendo un ruolo chiave nella quarta rivoluzione industriale. Sistemi IoT, Digital Twin, sensori attivi, Big Data su cloud e modellazione fisica spinta dal super calcolo scientifico possono essere integrati sinergicamente in un ambiente Safety 4.0. La piattaforma SmartBench, sviluppata nell’ambito di un progetto INAIL BRIC, integra quattro diverse tecnologie smart dimostrando come l’interazione e l’aggregazione delle informazioni possa rendere integrato il concetto di sicurezza. Il monitoraggio dello stato di integrità degli impianti viene affrontato in SmartBench considerando in modo specifico la tecnica delle emissioni acustiche. La modellistica interpretativa della propagazione dei segnali in abbinamento con sensori smart di tipo innovativo consente alla piattaforma di individuare e controllare nel tempo i difetti interni delle apparecchiature. La presenza di etichette intelligenti che consentono di gestire nel mondo digitale lo storico delle manutenzioni degli apparati fornisce alla piattaforma informazioni molto precise dei macchinari in prossimità dell’operatore. Un sensore virtuale di invecchiamento comunica alla piattaforma lo stato di degrado dei componenti e consente di prevederne l’evoluzione. Una rete di dispositivi IoT consente di monitorare in tempo reale lo stato dell’operatore per fornire un riscontro sul context awareness e rendere la sicurezza attiva in ambienti difficili.

1. Introduzione

Il progetto di Ricerca SmartBench [1] nasce dall’idea di rendere Smart la sicurezza degli impianti industriali beneficiando ai fini della sicurezza delle tecnologie che stanno rendendo possibile la nuova rivoluzione industriale che va sotto il nome di “industria 4.0”. Ciò non si limita semplicemente alla migrazione e adattamento delle idee base che fondano l’industria 4.0 ma piuttosto a rendere centrale il tema della sicurezza nell’industria 4.0. L’approccio Safety 4.0 ha l’ambizione di ripensare la sicurezza sfruttando tutte le potenzialità tecnologiche oggi disponibili e conseguentemente aumentare la sicurezza dei lavoratori (Figura 1).



Figura 1. Il concetto di Safety 4.0 si fonda sull'uso degli strumenti dell'industria 4.0 nel campo della sicurezza degli stabilimenti industriali.

Il progetto di Ricerca SmartBench, cofinanziato mediante il programma Inail BRIC (Bando Ricerche in Collaborazione), Piano Attività di Ricerca 2016 – 2018, nasce per integrarsi nella ricerca Safety 4.0 di Inail (Figura 2). Il sistema di gestione della sicurezza nella visione Inail [2] è il motore che regola all'interno di uno stabilimento tutte le attività che hanno a che fare con la prevenzione degli infortuni e degli incidenti. Il simbolo degli ingranaggi utilizzato nel logo di SmartBench rappresenta come la gestione dinamica della sicurezza sia la ruota di un ingranaggio perfetto. I sistemi automatizzati integrati fra loro vanno a sovrapporsi alle stesse istruzioni operative e procedure, rendendole di immediata applicazione per l'intero sistema di gestione.

Le attività del progetto biennale SmartBench, iniziate il primo Luglio 2017, coinvolgono cinque partner universitari e Inail ed è possibile consultare il portale web smartbench-project.it per aggiornamenti sui risultati intermedi conseguiti e sulle attività del consorzio.



Figura 2. Il ruolo di SmartBench nel percorso di sviluppo della Safety 4.0 di Inail [2].

Una visione sintetica del progetto SmartBench è riportata dalla Figura 3. L'acronimo SmartBench è una contrazione del nome esteso della piattaforma "Smart Industrial Safety Workbench". La piattaforma innovativa (con soluzioni web, mobile e IoT) consente l'integrazione e l'elaborazione di informazioni provenienti da dispositivi smart per migliorare la sicurezza nei luoghi di lavoro. Sebbene l'infrastruttura sia pensata e progettata per la massima flessibilità in modo da poter integrare nel tempo nuove funzionalità e, al contempo, potersi integrare con funzionalità Safety 4.0 già sviluppate da Inail (già mostrate nella Figura 2), il progetto SmartBench prevede lo sviluppo di quattro verticalizzazioni tecnologiche necessarie per lo sviluppo dei seguenti sistemi: reti di sensori Emissione Acustica (EA) per il monitoraggio dell'integrità strutturale; etichette smart per la gestione dei rischi e la verifica delle attrezzature di lavoro; sensori virtuali per la visualizzazione dell'invecchiamento di impianti; sistemi smart (IoT) per la verifica del corretto utilizzo dispositivi DPI e dello stato fisiologico del lavoratore che opera in ambienti difficili.

Questa memoria si propone di fornire una panoramica sugli aspetti tecnici e scientifici del progetto SmartBench riportando alcuni dettagli relativi allo sviluppo della piattaforma software e ai sottosistemi sviluppati dalle unità operative.



Figura 3. Una vista di insieme del progetto di ricerca e della piattaforma SmartBench.

2. Sviluppo piattaforma software

La piattaforma software di SmartBench vuole essere un sistema aperto nel quale i vari moduli di SmartBench possano essere facilmente integrati permettendo la gestione delle informazioni con opportune ontologie [3]. La piattaforma modulare, basata sulla soluzione industriale Predix di GE (<https://www.ge.com/digital/predix/platform>), prevede l'IoT Data Manager come un modulo centrale di controllo dei dispositivi IoT, una base di conoscenza rappresentata dalla SmartBench Ontology con le sue istanze e un insieme di moduli per il controllo dell'intera piattaforma: Plant Risk Surveillance Designer, Real Time Risk Monitoring e Batch Risk Analyzer. Il modulo IoT Data Manager consente di dialogare con i dispositivi IoT. Si prevede di supportare in modo diretto la tecnologia Predix di GE ma anche dei dispositivi IoT non connessi direttamente a Predix. Nel primo caso i dispositivi devono essere interfacciati con una "Predix Machine" che consente di stabilire una connessione diretta fra dispositivo e Predix interamente gestito da Predix; nel secondo caso il modulo IoT Data Manager dialoga con uno specifico controller "Independent IoT Device Controller". Nel caso del controller indipendente i dati vengono recuperati su richiesta del IoT Data Manager. In tutti i casi le autenticazioni vengono gestite mediante Predix. Il modulo IoT Data Manager risiede su un server centrale, dialoga con Predix su cloud, e memorizza le informazioni nell'Instance DataBase basato sulla tecnologia mongoDB. Le informazioni vengono organizzate e gestite mediante l'ontologia di SmartBench (SAREF e SafeLife-X). L'ontologia SAREF fornisce elementi costitutivi in ambito IoT che consentono la separazione e la ricombinazione di diverse parti dell'ontologia a seconda delle esigenze specifiche mediante un elenco di funzioni di base che possono essere eventualmente combinate per avere funzioni più complesse in un singolo dispositivo. L'ontologia SafeLife-X è definita estraendo le informazioni dall'omonimo documento per il controllo dell'invecchiamento nelle infrastrutture.

La piattaforma consente l'interazione con gli utenti di SmartBench (SmartBench Users con accesso da smartphone, tablet o pc) mediante un'interfaccia grafica che gestisce i vari moduli. Il "Plant Risk Surveillance Designer" viene utilizzato da utenti con privilegi specifici e consente di definire il layout dei dispositivi smart presenti nello stabilimento. Oltre ad essere utilizzato in fase di installazione e avvio è pensato per mantenere la piattaforma (aggiornamenti, aggiunta rimozione parti del sistema). Il componente "Real Time Risk Monitor" consente di esporre in tempo reale le informazioni e di generare warning; è pensato per un'interazione in tempo reale con i dispositivi. Il componente "Batch Risk Analyzer" è pensato per l'elaborazione di storici.

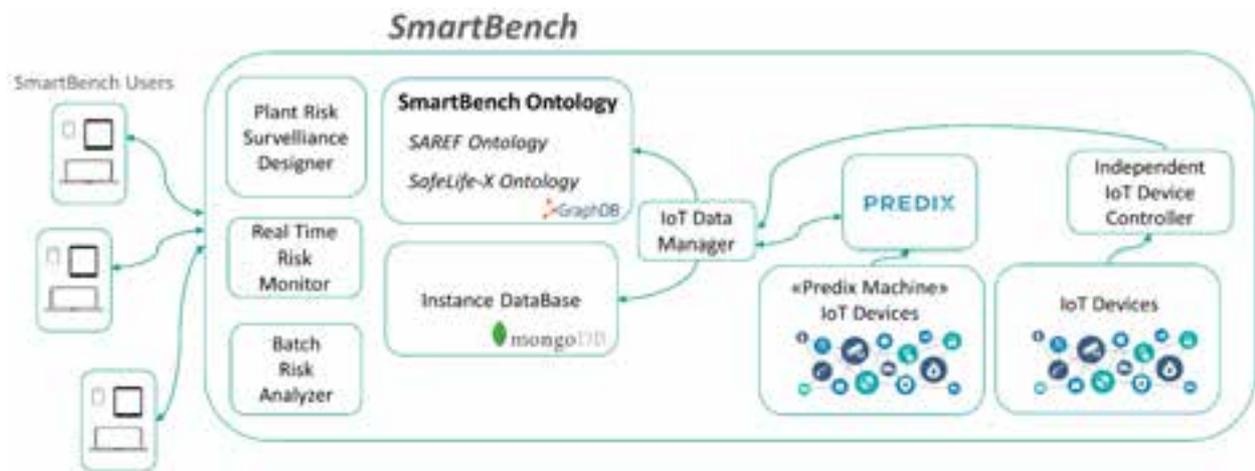


Figura 4. Architettura software della piattaforma SmartBench.

3. Monitoraggio EA

La piattaforma SmartBench prevede l'integrazione di un sistema di monitoraggio delle Emissioni Acustiche [4] (EA) atto a fornire informazioni sullo stato di integrità di attrezzature di lavoro rendendole smart in un'ottica di sicurezza integrata. In particolare, SmartBench mira ad una verifica continua dell'integrità strutturale superando il limite odierno delle metodiche diagnostiche a base di EA che prevede procedure di verifica basate su controlli periodici [5] e su modelli previsionali dell'evoluzione del danneggiamento [6]. In questo contesto si palesa la necessità di disporre di strumenti di misura delle EA piccoli, leggeri, poco costosi, facilmente installabili sulla struttura e atti al monitoraggio in continuo. In SmartBench vengono proposti due diversi nodi-sensore [7,8] ideati per essere installati in modo permanente sulle attrezzature e capaci di monitorare nel tempo i segnali EA. I nodi sensore, caratterizzati da dimensioni e pesi ridotti, basso consumo di potenza e capacità di elaborazione in locale del segnale acquisito, risultano ideali in diversi scenari applicativi, in particolare nel monitoraggio di attrezzature a pressione o atmosferiche contenenti fluidi pericolosi (esplosivi, infiammabili, tossici, comburenti, ecc.).

Sui nodi sensore è possibile innestare algoritmi di elaborazione del segnale sviluppati ad hoc per i segnali EA, e possono essere programmati per trasferire in modalità wireless, su piattaforme "cloud based service", il segnale elaborato. I nodi sensori in oggetto consentono lo sviluppo di reti di sensori minimamente invasive e installabili in modo permanente sulle strutture o apparecchiature oggetto di indagine.

I dati rilevati dalla rete di sensori, eventualmente pre-elaborati sui nodi sensore, ed elaborati sulla piattaforma SmartBench, permettono una ricostruzione dinamica delle condizioni di "salute" dell'attrezzatura consentendo la gestione sicura di tutto l'impianto.

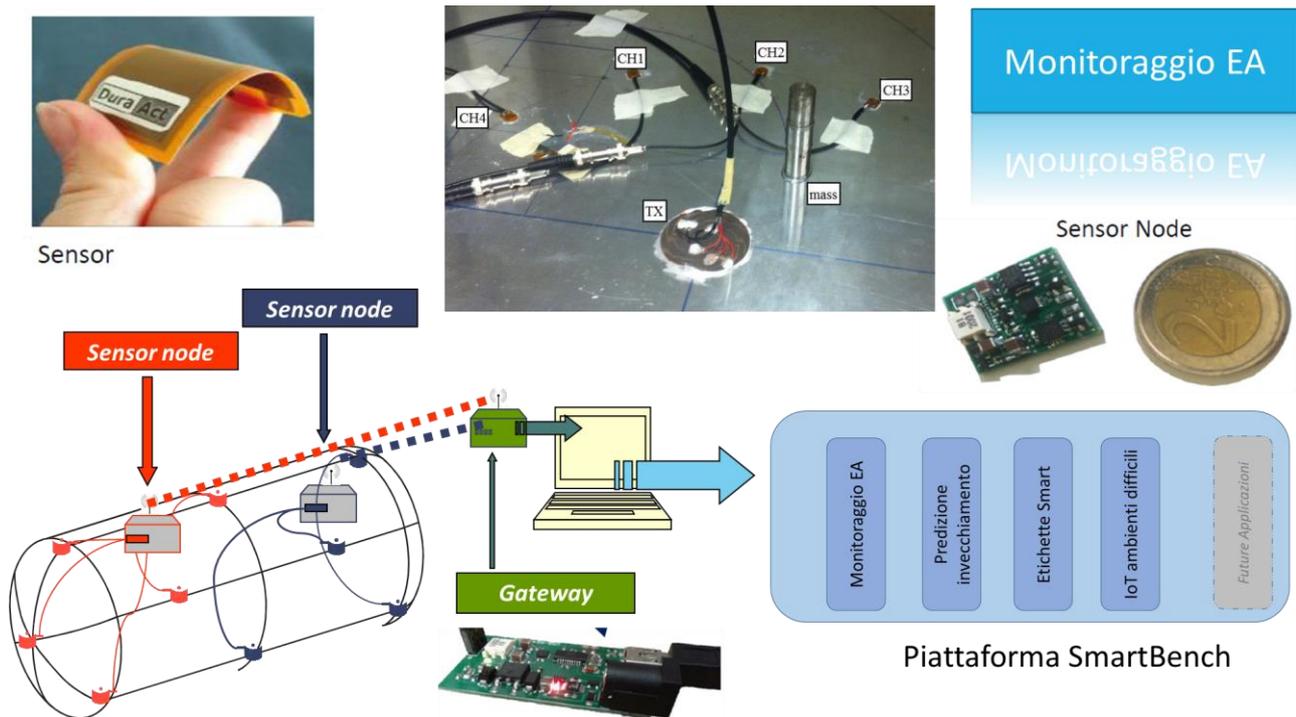


Figura 5. Monitoraggio continuo mediante la tecnica delle emissioni acustiche e nodi sensore.

4. Etichette intelligenti

Una delle criticità che caratterizza la gestione delle attrezzature di lavoro, e tra queste in particolare quelle a pressione e gli organi di sollevamento, è legata alla mancanza di informazioni inerenti lo “stato” d’uso dell’apparecchio; capita, infatti, frequentemente che attività di controllo, manutenzione e verifica (ove prevista) non siano correttamente tracciate, anche a causa della mancanza di idonei sistemi di registrazione degli interventi. Allo stesso modo si verifica spesso che presso il luogo di lavoro non sia disponibile la documentazione a corredo dell’attrezzatura (dichiarazione di conformità del fabbricante, istruzioni, ecc.), rendendo impossibile una conduzione sicura e coerente dell’apparecchio per l’utente e un’efficace attività di controllo da parte degli organi preposti. Questa mancanza di informazioni, infatti, non consente di conoscere le corrette modalità di utilizzo e gestione della specifica attrezzatura, non avendo a disposizione le indicazioni previste dal fabbricante e quindi gli indirizzi necessari per utilizzare in sicurezza il prodotto e garantirne nel tempo lo stato di efficienza, né di disporre di feedback circa le azioni messe in campo dall’utente in fase di gestione dell’attrezzatura, per una pianificazione organizzativa ed economicamente efficace degli interventi di controllo, manutenzione e verifica. Lo studio propone un prototipo di piattaforma software che integra tecnologie IoT (Internet of Things) [9,10], montate sulle attrezzature a pressione e di sollevamento cose e persone soggette al regime di verifica periodica, con sistemi cloud-based di gestione dei dati che consenta una univoca identificazione delle specifiche attrezzature di lavoro, la gestione dei dati relativi all’intero ciclo di vita della stessa, fornendo una tracciabilità dinamica e real time dei diversi interventi (e.g. a causa di un guasto improvviso, in base alla pianificazione indicata dal fabbricante, in base a suggerimenti a valle di attività di controllo, manutenzione e/o verifica).

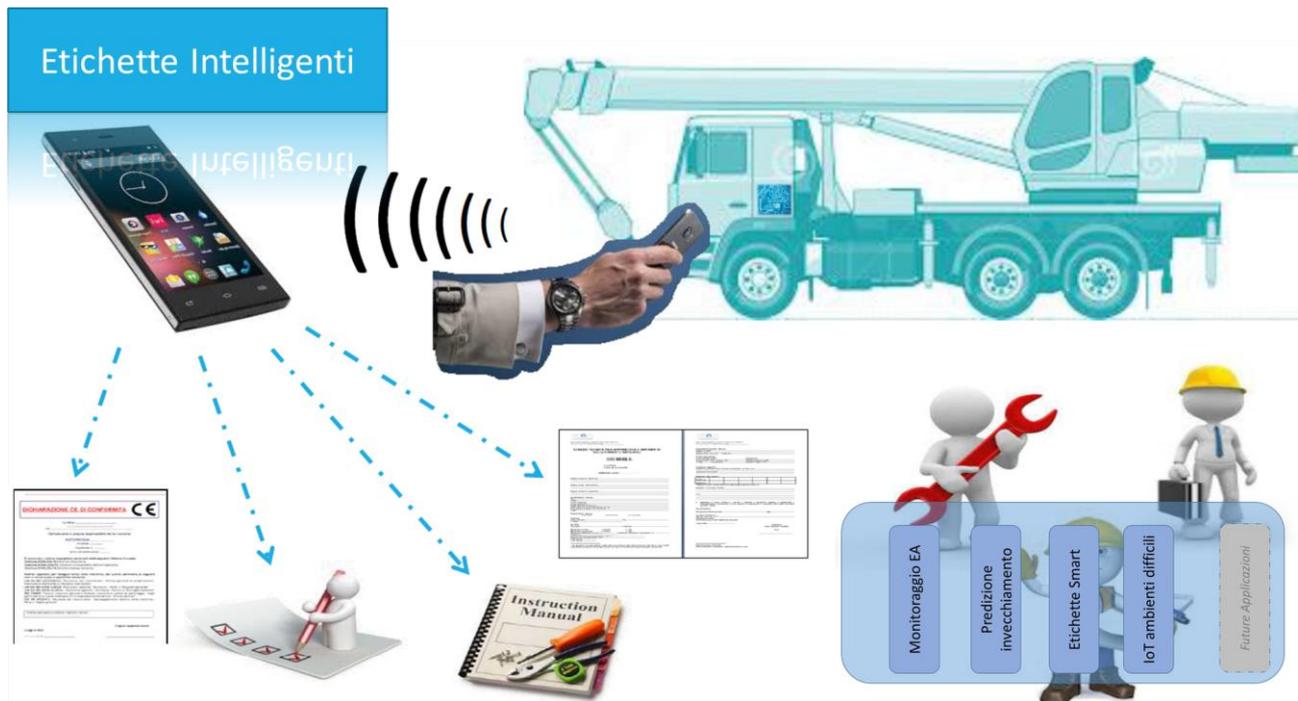


Figura 6. Gestione della manutenzione mediante l'uso di etichette intelligenti.

5. Sensore virtuale invecchiamento

Il cuore del sensore virtuale d'invecchiamento è una applicazione smart per il monitoraggio e la previsione dell'invecchiamento delle apparecchiature [11,12]. In realtà, il sensore è composto di hardware e software, che ricostruiscono un vero "gemello digitale" (Digital Twin) dell'impianto in grado di restituire all'utente specifici parametri correlati all'invecchiamento. Nello specifico è prevista la stima di una probabilità di guasto, che tenga conto dei fattori che contribuiscono all'invecchiamento di apparecchiature critiche (CriticalComponent), così come definiti dal Gruppo di Lavoro dell'invecchiamento nominato Ministero dell'Ambiente. È previsto un package CriticalComponentFeature in cui è implementato il sistema di acquisizione dati delle apparecchiature critiche, attraverso una serie di dispositivi: Sensore Reale (per acquisire i parametri operativi dell'apparecchiatura), RFID (per leggere informazioni archiviate su schede RFID), GPS (per informazioni di geo-localizzazione), FeatureCustom (per dare la possibilità all'utilizzatore del sistema di inserire caratteristiche come foto e/o altri parametri). Lo schema può essere facilmente implementato su diverse piattaforme: sistemi Android (Tablet, SmartPhone, SmartGlass, etc.), su sistemi Linux/Windows e, eventualmente, nei casi in cui sia possibile su webServer. Il fattore che accomuna tutti i sistemi di esecuzione, sopra elencati, è il linguaggio di programmazione Java.

I parametri raccolti dinamicamente dalla piattaforma SmartBench alimentano i modelli di degrado delle attrezzature e permettono di guidare la gestione sicura dell'intero ciclo di vita dell'impianto. Lo strumento finale sarà utilizzato da gestori e auditor interni, per una autovalutazione, e da ispettori per assolvere ai loro compiti di controllo. Tuttavia tutte le categorie di controllori potranno verificare l'adeguatezza dei piani per l'invecchiamento, in particolare nel contesto delle aziende a rischio di incidente rilevante, essi avranno un utile supporto per ottemperare a quanto richiesto dalla nuova Direttiva Seveso.

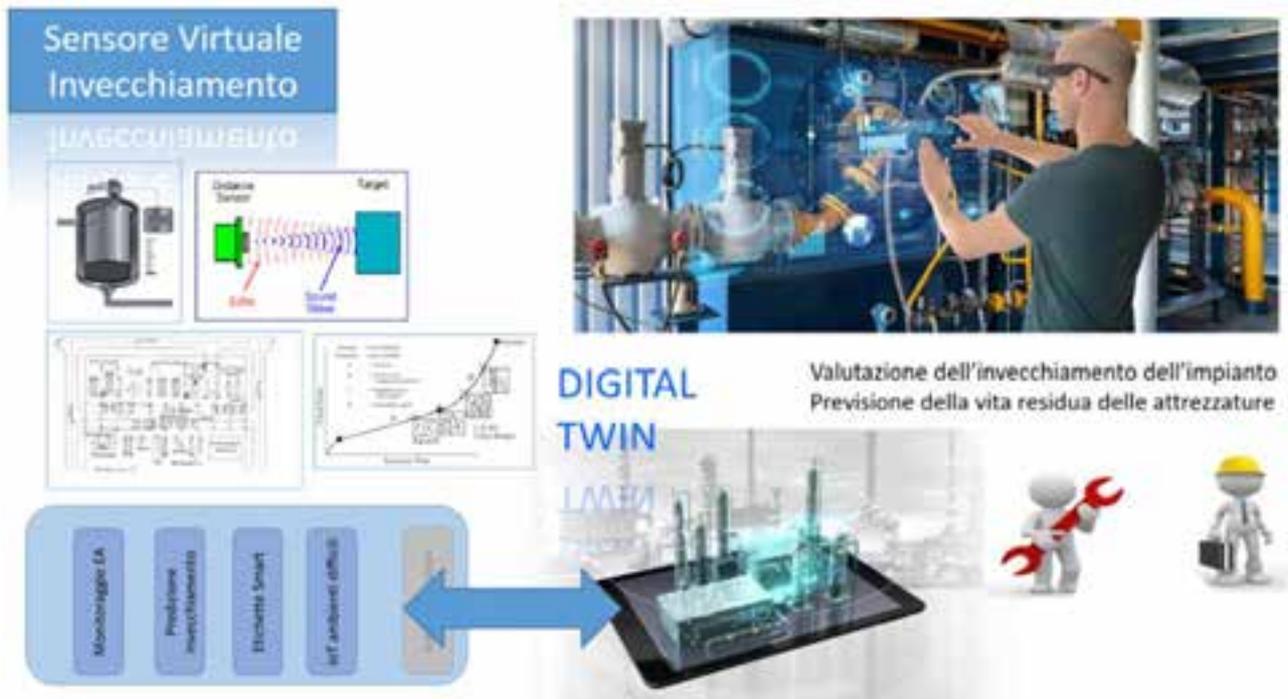


Figura 7. Sensore Virtuale per la valutazione dell'invecchiamento e per la previsione della vita residua.

6. IoT in ambienti difficili

Questa verticalizzazione mira allo sviluppo di un ambiente per aumentare la consapevolezza (awareness) dei lavoratori in ambienti difficili, ovvero in tutte quelle situazioni che a causa di modifiche e/o eventi avversi possono diventare potenzialmente "ostili" (inquinanti o infiammabili, carenza di ossigeno, temperature estreme) [13,14].

La soluzione prevede una architettura ibrida all'interno della quale sono ipotizzati l'integrazione di sensoristica indossabile con sensoristica ambientale. Nello specifico l'architettura prevede l'uso di un dispositivo mobile che faccia da collettore dei segnali provenienti dai sensori indossabili e che sia in grado di dialogare con i sensori nell'ambiente. Attraverso la piattaforma SmartBench tutti i dati e parametri utili verranno scambiati, supportando in particolare la supervisione delle attività e gli interventi di soccorso, in caso di necessità.

Il sistema si caratterizza per una elevata modularità e scalabilità al fine di facilitarne l'adattabilità a diversi contesti operativi. Nello specifico si ipotizza che i sensori ambientali siano in grado di comunicare mediante protocollo BLE e che siano in grado di riconoscere la presenza dell'operatore. Tali informazioni vanno a complementare quelle già disponibili mediante la BAN, consentendo di irrobustire le informazioni sull'ambiente oltre che per quel che riguarda lo stato fisiologico dell'operatore. Tali informazioni sono correlate dal sistema al fine di valutare il livello di rischio ovvero la presenza di situazioni patologiche e/o di pericolo. Al verificarsi di una tale evenienza il sistema provvede ad allertare l'operatore e il supervisore.

Una specifica attenzione è stata posta già in sede di ideazione e progettazione alla salvaguardia delle prerogative dei lavoratori per ciò che attiene la loro privacy. Infatti tutte le informazioni sono raccolte dal dispositivo mobile utilizzato dall'operatore in-the-field al fine di evidenziare esclusivamente a lui il proprio stato e quello dell'ambiente. Solo qualora si verificassero situazioni anomale e/o di emergenza i dati vengono trasmessi al centro di supervisione, altrimenti i dati puntuali vengono cancellati quando l'operatore esce dall'area di interesse e vengono conservati esclusivamente i dati aggregati.

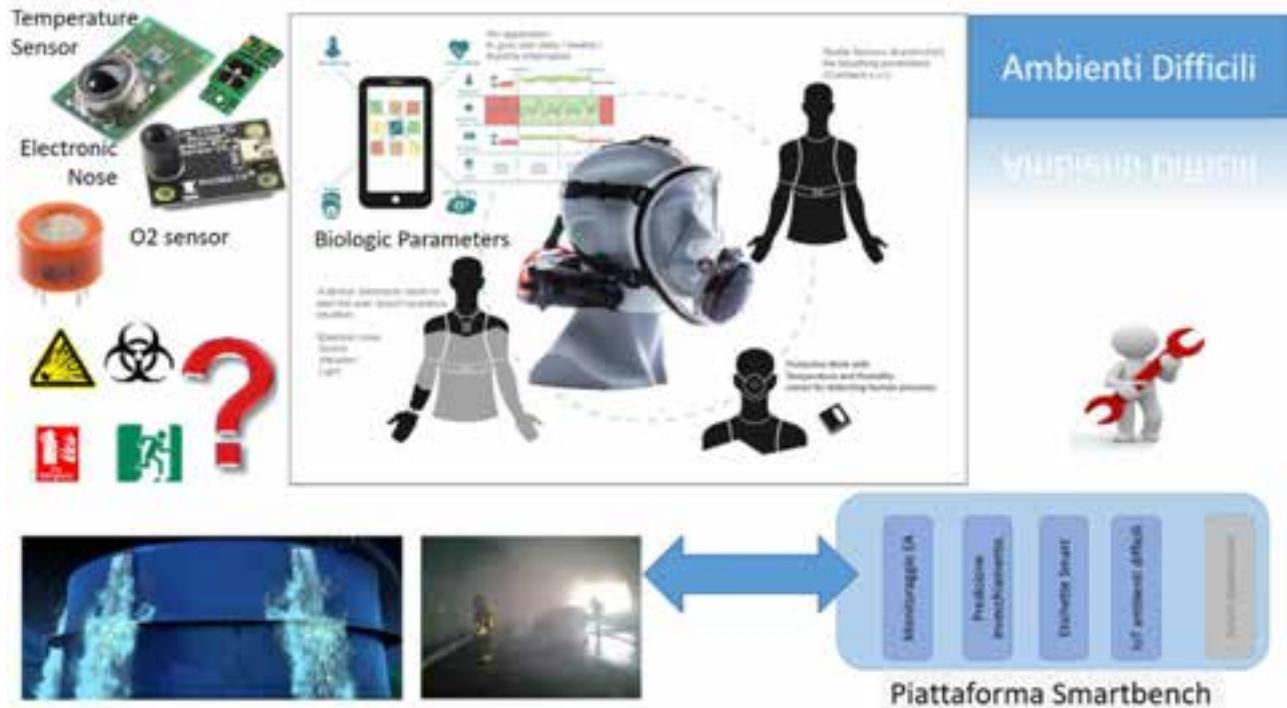


Figura 8. IoT in ambienti difficili.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da Inail nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

Bibliografia

- [1] AA. VV. SmartBench: quando la sicurezza negli stabilimenti industriali diventa Smart. Analisi e Calcolo. N. 86. Maggio/Giugno 2018
- [2] Agnello P, Ansaldi S, Bragatto PA Applicabilità delle tecnologie Smart per la gestione dell'integrità delle attrezzature negli impianti di processo SAFAP 2016 11-15 novembre Milano © INAIL ISBN 978-88-7484-520-0
- [3] Pazienza M. T., Stellato A., Henriksen L., Paggio P., Zanzotto F.M. Ontology Mapping to support ontology-based question answering. Proceedings of the 2nd Meaning Workshop, 2005.
- [4] Perelli A., De Marchi L., Marzani A., Speciale N. Acoustic emissions localization in plates with dispersion and reverberations by using sparse PZT sensors in passive mode. Smart Materials and Structures, 21, 2012, 025010 (10 pp).
- [5] Augugliaro G., De Petris C., Di Mambro S., Brutti C., Biancolini M.E. Valutazione dell'integrità strutturale di piccoli serbatoi GPL basata sull'interpretazione di dati di prova di Emissione Acustica con tecnica frattale. In: SAFAP 2010 - Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione, Venezia, Maggio 2010.
- [6] Biancolini M.E., Brutti C., Paparo G., Zanini A. Fatigue cracks nucleation on steel, acoustic emission and fractal analysis. International Journal of Fatigue, 2006, vol. 28, n 12, p. 1820-1825, ISSN: 0142-1123

- [7] Testoni N., Aguzzi C., Arditi V., Zonzini F., De Marchi L., Marzani A., Salmon Cinotti T. A sensor network with embedded data processing and data-to-cloud capabilities for vibration based real-time SHM (in press Journal of Sensors May 2018).
- [8] Acciarito S., Cardarilli G.C., Di Nunzio L., Fazzolari R., Re M. A Wireless Sensor Node Based on Microbial Fuel Cell. Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society: APPLEPIES 2015, 2017, pages 143-150, Springer International Publishing.
- [9] Andriulo S., Gnoni M.G. Measuring the effectiveness of a near-miss management system: An application in an automotive firm supplier. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132, 154-162
- [10] Gnoni M. G., Lettera G., Rollo A. A feasibility study of a RFID traceability system in municipal solid waste management. International Journal of Information Technology and Management, 2013, 12(1), 27-38.
- [11] Milazzo M.F. On the importance of managerial and organisational variables in the Quantitative Risk Assessment. Journal of Applied Engineering Science, 2016, vol. 14(1), p. 54-60.
- [12] Vianello C., Milazzo M.F., Guerrini L., Mura A., Maschio G. A risk-based tool to support the inspection management in chemical plants. Journal of Loss Prevention in The Process Industries, 2016, vol. 41, p. 154-168, ISSN: 0950-4230.
- [13] De Cillis F., Faramondi L., Inderst F., Marsella S., Marzoli M., Pascucci F., Setola R. Hybrid Indoor Positioning System for First Responders. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017.
- [14] De Cillis F., Inderst F., Pascucci F., Setola R., Tesei M., Bragatto P. Improving the Safety and the Operational Efficiency of Emergency Operators via On Field Situational Awareness. Chemical Engineering, 2016, 53.

Analisi dell'invecchiamento delle attrezzature e degli impianti negli Stabilimenti "Seveso": la valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione nell'attività istruttoria di valutazione dei rapporti di sicurezza negli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna

G.A. Zuccarello¹, A. Lambertini²

¹ Inail - Uot di Bologna

² Arpae Emilia Romagna CTR-RIR

Sommario

Negli ultimi anni, gli sviluppi nelle conoscenze dei meccanismi di degrado, la diffusione delle tecniche per i Controlli non distruttivi (CND), l'applicazione di metodologie di pianificazione delle ispezioni basata sul rischio (RBI) e delle tecniche di valutazione del Fitness-For-Service (FFS), combinata con la necessità di mantenere in esercizio apparecchiature assai datate, sta indirizzando sempre più i Gestori degli Stabilimenti verso una prospettiva di conservazione nel tempo delle apparecchiature esistenti, basata su un processo di gestione proattiva dell'invecchiamento.

Scopo del presente lavoro è quello di fornire, partendo dalle esperienze acquisite nelle valutazioni dei Rapporti di Sicurezza e dall'esame di alcuni casi reali di gestione dell'invecchiamento per alcuni Stabilimenti RIR ubicati in Emilia Romagna, una serie di indicazioni utili per poter analizzare tale tematica già in fase di Istruttoria ex. d.lgs. 105/2015. Le stesse possono costituire, infatti, un valido supporto per la rivalutazione degli scenari incidentali nell'ambito di un'analisi di rischio di tipo dinamico, e per l'individuazione di misure di carattere impiantistico e gestionale, in modo da esercitare un'azione sinergica e integrata con le attività di verifica da svolgere nel corso delle Istruttorie di valutazione dei Rapporti di Sicurezza e delle Ispezioni SGS-PIR, per le quali è stato recentemente proposto un metodo per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature, elaborato dal Gruppo di Lavoro istituito dal Coordinamento per l'uniforme applicazione della direttiva Seveso III di cui all'art. 11 d.lgs. 105/2015.

1. Introduzione

La necessità di gestire l'invecchiamento di strutture ed attrezzature degli impianti non è una problematica nuova.

Mentre per alcune attività industriali, però, l'invecchiamento può essere considerato come un processo naturale che viene gestito attraverso la sostituzione del componente in caso di guasto o rottura, nei settori ad alto rischio, come impianti nucleari e Stabilimenti a rischio di incidente rilevante, dove il fallimento dei sistemi deve essere necessariamente minimizzato, tale approccio non si può ritenere accettabile.

Alla fine degli anni '90 l'Autorità internazionale per l'energia atomica aveva pubblicato una serie di guide per la gestione dell'invecchiamento di diversi componenti nucleari. Nel Regno Unito, il rapporto di ricerca HSE 509 del 2006 [1] per le industrie di processo ha cambiato l'approccio alla gestione dell'invecchiamento degli impianti, che è diventata un'attività a carattere multidisciplinare, facente parte di un processo più ampio di mantenimento dell'integrità delle risorse, al fine di garantire nel tempo i livelli richiesti di funzionalità e affidabilità. L'American Petroleum Institute ha dato un forte impulso alla metodologia della "Risk Based Inspection" (RBI), che ha portato alla pubblicazione delle API 580 [2] e API RP581 [3].

Negli ultimi anni, la diffusione e l'evoluzione tecnologica delle tecniche per i Controlli non distruttivi (CND) ha consentito l'introduzione di nuove tecniche quali le Correnti indotte (ET), l'Emissione Acustica (AT), la Termografia (TT), l'utilizzo delle tecniche di valutazione di idoneità al servizio (FFS - Fitness-For-Service) [4]. I conseguenti sviluppi nelle conoscenze dei meccanismi di degrado, basati sull'esperienza operativa e sull'analisi di guasti e incidenti, combinati con la necessità di mantenere in esercizio apparecchiature datate causata anche da una riduzione degli investimenti per nuovi impianti in anni di crisi economica internazionale, ha supportato sempre più i Gestori degli Stabilimenti nella conservazione nel tempo delle apparecchiature esistenti, attraverso la gestione proattiva dell'invecchiamento [5].

2. La valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli Stabilimenti Seveso

Nel d.lgs. 105/2015, decreto di recepimento della direttiva 2012/18/UE o Seveso III, tra gli aspetti da trattare nell'ambito del sistema di gestione per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR), all'interno del controllo operativo (*Allegato B al suddetto decreto, §3.4.4.e Punto 4 della lista di riscontro Appendice 3 dell'Allegato H – “Lista di riscontro per le Ispezioni del SGS-PIR”*), è stata esplicitata la necessità di gestire il rischio associato all'invecchiamento ed alla corrosione degli impianti. In particolare, il Gestore ha l'obbligo di predisporre un piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature ed impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, compresa l'individuazione delle necessarie misure correttive e preventive.

Le attività di identificazione dei pericoli e la valutazione dei rischi di incidente rilevante devono essere aggiornate periodicamente, in occasione di modifiche ai sensi dell'art. 18 del d.lgs.105/2015 e qualora intervengano nuove conoscenze tecniche in materia di sicurezza, interne o esterne all'organizzazione, anche derivanti dall'esperienza operativa o dall'analisi di incidenti, quasi incidenti e anomalie di funzionamento o dal rilevamento di altri indicatori di invecchiamento di apparecchiature ed impianti.

In considerazione di ciò, il Gruppo di lavoro istituito nell'ambito del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art. 11 del d.lgs. 105/2015 ha ritenuto opportuno fornire uno strumento operativo per valutare, durante l'effettuazione delle Ispezioni ex art. 27 del d.lgs. 105/2015, la complessiva adeguatezza delle attività messe in atto dal Gestore per gestire in modo sicuro il processo d'invecchiamento di apparecchiature e impianti critici.

Con la circolare n. 3467/2018 del 13/03/2018, il Ministero dell'Interno ha comunicato l'adozione dei documenti emessi dal Coordinamento per l'uniforme applicazione a livello Nazionale individuando le *linee di indirizzo* come utili linee guida per il personale impegnato nell'esame dei Rapporti di Sicurezza e nelle Ispezioni SGS-PIR di cui all'Allegato H del d.lgs. 105/2015.

2.1 Le linee di indirizzo

Partendo dall'identificazione dei fattori che contribuiscono all'invecchiamento degli impianti, sia in termini di accelerazione che di riduzione del fenomeno, si è definita una metodologia speditiva per verificare come viene gestito l'invecchiamento degli impianti; tale metodologia può essere applicata sia per un'autovalutazione da parte del Gestore che per la valutazione condotta dalle Commissioni Ispettive incaricate dello svolgimento delle Ispezioni.

Per avere uno strumento operativo specifico è stato sviluppato un metodo ad indici [6] basato su un'analisi di tipo “fishbone” [7], schematizzata attraverso il diagramma rappresentato in Figura 1, finalizzata ad individuare i fattori che hanno un effetto accelerante

sull'invecchiamento ed i fattori che al contrario hanno l'effetto di rallentare od invertire la naturale tendenza all'invecchiamento, traducendosi rispettivamente in penalità (parte superiore del diagramma) e compensazioni (parte inferiore). Dall'applicazione del metodo si ottiene quindi un indice compensato IC, dato dalla somma algebrica delle penalità, assunte di segno negativo, e delle compensazioni, assunte di segno positivo. Pertanto al fine di ottenere un indice compensato IC maggiore di zero le compensazioni devono essere superiori alle penalità; al contrario, un IC di segno negativo è segnale che il sistema deve essere migliorato, introducendo ulteriori misure compensative.

Il punteggio ottenuto nelle specifiche voci permette, inoltre, di comprendere quali ulteriori misure potrebbero essere raccomandate, o se necessario proposte per eventuale prescrizione, in modo da portare il sistema di gestione dell'invecchiamento ad un livello adeguato.

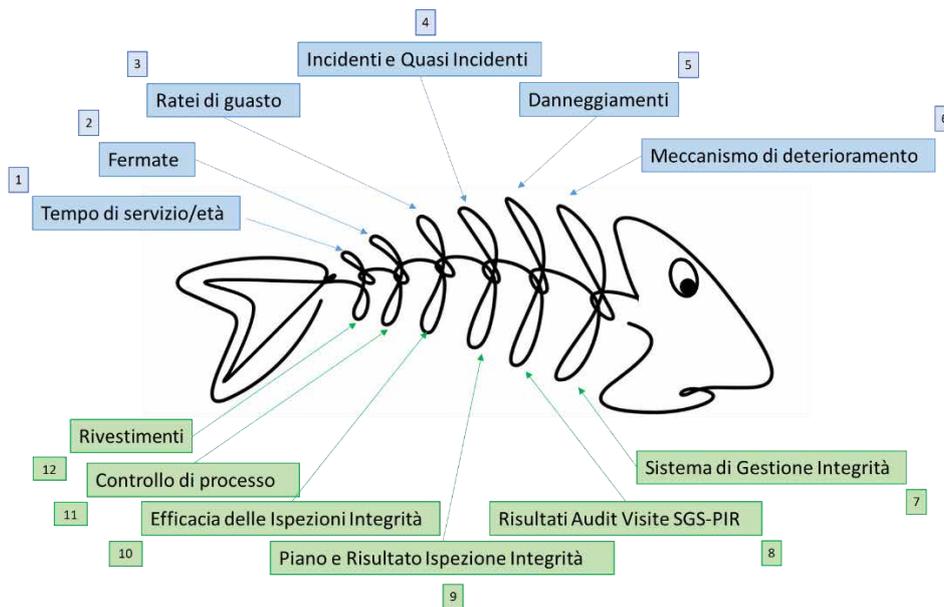


Figura 1. Modello “fishbone” per l’invecchiamento

Secondo HSE, 2010 [8], i diversi sistemi soggetti all'invecchiamento possono essere ricondotti a quattro tipologie di base:

- ✓ Sistemi di contenimento primario (sistemi *statici* e sistemi *rotanti*);
- ✓ Misure di controllo e mitigazione (salvaguardie di processo, sistemi di contenimento secondari o terziari, sistemi antincendio, salvaguardie ambientali esterne);
- ✓ Sistemi di controllo, elettrici e strumentali;
- ✓ Strutture.

Ciò nonostante, *in questa sua prima fase di applicazione*, vengono presi in esame solamente i sistemi di *contenimento primario statici* che contengono sostanze pericolose, inclusi serbatoi a tetto fisso o mobile, tubazioni, reattori, colonne di distillazione, scambiatori di calore, separatori; al contrario, macchine rotanti e sistemi di regolazione meccanici, elettrici ed elettronici non sono direttamente oggetto del metodo. Ai fini della gestione dell'invecchiamento vanno in particolare considerati tutti i sistemi di contenimento (recipienti e linee, in pressione e non), che in esercizio possono contenere sostanze pericolose in quantità sufficienti a determinare uno scenario incidentale, cioè pari o superiori al 5 % della quantità limite prevista alla colonna 3 della parte 1 o alla colonna 3 della parte 2 dell'Allegato 1 del d.lgs. 105/2015.

Diventa quindi essenziale, per poter applicare il metodo efficacemente, avere un elenco

aggiornato delle attrezzature critiche presenti in Stabilimento.

3. Invecchiamento negli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna

3.1 Situazione degli Stabilimenti RIR in esercizio

Complessivamente sono 84 gli Stabilimenti notificati a rischio di incidente rilevante in esercizio in Emilia Romagna alla data del 30 giugno 2018, di cui 52 Stabilimenti di “soglia superiore” e 32 di “soglia inferiore”.

La distribuzione in Regione, come illustrato in Figura 2, non è omogenea: nelle province di Ferrara e Ravenna gli Stabilimenti RIR sono concentrati in 2 poli chimici multi societari, mentre in provincia di Bologna diverse realtà sono distribuite sul territorio provinciale.

Stabilimenti RIR in Emilia Romagna



Figura 2. Distribuzione degli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna

Per quanto riguarda le tipologie di attività, in regione sono presenti prevalentemente stabilimenti chimici e petrolchimici, depositi di GPL, depositi di pesticidi e depositi di prodotti combustibili, in particolare prodotti petroliferi. La distribuzione complessiva è rappresentata in Figura 3: la tipologia di attività è riferita alla numerazione prevista nella sezione A2 punto 5 della notifica presentata dai Gestori ai fini dell'assoggettabilità al d.lgs.105/2015.

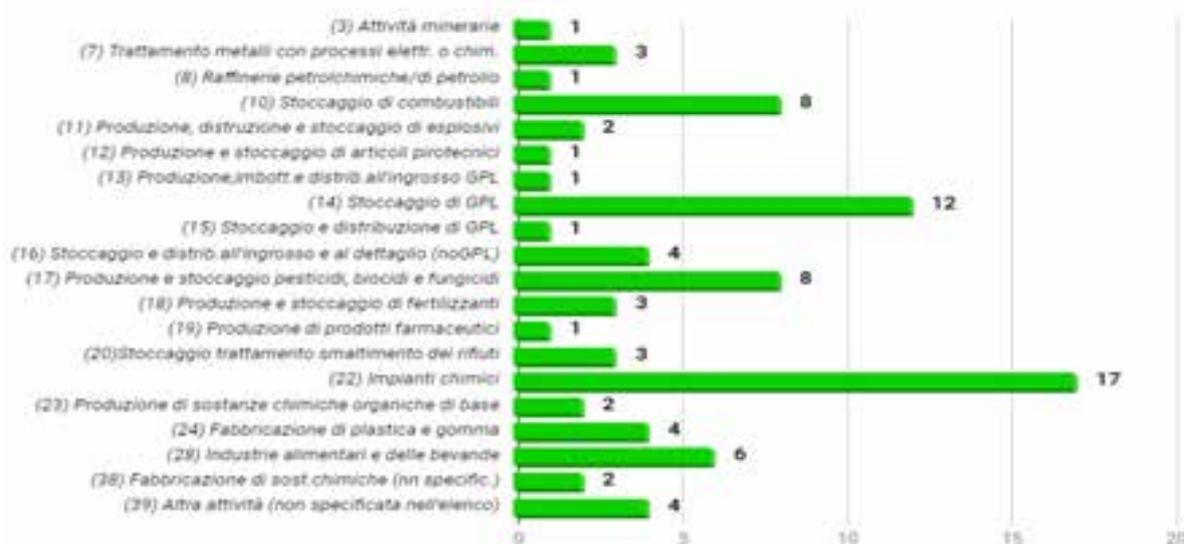


Figura 3. Tipologie di Attività RIR in Emilia Romagna

3.2. Ricognizione dell'età media degli Stabilimenti

E' stata condotta un'indagine storica sulla data di insediamento degli Stabilimenti in Emilia Romagna per fornire un primo indicatore significativo della possibile obsolescenza degli impianti, a meno di revamping o sostituzione di impianti o di singole apparecchiature.

Dal grafico di Figura 4 emerge che più del 60% degli Stabilimenti in esercizio in Emilia Romagna si è insediato prima del 1980 e che circa il 50% risale agli anni '60 e '70.

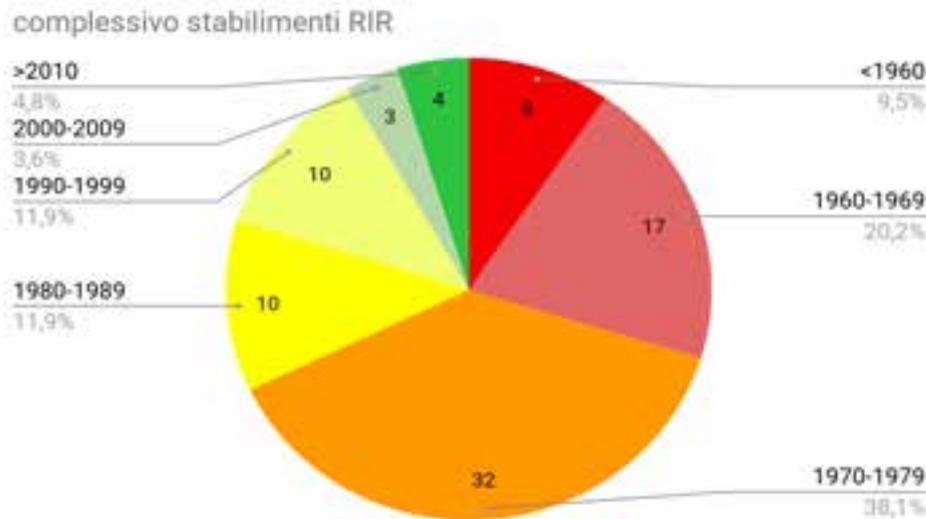


Figura 4. Anno di insediamento degli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna

Focalizzando l'analisi esclusivamente su 65 attività con presenza in esercizio di sistemi di contenimento primari *statici*, escludendo depositi di esplosivi e pirotecnici, aziende galvaniche e magazzini di fitofarmaci o di altri prodotti chimici confezionati, è possibile rappresentare l'età degli Stabilimenti per tipologia di attività

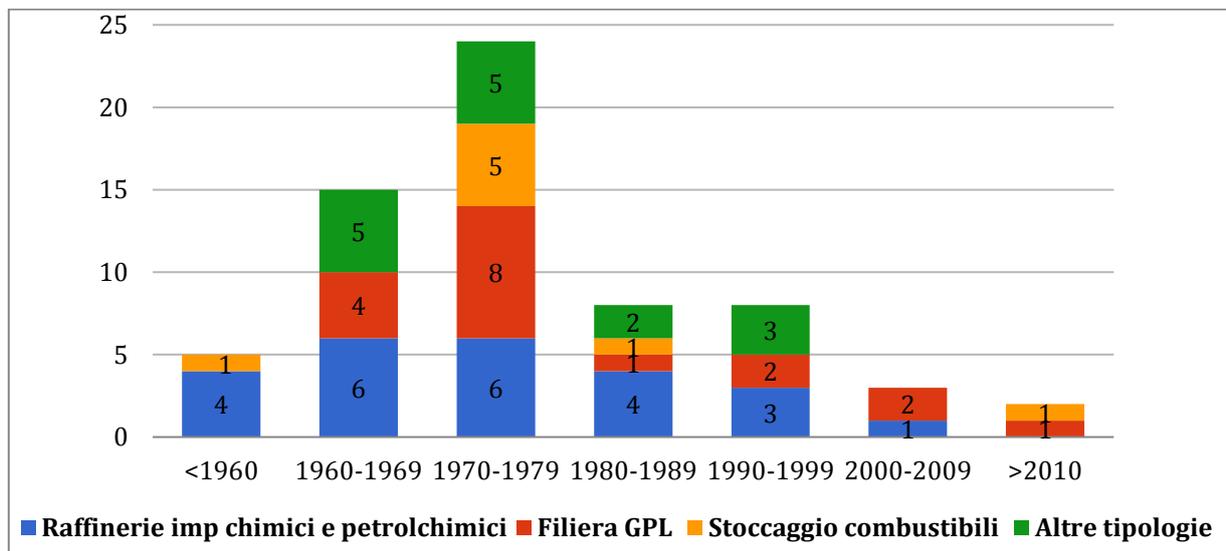


Figura 5. Periodo di insediamento degli Stabilimenti RIR con sistemi di contenimento primari statici per tipologia di attività

Relativamente alla voce "altre tipologie di attività" si è analizzata, caso per caso, l'effettiva presenza in esercizio di sistemi atmosferici o in pressione per il contenimento di sostanze chimiche pericolose in forma liquida o gassosa. Per questa ragione, nell'analisi sono state

incluse attività minerarie, produzione di prodotti farmaceutici, stoccaggio, trattamento e smaltimento dei rifiuti, industrie alimentari e delle bevande (distillerie) e altre attività (servizi industriali e produzione vernici).

Dalla lettura del grafico di Figura 5, emerge una netta prevalenza di impianti realizzati negli anni '70 e comunque quasi il 70% degli impianti esaminati è stato costruito prima degli anni '80.

E' importante sottolineare tuttavia che l'invecchiamento non è connesso esclusivamente all'età dell'apparecchiatura, ma anche a fattori che possono essere causa di danneggiamenti e guasti: modalità di esercizio (comprese fermate, incidenti, quasi incidenti, anomalie di funzionamento) e modifiche che la stessa ha subito nel tempo per eventi esterni (urti, shock termici, etc.) o per esposizione ad uno o più meccanismi di deterioramento (corrosione, fatica, etc.).

4. La gestione adottata dagli Stabilimenti RIR in Emilia Romagna

A seguito dell'entrata in vigore del d.lgs.105/2015 il Comitato Tecnico Regionale - CTR dell'Emilia Romagna aveva iniziato a porre l'attenzione sul tema dell'invecchiamento degli impianti, richiedendo ai Gestori di descrivere l'approccio adottato per la gestione dell'invecchiamento di attrezzature particolarmente critiche, origine di scenari incidentali con conseguenze rilevanti.

In casi specifici sono stati richiesti gli esiti di verifiche effettuate e di controlli non distruttivi utilizzati in occasione dell'ultima verifica di integrità dei serbatoi di stoccaggio, al fine di stabilire l'opportunità di ulteriori valutazioni sull'esercibilità in sicurezza delle attrezzature.

In Emilia Romagna, tuttavia, l'approccio non è ancora sistematico e completo. È generalmente in fase di attuazione la revisione dell'elenco delle attrezzature critiche da parte dei Gestori, fattore essenziale per poter applicare con successo il metodo.

Le linee di indirizzo di cui al paragrafo 2.1, originariamente pensate per consentire una valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento, stanno diventando per i Gestori riferimento per l'implementazione del programma di gestione stesso negli Stabilimenti che finora non hanno affrontato la tematica in maniera esaustiva.

Nelle realtà esaminate nelle quali il percorso è già stato intrapreso, si osserva che le difficoltà maggiori consistono nell'estrapolare le informazioni dai database di manutenzione, in cui spesso i dati sono catalogati e aggregati in maniera diversa rispetto a come occorrerebbe per una efficace gestione dell'invecchiamento delle attrezzature critiche.

In taluni casi si è riscontrato che il Gestore ha optato per la soluzione più conservativa consistente nella sostituzione delle attrezzature maggiormente soggette ad usura (es. bracci di carico, valvole, sistemi di rilevazione...).

Esistono poi realtà, generalmente le più complesse (Stabilimenti chimici e petrolchimici), in cui il programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature è ad uno stadio avanzato di realizzazione. In questi casi i Gestori hanno adottato in partenza metodologie di Ispezione (API 579 - 580 - 581) per verificare che le attività eseguite siano conformi ai requisiti richiesti dagli standard normativi: il rischio di impianto viene gestito concentrando le risorse ispettive sui componenti di impianto a maggiore rischio di avaria, collasso o rottura, assumendo decisioni sulle estensioni percentuali delle ispezioni e dei controlli e sulle tecniche per i Controlli Non Distruttivi, per individuare il danno atteso in funzione dei meccanismi potenzialmente attivi sui singoli componenti. Questo ha portato, in certi casi, i Gestori ad adattare e a personalizzare le metodologie standard in funzione della specificità dello Stabilimento. In alcuni casi, poi, le ispezioni di legge degli apparecchi in pressione vengono gestite dalla funzione aziendale che le organizza in base ai requisiti normativi, mentre una ulteriore apposita funzione ottimizza la frequenza delle ispezioni non di legge: a fronte dell'analisi RBI viene concordato lo scadenziario delle ispezioni necessarie per le attrezzature installate nei diversi impianti, ad esempio anticipando un controllo rispetto al

piano ispettivo. In tali realtà complesse, la gestione delle ispezioni avviene adottando appositi software di gestione aziendale. Per queste realtà, quindi, l'applicazione delle linee di indirizzo potrebbe effettivamente supportare i verificatori, più che il Gestore stesso, nella verifica dell'efficacia della metodica adottata.

Come anticipato al paragrafo 2.1, ai fini della gestione dell'invecchiamento andrebbero considerati tutti i sistemi di contenimento (recipienti e linee, in pressione e non), suscettibili di meccanismi di deterioramento che possono contenere sostanze pericolose in quantitativi sufficienti a determinare uno scenario incidentale, cioè pari o superiori al 5 % della quantità limite prevista alla colonna 3 della parte 1 o alla colonna 3 della parte 2 dell'allegato 1 D.Lgs. 105/2015. Nella sua pratica applicazione, però, specialmente per gli Stabilimenti più complessi e di grande dimensione, l'indicazione data nella linea guida di limitare l'applicazione del metodo ai sistemi di contenimento primari sembra non essere sufficiente a limitare il numero di attrezzature e impianti critici da monitorare ad un valore gestibile nei tempi a disposizione per le attività di Ispezione.

Ciò sta portando i Gestori ad orientarsi verso una ulteriore preliminare scrematura, prevedendo una implementazione del metodo per passi successivi, che includa in questa prima fase di applicazione delle linee di indirizzo, esclusivamente le attrezzature critiche che possono dare origine agli scenari incidentali principali individuati nel Rapporto di Sicurezza, dando priorità a quegli scenari aventi conseguenze con effetti all'esterno degli Stabilimenti. In questo modo si potrebbe ottenere in tempi brevi una prima valutazione sugli items più significativi, in modo da valutare quanto prima azioni mirate in caso di criticità; l'analisi andrà comunque progressivamente estesa a tutte le apparecchiature critiche individuate.

4.1. Caso studio applicativo su uno Stabilimento del polo di Ravenna

A mero titolo di esempio si riporta un caso di prima applicazione delle linee di indirizzo ad uno Stabilimento ubicato all'interno del polo chimico multi societario ex Enichem di Ravenna, che per estensione e complessità è l'area a maggior concentrazione di stabilimenti RIR dell'Emilia Romagna.



Figura 6. Polo Chimico multi societario di Ravenna

Lo stabilimento oggetto del caso studio è Ravenna Servizi Industriali (R.S.I.), società consortile incaricata della gestione dei servizi comuni all'interno del sito multi societario di Ravenna.

4.1.1. Le attività dello Stabilimento

La società svolge attività operative e attività di servizio all'interno del sito. Le principali attività riassunte in Tabella 1 sono individuate anche nella planimetria di Figura 7.

Attività operative	
▪	Gestione "Piperack" Generale di sito (PRG) per il supporto delle tubazioni di trasferimento di sostanze pericolose e fluidi di servizio tra parco generale serbatoi di stoccaggio e impianti utilizzatori o di collegamento tra impianti delle varie società ubicate all'interno del polo (Interconnecting);
▪	Produzione acque e distribuzione fluidi (acqua demi, zeolitica, antincendio,...);
▪	Gestione utilities, stazione e sottostazioni di riduzione metano;
▪	Servizio di vigilanza, guardiania e gestione degli ingressi al polo;
▪	Gestione del sistema di torce e del sistema fognario di sito;
▪	Servizio di pronto intervento per interventi di emergenza; conduzione e manutenzione della rete idrica antincendio, verifica e controllo degli impianti e attrezzature antincendio
▪	Servizio di primo soccorso;
▪	Presidio del tecnico di turno, punto di riferimento per la gestione delle comunicazioni durante le emergenze
Attività di servizio	
▪	Piattaforma ambientale: Gestione della rete di rilevamento dell'inquinamento atmosferico, campionamento e analisi dei piezometri per monitoraggio falda, controlli sul sistema fognario, gestione rifiuti...
▪	Formazione per gli addetti antincendio e primo soccorso per le Società del polo.
▪	Gestione delle aree comuni (strade, piazzali, muro di cinta, mensa, ...)

Tabella 1. Attività dello Stabilimento RSI all'interno del Polo Chimico di Ravenna

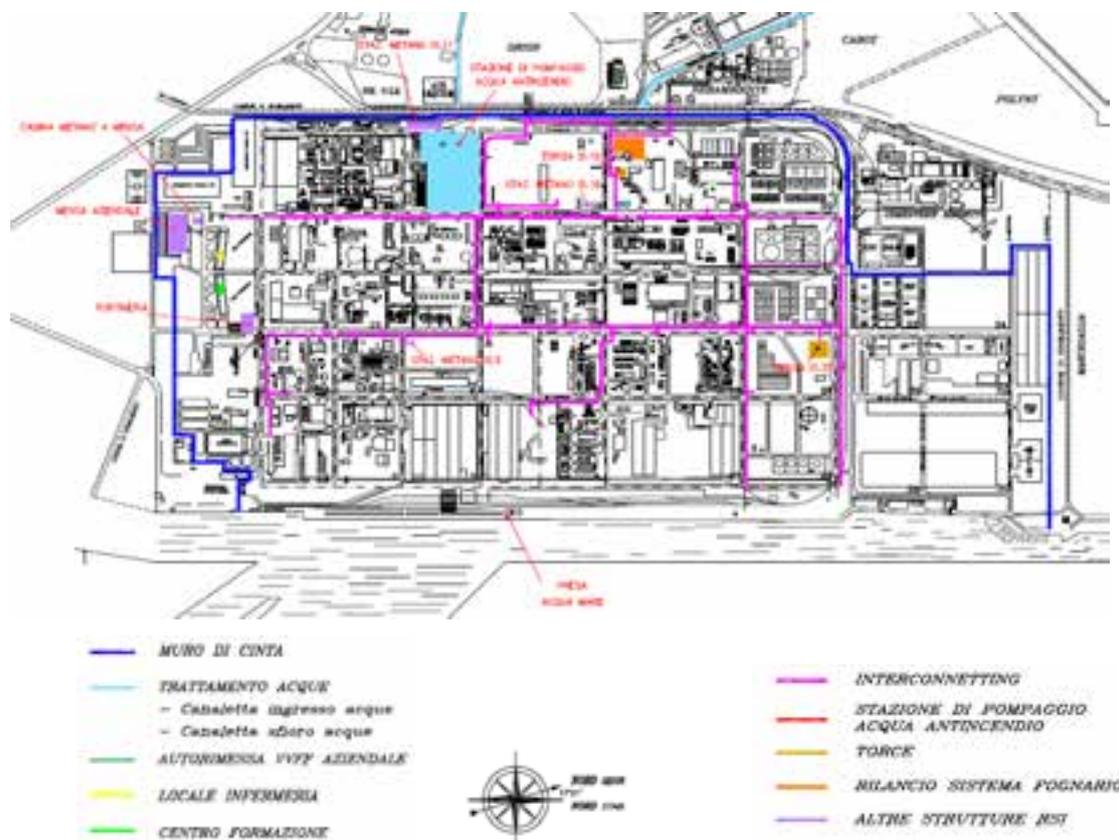


Figura 7. Planimetria dello stabilimento con individuazione delle principali attività

4.1.2. L'Analisi di Rischio

Per quanto concerne l'analisi di rischio, dalla valutazione effettuata dal Gestore è emerso che gli eventi prevedibili sono relativi a perdite da valvola o da accoppiamento flangiato delle tubazioni di trasferimento delle sostanze pericolose posizionate su Piperack generale di sito. L'individuazione degli eventi incidentali è stata effettuata in due fasi:

- ✓ FASE 1 – Identificazione delle sostanze di riferimento in funzione della pericolosità, stato fisico e quantità, condizioni di esercizio e diametro della tubazione;
- ✓ FASE 2 – Mappatura del Piperack al fine di verificare la distribuzione spaziale delle sostanze di riferimento identificate in fase 1, con l'obiettivo di individuare l'origine dei "Top Events".

Su richiesta del CTR l'analisi di rischio è stata estesa, oltre che ad Acrilonitrile, Ammoniaca e miscela C4 (GPL/butadiene), anche alle seguenti sostanze di riferimento: Isoprene, Cicloesano, Acetato di Vinil Monomero e Stirene, estendendo così il campo di applicazione per l'analisi storica riferita agli ultimi 10 anni, l'applicazione del metodo ad indici e l'individuazione dei "Top Events".

L'analisi storica è stata condotta tramite ricerca su banca dati eMARS "European Major Accident Reporting System" di eventi incidentali di rilascio delle sostanze precedentemente elencate. Dall'analisi dell'esperienza storica interna di Stabilimento è emerso che gli eventi e quasi incidenti più frequenti riguardavano:

- *Fori su tubazioni causa corrosione.* Ad oggi vengono eseguiti dei controlli non distruttivi di tipo visivo, spessimetrico con ultrasuoni o radiografico, focalizzandosi su punti critici, quali ad esempio appoggi, curve e saldature. La società sta valutando l'eventualità di introdurre altre modalità per i controlli.
- *Urti* dovuti ad errore di manovra da parte del conducente di un mezzo: sono stati introdotti nei punti critici apposite barriere che impediscono che gli automezzi urtino il "Piperack", ed è stata aggiornata la procedura di accesso e circolazione degli stessi. A seguito di tali interventi tecnici e gestionali tale evento incidentale non si è più verificato.

4.1.3. Piani di Ispezione e CND

Gli item inseriti nei Piani di Ispezione sono stati suddivisi nelle seguenti categorie:

- ✓ Item soggetti a verifiche di Legge: Apparecchi a pressione, Linee a pressione soggette al d.m. 329/2004, Linee soggette al d.lgs. 105/2015, Organi di protezione di apparecchi a pressione.
- ✓ Apparecchi e linee rilevanti per aspetti di qualità, sicurezza e ambiente.

In particolare le linee di proprietà RSI o in gestione a RSI contenenti fluidi pericolosi ai sensi del D.Lgs. 105/2015, sono sottoposte a controllo, secondo Piani di Ispezione interni, in quanto inserite nel Rapporto di Sicurezza. I Piani di Ispezione e le frequenze di controllo sono definite basandosi su:

- ✓ Classificazione delle linee in base alla pericolosità del fluido contenuto;
- ✓ Conoscenza del rateo di corrosione generalizzata (quando noto);
- ✓ Analisi dei meccanismi di danno;
- ✓ Analisi dei risultati delle precedenti ispezioni.

Le verifiche vengono effettuate ad opera di personale specializzato di Impresa terza, tramite uno o più dei seguenti CND: UT Controllo con Ultrasuoni; RT Controllo con Sorgenti Radianti; PT Controllo con Liquidi Penetranti; MT Controllo con Particelle Magnetiche; VT Controllo Visivo; ET Controllo con Correnti Indotte. In concomitanza con le verifiche periodiche, si esegue la prova di taratura degli organi di protezione.

La periodicità dei controlli viene stabilita in funzione dei seguenti criteri:

- Classificazione del servizio;
- Calcolo della velocità di corrosione e della vita residua;
- Giudizio dell'ispettore dopo ogni controllo.

In particolare, la velocità di corrosione (in mm/anno) si ricava prendendo il più alto tra i seguenti valori:

Velocità di corrosione nel lungo periodo (1)

$$\frac{\text{spessore iniziale} - \text{ultimo spessore}}{\text{tempo (anni) tra ispez. iniziale e ultima ispez.}} \quad (1)$$

Velocità di corrosione nel breve periodo (2)

$$\frac{\text{spessore precedente} - \text{ultimo spessore}}{\text{tempo (anni) tra ispez. precedente e ultima ispez.}} \quad (2)$$

In mancanza del dato di spessore iniziale, si considera la differenza tra spessore nominale da specifica e la tolleranza di fabbricazione.

Dal controllo spessimetrico, prendendo come riferimento la specifica tecnica della società, si verifica se i valori di spessore rilevati risultano superiori o uguali al valore nominale previsto dalla specifica di linea nella totalità delle sezioni controllate. Se lo stato di conservazione permane buono, il controllo successivo potrà essere eseguito alla cadenza periodica regolare, prevista dal piano.

4.1.4. Valutazione sintetica: l'adeguatezza del programma di gestione invecchiamento

In questo specifico caso, tenuto conto dell'elevato numero di tubazioni facenti parte dello stabilimento, si è deciso di applicare le linee di indirizzo alle attrezzature da cui possono originarsi gli scenari incidentali di maggior impatto individuati nel Rapporto di Sicurezza.

Linea	Sostanza	Diametro	Lunghezza	Pressione di esercizio
ACN_6	Acrilonitrile	2"	1202 m	6 bar
NH3_2	Ammoniaca	4"	1530 m	25 bar
MIX_1	Miscela C4	6"	1606 m	6 bar
AVM_2	Acetato di vinile Monomero	6"	1137 m	5,5 bar
C6_1	Cicloesano	3"	455 m	6 bar
ISO_2	Isoprene	4"	280 m	9,7 bar
STE_3	Stirene	2"	797 m	8 bar

Tabella 2. Tubazioni verificate applicando le linee di indirizzo

Si precisa che i valori adottati sono da intendersi derivati dall'esperienza maturata in qualità di Enti di Controllo in materia di verifica e prova di attrezzature e impianti, e dalla esperienza delle Ispezioni già svolte in applicazione delle Direttive Seveso, utilizzando esclusivamente i dati ricavabili dal Rapporto di Sicurezza e dalla conoscenza dello stabilimento in esame. Come si evince dalla Tabella 3, l'Indice Compensato IC, dato dalla somma algebrica di Penalità e Compensazioni, risulta positivo, per cui non occorre che il sistema venga migliorato attraverso l'adozione di ulteriori misure compensative. Quest'analisi non vuole

certo avere valenza esaustiva, ma rappresentare esclusivamente un esempio pratico di una prima applicazione del metodo. Mancano, infatti, gli approfondimenti riguardanti le oltre 120 linee contenenti sostanze pericolose non ancora oggetto di analoga valutazione, e l'analisi del punteggio ottenuto dai singoli fattori per individuare eventuali misure da raccomandare al Gestore per migliorare ulteriormente il programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature.

Risultato complessivo IC = 0,60			
Fattori acceleranti		Fattori frenanti	
Età	1,00	Sistema Gestione/ Software	3
Fermate	1,00	Audit	2,00
Guasti	2,00	Risultati Verifiche E Prove	4,00
Near Miss	4	Adeguatezza Controlli	2,71
Rotture	3	Controllo Processo	3
Meccanismi di danno	2,14	Rivestimenti	2,00
Media penalità	2,19	Media compensazioni	2,79

Tabella 3. Elaborazione dei punteggi raccolti e valutazione finale

5. Conclusioni

Nel d.lgs. 105/2015, recepimento della direttiva europea Seveso III, è stata esplicitata la necessità di gestire il rischio associato all'invecchiamento degli impianti. I Gestori, dunque, hanno l'obbligo di predisporre un piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature ed impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, e di individuare le necessarie misure correttive e preventive.

Il Gruppo di lavoro istituito nell'ambito del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art. 11 del d.lgs. 105/2015 ha fornito uno strumento operativo per valutare, durante l'effettuazione delle visite ispettive ex art. 27 del d.lgs. 105/2015, la complessiva adeguatezza delle attività messe in atto dal Gestore per gestire in modo sicuro il processo d'invecchiamento di apparecchiature e impianti critici. Nella prima fase di applicazione delle linee di indirizzo, vengono presi in esame solamente i sistemi di contenimento primari *statici* che contengono sostanze pericolose.

Da un'analisi della gestione adottata dagli Stabilimenti RIR nella regione Emilia Romagna, in cui la ricognizione dell'età media conferma che circa il 50% degli Stabilimenti RIR risale agli anni '60 e '70, è emersa chiaramente l'utilità dell'applicazione delle linee di indirizzo per i Gestori: il metodo ad indici diventa riferimento per l'implementazione del programma di gestione nei molti Stabilimenti che finora non hanno affrontato la tematica in maniera esaustiva. Da ciò e dalla constatazione dell'utilità dell'applicazione delle linee di indirizzo già in fase di Istruttoria, deriva la proposta formulata al CTR Emilia Romagna di inserire già nel Parere Tecnico Conclusivo per gli Stabilimenti interessati, una prescrizione di carattere generale al fine di garantire l'adozione e l'attuazione di un apposito piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti, nell'ambito del SGS-PIR, fornendo così un utile strumento di programmazione e monitoraggio.

È parere degli autori che questo ragionamento possa essere esteso agli Stabilimenti di soglia inferiore in Emilia Romagna, suggerendo al Comitato Tecnico di Valutazione dei Rischi, incaricato dell'istruttoria di valutazione della scheda tecnica predisposta ai sensi della Legge Regionale 26/2003 e s.m.i., di adottare una misura analoga a quella proposta in CTR.

In questo modo si otterrebbe un maggior approfondimento della tematica già in fase di predisposizione dei Rapporti di Sicurezza e delle Schede Tecniche, la cui articolazione discende dal medesimo Allegato C del d.lgs. 105/2015. Tale allegato al momento non prevede esplicitamente, a differenza della lista di riscontro di cui all'Allegato H adottata per le ispezioni, un punto specifico dedicato alla tematica dell'invecchiamento degli impianti, ma è auspicabile che possa essere introdotto in un futuro aggiornamento, inserendo anche un riferimento alla necessità di revisione dell'analisi di rischio nel corso della vita dell'impianto. Ciò consentirebbe già in fase di Istruttoria di effettuare una rivalutazione delle frequenze di accadimento degli eventi incidentali in funzione della variazione dei ratei di guasto conseguente ai meccanismi di degrado individuati e porterebbe i Gestori ad implementare opportune azioni finalizzate al controllo del rischio associato all'invecchiamento di strutture ed attrezzature.

6. Bibliografia

- [1] HSE Health and Safety Executive Research Report RR509 "Plant ageing. Management of equipment containing hazardous fluids or pressure", 2006, London UK
- [2] API, 2016, Risk-Based Inspection RP580, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA
- [3] API, 2016, Risk-Based Inspection Technology RP581, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA
- [4] G. Franceschini, G.A. Zuccarello "I serbatoi di stoccaggio ammoniaca a pressione atmosferica: Fitness For Service, analisi Leak Before Break, selezione di strategie ispettive non intrusive consolidate (UT TOFD e Phased Array) e possibili sviluppi con emissioni acustiche (AT)". SAFAP 2010. Venezia, 13-14 maggio 2010
- [5] G. Franceschini, G.A. Zuccarello "La valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni in un impianto di produzione Ammoniaca ed Urea: un approccio sistematico per l'ispezione e la manutenzione delle apparecchiature a pressione in conformità al DM329 ed introduzione alla Risk Based Inspection", SAFAP 2010. Venezia, 13-14 maggio 2010
- [6] Linee di Indirizzo INAIL ISPRA "Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli Stabilimenti Seveso" (2018)
- [7] P. A. Bragatto, C. Delle Site, A. Faragnoli, M. F. Milazzo "Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso". SAFAP 2016. Milano, 15-16 novembre 2016
- [8] HSE, 2010, Plant Ageing Study – A Summary Guide, Research Report RR823, Health & Safety Executive, London UK

Approccio metodologico di estensione della vita di un GVR oltre quella di progetto

D. Sallustio¹, C. Fossati², S. Larghi³

¹ Inail - Uot di Bari

² Services & Testing Laboratories

³ Nooter/Eriksen

Sommario

Lo sviluppo degli ultimi anni delle tecniche progettuali e costruttive, dei materiali utilizzati nonché delle tecniche di verifica, controllo e diagnostica in esercizio per i Generatori di Vapore a Recupero (GVR) ha reso queste macchine più affidabili nel tempo.

Inoltre la crescente competitività specialmente in ambito energetico ha creato le premesse per una crescente spinta ad utilizzare al meglio queste macchine con una richiesta di aumento delle prestazioni iniziali (specie in termini di flessibilità operativa) e di un prolungamento dell'esercizio oltre la vita di progetto, sempre nel rispetto della affidabilità e della sicurezza, aspetti per i quali i gestori d'impianto sono sempre più sensibili

Si apre, dunque, un nuovo panorama, in cui sono coinvolti l'Ente preposto al controllo e verifica della sicurezza dei GVR, i costruttori, gli specialisti nella valutazione dello stato di "degrado complessivo" di un impianto e del suo possibile ulteriore utilizzo sotto diversi scenari di esercizio futuro.

Nella presente memoria si descrive un approccio metodologico, già utilizzato su diversi impianti, che basandosi su:

- analisi dei parametri di esercizio e censimento dei meccanismi di danno attivi,
- valutazione del degrado complessivo accumulato e valutazione della velocità di accumulo del danno in funzione dei futuri parametri di esercizio ipotizzati,
- controllo delle sollecitazioni derivanti dai transitori termici (passati e/o futuri),
- programmazione dei controlli in esercizio,

consente agli utilizzatori di GVR di aumentare le prestazioni di tali macchine e di prolungarne l'utilizzo oltre la vita di progetto, nel pieno rispetto dei riferimenti legislativi e normativi nel campo della sicurezza.

1. Introduzione

Gli importanti mutamenti caratterizzanti gli ultimi 10 anni del mondo industriale hanno inciso radicalmente su molte delle impostazioni dei gestori di impianti per la produzione di energia elettrica la cui domanda è risultata fortemente influenzata da due fattori:

- La profonda crisi economica che ha ridotto in modo sensibile i consumi energetici modificandone anche gli spettri giornalieri;
- Lo sviluppo di energie alternative caratterizzate da sensibili variazioni di produttività.

Tali mutamenti si sono andati a sommare a quanto avvenuto a partire dagli anni '70/'80 a seguito delle prime crisi petrolifere:

- presa di coscienza che le riserve energetiche non sono infinite né garantite;
- necessità di utilizzare al meglio gli impianti disponibili archiviando la prassi "usa e getta" sino ad allora utilizzata (non dimentichiamo che tutte le normative prevedevano, ed alcune ancora oggi di fatto prevedono, per gli impianti termoelettrici (es. ASME) una vita di progetto di 100.000 ore pari a 11,5 anni);
- conseguente sviluppo di tecniche/metodologie per individuare e quindi valutare lo "stato di salute" di un impianto, introducendo il concetto di "vita residua" di un impianto.

Il risultato complessivo ha condotto ad un nuovo approccio ove gli impianti possano essere utilizzati in modo *più elastico*, rispetto al modello “classico” della caldaia che si ferma poche volte nell’anno con una produzione più o meno costante e con eventuali lievi variazioni nella giornata.

Tale approccio è iniziato già almeno 25 anni fa con la crescente richiesta di una nuova tipologia di impianti costituiti dall’abbinamento di due componenti: un turbogas ed a valle una caldaia che oggi tutti conosciamo come GVR che, come fonte di calore, utilizza i fumi di scarico del turbogas.

Tali cicli combinati consentono di ottenere un rendimento molto più alto rispetto agli impianti tradizionali (oggi si può superare il 60%) e maggior flessibilità d’uso.

2. La situazione attuale in Italia

Per gli impianti esistenti entrati in servizio all’inizio degli anni 2000 e già orientati verso l’ottimizzazione delle risorse, le caratteristiche “funzionali” erano le seguenti:

- progettazione secondo le norme “standard” e quindi vita di progetto 100.000 ore
- tempo di avviamento del turbogas: piena produzione in poco più di un’ora
- tempo di avviamento della parte a vapore, nel caso di partenza da freddo, di poche ore.

Di certo si tratta di prestazioni “straordinarie” rispetto alle caldaie tradizionali che, però oggi non sono più ottimali, in quanto:

- a. I tempi di preavviso per fornire energia alla rete elettrica sono sempre più stretti; e per ridurre i costi di combustibile si rende necessario l’abbassamento del minimo tecnico e/o disporre di un impianto che entri in piena produzione nel più breve tempo possibile;
- b. l’aumento di sensibilità dei gestori degli impianti nei confronti della sicurezza e dell’affidabilità, dei costi di manutenzione e di quelli di riparazione/sostituzione richiede verifiche affidabili sullo “stato di salute” dell’impianto.
- c. la programmazione economica è diventata fondamentale nella nuova filosofia di gestione.

Le richieste avanzate oggi ai costruttori di GVR sono, dunque:

- prolungare il più possibile la vita degli impianti esistenti
- rendere il più possibile flessibili gli impianti esistenti

con garanzie sulla affidabilità della previsione/valutazione sull’utilizzo temporale dell’impianto e a quali condizioni.

Per questo motivo i principali costruttori di GVR hanno dedicato a questo problema la massima attenzione confrontandosi da un lato con le autorità di controllo (garanti di un esercizio secondo legge) e dall’altro con esperti di materiali, conducendo la valutazione del danno negli impianti industriali con lo scopo di mettere a punto una metodologia in grado di soddisfare i gestori di impianti.

Nel seguito verranno tracciati presupposti e linee principali di tale metodologia.

3. La determinazione del danno

Si definisce “vita” di un componente il tempo di esercizio tra la sua prima messa in servizio e la sua messa fuori servizio perché non più idoneo/sicuro.

È determinata dal bilancio fra i fattori che concorrono a determinare quantità e velocità di accumulo del danno. Nelle figure seguenti (Fig. 1 e Fig. 2) sono riportati schematicamente i più importanti tra i fattori che incidono, positivamente o negativamente, sulla vita effettiva di un impianto generico e quindi anche di un GVR.

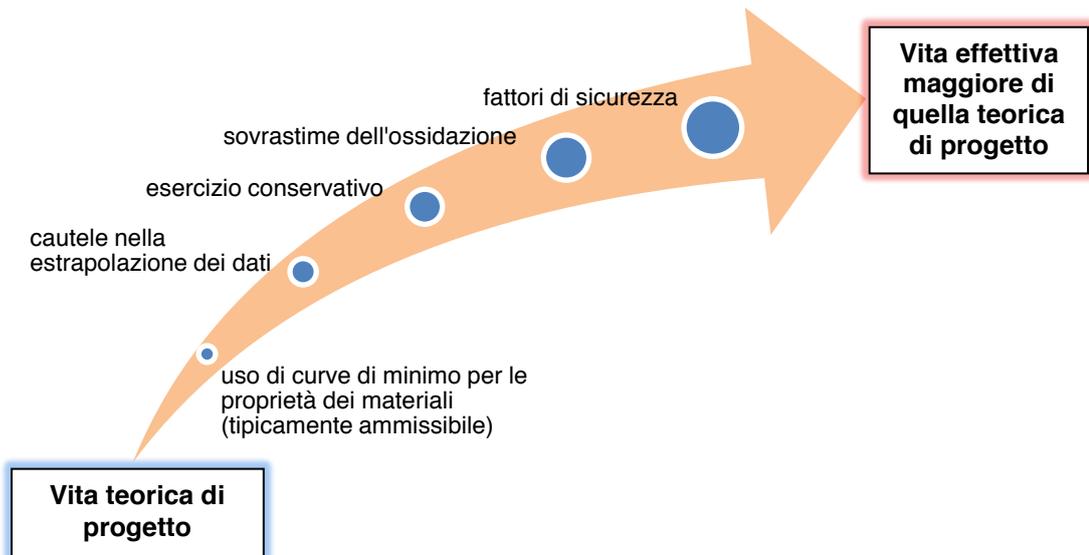


Figura 1. Fattori che influenzano positivamente la vita effettiva di un impianto

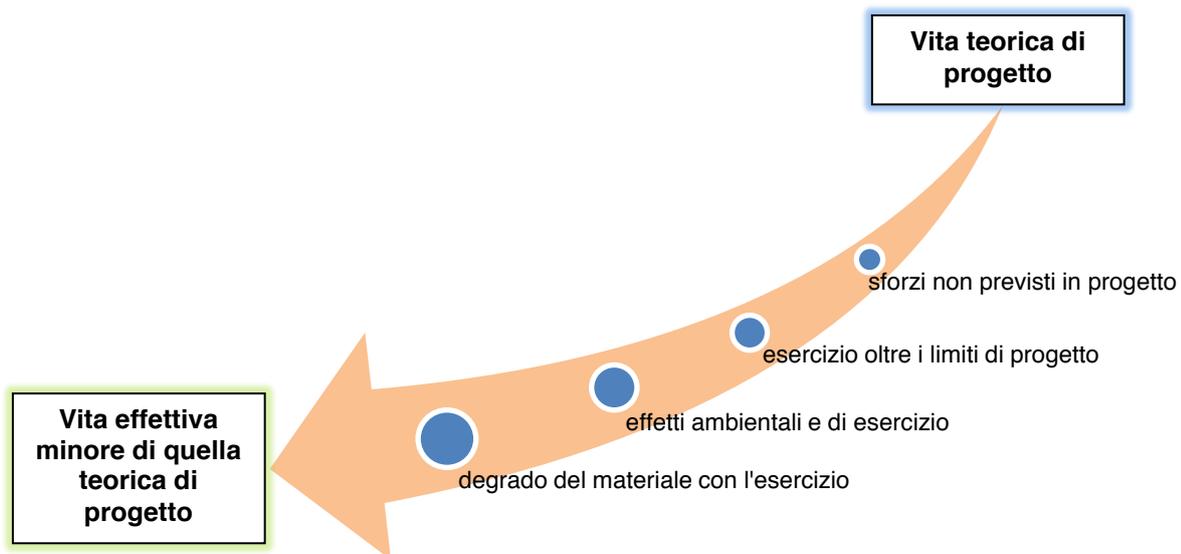


Figura 2. Fattori che influenzano negativamente la vita effettiva di un impianto

Da quanto esposto si deduce che valutare correttamente l'ammontare del danno accumulato, la frazione di vita spesa e la vita residua (vita dell'impianto meno vita spesa) a parità di parametri di esercizio o meno richiede un approccio multidisciplinare caratterizzato da:

- o familiarità con l'impianto (conoscenza di zone critiche e tipi di danno prevalenti);
- o definizione di scale di priorità e criteri di criticità per regolare su basi di sicurezza gli interventi di sorveglianza, manutenzione, riparazione e sostituzione;
- o metodi di calcolo dedicati (stress analysis e modelli di evoluzione del danno);
- o tecniche sperimentali idonee a misurare lo stato di degrado direttamente sul materiale del componente.

3.1 Danni tipici nei GVR

I tipi di danno che possono facilmente essere presenti in un GVR sono essenzialmente:

- Danno da *scorrimento viscoso (creep)* strettamente legato alle temperature di esercizio: è sempre presente.
Fissato il tipo di materiale e il funzionamento del GVR, la sua cinetica è fortemente influenzata dalla temperatura del metallo ed è funzione del tempo di impiego a tale temperatura. È di norma il fattore più importante che condiziona la vita del generatore e sulla cui cinetica si può incidere poco.
La sua valutazione può essere fatta in vari modi ma di fatto si utilizzano norme tecniche ASME [1], EN [2], in linea con la relativa Procedura Tecnica emanata dall'ISPESL [3].
- Danno da *fatica termica* dovuta alle variazioni di temperatura nei vari transitori: è sempre presente ma può essere più o meno intenso in funzione della severità dei transitori stessi.
Il suo contributo al danneggiamento complessivo negli ultimi anni è divenuto sempre più rilevante in quanto, per ridurre i tempi di avviamento degli impianti, si tende a rendere sempre più brevi i transitori con conseguenti alti gradienti di temperatura nelle pareti dei vari componenti e, dunque, alte sollecitazioni.
La valutazione di questo danno è più complessa in quanto è necessario determinare la distribuzione di temperature e/o sforzi termici durante il transitorio per calcolarne l'ampiezza di sforzo nei punti più critici (in genere bocchelli). Gli strumenti sono codici f.e.m. e/o formulazioni matematiche.
Le norme ASME [1] e EN [2], queste ultime spesso utilizzate non solo in ambito europeo, forniscono indicazioni a riguardo e sono quindi preferite ad altre che dovrebbero essere validate.
- Danno da *corrosione*: è molto più raro in quanto l'acqua è normalmente controllata. Più frequente la FAC (Flow Accelerated Corrosion) legata al moto turbolento del fluido che passa tipicamente nei banchi di evaporazione ed economizzatori specie di bassa pressione del GVR [4].
Questo tipo di danno è difficile da modellare in quanto dipende da molti fattori a volte sinergici a volte no. La prassi più usata è la valutazione "a posteriori" basata su misure periodiche di spessore nelle zone riconosciute come critiche, che possono essere utilizzate per valutare la velocità di riduzione di spessore. Esistono in letteratura dei dati che possono essere utilizzati per creare un criterio di previsione/valutazione specifico per l'impianto.
- Altri tipi di danno non si possono escludere ma sono in genere legati a particolari situazioni. È necessario, quindi, in ogni caso esaminare con attenzione progetto e condizioni di esercizio per verificarne l'esistenza. Un utile ausilio a riguardo può essere fornito dalla norma UNI 11706:2018 [5] sviluppata presso il CTI (GL 05 "Fatica" - CT 222 "Integrità strutturale degli impianti a pressione") su sollecitazione dell'INAIL.

4. Approccio metodologico applicato ad un caso pratico complesso

4.1 Le richieste del Gestore: il problema

Per illustrare nel modo più completo l'approccio metodologico già utilizzato su diversi impianti, si ipotizza un caso complesso in cui sono presenti tutte le possibili esigenze di un Gestore.

Consideriamo quindi il caso in cui al Fabbricante del GVR venga chiesta la seguente prestazione:

- Valutare la vita spesa dall'impianto sino ad oggi

- Valutare la possibilità di ridurre il più possibile i tempi di ripartenza da freddo, tiepido e caldo
- Aumentare il numero di transitori ammessi
- Non ridurre la vita di progetto dell'impianto cercando di individuare gli eventuali interventi impiantistici necessari per, addirittura, estenderla.

Come si vede immediatamente le richieste del Gestore appaiono concettualmente in contrasto tra loro:

- ✓ Ridurre i tempi dei transitori comporta transitori più ripidi, quindi maggior vita a fatica consumata per ogni ciclo: conseguente riduzione del numero di cicli possibili
- ✓ Prolungare la vita dell'impianto significa ridurre le cinetiche di danno:
 - Difficile ridurre la cinetica del danno da creep che dipende dalle temperature
 - La via parrebbe ridurre la cinetica del danno da fatica.

4.2 Esame del problema

L'approccio metodologico, di seguito descritto, prevede come prima fase un accurato esame del problema utilizzando tutta la documentazione tecnica disponibile dell'impianto.

Come già accennato al paragrafo precedente, spesso la soluzione del problema comporta il raggiungimento di un accettabile equilibrio tra le varie necessità contrapposte.

Il problema deve quindi essere studiato dalle varie componenti tecniche esperte degli ambiti in cui si va ad operare: impiantisti, progettisti, termotecnici, esperti di materiali e di danno.

Devono poi essere valutati due differenti aspetti con cui la soluzione deve necessariamente confrontarsi:

- la fattibilità tecnico/economica
- le conseguenze legate alla legislazione vigente sulle attrezzature a pressione

Di norma, i dati per una valutazione del primo aspetto sono disponibili, per quanto la valutazione possa basarsi su previsioni di utilizzo dell'impianto a medio-lungo termine con tutte le incertezze del caso.

Il secondo è legato alla presenza o meno di piccoli interventi sull'impianto ed investe l'ambito delle regole per la manutenzione, la riparazione e le modifiche delle attrezzature a pressione.

La legislazione vigente è estremamente chiara a riguardo:

- a) Se l'intervento si configura come riparazione/modifica non importante, deve essere presentata dal "Riparatore", all'Ente di controllo, una procedura che attesti la conformità dell'intervento alla normativa del progetto iniziale.
- b) In caso contrario:
 - Se l'impianto è stato realizzato in ambito PED, occorre una ricertificazione della parte su cui si interviene. È richiesto quindi l'intervento di un Organismo Notificato.
 - Se è un "vecchio" impianto ancora non PED occorre certificarlo ex-novo: strada tipicamente complessa e spesso difficilmente percorribile.

In ogni caso il parere preventivo dell'Ente di controllo diventa assolutamente indispensabile. Nel caso del problema in esame ci limiteremo solo alla parte tecnica senza approfondire l'aspetto normativo che deve, comunque, essere sempre tenuto presente.

4.3 Piano operativo

Trattandosi di un'attività complessa è necessario stilare un esteso piano dettagliato che descriva tutte le attività necessarie definendone anche la sequenza temporale. Prima di questo è, comunque, necessario definire in via preliminare se le richieste del Gestore possono essere soddisfatte in tutto o in parte.

Questa azione preliminare, da completare necessariamente in tempi brevi, spetta tipicamente al Fabbricante sulla base della sua esperienza, eventualmente sentiti alcuni esperti del team, e condiziona l'avvio o meno dell'attività. In genere, tale analisi viene effettuata, sulla base di colloqui preliminari, ancora prima della richiesta ufficiale del Gestore.

Nella figura 3 si riporta uno schema a blocchi sintetico del piano operativo anzidetto, con successiva descrizione dettagliata delle varie fasi in esso indicate.

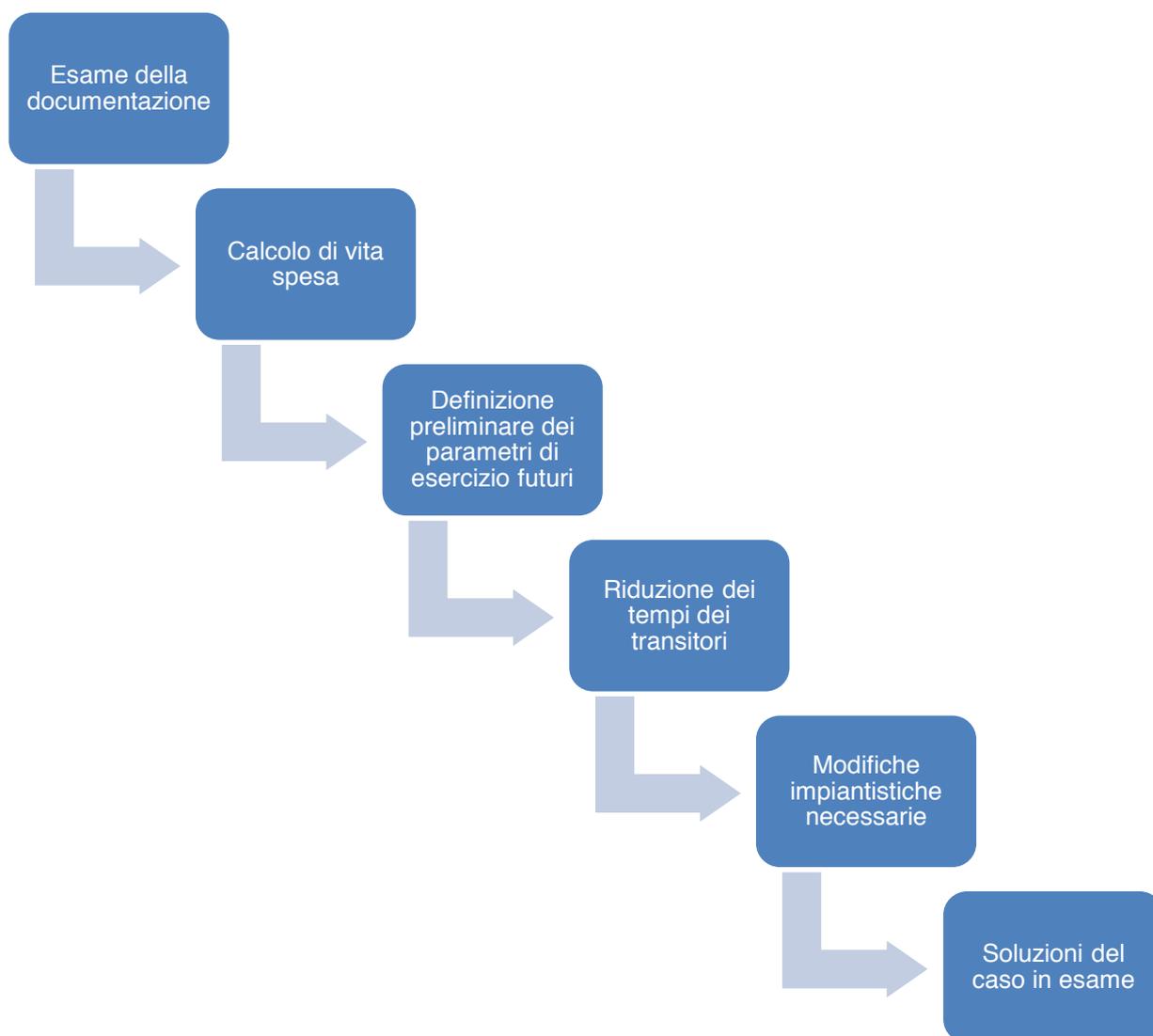


Figura 3. Schema a blocchi del piano operativo

4.3.1 Esame della documentazione

Deve essere reperita tutta la documentazione tecnica disponibile ed in particolare:

- Disegni e calcoli di progetto.
- Storia dell'impianto: manutenzioni (con relativi certificati), riparazioni/modifiche (con relativi calcoli/certificati), risultati delle verifiche periodiche di legge (con relativi Verbali dell'Ente di controllo).
- Registrazioni di temperatura/pressione nel tempo o comunque una relazione del Gestore relativa a questi dati.

I dati storici pressione/temperatura nei transitori consentono di valutare gli sforzi termici conseguenti definendo le "tipologie" di transitorio ed il loro numero.

In genere tutti i GVR hanno termocoppie di misura/controllo ed è quasi sempre possibile accedere almeno alle ultime registrazioni.

Raccolta tutta la documentazione occorre un'attenta analisi di tutti i documenti finalizzata a determinare i seguenti punti.

- Esistenza e posizione di eventuali indicazioni di difetti prodotti da creep, fatica, o altri meccanismi.
- Parametri di esercizio suddivisi, se del caso, in periodi temporali.
- Sulla scorta delle informazioni acquisite, se non sono disponibili risultati di controlli recenti è di norma buona prassi predisporre un piano di controllo mirato al fine di ottenere una fotografia aggiornata dell'impianto. Tale piano viene di norma stilato seguendo lo schema dei precedenti utilizzati (salvo specifiche ragioni per stilare uno diverso).

4.3.2 *Calcolo di vita spesa*

Sulla base dei dati raccolti nella fase precedente ed in particolare delle risultanze degli ultimi controlli eseguiti, si passa al calcolo della frazione di vita spesa dai componenti più significativi: corpi cilindrici, collettori, ed eventualmente tubazioni del vapore sino alla turbina per avere una prima indicazione dello stato dell'impianto.

Il calcolo viene in genere fatto seguendo, per quanto riguarda il *creep*, la Procedura Tecnica dell'ISPESL [3] o la EN12952 [4], e quest'ultima per la *fatica termica*.

Nel caso di presenza di fenomeni tipo corrosione generalizzata o FAC tipicamente viene valutata l'influenza degli assottigliamenti di spessore accumulati e viene fatta una stima della velocità di evoluzione nell'ipotesi di non rimuovere le cause che la producono.

4.3.3 *Definizione preliminare dei parametri di esercizio futuri*

È basata sulle esigenze/richieste del Gestore.

In questa fase, sulla base dell'esperienza del Fabbricante, si valutano le richieste del Gestore e si ricavano i dati di partenza per le analisi successive:

- Entità ritenuta possibile delle riduzioni dei tempi dei transitori;
- Numero degli avviamenti da freddo, tiepido e caldo: Numero/anno e Numero totale.

Si tratta di un'ipotesi preliminare che, nella maggior parte dei casi, viene poi modificata al termine di tutta l'attività ma che è necessaria per avere dei dati di partenza per le analisi successive.

4.3.4 *Riduzione dei tempi dei transitori*

È la parte più complessa che prevede varie sotto-fasi:

- a) Definizione di nuove curve pressione/temperatura per i transitori.
- b) Sulla base di queste curve determinazione dei profili di temperatura nelle pareti dei vari componenti durante i transitori tramite codici f.e.m. Questa attività richiede necessariamente una conoscenza il più esatta possibile delle geometrie dei componenti (disegni di progetto).
- c) Sulla base dei profili di cui al punto b), determinazione della frazione di vita assorbita da ciascun ciclo e calcolo quindi del numero di cicli ammissibili prima di raggiungere il fine vita.
- d) Valutazione dei risultati di cui al punto c):
 - Se i risultati non sono soddisfacenti si riparte dal punto a) con nuove curve.
 - Se i risultati sono soddisfacenti si passa alla progettazione di dettaglio delle eventuali modifiche impiantistiche necessarie per poterli conseguire.

4.3.5 Modifiche impiantistiche necessarie

Come già accennato modifiche impiantistiche sono spesso necessarie per raggiungere lo scopo finale.

Citiamo a titolo d'esempio le seguenti:

- Installazione di attemperatori finali sulle linee del vapore surriscaldato di alta pressione (linea HP SH) e risurriscaldato caldo (linea HRH).
- Flessibilizzazione dei banchi surriscaldatori di alta pressione e risurriscaldatori sostituendone i supporti rigidi con molle.
- Upgrade dei sistemi di drenaggio dei banchi surriscaldatori e risurriscaldatori e delle relative linee vapore.
- Inserimento di una serranda nel camino (stack damper) e coibentazione del condotto d'uscita e del camino fino alla serranda per "imbottigliare" il GVR.
- Mantenimento di temperature/pressioni minime nel lato acqua di caldaia mediante iniezioni di vapore ausiliario (sparging steam) nei banchi evaporatori (tipicamente almeno in quelli di alta pressione).

Si tratta di piccoli interventi dal punto di vista della normativa di legge; alcuni non hanno neppure influenza sulla parte in pressione, per altri l'impatto è pressoché risibile.

4.3.6 Le soluzioni per il caso in esame

Nel caso in esame, a fronte delle esigenze/richieste del Gestore ed alla luce della documentazione esaminata, in particolare delle logiche di esercizio, sono stati individuati i seguenti punti su cui agire:

- i. Riduzione dei tempi di pressurizzazione della caldaia al fine di rendere più flessibile l'impianto ed accelerare i tempi di immissione di potenza sulla rete elettrica.
- ii. Preriscaldamento delle linee del vapore risurriscaldato caldo (linea HRH – da caldaia a turbina) e freddo (linea CRH – da turbina a caldaia) sempre per ridurre i tempi di avviamento, dati i tempi preesistenti di pressurizzazione della media pressione in antitesi con le richieste di flessibilità operativa dell'impianto.

4.3.6.i Riduzione dei tempi di pressurizzazione caldaia

Una parte del tempo di avviamento dell'impianto è legata al tempo di preriscaldamento nonché alla pressurizzazione della caldaia.

In considerazione della modalità operativa dell'impianto, è stata valutata una possibile riduzione del tempo di pressurizzazione evitando il raffreddamento del GVR con i seguenti vantaggi:

- Riduzione del consumo di vita della caldaia
- Aumento dei gradienti di pressurizzazione in quanto in avviamenti da tiepido/caldo sono accettabili gradienti maggiori
- Riduzione quindi dei tempi di avviamento dell'impianto

Sono stati pertanto identificati i seguenti possibili interventi:

- Riduzione delle dispersioni di calore a caldaia spenta attraverso il camino inserendo nello stesso una serranda e coibentando il condotto d'uscita ed il camino fino alla serranda.
- Riscaldamento dell'acqua di caldaia attraverso un sistema ausiliario, prevedendo opportuni attacchi alla base dei banchi evaporatori per iniezioni di vapore di processo disponibile in loco, allo scopo di mantenere i circuiti interessati a temperature e pressioni tali da consentire un avviamento da tiepido. La presenza della serranda al camino, riducendo le dispersioni, consente appunto un consumo ridotto di vapore ausiliario.

4.3.6.ii Riduzione del tempo di riscaldamento linee

La sequenza di avviamento preesistente consente di incrementare il carico del TG solo quando le linee di ammissione in turbina sono riscaldate e le condizioni del vapore sono adeguate per l'ammissione in turbina con le valvole di immissione del vapore completamente aperte e by-pass di turbina completamente chiusi.

Non risultando più tale sequenza idonea alle esigenze operative dell'impianto sono state individuate le seguenti possibili modifiche:

- Installazione di desurriscaldatori finali sulle linee vapore in uscita dalla caldaia da utilizzare solo durante le fasi di avviamento.
- Upgrade dei sistemi di drenaggio delle linee vapore anche a valle degli attemperatori (in conformità alle raccomandazioni ASME) per la raccolta dell'acqua eventualmente non evaporata completamente.
- Riscaldamento delle linee CRH e HRH in parallelo mediante l'ausilio del vapore principale di alta pressione sfruttando il bypass HP SH - CRH preesistente ed una nuova linea di bypass CRH - HRH.

Gli interventi sopra descritti (4.3.6.i e 4.3.6.ii) consentono di ridurre di oltre il 50% i tempi totali di avviamento dell'impianto senza modificare il gradiente della turbina a vapore (soltanto anticipandolo nel tempo) e senza ridurre la vita utile della caldaia.

5. Documentazione di supporto

Terminata la progettazione di dettaglio dell'intervento si passa alla stesura di un documento che, in funzione della complessità dell'intervento, può avere contenuti più o meno complessi. Nello spirito sin qui adottato di descrivere un intervento consistente, si considera la situazione più complessa in cui il documento diventa un "Manuale d'Uso e Manutenzione". Trattandosi di riassumere, sia per il Gestore dell'impianto che per l'Ente di Controllo, le regole per i futuri esercizio e manutenzione, tale documento riveste particolare importanza. Obbligatorio per legge, nel caso l'intervento comporti una ricertificazione PED, è, comunque, un documento necessario.

5.1 Descrizione dell'impianto modificato

È fondamentale per fornire al Gestore dell'impianto una visione completa della nuova configurazione e del nuovo assetto che gli consenta di istruire il personale addetto.

Oltre alla descrizione delle modifiche, non può prescindere (ove applicabili, come nel caso considerato) dalla revisione dei P&ID e degli schemi logico/funzionali dell'impianto.

5.2 Valutazione finale della cinetica di invecchiamento dell'impianto e valutazione degli anni di possibile ulteriore utilizzo nelle nuove condizioni

Si tratta della sintesi dei calcoli di vita effettuati e serve per fornire al Gestore un quadro dell'impatto dei parametri di esercizio sulla vita dell'impianto.

Può essere predisposta in vari modi che sono anche funzione della complessità dell'impianto e della complessità delle modifiche/variazioni apportate.

La forma più semplice è costituita da poche ma esaurienti informazioni che forniscano i valori limiti per l'utilizzo del GVR, come la tabella sotto riportata:

Tipo di transitorio	Tempo minimo (minuti)	Massimi gradienti di temperatura ammessi per i componenti interessati (°C/min)
Partenza da freddo	x	xxx
Partenza da tiepido	y	yyy
Partenza da caldo	z	zzz

La forma più completa è costituita, oltre ai parametri sopra riportati, dalle seguenti informazioni:

- a) Frazione di vita spesa per ogni tipologia di transitorio e per classi di velocità di avvio
- b) Numero di cicli ammessi prima del collasso del GVR per ogni situazione di cui al punto a)
- c) Numero di anni di ulteriore esercizio del GVR per ogni situazione di cui al punto a)

5.3 Aggiornamento dei piani di controllo

Anche questa parte è fortemente condizionata dall'entità dell'intervento effettuato e contiene indicazioni che il Fabbricante ritiene indispensabili per garantire un funzionamento corretto e "sicuro" del GVR "modificato".

In genere si forniscono al Gestore indicazioni aggiuntive a quanto la legislazione vigente e quindi gli Enti di controllo prescrivono.

In particolare, nel caso siano emersi aspetti o punti critici, su questi devono essere date indicazioni su tipo di controlli da eseguire, posizioni dove eseguirli, tempistiche tra due controlli successivi, valori limite dei risultati/esiti dei controlli al superamento dei quali può corrispondere un fermo impianto e comunque una valutazione di stabilità del difetto.

6. Conclusioni

La suddetta descrizione dell'approccio metodologico applicato ad un caso pratico complesso ha evidenziato come la necessità di estendere la vita di un GVR oltre quella di progetto richieda l'intervento delle varie componenti tecniche esperte degli ambiti in cui si va ad operare (impiantisti, progettisti, termotecnici, esperti di materiali e di danno, ente di controllo) che, partendo da uno studio accurato di tutta la documentazione tecnica disponibile dell'impianto, individuano modifiche impiantistiche necessarie e soluzioni legate a logiche di esercizio (ad es. la riduzione dei tempi di pressurizzazione della caldaia e riduzione dei tempi di avviamento con preriscaldamento delle linee vapore HRH e CRH), con il fine di raggiungere un accettabile equilibrio tra le varie necessità del Gestore talvolta in contrapposizione tra loro.

7. Bibliografia

- [1] API 579-1/ASME Fitness For Service
- [2] UNI EN 12952 – Caldaie a tubi d'acqua ed installazioni ausiliarie – Parte 3 – 2012
- [3] ISPESL - Procedura Tecnica su "Verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso dei materiali"
- [4] Dr Otakar Jonas, PE, Jonas Inc: "FAC and cavitation: Identification, assessment, monitoring, prevention" - COMBINED CYCLE JOURNAL, Second Quarter 2004
- [5] UNI 11706 "Attrezzature a pressione - Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali" – 2018.

Monitoraggio e gestione dei meccanismi di deterioramento di attrezzature in pressione attraverso un approccio ontologico

M.F. Milazzo¹, S.M. Ansaldi², P.A. Bragatto², T. Di Condina³, F.M. Zanzotto³

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina

² Inail - Dit

³ Dipartimento di Ingegneria d'Impresa, Università di Roma Tor Vergata

Sommario

Le attrezzature industriali in pressione, destinate al contenimento o alla conversione di sostanze pericolose, e i loro componenti sono soggetti a fenomeni di invecchiamento che, nel corso del tempo, possono influenzare i livelli di sicurezza dell'intero stabilimento in quanto aumentano il rischio di perdita di contenimento e riducono la performance dell'intero impianto. L'invecchiamento si manifesta come una forma generale di degrado del componente, che non è associata solo al tempo in servizio ma alla sua condizione e a come esso cambia nel corso del tempo. I meccanismi più comuni, con cui le attrezzature deteriorano, rappresentano una percentuale significativa di guasti e di sostituzioni di componenti. Tuttavia, il deterioramento si verifica anche a causa di molti altri fattori associati ad aspetti di progettazione, di gestione, etc. La conoscenza dei meccanismi con cui avviene il fenomeno (ovvero delle relazioni "causa-effetto", "condizioni al contorno-velocità di propagazione" ed "identificazione-misura") e delle misure di prevenzione sono utili al fine di monitorare il deterioramento delle attrezzature e di attuare una gestione sicura del fenomeno. In questo articolo, si propone un approccio di esplorazione di tali relazioni basato su una interpretazione ontologica dei meccanismi di deterioramento, con l'obiettivo di supportare il monitoraggio dell'invecchiamento di attrezzature e componenti industriali. Per raggiungere l'obiettivo, l'approccio proposto utilizza i concetti e le relazioni già definite per i più comuni meccanismi, cui sono soggetti le attrezzature, all'interno della pratica americana API 581. Detti meccanismi verranno definiti attraverso dei domini ontologici.

1. Introduzione

La gestione dell'invecchiamento delle attrezzature è un aspetto di grande interesse e attualità, in particolare per le attrezzature destinate al contenimento o alla conversione di sostanze pericolose. La rilevanza di questa problematica è da imputare a due principali fattori: (i) la maggior parte degli impianti in Europa sta raggiungendo l'età limite di funzionamento definita in fase di progettazione; (ii) la Direttiva Seveso III, recepita dal d.lgs. 105/2015, chiede ai gestori di stabilimenti a rischio d'incidente rilevante di adottare un piano di monitoraggio e controllo delle attrezzature per assicurarne un invecchiamento sicuro. L'invecchiamento degli impianti, che si manifesta come una forma generale di deterioramento associato al loro utilizzo [1], è stato identificato in molti casi come causa prima di rilasci di sostanze pericolose e di incidenti rilevanti [2-4]. In generale, il deterioramento rappresenta una percentuale significativa delle cause di guasto o rottura di componenti. Il deterioramento è dovuto a interazioni chimiche e fisiche fra i materiali di cui sono costituiti recipienti e tubazioni, le sostanze chimiche contenute e l'ambiente esterno. I meccanismi di deterioramento possono essere controllati da molti fattori, associati ad aspetti di progettazione, di gestione, etc. [5]. Ai fini della gestione sicura del fenomeno nell'industria chimica e petrolifera, una pratica molto diffusa è l'adozione di uno schema *Risk Based Inspection (RBI)*, fra i quali quello API RP 580 [6]. La RBI si basa sulla conoscenza dei fenomeni di deterioramento concorrenti (che possono essere di tipo fisico e chimico),

dalla gestione delle informazioni relative ad ogni singolo componente e alla sua storia, dalla misurazione appropriata e dall'acquisizione di variabili legate al fenomeno in atto. La conoscenza dei meccanismi con cui si manifesta il fenomeno rappresenta il cuore del processo di gestione; di ognuno occorre conoscere le relazioni tra causa ed effetto, tra condizioni al contorno e velocità di propagazione e tra identificazione del fenomeno e misura effettuata ed infine, un'ulteriore conoscenza indispensabile è quella relativa alle misure di prevenzione, che sono utili al fine di monitorare il deterioramento dell'impianto e attuare la strategia di gestione. Allo stato attuale esiste una conoscenza dettagliata dei meccanismi presenti dell'industria petrolifera, che sono riportati nella documento API RP 571 [7], mentre in altri contesti la conoscenza può non essere completa, in particolare in relazione a nuovi materiali, nuovi processi, etc. Il documento [7] contiene la descrizione dettagliata di almeno 64 meccanismi di deterioramento, la cui conoscenza deve essere trasferita al gestore per una appropriata definizione del piano di gestione dell'invecchiamento. Al fine di trasferire le conoscenze già acquisite sui meccanismi di danno all'interno di un sistema di monitoraggio dell'invecchiamento di attrezzature e componenti industriali, in questo articolo, si propone un approccio che esplora le relazioni sopra menzionate, basandosi su una interpretazione ontologica dei meccanismi di deterioramento.

Le ontologie [8, 9] all'interno del Semantic Web [10] sono una recente tendenza per la rappresentazione sistematica della conoscenza e delle informazioni che può giocare un ruolo relevantissimo nella descrizione coerente dei fenomeni di degradazione. Le ontologie sono un meccanismo che prende spunto da due tradizioni differenti sempre atte a rappresentare in maniera sistematica un dominio conoscitivo: la terminologia da una parte e la logica. La terminologia [11] ha una lunghissima tradizione per la costruzione di dizionari controllati per la realizzazione e il controllo di manufatti complicati. Infatti, si può dire che la terminologia è nata con la prima rivoluzione industriale nella quale le persone si dovevano accordare sul significato delle parole per ottenere dei manufatti "compatibili" tra loro come la costruzione di rotaie e treni compatibili o per scrivere dei manuali per il controllo di oggetti complicati come le centrali termoelettriche. La variazione linguistica incontrollata può infatti generare numerose incomprensioni. L'unione tra la terminologia e la logica ha generato il concetto di ontologie che sono dei manufatti logici utili per il controllo sistematico della conoscenza all'interno di un dominio conoscitivo anche ad uso e consumo di processi di decisione automatica attraverso calcolatori.

Scopo principale del lavoro è collegare i meccanismi di deterioramento ai parametri di monitoraggio dell'apparecchiatura con un approccio ontologico. I meccanismi di danno sono associati alle tipologie di attrezzatura, ai processi ed alle condizioni operative. I sistemi di monitoraggio possono essere strumenti di misura convenzionale, che forniscono dati solo su lunghi intervalli di tempo, o strumenti più innovativi, che forniscono dati in maniera continua. La chiara organizzazione conoscitiva dei due mondi (deterioramento e monitoraggio) permette di sfruttare efficacemente le risorse rese disponibili dagli sviluppi della ricerca nel campo della sensoristica. Questo è importante nella fase progettuale, dove vanno fatte le scelte tecnologiche; ma può anche costituire l'ossatura su cui costituire l'architettura della piattaforma gestionale che in esercizio permette l'integrazione dei sistemi. Il lavoro è strutturato come segue. Nella sezione 2 si descrivono brevemente i criteri di classificazione di meccanismi di deterioramento e di sensori, ovviamente le due classificazioni sono strumentali all'applicazione prettamente ingegneristica che se ne vuol fare, cioè la gestione nel tempo dell'integrità degli impianti. Nella sezione 3 si riporta una descrizione sintetica del caso studio a cui si applicherà il metodo. Nella sezione 4 sono illustrati i risultati e la relativa discussione. Infine, nella sezione 5 si riportano le conclusioni.

2. Metodo

Nel 2018, il Coordinamento Nazionale per l'applicazione della Direttiva Seveso, di cui all'art. 11 d.lgs. 105/2015, ha pubblicato una linea guida per la valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso, come richiesto dal citato decreto (art. 27, allegato H, appendice 3). Il cuore della linea guida è un modello per la valutazione sintetica, denominato *FishBone model*. Esso si basa su: (i) l'identificazione di un certo numero di fattori, che influenzano l'invecchiamento delle attrezzature, (ii) la loro classificazione in fattori acceleranti o ritardanti, in funzione del loro effetto, (iii) l'attribuzione di un punteggio su una scala da 1 a 4 per ogni fattore (negativo per quelli acceleranti e positivo per i frenanti) e (iv) il calcolo dell'indicatore di invecchiamento come media tra i fattori. I fattori identificati dal gruppo di lavoro (GdL) sono:

- *Fattori acceleranti*: l'età di costruzione o le ore di esercizio, il numero di fermate impreviste, i guasti, gli incidenti e i quasi incidenti, i danneggiamenti e i meccanismi di deterioramento;
- *Fattori frenanti*: il sistema di gestione delle ispezioni, gli audit sulla gestione della sicurezza, la pianificazione e i risultati delle ispezioni, l'efficacia e l'appropriatezza delle ispezioni, i sistemi di controllo e i rivestimenti e protezioni specifiche.

La trattazione dei diversi fattori, dei relativi criteri di valutazione e dei punteggi non è obiettivo del presente articolo e si rimanda alla linea guida ed alla letteratura scientifica che documenta lo sforzo fatto dal GdL che ha sviluppato la linea guida [12]. In generali si può dire che i 12 punti considerati, 6 frenanti e 6 acceleranti, coprono vari fattori che comprendono quelli direttamente fisici, fra i quali guasti, danneggiamenti, rivestimenti, sistemi di controllo e quelli più indiretti ma non meno importanti, quali la gestione delle fermate, la pianificazione delle ispezioni, l'analisi dei quasi incidenti, la gestione della sicurezza verificata dagli audit obbligatori. Nel contesto del presente articolo si approfondisce solo il fattore "meccanismi di deterioramento", che fa riferimento ai meccanismi fisici e chimici [7] con cui il fenomeno si manifesta e dei quali il gestore dovrebbe avere una buona conoscenza. I prerequisiti, per valutare questo fattore, sono la conoscenza di tutti i possibili fenomeni e le informazioni esatte sui materiali (passate e presenti) e sulle condizioni operative dell'attrezzatura. Il fattore deriva dalla combinazione di tre sub-fattori principali, cioè la *rilevabilità*, la *velocità di propagazione* e le *conseguenze* causate dal fenomeno all'attrezzatura. Il fattore risultante è la media dei punteggi associati ai singoli sub-fattori, identificati come segue:

- *Rilevabilità* - Il punteggio è più alto quando è più difficile rilevare e misurare gli effetti del fenomeno. Le difficoltà derivano principalmente dalla strumentazione di misura richiesta e dai costi associati, dall'affidabilità e ripetibilità delle misure. Ulteriori difficoltà possono derivare da aspetti organizzativi e metodologici relativi alla misura.
- *Velocità di propagazione* - Essendo i controlli eseguiti a intervalli di tempo fissi, se i fenomeni fisici e chimici sono veloci, c'è la possibilità che essi siano inizialmente invisibili e diventare significativi prima della successiva ispezione. Il punteggio fa riferimento alla scala temporale di evoluzione del fenomeno.
- *Conseguenze* - Il punteggio si assegna facendo riferimento alla pericolosità della sostanza contenuta nell'apparecchiatura e all'entità del rilascio.

Nell'ambito del progetto SmartBench, il *FishBone model* è stato integrato in un sensore virtuale per la valutazione dell'invecchiamento delle attrezzature, basato su modelli di stima del tempo di vita rimanente e della probabilità di guasto. Il modello integrato costituisce il cosiddetto *presensore* (livello 1), che può acquisire dati da una piattaforma di interscambio di dati con altri dispositivi IoT oppure funzionare indipendentemente da essa attraverso inserimento manuale delle informazioni. Il funzionamento del *presensore* in modalità agganciata alla piattaforma richiede che siano *filtrate* le informazioni in essa archiviate, al

fine di acquisire quelle necessarie per l'elaborazione del fattore "meccanismi di danno" da includere nell'indice di invecchiamento. Il tutto è possibile attraverso la descrizione sistematica di ogni meccanismo fornita dalle ontologie specifiche di dominio.

2.1. Classificazione dei meccanismi di danno

I meccanismi di danno delle attrezzature sono numerosi ed esistono diverse classificazioni, a partire dal citato documento API RP 571 [7] e la "pratica raccomandata" API 581 [13], che ha lo scopo di specificare le basi conoscitive e metodologiche per l'applicazione sistematica dell'approccio RBI. Nel documento RR823 [2] dell'HSE (Autorità Competente della Seveso per il Regno Unito) si può trovare una classificazione simile alle API, che appare meno legata alle specificità del mondo petrolifero. La linea guida del GdL per la verifica dei piani di monitoraggio e controllo delle attrezzature li classifica tenendo conto degli effetti sui materiali, sulla base della velocità di propagazione, delle conseguenze del fenomeno e della rilevabilità del fenomeno.

Le classi in questione sono le seguenti:

1. Metallurgico a lungo termine
2. Metallurgico a breve termine
3. Meccanismi di assottigliamento localizzati
4. Meccanismi di assottigliamento uniforme
5. Corrosione dovuta all'ambiente
6. Tensocorrosione con fessurazione
7. Danneggiamento da idrogeno ad alta temperatura
8. Fatica
9. Scorrimento viscoso
10. Corrosione sotto isolamento

2.2. Interpretazione ontologica dei meccanismi di danno

L'ontologia del meccanismo di danno è un'interpretazione semantica del meccanismo stesso, che è stata sviluppata per supportare lo scambio di informazioni tra due sistemi [14], in questo lavoro consente la modellazione del fattore accelerante relativo ai meccanismi di danno. Il primo sistema misura le variabili fisiche e chimiche, associate all'apparecchiatura, mentre il secondo analizza ed elabora le informazioni acquisite per restituire il sopraccitato fattore. I meccanismi di danno descritti in [7] sono stati analizzati per estrarre i concetti e le relazioni pertinenti alla loro gestione. Il metodo che è stato adottato è quello di esaminare il report relativo ad ogni meccanismo di danno, cercando di rispondere ad una sequenza di domande per ciascuno di essi (Tabella 1). Ogni domanda corrisponde all'individuazione di una relazione tra due o più concetti (dette *classi*).

Facendo riferimento alla Tabella 1, la risposta alla domanda 1 corrisponde all'identificazione della classe di appartenenza del meccanismo tra quelle descritte nella sezione precedente (*Type*). Un meccanismo di danno può essere causato da uno specifico fattore (o evento), per esempio la corrosione sotto coibentazione è indotta dalla presenza di acqua sotto all'isolamento, oppure da molteplici fattori combinati fra loro, ad esempio la corrosione dei metalli a contatto con il suolo (*soil corrosion*) è determinata dal tipo di terreno (umidità, resistività, capacità di drenaggio), dalle condizioni dell'attrezzatura (protezione catodica applicata, tipo di rivestimento, età) e dal tipo di gestione adottata (temperatura operativa, drenaggio corrente vagante). La definizione di tali fattori (*Reason*) consente di rispondere alla domanda 2. La domanda 3 evidenzia gli effetti che il meccanismo di danno produce sull'attrezzatura (*Effect*). Ad esempio, il meccanismo *soil corrosion* appare come un assottigliamento con perdite localizzate (*localized loss in thickness*) dovute alla vaiolatura (*pitting*). La domanda 4 individua le tipologie di attrezzatura che possono essere interessate

dai meccanismi di danno analizzati (*Affect*), a questo proposito è stata utilizzata una classificazione generale per le attrezzature, che include: colonna, condotta, serbatoio, scambiatore, reattore e tubazione. La domanda 5 (*Prevention*) individua le misure di prevenzione che si possono adottare per prevenire il meccanismo di danno; esse potrebbero essere di tipo fisico (rivestimenti, protezioni catodiche), di processo (ridurre la velocità del fluido, aumentare la pressione di aspirazione) e di gestione (programmi di manutenzione). Le domande 6, 7 e 8 riguardano la capacità di valutare il fenomeno in modo quantitativo, cioè di individuare cosa misurare (*What to measure*), con quale metodo (*How to measure*) e come farlo (*Measurement*). Ad esempio, lo spessore del materiale è oggetto di misura per individuare vari tipi di meccanismi di danno (quali erosione, corrosione, cavitazione, corrosione sotto coibentazione, solforazione). I metodi per misurare lo spessore variano dall'esame visivo da parte di un esperto, all'utilizzo di tecniche sofisticate (quali ultrasuoni, raggi X, etc.). Oltre alla individuazione del meccanismo di danno, è anche importante conoscere la sua velocità di propagazione (*Propagation*), cioè sapere se ha un tempo di diffusione breve o lungo, ovvero se è dell'ordine di settimane, mesi o anni. Infine si individuano le conseguenze di ciascun meccanismo di danno (*Consequence*), evidenziando le possibili dipendenze fra di loro (*Depend on*). Tali conoscenze consentono di rispondere alle domande 9, 10 e 11.

Domanda	Relazione
1. Appartiene ad una classe più generale di meccanismi di danno?	Type
2. Quali fattori determinano il meccanismo di danno?	Reason
3. Quale effetto produce?	Effect
4. Quale tipo di attrezzatura può essere interessata dal meccanismo?	Affect
5. Quali sono le misure fisiche di prevenzione?	Prevention
6. Che cosa si misura per individuare il meccanismo?	What to measure
7. Come si misura?	How to measure
8. Quale tipo di misura adottare?	Measurement
9. Qual è il tempo di propagazione del meccanismo?	Propagation
10. Quali conseguenze può provocare il meccanismo di danno?	Consequence
11. Da quali modalità dipende il meccanismo di danno?	Depend on

Tabella 1. Individuazione delle relazioni tra classi

L'idea dell'applicazione dell'approccio ontologico è di mettere assieme competenze e conoscenze diverse relative ai meccanismi di danno, fra cui quelle fisico-chimiche sul deterioramento dei materiali, quelle meccanico-elettroniche su tecnologie di misura ed il loro interfacciamento, quelle impiantistiche su attrezzature, processi, sostanze e pericoli, quelle gestionale sui flussi informativi e documentali. Nella Figura 1 si è tentato di rappresentare in modo grafico quest'idea. I diversi argomenti che concorrono alla gestione dell'invecchiamento sono discipline tutte già consolidate e organizzate in modo strutturato, di solito attraverso tassonomie, cioè strutture gerarchiche. Queste strutture sono adeguate per approfondire gli argomenti singoli, ma devono essere collegate una con l'altra. Lo sviluppo logico di queste connessioni porta a dare una dimensione in più alla conoscenza, rappresentabile solo attraverso grafi più complessi, tipici appunto dell'ontologia.

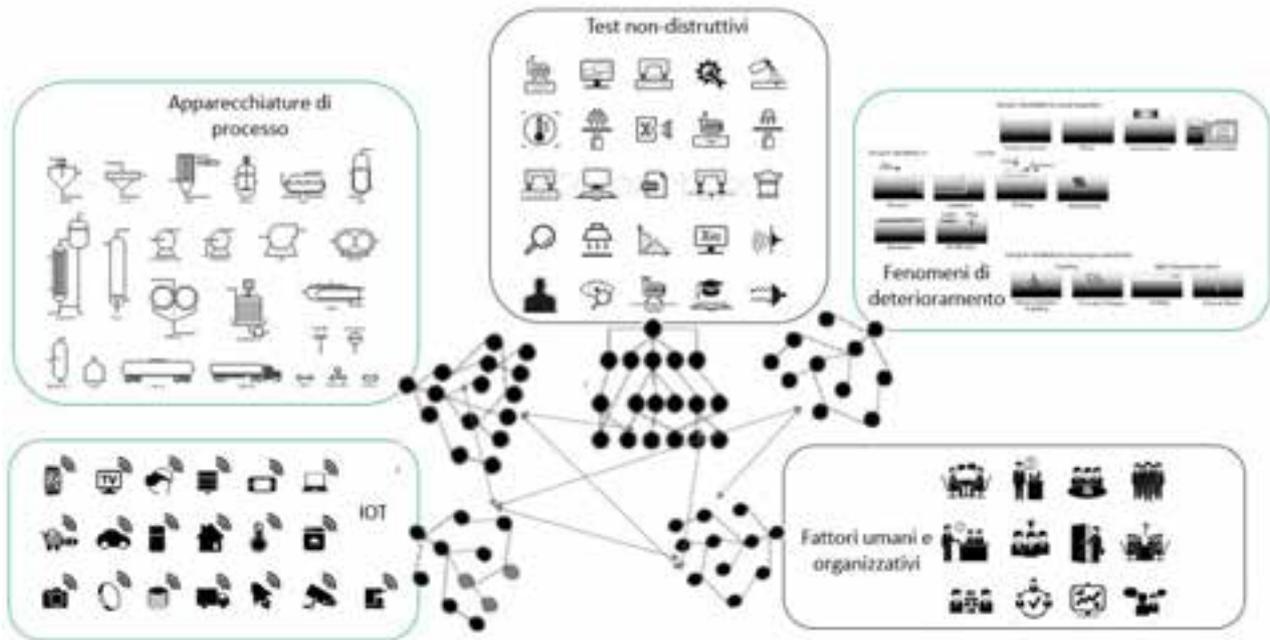


Figura 1. Rappresentazione grafica dell'informazione ontologica sui meccanismi di danno

2.3. Classificazione dei sensori

Il monitoraggio “connesso all’invecchiamento” deve tenere conto dei processi che regolano la vita dei componenti/sistemi, che dipendono dal tipo di componenti e dalle condizioni operative dei materiali [15]. Il monitoraggio può essere effettuato in modo indiretto o diretto. Nel primo caso si monitorano i parametri di esercizio, che dovrebbero rimanere entro intervalli virtualmente invariati durante l'intera vita dell'impianto. Da questi si deducono, con un ampio margine di incertezza, le condizioni di danno cumulate. Nel secondo caso si monitorano i processi di danno, cioè i parametri i cui valori cambiano con il tempo in servizio. Le soluzioni tecniche disponibili controllano principalmente i fenomeni di assottigliamento (ad es. sensori fissi ad ultrasuoni UT) e di deformazione (ad es. estensimetri capacitivi o trasduttori di spostamento). Occorre poi aggiungere che anche una serie ordinata di risultati di ispezione potrebbe essere considerato anche “monitoraggio”. Si possono considerare tre tipi di monitoraggio diretto: (i) il monitoraggio vero e proprio con sensori applicati sulle attrezzature che comunicano con continuità le misure con wireless ad un centro di controllo (on-line); (ii) quello con strumentazione di tipo commerciale, che può essere utilizzata dall'operatore a intervalli programmati (off-line), che possono essere ridotti; (iii) quello completamente off-line con interventi più o meno invasivi, che vengono eseguiti ad impianto fermo, in quest'ultimo caso il termine “monitoraggio” è senz'altro forzato, perché l'intervallo fra due misurazioni non può essere ridotto al disotto dell'intervallo fra le fermate.

La Tabella 2 riporta un quadro sintetico delle principali tecniche di monitoraggio diretto, sia di tipo discreto che continuo. Inoltre, esistono sensori classificati come “avanzati”, che sono prevalentemente prototipi di ricerca, ad esempio i sensori ad emissioni acustiche (EA). La principale classificazione delle tecniche è in *non-distruttive* e *distruttive*. Quelle on-line sono classificate in base a dimensioni, energia richiesta, periodicità di campionamento, tempo di risposta, parametri misurabili, soglie di attenzione e grado di incertezza associato alla misura. I sensori off-line (inclusi controlli non distruttivi e campionatori) sono caratterizzati da pesi, dimensioni ed energia richiesta considerevoli; inoltre essendo richiesto l'intervento umano i parametri vengono forniti con periodicità addirittura annuale o pluriennale con lunghi tempi di risposta. Al contrario la sensoristica innovativa (on-line) è caratterizzata da pesi, ingombri ed energie ridottissime, mentre i tempi di risposta sono immediati (minuti o

secondi). L'accuratezza della sensoristica innovativa può essere anche più bassa rispetto a quella convenzionale, in alcuni casi l'integrazione di misure accurate su base pluriennale può costituire una forma di monitoraggio particolarmente efficace. Va stressato che nei casi di monitoraggio combinato, piuttosto che di una soglia di attenzione, si avranno delle regole più complesse di combinazione dei parametri diversi.

Tecniche non distruttive di monitoraggio (anche on-line)	Tecniche non distruttive di monitoraggio (solo off-line)	Altre Tecniche
UT – monitoraggio con ultrasuoni	VT – esame visivo	MeT – esame metallografico con repliche
VM – monitoraggio vibrazioni	VTE – endoscopio	MST - esame metallografico su campioni di materiale
DM – monitoraggio spostamento	ET – correnti vaganti	
SM – monitoraggio deformazione	PT – liquidi penetranti	
AE – monitoraggio con emissioni acustiche;	DiM – misurazioni dimensioni	
GW – monitoraggio con onde guidate	RX – radiografia	
	IR – termocamera all'infrarosso	

Tabella 2. Classificazione delle tecniche di monitoraggio

3. Caso-studio

L'approccio ontologico è stato dunque applicato per una analisi parziale del documento descrittivo dei meccanismi di danno del progetto SAFELIFE-X [16]. Questa analisi ha permesso la generazione di una porzione di ontologia, che è rappresentata in Tabella 3 e in Figura 1 relativamente al meccanismo di danno *corrosione da suolo*. In questa porzione di ontologia si possono osservare le classi e le istanze e le relazioni tra le classi e tra le istanze.

Classe	Relazione	Classe
<i>Event</i> (corrosione da suolo)	<i>Type</i>	<i>Event</i> (assottigliamento)
<i>Event</i> (corrosione da suolo)	<i>Effect</i>	<i>Event</i> (assottigliamento localizzato AND pitting)
<i>Event</i> (corrosione da suolo)	<i>Affect</i>	<i>Physical Equipment</i> (condotta interrata OR serbatoio interrato OR fondo di serbatoio di stoccaggio)
<i>Event</i> (corrosione da suolo)	<i>Prevention</i>	<i>Physical Prevention</i> (rivestimento AND protezione catodica)
<i>Event</i> (corrosione da suolo)	<i>What to measure</i>	<i>Measure</i> (resistività suolo)
<i>Measure</i> (resistività del suolo)	<i>How to measure</i>	<i>Physical Dimension</i> (potenziale suolo)
<i>Physical Dimension</i> (potenziale del suolo)	<i>Measurement</i>	<i>Physical device</i> (elettrodo)
<i>Physical Prevention</i> (protezione catodica)	<i>Measurement</i>	<i>Method</i> (NACE RP 0169)

Tabella 3. Relazioni estratte tramite esame del documento SAFELIFE-X [17]

Le classi rappresentate sono: Evento (*Event*), Misura (*Measure*), Grandezza fisica (*Physical Dimension*), Dispositivo (*Physical Device*), Apparecchiatura (*Physical Equipment*), Tempo (*Time*) e Metodo (*Method*). Mentre le istanze rappresentate sono indicate tra parentesi subito dopo le classi nella Tabella 3, ad esempio corrosione da suolo è un tipo di Evento (*Event*). Nella stessa tabella sono rappresentate le relazioni: Tipo (*Type*), Effetto (*Effect*), Agisce su (*Affect*), Previene (*Prevention*), Cosa Misura (*What to Measure*), Come Misura

(*How to Measure*), Propagazione (*Propagation*) e Conseguenza (*Consequence*). Queste relazioni connettono tra loro istanze di classi come, ad esempio, l'Evento "corrosione da suolo" è un *tipo* di Evento di "assottigliamento" oppure il Dispositivo "elettrodo" misura la Grandezza fisica "potenziale del suolo". La stessa conoscenza è stata resa in forma grafica attraverso strumenti di visualizzazione tipici del mondo ontologico in Figura 2. La figura è stata realizzata utilizzando il software libero Protegèe, che rappresenta i legami logici fra gli elementi informativi o conoscitivi.

Rendere l'informazione contenuta nel documento SAFELIFE-X attraverso una rappresentazione ontologica permette di consultare più agevolmente il contenuto del documento permettendo una navigazione tra le classi e le relazioni di riferimento. L'idea della rappresentazione ontologica nasce con l'intento di supportare il funzionamento della piattaforma innovativa SmartBench [17]. Tale piattaforma consente l'integrazione e l'elaborazione di informazioni provenienti da vari dispositivi smart per migliorare la sicurezza nei luoghi di lavoro. L'approccio ontologico supporta l'interazione del database e dei sensori installati sulle attrezzature al fine di stimare lo stato di invecchiamento delle stesse.

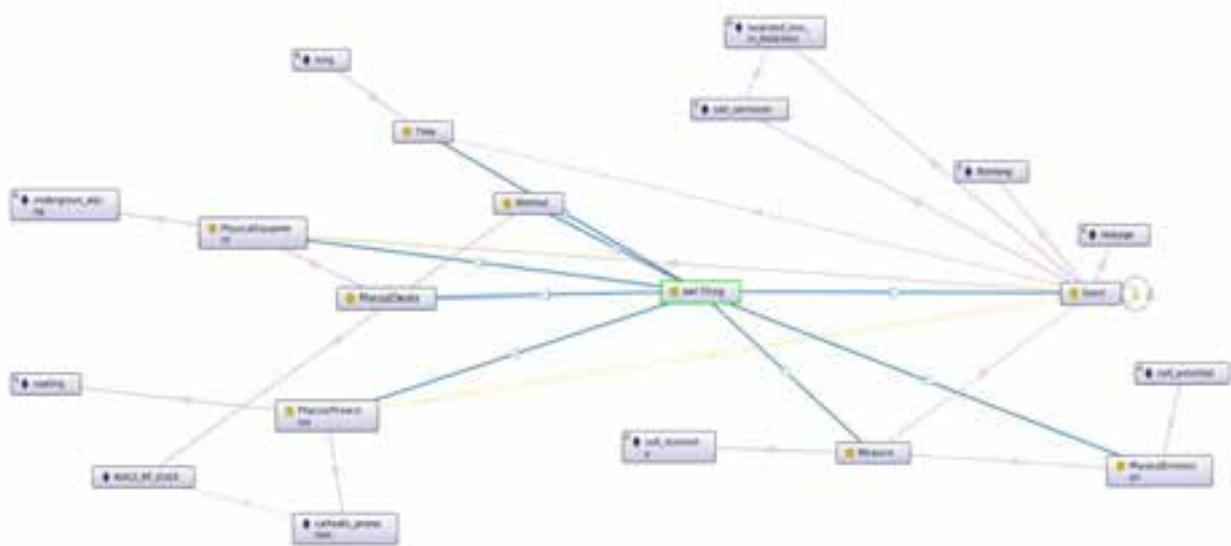


Figura 2. Rappresentazione grafica dell'informazione ontologica di SAFELIFE-X

4. Risultati

I risultati dell'uso dell'approccio ontologico sono presentati attraverso un use-case, che riguarda il monitoraggio periodico di una attrezzatura. L'ispettore esterno oppure l'auditor interno cammina con un tablet nello stabilimento, entra in una certa unità, verifica l'adeguatezza della gestione dell'invecchiamento attraverso i diversi fattori; si posiziona davanti un'attrezzatura e scansiona l'etichetta che gli restituisce il suo identificativo. L'utente visiona sullo schermo le informazioni tecniche e i dati generati attuali. In altre parole verranno richiamati due servizi sviluppati nell'applicazione: il primo si occupa di recuperare i dati dall'ontologia (informazioni generiche e vincoli ontologici) mentre il secondo elabora una sintesi dei dati mantenuti nel delle informazioni contenute nel database. La propensione all'invecchiamento dell'unità, le misurazioni fatte in precedenza, gli eventuali dati trasmessi direttamente da sensori installati, verranno elaborati, sulla base delle regole derivate dall'ontologia, per aggiornare la previsione del tempo di vita utile (o del tempo minimo prima di un guasto) previsto. Se è il caso può essere emessa anche una segnalazione di warning, alla quale potranno anche essere associate indicazioni operativi sempre derivate dalla banca dati conoscitiva.

5. Conclusioni

L'attività di monitoraggio delle condizioni degli impianti, in relazione ai diversi possibili meccanismi di deterioramento, è essenziale per garantire che non aumenti il rischio di rotture o guasti dei sistemi di contenimento primario negli anni, con potenziali conseguenze rilevanti per i lavoratori, l'ambiente e le strutture. Per organizzare e verificare il "monitoraggio" occorre mettere assieme competenze e conoscenze diverse, fra cui quelle fisico-chimiche sul deterioramento dei materiali, meccanico-elettroniche su tecnologie di misura ed il loro interfacciamento, impiantistiche su attrezzature, processi, sostanze e pericoli, gestionale sui flussi informativi e documentali. Ognuno di questi mondi ha propri linguaggi, conoscenze ed esperienze, organizzate e rappresentate secondo specifiche tassonomie consolidate. Mettere assieme queste tassonomie e pervenire ad una visione d'insieme non è semplice, anche perché alle loro spalle ci sono linguaggi e culture diverse. Un piccolo esempio della necessità di integrazione viene proprio dal metodo *fishbone* che, pur con grande semplicità, riconduce questi aspetti ad una valutazione unica. Nella letteratura attuale si osserva che un certo sforzo di intreccio delle diverse tassonomie è stato fatto, in particolare con le linee guida API RP 581. I risultati non sono comunque di facile comprensione e coprono solo parte dei problemi. L'approccio ontologico ha una forza straordinaria nel mostrare come un insieme unico le diverse conoscenze. Le singole tassonomie diventano delle proiezioni della conoscenza complessiva, rappresentata dall'ontologia su dimensioni di rango inferiore. Sfruttando le tecnologie cognitive si può anche guidare l'organizzazione logica della conoscenza partendo dai singoli documenti e procedendo per induzione, al contrario dell'approccio tassonomico convenzionale, che è invece di tipo deduttivo. Questo vantaggio non è solo un ausilio per lo studio e la comprensione dei problemi, ma può diventare anche modello logico da riportare nella struttura dati condivisa, attorno alla quale sviluppare una piattaforma di lavoro condiviso, come è appunto obiettivo del progetto Smartbench [18].

6. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da Inail nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto "SMARTBENCH"

7. Bibliografia

- [1] Wintle J., Moore P., Henry N., Smalley S., Amphlett G. (2006). *Plant ageing. Management of equipment containing hazardous fluids or pressure*. Health and Safety Executive Report no. RR509. Accessed on the 18-07-2018: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr509.pdf>
- [2] Horrocks P., Mansfield D., Thomson J., Parkerv K., Winter P. (2010). *Plant Ageing Study Phase 1 Report*. Health and Safety Executive Report no. RR823. Accessed on the 18-07-2018: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr823.pdf>
- [3] European Commission Joint Research Centre JRC (2013). *Corrosion-Related Accidents in Petroleum Refineries*. EU JRC Report no. EUR 26331 EN.
- [4] Organisation for Economic Cooperation and Development OECD (2017). *Ageing of hazardous installations*. OECD Environment, Health and Safety Publications - Series on Chemical Accidents, no. 29.
- [5] Bragatto P., Milazzo M.F. (2016). *Risk due to the ageing of equipment: Assessment and management*. Chemical Engineering Transactions, 53: 253-258.
- [6] American Petroleum Institute API (2016). *Risk-based Inspection. API Recommended Practice 580*. Third Edition. Washington, USA.

- [7] American Petroleum Institute API (2011). *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. API Recommended Practice 571*. Second Edition. Washington, USA.
- [8] Wright S.E., Budin G. (1997). *Handbook of Terminology Management*. Volume 1, John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, The Netherland.
- [9] Wright S.E., Budin G. (2001). *Handbook of Terminology Management*. Volume 2, John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, The Netherland.
- [10] Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. (2001). *The Semantic Web*. Scientific American, 284 (5): 34-43.
- [11] Gruber T.R. (1995). *Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing*. International Journal of Human-Computer Studies, 43(5-6): 907-928.
- [12] Bragatto P., Delle Site C., Milazzo M.F., Pirone A., Vallerotonda M.R. (2018). *Managing pressure equipment aging in plants with major accident hazard: a methodology satisfying the requirements of the European Directive 2012/18/UE Seveso III*. Proceedings of the ASME/PVP conference 2018.
- [13] American Petroleum Institute API (2016). *Risk-based Inspection Methodology. API Recommended Practice 581*. Third Edition. Washington, USA.
- [14] Guizzardi G. (2005). *Ontological Foundations for Structural Conceptual Model*. PhD thesis, Enschede, The Netherlands.
- [15] Ansaldo S.M., Agnello P., Bragatto P. (2017). *Smart Safety Systems: Are they ready to control the hazards of major accidents?* WIT Transactions, The Built Environment,
- [16] Report of SAFELIFE-X project no. D3.3. *Analysis of the degradation laws and kinetics*. Accessed on the 18-07-2018: <http://www.safelife.eu-vri.eu/>
- [17] S. Anastasi, et al. (2018) *SmartBench: quando la sicurezza negli stabilimenti industriali diventa Smart?*. Analisi e Calcolo, 86.

Invecchiamento delle attrezzature a pressione negli impianti RIR: applicazione della norma UNI 11706:2018

R. Balistreri¹, A.F. Magri²

¹ Inail - Uot di Cagliari

² Lloyd's Register EMEA, Vimodrone (MI)

Sommario

Nel presente lavoro gli autori illustrano la applicazione della norma tecnica UNI 11706:2018 "Attrezzature a pressione – Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali" [1] nell'ambito dei controlli previsti dal SGS implementato dai gestori degli impianti RIR (Rischio di Incidente Rilevante).

La norma tecnica propone una procedura di analisi dello stato di conservazione delle attrezzature a pressione e di conseguenza consente di determinare il grado di invecchiamento delle stesse, definendo i criteri per l'individuazione e la caratterizzazione dei potenziali meccanismi di danno, la pianificazione ed esecuzione dei controlli e la valutazione del danno con le implicazioni sull'esercibilità dell'attrezzatura analizzata.

Il lavoro si propone di implementare l'applicazione della norma in combinazione alle norme UNI/TS11325-2[2], UNI/TS11325-4[3] (scorrimento viscoso) e UNI/TS11325-11[4] (fatica), nella predisposizione dei piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose negli impianti RIR.

1. Introduzione

La norma tecnica UNI 11706:2018 "Attrezzature a pressione – Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali" [1] è stata pubblicata nel 2018 dall'UNI ed è stata elaborata a cura del CTI, Sotto Comitato 3 - Generatori di calore e impianti in pressione.

La norma definisce le modalità per valutare lo stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione in esercizio relativamente al degrado metallurgico del materiale. Nello specifico, la norma tratta i meccanismi di danno a evoluzione normalmente lenta i cui effetti non risultano rilevabili all'esame visivo.

Non sono trattati meccanismi di danno tenso-corrosivi e quelli dovuti a scorrimento viscoso e fatica già trattati dalle precedenti UNI/TS11325-2[2], UNI/TS11325-4[3] e UNI/TS11325-11[4]. L'uso combinato delle quattro norme, integrato da una opportuna analisi di Risk Based Inspection secondo API RP-580[6] e API RP-581[5] o equivalenti, consente una valutazione quantitativa del grado di invecchiamento dell'attrezzatura esaminata.

Entrando nello specifico, la norma riporta un elenco di riferimento dei meccanismi di danno potenzialmente attivi sulle attrezzature con la descrizione qualitativa del fenomeno di danno e l'indicazione delle possibili metodologie di indagine, distruttiva e non, di misura e di analisi. Anche le sopraccitate norme UNI/TS11325-2[2], UNI/TS11325-4[3] e UNI/TS11325-11[4] prevedono, ciascuna per lo specifico meccanismo di danno trattato, la descrizione qualitativa del fenomeno di danneggiamento e l'indicazione delle metodologie indagine, di misura e analisi.

Le quattro norme forniscono, nel loro complesso, i criteri per la valutazione del grado di danneggiamento di attrezzature a pressione per un'ampia e completa casistica di fenomeni; tali criteri, applicati in un processo metodico e registrato tipo Risk Based Inspection, possono assolvere alla prescrizione di cui all'Appendice 3 - liste di riscontro per le ispezioni del SGS-RIR del d.lgs. 105 del 2015[9], che prevede che il Gestore dell'impianto RIR adotti un piano di monitoraggio e controllo operativo manutentivo e l'analisi dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, comprese le necessarie misure correttive e preventive. La UNI 10617[8] meglio specifica sull'obbligo di adozione di un piano di integrità per la prevenzione degli incidenti rilevanti, che si allinea al concetto di perdita dell'integrità fisica delle strutture, cui può seguire una perdita di contenimento delle sostanze pericolose, come riportato nella parte 3 dell'allegato C della norma.

Il gestore può adottare anche un approccio puramente prescrittivo riferendosi al d.m. 329/04[10] art. 12 ed all'allegato VII del d.lgs. 81/08[11], che prevede l'obbligo di sottoporre a verifiche di integrità le attrezzature quale strumento di verifica e controllo dello stato conservazione delle stesse. A parere degli scriventi però è consigliabile adottare metodologie che siano strettamente connesse all'analisi di sicurezza e di gestione dell'invecchiamento, così da inserire le attrezzature critiche individuate nei programmi di manutenzione, di ispezione, di controllo periodici e di riparazione o sostituzione in relazione alla loro affidabilità, al loro tempo di vita o alle frequenze di guasto.

Per questa ragione si propone l'applicazione metodica delle quattro norme che risponde alla necessità di un controllo dei processi di invecchiamento per corrosione, erosione, fatica e scorrimento viscoso ma anche per tutti i fenomeni a cinetica lenta e lentissima relativamente al degrado metallurgico del materiale.

I campi di applicazione delle quattro norme escludono i processi di degrado, più o meno lenti, che sono legati alle interazioni tra materiale e processo/sostanza contenuta. In questo caso sarà necessario integrare l'elenco dei meccanismi di danno potenzialmente attivi sulle attrezzature critiche con quelli legati all'interazione materiale/processo la cui descrizione qualitativa del fenomeno di danneggiamento, la sua cinetica e l'indicazione delle possibili metodologie indagine, distruttiva e non, e di misura dovranno essere derivate dai manuali di processo del licenziatario implementati dall'esperienza operativa dell'impianto e/o di impianti analoghi già in esercizio e dai risultati di studi e ricerche sviluppate negli anni. In questo caso è essenziale una raccolta metodica dei riscontri delle attività di manutenzione, le informazioni fornite dal licenziatario del processo, dai progettisti dell'impianto e dai gestori di impianti analoghi.

A completamento dell'analisi, dato che nel rispetto del mandato normativo il gestore dovrà dimostrare di curare il controllo sul grado di invecchiamento delle attrezzature e degli impianti che esercisce (a pressione e non) parimenti dovranno fare i gestori che operano negli altri paesi europei. In conclusione alla presente memoria vengono quindi presentati e confrontati i criteri di monitoraggio del grado di invecchiamento delle attrezzature a pressione esercite in impianti RIR di alcuni paesi europei.

2. Elementi di valutazione del grado di invecchiamento

Il metodo proposto nella presente memoria deriva direttamente dal criterio scelto dal GL 5 "Fatica" - CT 222 del CTI - estensore della norma, per sintetizzare i meccanismi di danneggiamento nella UNI 11706:2018[1]. La norma contiene, nell'Appendice A – Normativa, le schede, una per ciascuno dei meccanismi di danno trattati, comprendenti: la descrizione del meccanismo, le tipologie di materiali interessati, i fattori scatenanti e critici, gli effetti che si producono sul materiale e le conseguenze con i possibili metodi di indagine

e valutazione, invasivi e non. Questo criterio ben si sposa con una valutazione sistematica delle attrezzature che possono presentare meccanismi di danneggiamento causa di un più o meno lento grado di invecchiamento. Questa schematizzazione ben si presta, inoltre, alla trasposizione in applicazione digitale del metodo, con la conseguente possibilità di gestire le attrezzature che sono state selezionate perché soggette a fenomeni di invecchiamento, registrando e monitorando tutte le attività di indagine, controllo e verifica eseguite e successiva applicazione di analisi predittiva degli eventi.

Per completare la trattazione dei fenomeni che conducono all'invecchiamento, si devono pertanto incrementare le schede della UNI 11706:2018[1] con le due nuove schede relative alle attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso a caldo e le attrezzature a pressione operanti in regime di fatica di natura termica e/o meccanica, ad alto o basso numero di cicli. Le due nuove schede sono ricavate dalle normative UNI/TS11325-2[2] e UNI/TS11325-4[3] e dalla UNI/TS11325-11[4].

Nello specifico ricordiamo che le UNI/TS11325-2[2] e UNI/TS11325-4[3] definiscono i criteri di pianificazione, esecuzione, valutazione e la documentazione dei controlli e delle prove non distruttive da effettuare su attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso a caldo sia al raggiungimento della durata di progetto sia nelle verifiche successive, per valutarne lo stato di esercizio e l'idoneità al loro ulteriore utilizzo. Le suddette norme sono derivate dalla norma UNI 11096:2004[7] e da precedenti Circolari dell'ISPESL.

In particolare contengono la procedura per la determinazione degli intervalli di ricontrollo, che è strettamente correlata all'estensione delle prove non distruttive.

Derivata dalle norme sopra citate, in appendice I è riportato il Prospetto B.1 che sul modello delle schede contenute nell'Appendice A - Normativa della UNI 11706:2018[1], riassume le caratteristiche essenziali alla base del fenomeno, in base al materiale, le sue condizioni di servizio, i risultati dei controlli e delle valutazioni del progettista/analista.

La UNI/TS11325-11[4] fornisce la procedura per valutare l'idoneità al servizio di attrezzature e insiemi a pressione, o loro componenti esenti da difetti e soggetti a fatica di natura termica e/o meccanica, sia ad alto sia a basso numero di cicli. Inoltre consente di determinare la frazione di vita spesa a fatica in funzione delle modalità di esercizio e il contributo della fatica nel caso di danno combinato fatica-scorrimento viscoso. Per i componenti soggetti a fatica indicati nella legislazione vigente la UNI/TS11325-11[4] fornisce indicazioni sulle possibili azioni da intraprendere per prevenire l'insorgenza di difetti. L'Appendice D – Modello di rapporto sintetico - è una scheda riepilogativa sull'analisi a fatica svolta dal progettista, contenente le informazioni da riportare (se applicabili).

Derivata dalla norma sopra citata, in appendice I è riportato il Prospetto B.2 che sul modello delle schede contenute nell'Appendice A - Normativa della UNI 11706:2018[1], riprende le caratteristiche essenziali alla base del fenomeno, in base al materiale, le sue condizioni di servizio, i risultati dei controlli e delle valutazioni del progettista/analista, derivate dal Modello di Rapporto Sintetico elaborato dal progettista.

3. Criteri per la gestione di attrezzature a pressione soggette ad altri meccanismi di danneggiamento

Oltre ai meccanismi di danno trattati nelle succitate norme, non debbono trascurarsi quei fenomeni di danneggiamento che riguardano specifiche interazioni fluido/processo/materiale. Questi meccanismi sono generalmente noti al licenziatario del processo e alla società di ingegneria che ha progettato l'impianto e ha definito le specifiche di progetto e di acquisto delle attrezzature. È importante considerare che nella fase di progettazione degli impianti, in presenza di fenomeni di interazione noti, si scelgono delle soluzioni spesso di compromesso tra i costi e i benefici, preferendo in taluni casi materiali meno nobili a prezzi più competitivi ma minore durata, rispetto a soluzioni a maggior costo e maggior durata.

Questo processo trova riscontro nelle prescrizioni del licenziatario relative al controllo ispettivo e alla manutenzione periodica di tali attrezzature, che giocoforza saranno soggette a ispezioni, a sostituzioni e/o a riparazioni più frequenti.

La scheda che dovrà essere scelta, in questo specifico caso, potrebbe non essere ricompresa tra quelle finora proposte e la sua compilazione sarà interamente a cura del gestore.

Partendo dalle prescrizioni che il licenziatario/società di ingegneria ha indicato nelle specifiche tecniche e nei manuali di impianto, il gestore dovrà dettagliare in una scheda bianca (o in una apposita schermata dell'applicazione digitale) il fenomeno di danneggiamento, la sua cinetica e l'indicazione delle metodologie indagine, distruttiva e non, e di misura. Potranno essere inseriti anche i risultati delle analisi costi-benefici implementati a seguito di ulteriori analisi derivanti dall'eventuale modifica del processo, dei materiali di fabbricazione delle attrezzature, dei reagenti e/o catalizzatori. L'esperienza operativa dell'impianto e/o di impianti analoghi già in esercizio e i risultati di studi e ricerche sviluppate nel corso degli anni completeranno le informazioni e consentiranno l'omogeneizzazione dei criteri di gestione in un unico sistema.

Si segnala inoltre, nella attuale assenza di norme italiane che trattino questi fenomeni nel dettaglio, l'esistenza di consolidate norme e standard internazionali che possono aiutare i gestori di impianto della compilazione delle schede (API RP 571 2^a Ed., April 2011 [12], WRC Bulletin 489: 2004[13], WRC Bulletin 488: 2004[14], WRC Bulletin 490: 2004[15]).

4. Procedure di valutazione del grado di invecchiamento – esperienze consolidate in alcune nazioni europee

La gestione della sicurezza degli impianti non è uniforme negli altri paesi europei, si passa da stati (come Regno Unito e Olanda) in cui approcci basati sulla valutazione del rischio sono accettati dall'industria e dalle autorità, ad altri (come la Germania) in cui la gestione delle ispezioni è ancora basata su un approccio più prescrittivo. Queste forti differenze sono dovute al fatto che all'interno della comunità europea solo i requisiti che riguardano la costruzione delle attrezzature sono "standardizzati" (direttiva PED), mentre l'esercizio è ancora disciplinato dai singoli stati membri. È comunque opportuno segnalare un interesse sempre maggiore emerso negli ultimi anni da parte dell'industria nei confronti di metodologie di gestione più efficaci sia dal punto di vista economico che di sicurezza. Tale interesse è testimoniato, per esempio, dalla creazione del progetto RIMAP (Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry) – parzialmente finanziato dalla Commissione Europea – e dalla recente pubblicazione della normativa UNI EN 16991: 2018 – Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio[16], il primo esempio di standardizzazione a livello europeo di linee guida per la pianificazione di ispezioni basate su valutazione dei rischi.

5. Conclusioni

L'attuale gestione delle verifiche periodiche con una metodologia prevalentemente prescrittiva (attualmente prevista dalla legislazione Italiana), seppur di relativamente facile applicazione, potrebbe risultare non ottimale in termini di gestione della sicurezza e dei costi degli stabilimenti industriali. Infatti l'utilizzo di scadenze fisse (tipicamente decennali) per l'effettuazione delle verifiche di integrità su ogni tipo di attrezzatura mal si sposa con l'esistenza di forme di danneggiamento fra loro molto diverse sia per morfologia che per cinetica.

È parere degli autori che un approccio basato sulle effettive condizioni di utilizzo delle attrezzature e una conseguente gestione che tenga conto dei meccanismi di danno attesi possa risultare più efficace, sia nella pianificazione temporale che nella stesura dei piani di

controllo da utilizzare per la valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature operanti in varie sezioni di impianto e con condizioni di esercizio e materiali simili. La maggiore efficacia ispettiva sarebbe un notevole vantaggio per gli utilizzatori.

6. Bibliografia

- [1] UNI 11706:2018 “Attrezzature a pressione – Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali”
- [2] UNI/TS11325-2:2013 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 2: Procedura di valutazione dell'idoneità all'ulteriore esercizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione soggetti a scorrimento viscoso”
- [3] UNI/TS11325-4:2013 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 4: Metodi operativi per la valutazione di integrità di attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso applicabili nell'ambito della procedura di valutazione di cui alla UNI/TS 11325-2”
- [4] UNI/TS11325-11:2015 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 11: Procedura di valutazione dell'idoneità al servizio di attrezzature e insiemi a pressione soggetti a fatica”
- [5] API RP-580: Risk-based Inspection - API recommended practice 580
- [6] API RP-581: Risk-Based Inspection Technology - API recommended practice 581
- [7] UNI 11096:2012 “Prove non distruttive - Controlli sullo stato di integrità strutturale di attrezzature a pressione soggette a scorrimento viscoso a caldo - Pianificazione ed esecuzione dei controlli, valutazione dei risultati e documentazione”
- [8] UNI 10617:2012 “Impianti a rischio di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali”
- [9] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [10] Ministero delle Attività Produttive - Decreto 1 dicembre 2004, n.329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”
- [11] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106 Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro
- [12] API RP 571, 2^a Ed., April 2011: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment, In The Refining Industry
- [13] WRC Bulletin 489: 2004 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment, In The Refining Industry
- [14] WRC Bulletin 488: 2004 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment, In The Pulp And Paper Industry
- [15] WRC Bulletin 490: 2004 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment, In Fossil Electric Power Industry
- [16] UNI EN 16991: 2018 – Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio

7. Appendice I

Prospetto B.1 Attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso a caldo

Meccanismo	SCORRIMENTO VISCOSO A CALDO		
Materiali interessati	Fenomeno tipico degli acciai ferritici, legati e non legati, acciai austenitici		
Fattori critici	Temperatura oltre il quale proprietà meccaniche sono correlate al tempo di esercizio (vedi anche l'APPENDICE C della UNI/TS11325-4)		
Effetto sul materiale	- Di norma degrado micro strutturale e progressiva formazione di micro cavità isolate e/o orientate, microcricche, macrocricche.		
Conseguenze	Diminuzione delle proprietà tensili		
Localizzazione preferenziale	Giunzioni saldate, materiale base		
Implicazioni su recipienti a pressione	Riduzione progressiva delle proprietà meccaniche del materiale costituente le membrature a pressione e conseguenti implicazioni sulla stabilità in esercizio.		
Possibili metodi di valutazione	Le UNI/TS11325-2 e UNI/TS11325-4 forniscono i criteri e i metodi per la valutazione dell'integrità di attrezzature soggette a fenomeni di scorrimento viscoso. I metodi di indagine sono quelli che consentono di valutare la presenza del degrado micro strutturale.		
	Azione	Vantaggi	Svantaggi
	<i>Invasivi</i> - Prelievo di materiale per esecuzione prova di trazione per applicazione del metodo Omega;	- Dati affidabili	- Implica una riparazione o una sostituzione della parte asportata e spesso una verifica di stabilità dopo asportazione del materiale
	<i>Parzialmente invasivi</i> - Replica estrattiva;	- L'asportazione di materiale è minima e non richiede successiva riparazione	- La misura è solo superficiale
<i>Non invasivi</i> - Prova di durezza - Repliche - MT - UTD - RT - PT - Eddy Current	- Di facile esecuzione	- Le repliche sono meno accurate dell'analisi metallografica - I risultati di prova di durezza e repliche non sono direttamente correlabili alla resistenza - Ad eccezione dei metodi ET, RT e UTD, questi forniscono misure solo superficiali	
Note			

8.

Prospetto B.2 Attrezzature a pressione operanti in regime di fatica di natura termica e/o meccanica, ad alto o basso numero di cicli

Meccanismo	FATICA DI NATURA TERMICA E/O MECCANICA, AD ALTO O BASSO NUMERO DI CICLI		
Materiali interessati	Acciai		
Fattori critici	Sollecitazioni meccaniche cicliche interne e/o esterne (pressione interna e/o carichi esterni) e sollecitazioni termiche cicliche		
Effetto sul materiale	Di norma formazione di microcricche e cricche.		
Conseguenze	Rottura della membratura		
Localizzazione preferenziale	Vedi l' APPENDICE A - Prospetto A.1 – Meccanismi di danneggiamento nelle attrezzature a pressione della UNI/TS11325-11		
Implicazioni su recipienti a pressione	Perdita di contenimento e rottura delle membrature a pressione.		
Possibili metodi di valutazione	Qualsiasi metodo di indagine superficiale e volumetrica che consenta di valutare la presenza cricche.		
	Azione	Vantaggi	Svantaggi
	<i>Invasivi</i>	- Non applicabile	
	<i>Parzialmente invasivi</i>	- Non applicabile	
<i>Non invasivi</i>	- VT/VTE: Visivo - MT: Magnetoscopico - PT: Liquidi penetranti - EC: Eddy Current - UT: Ultrasonoro difettoscopico - RT: Radiografico	- Di facile esecuzione	
Note			

Applicazione del metodo di valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature all'impianto Steam Cracker P1CR dello stabilimento Versalis di Brindisi

A. Di Bello¹, V. Galasso², A. Mele², A. Sibilano²

¹ Versalis - ENI, Stabilimento di Brindisi

² Inail - Uot di Taranto

Sommario

La direttiva 2012/18/UE (Seveso III) impone l'obbligo di gestire il rischio associato all'invecchiamento degli impianti. Tale obbligo è dettagliato nell'allegato 3 del d.lgs. 105/2015 di recepimento della direttiva stessa, come aspetto da trattare nell'ambito del SGS-PIR, all'interno del controllo operativo.

In considerazione di ciò, è stata emessa di recente una linea guida che fornisce uno strumento per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature installate. Tale metodo di analisi, di tipo fish-bone, può essere utilizzato sia dal gestore dello stabilimento, come metodo di autovalutazione, che dagli auditor di enti esterni, in occasione di visite ispettive ex art. 27 d.lgs. 105/2015.

Nella presente memoria tecnico-scientifica, si illustra l'applicazione della suddetta tecnica di analisi, impostata su un metodo a indici, alle apparecchiature a pressione critiche dell'impianto Steam Cracker dello stabilimento Versalis di Brindisi. Partendo dall'inventario delle apparecchiature coinvolte nelle sequenze incidentali ipotizzabili nell'impianto, come evidenziate dall'attuale Rapporto di Sicurezza, vengono analizzati e calcolati gli indici relativi ai fattori che favoriscono (*età, fermate, ratei di guasto, incidenti/quasi incidenti, danneggiamenti, meccanismi di deterioramento*) e che limitano (*sistema di gestione integrità, risultati audit SGS-PIR, piano, risultati ed efficacia delle ispezioni di integrità, controllo di processo, rivestimenti*) il fenomeno di invecchiamento. Conseguentemente, dall'elaborazione degli indici risultanti, viene effettuata la valutazione finale sull'adeguatezza del sistema di gestione, proponendo eventuali azioni di miglioramento, qualora necessarie. Il presente *use case* ha anche il fine di testare la speditezza nell'applicazione del metodo proposto ed evidenziare eventuali criticità relative alla valutazione degli indici.

1. Introduzione

La direttiva 2012/18/UE (Seveso III) impone l'obbligo di gestire il rischio associato all'invecchiamento degli impianti. A tal riguardo, già in occasione del SAFAP 2016, Bragatto et al. [25] avevano evidenziato la necessità di uno strumento specifico che fosse utile in sede di audit SGS-PIR e al tempo stesso spedito, con una lista di controllo più agile di quanto già previsto da altre norme tecniche, quali le API 581. Ad aprile 2018, è stata emessa una linea guida [1] che fornisce al gestore di stabilimento uno strumento per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature a pressione, tramite un metodo ad indici di tipo fish-bone.

Nella presente memoria tecnico-scientifica si illustra l'applicazione di tale tecnica di analisi all'impianto "Steam Cracker" P1CR dello stabilimento Versalis di Brindisi.

Dopo una prima sezione dedicata alla descrizione sintetica dell'impianto, vengono elencate le relative apparecchiature critiche risultanti dal Rapporto di Sicurezza 2016 [2] vigente, dettagliando il tipo di servizio e le condizioni operative.

Successivamente, si procede all'analisi e al calcolo dei singoli indici previsti dal metodo, illustrando le motivazioni e la fonte dei valori inputati nei fogli di calcolo per ciascuna apparecchiatura ed elaborando i dati stessi per ottenere i valori sintetici finali.

Infine, dalle risultanze dell'analisi effettuata, si traggono conclusioni di dettaglio relative all'adeguatezza del sistema di gestione in essere in ordine all'invecchiamento delle attrezzature installate nell'impianto P1CR e considerazioni di carattere generale sulla speditezza di applicazione del metodo utilizzato.

2. Descrizione dell'impianto steam cracker P1CR

L'impianto P1CR, progettato e costruito da TPL per EniChem-ANIC, è entrato in esercizio nel 1993 e successivamente ampliato da Technip per Versalis con un intervento di "revamping" nel 1999.

L'impianto è basato sul processo di steam cracking, "unico processo su grande scala disponibile per la produzione di olefine leggere (Etilene, Propilene, Butadiene) e considerato generalmente BAT", ovvero sulle reazioni di pirolisi degli idrocarburi condotte in fase vapore, ad alta temperatura, in presenza di vapor d'acqua e a bassa pressione, per favorire, durante le reazioni di cracking termico, la formazione di idrogeno e di composti idrocarburici leggeri quali l'Etilene e il Propilene.

Il processo dell'impianto P1 CR è a ciclo continuo e tratta frazioni di petrolio (virgin nafta, GPL [C3, C4, GPL mix]) a cui si aggiungono etano e propano di riciclo, che vengono sottoposte a cracking termico (pirolisi), favorito dall'immissione di vapore di diluizione. L'insieme dei prodotti così ottenuto, viene separato per distillazioni successive.

L'attuale capacità produttiva nominale, riferita alla produzione di Etilene, è di 489 kt/anno. L'impianto inoltre produce: propilene, idrogeno, fuel gas (miscela di Metano ed Idrogeno), miscela C4 (miscela Butadiene/Butileni), benzina da cracking, olio da cracking (FOK).

L'impianto consta delle seguenti sezioni:

- Unità 10: forni di cracking
- Unità 15: frazionamento primario e quench tower
- Unità 20: compressione gas di cracking e lavaggio caustico
- Unità 30: essiccamento, raffreddamento gas di cracking, demetanazione e produzione idrogeno, deetanazione, reattori idrogenazione cetilene e separazione etilene/etano.
- Unità 40: depropanazione, idrogenazione metilacetilene/propadiene e separazione Propilene/Propano
- Unità 50: cicli frigo etilene e propilene
- Unità 60/90: trattamento sode spente e utilities

Il feedstock dell'impianto è costituito da Virgin Nafta e da G.P.L. Allo stoccaggio della virgin nafta di carica sono adibiti N°2 serbatoi a tetto galleggiante dotati di fondo doppio della capacità nominale di 5.000 m³.



Figura 1. stralcio ortofotografico e rappresentazione 3D semplificata impianto P1CR

3. Lista delle apparecchiature critiche dell'impianto P1CR

Il campo di applicazione del metodo ad indici proposto nella linea guida oggetto di analisi è quello dei sistemi di contenimento primari statici (colonne, scambiatori, vessel, reattori, ecc.), mentre sono esclusi attualmente macchine rotanti e sistemi di controllo.

Nello specifico il metodo si applica alle attrezzature critiche ai fini dell'incidente rilevante (art.3, lettera "o", del d.lgs. 105/2015), ossia a quelle apparecchiature coinvolte nelle sequenze incidentali ipotizzabili nello stabilimento o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa. Si considerano, inoltre, le apparecchiature contenenti fluidi pericolosi con hold up superiori al 5% della quantità limite prevista alla colonna 3 della parte 1 o della parte 2 dell'allegato 1 del d.lgs. 105/2015. Di seguito viene fornito l'elenco delle apparecchiature critiche dell'impianto P1CR oggetto di analisi, indicando il tipo di servizio, le condizioni operative e gli scenari incidentali in cui sono coinvolte, secondo il "Rapporto di Sicurezza 2016" [2] attualmente vigente per lo stabilimento Versalis di Brindisi:

Sigla Item	Tipologia	Servizio	Volume (m3)	P_esser (bar a)	T_esser (°c)	Scenario incidentale da RDS 2016
C-1501	Colonna	frazionatore primario	1689,5	1,55	185	P1CR_4
C-1503	Colonna	colonna di quench	1075,3	1,41	80	P1CR_4
C-2003	Colonna	colonna soda	271	10	43	HOLD UP
C-2004	Colonna	stripper A.P.	26,2	10,3	63	P1CR_6
C-3001	Colonna	I° demetanatore	37,8	16,2	-7,5	P1CR_21
C-3002A	Colonna	tronco inferiore II° demetanatore	67,2	15,9	-31	P1CR_8/16/21
C-3002B	Colonna	tronco superiore II° demetanatore	14	15,6	-95	P1CR_8/16/21
C-3003	Colonna	assorbitore etilene	11,3	27,85	-112	HOLD UP
C-3004	Colonna	deetanatore	181	22,5	68	P1CR_9/18
C-3005	Colonna	lavaggio green-oil	55,5	20,2	-24	HOLD UP
C-3006	Colonna	splitter C2	972,4	19	-7	P1CR_11
C-4001	Colonna	depropanatore n° 1	58,2	5,5	62	P1CR_17/19
C-4002	Colonna	depropanatore n° 2	78,3	11,6	51	P1CR_17/19
C-4003	Colonna	debutanatore	47,2	5	108	P1CR_19
C-4005A	Colonna	tronco superiore splitter C3	1182	18	45	P1CR_18
C-4005B	Colonna	tronco inferiore stripper C3	252	19	53	P1CR_18
V-3001	Vessel	separatore alim. I° demetanatore	19	29,15	-32	P1CR_7/16/21
V-3002	Vessel	separatore alim. II° demetanatore	15,9	28,55	-73	P1CR_7
V-3003	Vessel	separatore alim. II° demetanatore	4,1	28,1	-92	P1CR_7
V-3004	Vessel	accumulatore rifl II° demetanatore	7	15,5	-116	HOLD UP
V-5001	Vessel	accumulatore propilene refriger.	67,1	16,5	40	P1CR_20/21
R-3001A/B/C	Reattore	reattore idrogenazione C2	77,4	20,6	100	P1CR_10
R-3002A/B/C	Reattore	reattore idrogenazione C2	77,4	20,6	100	P1CR_10
R-4001A	Reattore	I° reattore idrogenazione C3	4,2	20,4	50	P1CR_5
R-4001B	Reattore	I° reattore idrogenazione C3	4,2	20,4	50	P1CR_5
R-4002	Reattore	II° reattore idrogenazione C3	2,7	25,5	38	P1CR_5
E-1015	Scambiatore	TLE F-1012	5,7	1,6	850	P1CR_3
E-1016	Scambiatore	TLE F-1012	5,7	1,6	850	P1CR_3
E-1017	Scambiatore	TLE F-1012	5,7	1,6	850	P1CR_3
E-1018	Scambiatore	TLE F-1012	5,7	1,6	850	P1CR_3
E-3020	Scambiatore	ribollitore deetanatore	7,7	22	68	HOLD UP
E-3030	Scambiatore	condensatore splitter C2 l.t.	19	19,6	-30	P1CR_18
E-4002	Scambiatore	condensatore depropanatore	2	5,5	24	P1CR_17
E-4005	Scambiatore	condensatore depropanatore	4,1	11,6	25,9	P1CR_17

Tabella 1. Elenco apparecchiature critiche impianto Steam Cracking P1CR

4. Applicazione del metodo ad indici

4.1 Generalità

Definite le apparecchiature critiche dell'impianto P1CR, si procede alla valutazione del programma di gestione dell'invecchiamento dell'impianto, applicando un'analisi di tipo fish-bone che individua n°6 fattori con effetto accelerante e n°6 fattori con effetto rallentante sul fenomeno stesso.

I fattori acceleranti e frenanti si traducono rispettivamente in penalità e compensazioni la cui somma algebrica consente di esprimere un giudizio sull'adeguatezza del sistema di gestione (se positiva) o di mettere in evidenza eventuali carenze e individuare apposite aree di miglioramento (se negativa).

4.2 Calcolo dei fattori acceleranti

Di seguito si riporta l'analisi e il risultato del calcolo dei singoli indici relativi ai fattori che favoriscono il fenomeno di invecchiamento (*età, fermate, ratei di guasto, incidenti/quasi incidenti, danneggiamenti, meccanismi di deterioramento*). I risultati illustrati sono stati ottenuti compilando fogli di calcolo costruiti ad hoc per i singoli indici secondo i moduli forniti dalla linea guida [1].

Tempo in servizio

Tale fattore è definito come il rapporto "età attuale/età massima di progetto" di ciascuna attrezzatura critica, espresso in forma percentuale. In funzione di tale valore, viene attribuito a ciascun item un punteggio secondo le indicazioni fornite dalla tabella 1 "penalità per età" a pag.10 della linea guida [1]. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Nel caso in analisi, l'età attuale risulta pari a 25 anni per n°32 apparecchiature originali di impianto (messa in servizio nel 1993) e 19 anni per n°6 apparecchiature installate nel revamping del 1999. L'età massima di progetto è stata assunta pari a 40 anni per ciascuna apparecchiatura; tale valore, che non è peraltro riportato nella documentazione tecnica di progetto, viene considerato quale limite temporale oltre il quale le attrezzature andrebbero assoggettate ad una valutazione in conformità alla UNI 11706 in ordine al degrado metallurgico del materiale.

Il rapporto percentuale "età attuale/età massima di progetto" è pari al 63% per le prime n°32 apparecchiature e al 48% per le n°6 apparecchiature di revamping. Essendo in ogni caso tale rapporto $f \leq 90\%$, il punteggio attribuito a ciascun item è pari a 1.

Il primo fattore di penalità risultante è, pertanto, pari a 1.

Fermate

Tale fattore è definito come rapporto "n° fermate impreviste/n° fermate totali" di ciascuna attrezzatura critica, espresso in forma percentuale. Si assume un periodo di riferimento pari a 10 anni (dal 2008 al 2018). In funzione di tale valore, viene attribuito a ciascun item un punteggio secondo le indicazioni fornite dalla tabella 2 "penalità per fermate impreviste" a pag. 11 della linea guida [1]. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Per l'impianto P1CR, negli ultimi 10 anni sono state eseguite N°4 fermate programmate; dall'analisi storica risultano inoltre N°2 fermate accidentali totali di impianto e N°3 fermate accidentali della "sezione fredda" ossia relative alle zone 20, 30, 40 e 50 di impianto.

Il suddetto rapporto risulta pari al 56% per tutte le apparecchiature critiche, eccezion fatta per le N°6 apparecchiature ricadenti in zona 10 e 15 che, avendo subito N°2 fermate accidentali in meno, registrano un rapporto pari al 33%.

In ogni caso essendo tale rapporto $25\% \leq f \leq 60\%$, il punteggio attribuito a ciascun item è pari a 3.

Il secondo fattore di penalità risultante risulta, pertanto, pari a 3.

Tassi di guasto

Tale fattore è dato dal rapporto “numero di guasti registrati/numero di guasti atteso in base ai ratei di guasto di riferimento” calcolato cumulativamente su tutte le apparecchiature critiche dell'impianto. Si assume un periodo di riferimento pari a 10 anni (dal 2008 al 2018). Calcolato il rapporto tra la somma dei guasti registrati e la somma dei guasti attesi, il fattore viene definito secondo le indicazioni fornite dalla tabella 3 “penalità per tassi di guasto” a pag. 12 della linea guida [1].

Per il caso in analisi, il numero totale di guasti effettivi è pari a “0” in quanto non si sono verificate perdite di contenimento da apparecchiature critiche negli ultimi 10 anni.

Il numero di guasti attesi è calcolato per ciascun item come prodotto tra i ratei di guasto riportati in calce nella tabella 2 (rif. TNO “Purple Book” ed. 2005) coincidenti a quelli usati per la redazione del Rapporto di Sicurezza 2016 [1] dello stabilimento Versalis di Brindisi e la durata del periodo di osservazione pari a 10 anni).

Tipologia	Rateo di guasto (ipotesi di rilascio continuo da un foro $\phi=10$ mm)
Apparecchiatura a pressione	$1 \cdot 10^{-5}$
Reattore	$1 \cdot 10^{-4}$
Scambiatori di calore	$1 \cdot 10^{-3}$

Tabella 2. Ratei di guasto di riferimento per tipologia di apparecchiatura

Il rapporto tra le sommatorie “numero di guasti registrati/numero di guasti atteso” è pari al $0 < 0,5$. Il terzo fattore di penalità risultante risulta, pertanto, pari a 1.

Incidenti e quasi incidenti

Si tratta di un fattore complessivo definito dal rapporto “numero di eventi significativi riconducibili a fenomeni di deterioramento / numero totale di eventi significativi” relativi ad attrezzature critiche in un periodo di riferimento pari a 10 anni. Si fa riferimento agli eventi significativi (incidenti e quasi incidenti) riportati nella sezione 2 “analisi dell’esperienza operativa” della appendice 2 “criteri e procedure per la conduzione delle ispezioni” ex art.27 D.Lgs 105/2015 (allegato H), escludendo gli eventi già computati nel calcolo di altri fattori (i.e fermate). Calcolato tale rapporto in forma percentuale, il fattore viene definito secondo le indicazioni della tabella 4 “penalità per incidenti, quasi incidenti e anomalie dovute a deterioramento” a pag. 13 della linea guida [1].

Per l'impianto P1CR si registrano n° 6 eventi significativi negli ultimi 10 anni, di cui n°5 non vengono considerati in quanto già computati nel calcolo del fattore “fermate”. L'unico evento significativo rimanente, legato al cedimento per errore di montaggio di una guarnizione di collegamento a uno strumento asservito al vessel V3002, non è attribuibile a fenomeni di deterioramento dell'apparecchiatura stessa. Il rapporto in analisi risulta pari $0 < 5\%$. Il quarto fattore di penalità risultante è, pertanto, pari a 1.

Danneggiamenti

Si tratta di un fattore complessivo definito dal rapporto “numero di danneggiamenti gravi / numero totale di attrezzature critiche” nel periodo di riferimento pari a 10 anni. Calcolato tale rapporto in forma percentuale, il fattore viene definito secondo le indicazioni fornite dalla tabella 5 “penalità per danneggiamenti e difetti” a pag. 13 della linea guida [1].

Il numero di danneggiamenti gravi (perdita di integrità con necessità di riparazione immediata o dismissione/sostituzione dell’attrezzatura) riscontrati nelle ispezioni sulle n°38 attrezzature critiche negli ultimi 10 anni è pari a 0. Il rapporto in analisi risulta pari a $0 < 1\%$.

Il quinto fattore di penalità risultante è, pertanto, pari a 1.

Meccanismi di danneggiamento

Tale fattore tiene conto dei meccanismi di danneggiamento delle apparecchiature critiche, cui è attribuito un determinato punteggio legato alla “rilevabilità” (tramite ispezione), alla velocità di propagazione e alle possibili conseguenze in base alla tabella 6a a pag.16 della linea guida [1].

Per ciascuna delle N°38 apparecchiature critiche del P1CR, è stato considerato il meccanismo di danneggiamento prevalente estrapolato dallo studio RBI SER 1785 L [3] condotto da I.I.S. nel 2013. Il tipo di danneggiamento più diffuso è quello della “corrosione sotto coibente” (n°33 apparecchiature, punteggio 4), con un caso di corrosione ambientale (punteggio 1) e n°4 casi di tenso-corrosione con fessurazione (punteggio 3).

Il sesto fattore di penalità risultante, dato dalla media dei punteggi, risulta pari a 3,82.

4.2 Calcolo dei fattori frenanti

Di seguito si riporta l’analisi e il risultato del calcolo dei singoli indici relativi ai fattori che limitano il fenomeno di invecchiamento (*sistema di gestione integrità, risultati audit SGS-PIR, piano, risultati ed efficacia delle ispezioni di integrità, controllo di processo, rivestimenti*). I risultati illustrati sono stati ottenuti compilando fogli di calcolo costruiti ad hoc per i singoli indici secondo i moduli forniti dalla linea guida [1].

Sistema di gestione integrità

Questo fattore riguarda la gestione dei controlli sulle attrezzature critiche, integrata nel SGS-PIR, in particolare al punto 4 “controllo operativo”. Il punteggio viene attribuito in base alle indicazioni della tabella 7 “Compensazione per “Sistema di gestione delle ispezioni” a pag. 18 della linea guida [1].

Per le apparecchiature critiche del P1CR il piano di ispezione è stato stabilito in base allo studio RBI SER 1785 L [3] del 2013, gestito con software ANTEA ed attuato nella recente fermata generale impianto del 2015.

Il primo fattore di compensazione assume pertanto valore pari a 3.

Risultati delle visite ispettive e degli audit SGS-PIR

Questo fattore fa riferimento ai risultati di visite ispettive delle autorità e di audit indipendenti sul SGS-PIR effettuati nel periodo di riferimento pari a 10 anni.

Il risultato è funzione dei rapporti tra il numero di non conformità minori e maggiori (presi separatamente) e il numero di punti esaminati; in base al valore percentuale di tale rapporto viene assegnato un punteggio secondo quanto riportato nella tabella 8 “Risultati delle visite ispettive e degli audit” a pag. 19 della linea guida. Il fattore è la media di tali punteggi.

Per lo stabilimento Versalis di Brindisi negli ultimi 10 anni sono stati eseguiti n°3 audit SGS-PIR, con n°81 punti esaminati, n°44 non conformità minori e n°29 non conformità maggiori. I rapporti percentuali considerati sono rispettivamente pari al 54%>30% per le non conformità minori e 36%>20% per le non conformità maggiori. A tali valori corrisponde un punteggio pari a 1.

Il secondo fattore di compensazione assume, pertanto, valore pari a 1.

Pianificazione e risultati delle ispezioni

Questo fattore tiene conto dei risultati delle verifiche di funzionalità e integrità (incluse quelle ex art.71 D.lgs. 81/08) sulle attrezzature critiche e del rispetto delle scadenze temporali di tali verifiche, nel periodo di riferimento pari agli ultimi 10 anni.

Con riferimento alle sommatorie delle verifiche eseguite sulle attrezzature critiche presenti, vengono considerati i seguenti n°3 rapporti in percentuale “n° test di funzionamento positivi/ n° test di funzionamento eseguiti”, “n° test di integrità positivi/ n° test di integrità eseguiti” e “n° ispezioni eseguite entro scadenza/n° ispezioni eseguite”.

Per ciascun dei suddetti indicatori è attribuito un punteggio parziale in base alle indicazioni riportate nella tabella 9 “Compensazione per pianificazione e risultati delle ispezioni” a pag.20 della linea guida [1]. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Per le apparecchiature critiche del P1CR negli ultimi 10 anni sono state eseguite n° 1 verifica di integrità e n° 5/6 verifiche di funzionamento tutte con esito positivo e nel rispetto dei termini temporali previsti.

I suddetti rapporti risultano pertanto pari al 100% e i punteggi parziali attribuiti sono tutti pari 4. Il terzo fattore di compensazione assume, pertanto, valore pari a 4.

Efficacia delle ispezioni

Questo fattore tiene conto dell'efficacia delle ispezioni effettuate (in termini di estensione, grado di copertura ottenibile e probabilità di rilevare i difetti) e della qualificazione degli ispettori che le hanno condotte. La valutazione va eseguita attribuendo a ciascuna apparecchiatura due punteggi in base alle indicazioni riportate nella tabella 10 “compensazione per efficacia delle ispezioni” a pag.22 della linea guida [1] e calcolando il punteggio medio per ciascuna di esse. Il fattore è la media dei suddetti punteggi.

Per le apparecchiature critiche dell'impianto P1CR, dal confronto con la tabella 10, risulta:

1) Efficacia/estensione dei controlli:

- Apparecchiature coibentate a caldo: punteggio 4
nell'ultima verifica di integrità, eseguita nella maggior parte dei casi nel 2015, hanno subito ispezione interna ed esterna (esame visivo, rilievi spessimetrici UTS e magnetoscopia su incroci di saldatura e bocchelli), previa rimozione totale della coibentazione
- Apparecchiature coibentate a freddo: punteggio 3
nell'ultima verifica di integrità, eseguita nel 2015, hanno subito ispezione esterna (esame visivo, rilievi spessimetrici UTS e magnetoscopia su incroci di saldatura e bocchelli) e pressatura pneumatica, previa rimozione della coibentazione a tampone nei punti critici (selle, bocchelli, ecc.) secondo un piano di controllo stabilito da RBI SER 1785 L [3].

2) Qualificazione degli ispettori/ditta: punteggio 2 (per tutte le apparecchiature)
ispezioni eseguite da ditta Eurocontrol con ispettori qualificati secondo Norma UNI EN ISO 9712:2012 Livello 2

Mediando i suddetti punteggi, il quarto fattore di compensazione risulta pari a 2,8.

Controllo di processo

Questo fattore tiene conto del fatto che il controllo dei parametri di processo contribuisce ad evitare situazioni che possono aumentare lo “stress” dei materiali. La valutazione viene condotta in base alle indicazioni riportate nella tabella 11 “Compensazione per la sicurezza funzionale” a pag.22 della linea guida [1].

L'impianto P1CR è dotato di sistemi di controllo (DCS) e blocco (logiche a relè) separati. Dal confronto diretto con la tabella 11, il quinto fattore di compensazione risulta pari a 3.

Rivestimenti e protezioni specifiche

Questo fattore tiene conto delle condizioni di eventuali rivestimenti interni (es. cladding e lining) o esterni delle apparecchiature, qualora presenti. Sulla base delle indicazioni riportate nella tabella 12 “compensazione per protezioni specifiche” a pag.23 della linea guida [1], si attribuiscono a ciascuna apparecchiatura due punteggi relativi rispettivamente alla frequenza di ispezione e alle condizioni rilevate nell'ultima ispezione e se ne calcola la media. Il fattore è calcolato, infine, mediando tutti i valori ottenuti.

Le apparecchiature critiche del P1CR non presentano rivestimenti interni ed esterni; si tratta di apparecchiature verniciate e coibentate a caldo (con lana di roccia) o a freddo (con fenolite). Per l'analisi si considerano, come suggerito da linea guida, le condizioni del trattamento superficiale (verniciatura).

Dal confronto con la tabella 12, risulta nello specifico:

- 1) Intervallo di tempo dall'ultima ispezione del rivestimento
 - Per n°34 apparecchiature critiche ultima ispezione del rivestimento in occasione della verifica di integrità, con rimozione della coibentazione, nel 2015 (3 anni fa < dell'intervallo minimo pari a 5 anni): punteggio 4
 - Per n°4 apparecchiature critiche ultima ispezione del rivestimento in occasione della verifica di integrità, con rimozione della coibentazione, nel 2010 (8 anni fa, periodo compreso tra intervallo minimo pari a 5 anni e massimo pari a 10 anni): punteggio 2.5
- 2) Condizioni di conservazione rilevate: punteggio 4 (condizioni ottime) per tutti gli item
 - in occasione delle suddette ispezioni le apparecchiature "calde" sono state integralmente spazzolate e verniciate; le apparecchiature "fredde" presentavano la superficie esterna in ottime condizioni nei punti critici "scoibentati" a tampone (anche in questo caso è stata comunque riapplicato il ciclo idoneo di verniciatura).

Mediando i suddetti punteggi, il sesto fattore di compensazione risulta pari a 3.92.

5. Elaborazione dei punteggi e valutazione finale

L'elaborazione dei punteggi viene effettuata sommando algebricamente i fattori relativi alle penalità (da assumere con segno negativo) e i fattori relativi alle compensazioni (da assumere con segno positivo), per ottenere l'indice compensato IC.

La linea guida consente al gestore di attribuire a ciascun fattore un peso differente qualora si voglia dare più risalto ad alcuni aspetti sia penalizzanti che compensativi rispetto ad altri. I pesi differenziati devono essere in ogni caso normalizzati facendo in modo che la somma relativa ai pesi delle penalità sia pari a (-6) e la somma relativa ai pesi delle compensazioni sia pari a (6).

Per il caso in questione, si sceglie di attribuire a tutti i fattori il peso unitario in modo da conservare un carattere quanto più oggettivo e neutrale possibile.

Si riportano, di seguito, le tabelle riepilogative dei valori calcolati per i singoli fattori acceleranti e frenanti, il calcolo della penalità totale P e della compensazione totale C e l'indice compensato IC per il caso in analisi:

Fattori acceleranti	Peso	Punteggio	Punteggio pesato
Età di esercizio delle attrezzature critiche	-1	1	-1
Fermate impreviste	-1	3	-3
Tassi di guasto (perdita di contenimento)	-1	1	-1
Incidenti e quasi incidenti dovuti a corrosione	-1	1	-1
Danneggiamenti e difetti	-1	1	-1
Meccanismi di deterioramento	-1	3,82	-3,82
Penalità totale P	-1	10,82	-10,82

Tabella 3. Riepilogo dei fattori acceleranti e calcolo della penalità totale

Fattori frenanti (compensazioni)	Peso	Punteggio	Punteggio pesato
Sistema di gestione SGS-PIR	+1	3	3
Risultati degli Audit	+1	1	1
Pianificazione e risultati delle ispezioni	+1	4	4
Efficacia delle ispezioni	+1	2,8	2,8
Controllo di processo	+1	3	3
Protezioni specifiche meccaniche (rivestimenti)	+1	3,92	3,92
Compensazione totale C	+1	17,72	+17,72

Tabella 4. Riepilogo dei fattori frenanti e calcolo della compensazione totale

$$\text{Indice compensato IC} = P+C = -10,82 + 17,72 = 6,9$$

Per le apparecchiature critiche del P1CR, il valore dell'indice compensato risulta ampiamente positivo.

6. Conclusioni

Avendo ottenuto un indice compensato $IC > 0$, si può concludere, in accordo alle indicazioni della linea guida, che il programma di gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature critiche dell'impianto Steam Cracking P1CR risulta adeguato.

Dall'analisi dei valori dei singoli indici relativi a penalità e compensazioni, si possono, comunque, individuare spunti di miglioramento

Nell'ambito delle penalità emergono n°2 indici (fermate intempestive e meccanismi di deterioramento) con valore assoluto ≥ 3 , mentre gli altri indici assumono tutti il valore minimo unitario.

Relativamente ai meccanismi di deterioramento, il gestore non ha leve di azione in quanto si tratta di un fattore legato esclusivamente alle particolari condizioni di esercizio delle apparecchiature (nella maggior parte dei casi corrosione sotto coibente). È possibile, altresì, agire sui corrispondenti fattori compensativi relativi alle ispezioni. Su quest'aspetto, l'analisi condotta dimostra che il livello qualitativo è già elevato come dimostrato dai valori calcolati per i fattori "pianificazione e risultati delle ispezioni" (punteggio 4) e "efficacia delle ispezioni" (punteggio 2,8).

Relativamente al fattore fermate impreviste, oltre alle azioni correttive immediate mirate alla soluzione del problema, il gestore ha messo in atto una serie di interventi di miglioramento atti ad evitare il ripetersi delle cause radice che hanno portato alle fermate.

Nell'ambito delle compensazioni, i valori degli indici risultano tutti elevati, fatta eccezione per quello relativo ai "risultati di audit", legato al numero di non conformità minori/maggiori (prevalentemente di sistema) emerse in fase delle ispezioni SGS-PIR negli ultimi 10 anni. Si sottolinea, comunque, che si tratta di non conformità già risolte e superate o su cui il gestore ha presentato un apposito piano di miglioramento già in fase di attuazione.

Infine, sul fattore "controllo di processo" (che già attualmente assume valore pari a 3) sono stati conclusi una serie di studi e sono in corso delle iniziative atte ad ottimizzare il livello SIL dei loop di blocco in accordo a quanto previsto dalle normative IEC 61508 [19] e IEC 61511 [20].

Volendo, infine, esprimere un giudizio complessivo sulla speditezza di applicazione del metodo, lo "use case" sviluppato ha dimostrato che lo stesso, se applicato alle apparecchiature critiche di un singolo impianto o unità produttiva, risulta piuttosto scorrevole a patto che il gestore abbia una conoscenza dettagliata di tutti i meccanismi di deterioramento degli impianti e disponga di archivi della documentazione tecnica, dei risultati ispettivi e dei near miss aggiornati e consultabili in maniera rapida.

7. Bibliografia

- [1] Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso, INAIL, ISPRA, ARPA, ARPAV, ARPAL, MATTM, Italia, aprile 2018
- [2] Rapporto di Sicurezza 2016 ai sensi dell'art. 15 del D.Lgs. 105/2015 dello stabilimento Versalis di Brindisi, Tecnologia Ricerca Rischi S.r.l., maggio 2016
- [3] Analisi RBI SER 1785 L, Istituto Italiano della saldatura, settembre 2013
- [4] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, N. 105. Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [5] API2003. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. RP571, American Petroleum Inst., Washington, USA.

- [6] API, 2014. Integrity Operating Window RP584, American Petroleum Inst., Washington, USA
- [7] API, 2016, Risk-Based Inspection RP580, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA
- [8] API, 2016, Risk-Based Inspection Technology RP581, 3rd ed., American Petroleum Inst., Washington, USA.
- [9] ASME, 2007, PCC-3 Inspection Planning Using Risk-based Methods. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA
- [10] CEN, 2016 Risk Based Inspection Framework (RBIF) PrEN 16991 Brussel, B
- [11] EEMUA, 2014, Users' guide to the inspection, maintenance and repair of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks, P159 4th ed. EEMUA London, UK.
- [12] Energy Institute, 2016, Research Report: Guidance on available literature for assessing and managing ageing plant at bulk storage facilities, London.
- [13] ESReDa, 2006, Ageing of Components and Systems, Eds: Lars Petterson and Kaisa Simola. An ESReDa Working Group Report. Det Norske Veritas Oslo
- [14] EUR, report no. 26331 (2013) Corrosion Related Accidents in Petroleum Refineries. Wood, M. H., Arellano, A. V., & Van Wijk, L. European Commission Joint Research Centre.
- [15] HSE, 2012, Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments – FRED Health & Safety Executive London UK
- [16] HSE, 2010, Plant Ageing Study – A Summary Guide, Research Report RR823, Health & Safety Executive London UK
- [17] HSE 2006, Plant ageing, Management of equipment containing hazardous fluids or pressure, Research Report RR509, Health & Safety Executive London UK
- [18] IAEA, 2004 Management of life cycle and ageing at nuclear power plants: Improved Maintenance & Control of Nuclear Power Plant, TECDOC-1402 International Atomic Energy Agency
- [19] IEC 61508: 2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems, Geneva CH
- [20] IEC 61511-1:2016 Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector, Geneva CH
- [21] ISO 9712:2012 Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel, Geneva CH.
- [22] OREDA, 2015, Offshore and onshore reliability data handbook, 6th edition–Vol. I-II
- [23] UNI 11325-Parte 8 (2013) Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI) Milano Italia
- [24] UNI 10617:2012 Impianti a rischio di incidente rilevante Sistemi di gestione della sicurezza Requisiti essenziali, Milano Italia
- [25] P. A. Bragatto, C. Delle Site, A. Faragnoli, M. F. Milazzo, “Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso”, Atti SAFAP 2016. Milano, 15-16 novembre 2016.

Lo standard UNI - EN 16991:2018 e la gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti Seveso

P.A. Bragatto¹, C. Delle Site¹, A. Pirone¹, M.R. Vallerotonda¹

¹ Inail - Dit

Sommario

La norma UNI EN 16991:2018, di recente pubblicazione, fornisce gli indirizzi per la pianificazione e lo svolgimento dei controlli e delle manutenzioni nelle industrie di processo secondo l'approccio Risk Based Inspection (RBI). Nel quadro della Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) tali indicazioni sono di particolare interesse anche in relazione alla necessità di gestire, tra gli elementi del sistema di gestione della sicurezza, il rischio associato all'invecchiamento ed alla corrosione degli impianti attraverso programmi di ispezione e manutenzione adeguati. Tale aspetto, recepito nel d.lgs. 105/15, è stato oggetto di uno specifico gruppo di lavoro, istituito nell'ambito del Coordinamento ex art. 11 del decreto e coordinato da Inail, che ha elaborato una metodologia, a supporto degli ispettori, per la valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti Seveso. La metodologia è stata resa disponibile sul sito del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare contemporaneamente con la pubblicazione della norma. Lo studio mira a verificare la consistenza dei due documenti.

Introduzione

Il 1 maggio 2018 l'European Committee for Standardization (CEN) ha pubblicato la norma 16991 "Risk-Based Inspection" [1] che specifica il quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio (RBIF) e fornisce le linee guida per le ispezioni e la manutenzione basate sul rischio (RBIM) nelle industrie degli idrocarburi e dei processi chimici, nella produzione di energia e in altri settori in cui la RBI è applicabile.

In Italia la norma è stata pubblicata dall'UNI il 31 maggio, in lingua inglese e con una breve sintesi in italiano. L'UNI è stato uno dei primi enti di normazione europei a pubblicare, a livello nazionale, la norma facendo seguito al NEN ed il SIS, enti omologhi per i Paesi Bassi e la Svezia. Lo standard intende fornire un riferimento comune per la formulazione delle politiche RBI e lo sviluppo dei corrispondenti programmi di ispezione e manutenzione.

Il documento è destinato ai manager e agli ingegneri che definiscono le politiche RBIM a mezzo del cosiddetto "RBI Framework", cioè del quadro generale entro il quale deve avvenire la creazione e l'applicazione di programmi di ispezione e manutenzione basati sul rischio negli impianti industriali. Ciò deve essere fatto in modo documentato ed efficiente, rispettando, allo stesso tempo, le normative legali e nazionali e garantendo il mantenimento ed il miglioramento degli obiettivi di sicurezza, salute, business ed ambiente. Il fatto che si parli di "framework" indica la volontà del normatore nel promuovere un utilizzo congiunto dello standard con le pratiche accettate a livello internazionale, i regolamenti nazionali e le politiche aziendali.

L'RBIF si rivolge principalmente alle apparecchiature di contenimento statico (ad esempio serbatoi, tubazioni), alle attrezzature di contenimento dinamico/rotante (ad esempio pompe, turbine, valvole) e ai dispositivi di decompressione, ma può essere esteso ad altri tipi di apparecchiature, se necessario. È, inoltre, principalmente indirizzata alle apparecchiature e/o ai sistemi nella fase di messa in servizio dell'operazione, ma può anche essere applicata

in fase di progettazione per l'analisi e/o la determinazione delle strategie di manutenzione/ispezione o delle fasi di estensione della vita.

Per un fatto puramente casuale la pubblicazione della nuova norma CEN 16991 ha coinciso con la pubblicazione da parte del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare italiano (MATTM) del Metodo per la Valutazione Sintetica dell'adeguatezza del programma di Gestione dell'Invecchiamento delle attrezzature critiche negli stabilimenti Seveso [2]. Il primo documento è destinato ai gestori di stabilimento, che sono liberi di scegliere gli strumenti che ritengono più idonei al raggiungimento dei requisiti di legge; il secondo è destinato agli ispettori che operano su incarico delle Autorità competenti per la Seveso, al fine di verificare la reale corrispondenza di quanto posto in atto dai gestori rispetto ai requisiti di legge.

La struttura dell'articolo è articolata in 6 sezioni. La sezione 1 è dedicata all'evoluzione della normativa RBI in Europa. La sezione 2 è dedicata all'impatto della RBI sulla legislazione Europea. La Sezione 3 riporta una breve sintesi della norma. La sezione 4 riporta molto sinteticamente i concetti del metodo MATTM. Nella sezione 5 viene effettuato il confronto di coerenza fra i due documenti. Le conclusioni sono esposte nella sezione 6.

1. Storia della normativa "RBI"

Il cuore della metodologia RBIM riportata nella norma nasce quasi quindici fa dal progetto RIMAP (Procedure di ispezione e manutenzione basate sul rischio per l'industria europea) [3], un progetto finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del Sesto programma quadro 2000-2006. L'obiettivo del progetto era quello di fornire delle linee guida ai diversi settori industriali, inclusa l'industria chimica-petroliera, dell'energia e dell'acciaio, per l'adozione di politiche basate sul rischio nella gestione delle ispezioni e della manutenzione. Fin dall'inizio il RIMAP non ha mai nascosto l'ambizione di costituire la risposta "europea" alla grande novità della RBI, che proprio in quegli anni raccoglieva i primi seguaci, in particolare nel mondo dell'oil&gas, grazie soprattutto alla pubblicazione delle prime edizioni delle norme sviluppate e pubblicate dall'American Petroleum Institute (API) in materia: API 580:2002 ed API 581:2000 [4], [5]. Le norme API non erano una novità assoluta, perché già negli anni novanta la American Society of Mechanical Engineers (ASME) [6], aveva pubblicato la primissima e pionieristica linea guida sulla RBI. L'idea di RIMAP nasceva dal riconoscimento del grande sforzo compiuto dall'API, sia sul piano culturale che su quello tecnologico, che aveva proposto con audacia un approccio completamente innovativo ad una materia come quella dei controlli e delle verifiche delle attrezzature e degli impianti di processo tradizionalmente regolate da numerosi vincoli e scadenze temporali rigide. Con la RBI definita dall'API 580, la parte ispezioni, che comprende tutte le prove e verifiche che vengono compiute sui vari tipi di attrezzature (sistemi di contenimento, sistemi di sicurezza, macchine rotanti) diventa parte integrante di un sistema; esse non sono più un ambito isolato, ma necessitano un confronto continuo con il contesto esterno, che include i lavoratori, l'impianto e l'ambiente, che possono avere conseguenze più o meno importanti in funzione degli eventuali guasti o rotture delle attrezzature. Allo stesso tempo con la norma API 581 veniva definita anche la "tecnologia" per potere sviluppare nel concreto tale approccio che era, per quei tempi, veramente innovativo. API 581 di fatto si poneva come un vero distillato delle conoscenze disponibili in termini di meccanismi di degrado dei materiali in relazione ai processi ed alle lavorazioni tipiche del settore petrolifero, alle tecniche di misurazione e verifica delle condizioni dei materiali, alle tecniche di valutazione delle probabilità di guasto e delle conseguenze di eventuali rilasci.

Si può in pratica riconoscere alle norme API il merito di aver introdotto un nuovo approccio in base al quale i principali prodotti di lavoro della valutazione RBI e dell'approccio gestionale sono i piani che indicano le modalità di gestione a livello di singola attrezzatura.

Nonostante ciò, nell'idea alla base del progetto RIMAP, la soluzione proposta dalle norme API nel contesto dell'industria presentava alcuni aspetti problematici, per i quali valeva la pena investire in un programma di ricerca. I punti critici che furono individuati erano i seguenti:

1) le norme API sono legate al contesto petrolifero. L'estrapolazione ad altri settori, quello chimico o quello energetico, porta a forzature notevoli e ad esiti molto incerti. Per i serbatoi atmosferici, esistono delle norme EEMUA 159 specifiche [7] per la programmazione delle ispezioni basate sul rischio che sono efficaci ed abbastanza versatili, perché idonee sia ai prodotti petroliferi che agli altri liquidi, infiammabili o tossici. È evidente che, ad esclusione delle attrezzature in pressione, il campo resta ristretto e l'idea di avere per ogni settore delle linee guida specifiche appare poche promettente, in mancanza di un inquadramento generale;

2) le norme API sono molto complesse. Ciò è la necessaria conseguenza della completezza e della specificità che caratterizzano i documenti, infatti, quasi tutti i processi di raffinazione sono riportati nel testo. Come detto al punto precedente adattare a settori diversi l'originale architettura API può essere una fatica notevole, non sempre premiata. In particolare tutta la chimica, in particolare la produzione di specialità è completamente fuori dal campo API e sembra difficile pensare a sviluppi specifici per l'enorme varietà di processi, materiali e sostanze;

3) le norme API sono conformi all'approccio culturale "americano" ovvero ad un contesto in cui la legislazione tende a delegare molte responsabilità alle aziende che organizzano al proprio interno i controlli assumendosene le responsabilità. A livello europeo, invece, sono previste forme di controllo pubblico preventivo a tutti i livelli, dalla certificazione di attrezzature ed impianti, alle verifiche periodiche e, nel caso degli impianti "Seveso" a rischio di incidenti rilevanti, anche per le verifiche sul sistema di gestione della sicurezza e sull'analisi quantitativa svolta per individuare le attrezzature critiche per potenziali rilasci di sostanze pericolose e conseguente sviluppo di esplosioni, incendi e nubi tossiche. Inoltre, le valutazioni del rischio secondo le norme API non includono quelle per la salute, la sicurezza e l'ambiente che in Europa sono obbligatorie e soggette a forme di controllo ulteriore;

4) le norme API sono specializzate nei controlli d'integrità, essenziali per prevenire le perdite di contenimento. Non sono considerati invece i controlli di funzionalità, essenziali in particolare per sistemi di sicurezza e macchinari;

5) le norme API non includono le manutenzioni. Esse considerano solo la parte delle ispezioni, mentre non dicono niente sulla parte delle manutenzioni, che in molti contesti sono doppiamente legate ai controlli. Si pensi ad esempio alle macchine rotanti, dove è difficile separare la parte manutentiva ordinaria dalla parte ispettiva. Questa netta separazione fra le ispezioni e le manutenzioni fa sì che, paradossalmente, risulti ostico conciliare con le norme API gli approcci alla manutenzione più innovativi come quella della manutenzione centrata sull'affidabilità "Reliability Centered Maintenance" (RCM).

A seguito del progetto e, soprattutto, della sperimentazione presso vari contesti industriali specifici, le attività e i risultati sono convogliati nell'ambito del CEN; la via fu quella del CEN Workshop Agreement (CWA), una formula veloce che consente di definire degli "standard temporanei" in attesa dello svolgimento del complesso iter che porta alle norme internazionali. Nel 2008, ad un paio di anni dalla conclusione del progetto, fu pubblicato il documento CWA 15740:2008 "Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry (RIMAP)" [8]. Il successivo passaggio a vero e proprio standard si è però dimostrato difficoltoso. L'obiezione principale veniva proprio dalla compatibilità con la sicurezza del lavoro e dall'introduzione dell'approccio RBI, non pienamente condiviso in Europa. In alcuni paesi esiste sul piano pratico una forte separazione fra sicurezza e salute dei lavoratori e sicurezza delle attrezzature, cosa che in Italia, fortunatamente, non esiste

affatto. Ciò ha comportato che nel 2013, allo scadere dei cinque anni normalmente previsti del CWA, la decisione fu quella di prorogare il CWA 15740 per altri cinque anni, riservando ulteriore tempo per rispondere alle perplessità e resistenze in corso.

Dopo il progetto RIMAP, sono sorti altri problemi con l'utilizzo delle norme API proprio in relazione alla diffusione della RBI almeno negli stabilimenti più avanzati. L'esistenza del CWA 15740:2008, essendo esso un documento comunque riconosciuto, apriva la discussione sul suo utilizzo e ha di fatto spinto alla risoluzione dei nodi rimasti in sospeso con il congelamento del CWA.

I problemi sorti dopo il RIMAP sono riassunti di seguito:

1) le norme API non sono uno standard. Nel contesto europeo, che vede la presenza di Autorità Competenti con il compito di fare verifiche preventive su vari aspetti che riguardano la sicurezza, la salute e l'ambiente, il fatto che il programma delle ispezioni sia certificato da un soggetto terzo come rispondente a criteri normati, che assicurano l'integrazione con la valutazione del rischio al fine di assicurare la massima efficacia alle attività ispettiva, può essere un fattore premiante in fase di valutazione. Ciò, in particolare, è importante negli stabilimenti Seveso, che sono obbligati ad adottare un sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGSPIR), soggetto a controlli periodici da parte di ispettori inviati dall'Autorità competente. In Europa l'obbligo del sistema di gestione fino al 2012 era solo per gli stabilimenti di livello superiore, ma con la nuova Direttiva l'obbligo si è esteso anche a quelli di soglia inferiore. In Italia tale obbligo vigeva già dal 1999. La programmazione delle ispezioni e delle manutenzioni delle attrezzature critiche ai fini dell'incidente rilevante è uno dei punti qualificanti del sistema di gestione della sicurezza PIR. Poter dimostrare che è stata seguita una norma rappresenta un grande vantaggio per il gestore, che vede anche riconosciuto lo sforzo (spesso notevole) necessario per implementare all'interno dell'azienda un programma RBI. Si deve tenere conto che la mancanza della certificazione ostacola anche l'affidamento della programmazione RBI a soggetti terzi, società di consulenza, per le quali il riconoscimento del lavoro svolto richiede capitoli complessi e adempimenti che una certificazione terza renderebbe più agevole e trasparente;

2) le norme API non seguono lo schema della norma ISO 31000 "Risk management - Principles and guidelines" in merito alla gestione del rischio [9]. Lo standard ISO 31000 è una sorta di standard "madre" degli standard successivi, nel senso che richiede che tutti gli standard che hanno per oggetto la gestione di un qualche rischio abbiano una struttura analoga ed analoghe definizioni. Il vantaggio evidente è che le procedure possono essere strutturate in modo tale da essere condivise fra diversi sistemi di gestione o, nella condizione migliore, essere integrate in sistemi di gestione che tengano conto di vari aspetti. Sulla scorta dell'ISO 31000 si sono conformate (o sono in corso di revisione), fra le altre, l'ISO 9000 per la qualità [10], l'ISO 14000 per l'ambiente [11], l'ISO 55000 per la gestione asset [12], l'ISO 45000 sicurezza del lavoro [13]. La diversa strutturazione delle norme API pone un problema nella loro integrazione con gli altri aspetti, primo fra tutti la sicurezza del lavoro, che a partire dal 2018 è finalmente rientrato con la 45000 in un quadro armonizzabile con gli altri standard. In Italia, la norma per i sistemi di gestione della sicurezza PIR è soggetta alla UNI 10617 [14], in fase di revisione per conformarsi al modello ISO 31000. La possibilità di conformarsi ad uno schema ormai riconosciuto e consolidato rappresenta un ulteriore motivo per avere un allineamento anche formale del programma RBI a standard affermati;

3) le norme API non sono pensate esplicitamente per la gestione dell'invecchiamento. L'invecchiamento degli impianti e delle attrezzature è un'altra importante questione che, come dimostrano le indagini fatte dalla Commissione europea, è considerata in Europa un vero rischio emergente. Come successivamente argomentato, la nuova Direttiva Seveso del 2012 obbliga i gestori a pianificare azioni per prevenire gli incidenti dovuti agli effetti dell'invecchiamento e della corrosione sugli impianti Seveso. Le norme API sicuramente

sono organizzate per una gestione ottimizzata dell'integrità, che si sposa bene con la gestione dell'invecchiamento, senza però esaurirla appieno. Gli aspetti gestionali, in particolare, sono presenti nella API 581, ma non adeguatamente approfonditi. Aspetti come la gestione della documentazione lungo l'intero ciclo di vita dello stabilimento o la gestione delle modifiche, diventano fondamentali quando i cicli di vita diventano molto lunghi e superano la normale durata delle carriere lavorative. Rispetto all'approccio API molto auto-consistente, l'approccio RIMAP si mostra più aperto e flessibile ed appare più idoneo a gestire problemi complessi come l'invecchiamento, che non riguarda solo i materiali, ma anche la capacità delle organizzazioni di resistere alle difficoltà emergenti (resilienza).

Sulla base di quanto esposto, si può affermare che lo standard UNI EN 16991:2018 sembra dare finalmente una risposta sia alle problematiche "vecchie", che avevano motivato lo sviluppo di RIMAP, sia ai "nuovi" problemi sorti durante il faticoso iter verso la standardizzazione.

Dal punto di vista scientifico, lo standard e il background connesso al suo sviluppo, rappresentano un esempio significativo di come i risultati della ricerca europea vengano trasferiti all'industria. Certamente i tempi sono stati troppo lunghi e alcune resistenze potevano essere superate più velocemente, ma il risultato ottenuto rappresenta motivo di successo anche per il ruolo italiano, che è stato sicuramente di facilitazione del processo anche alla luce dell'esperienza riconosciuta nell'ambito della valutazione e gestione dei rischi ed dello sviluppo di una normativa consolidata e, spesso, all'avanguardia.

2. Attrezzature in pressione: diffusione della RBI in Europa ed in Italia

Durante l'esercizio l'integrità strutturale delle attrezzature a pressione è compromessa da vari meccanismi di danno, ciò determina situazioni di elevato rischio per la sicurezza. Il livello di rischio è strettamente correlato al tipo di impianto, all'invecchiamento ed alla manutenzione effettuata e può portare nel tempo a raggiungere livelli non accettabili. Se attuate in maniera rigorosa, le strategie manutentive di tipo "Risk-Based" consentono di ottimizzare i livelli di rischio. Nelle legislazioni sulla sicurezza delle attrezzature in pressione, la questione della RBI è affrontata in maniera molto diversa. In tutti i Paesi europei si prevedono per le attrezzature in pressione diverse forme di verifica di sicurezza lungo l'intero ciclo di vita oltre a quelle iniziali previste dalla stessa Direttiva PED. Per le altre attrezzature (serbatoi atmosferici, macchine) si può dire che le norme sono meno stringenti e l'introduzione della RBI non incontra particolari ostacoli.

Le posizioni assunte in Europa in relazione all'applicazione della RBI per quanto riguarda le attrezzature in pressione [15] sono riportate nella tabella 1.

Permessa	Condizionale		Non Permessa
Regno Unito	Irlanda	Lituania	Danimarca
Francia	Spagna	Ungheria	Polonia
Portogallo	Italia	Romania	Svezia
Bulgaria	Germania	Slovacchia	Grecia
	Austria	Slovenia	Lettonia
	Finlandia	Belgio	
		Rep. Serba	

Tabella 1. RBI ed attrezzature in pressione: quadro europeo

Alcuni Paesi, come il Regno Unito ed i Paesi Bassi sono convinti delle ispezioni RBI e le considerano del tutto valide per gli adempimenti sulle attrezzature in pressione. Altri Paesi, come la Grecia e la Danimarca, restano fermi sulle periodicità fissate per legge; questo ovviamente non impedisce di applicare la RBI, ma impone che ove siano imposte delle

verifiche di legge, queste siano effettuate a prescindere dai risultati dell'analisi RBI. Molti Paesi, fra cui l'Italia hanno un atteggiamento intermedio. Nel nostro Paese la legislazione ha anticipato questi temi; il decreto ministeriale n. 329 del 1° dicembre 2004, in buon anticipo sui tempi, ha razionalizzato la materia dell'esercizio delle attrezzature a pressione stabilendo la periodicità d'ispezione per le attrezzature da sottoporre a verifica. Tra i vari aspetti introdotti dal decreto, c'è quello correlato agli intervalli di riconrollo e modalità di ispezione con l'analisi di rischio, secondo metodologie tipo RBI che sono considerate un utile strumento per determinare la periodicità delle ispezioni di apparecchi in servizio, in alternativa a quelli fissati negli allegati A e B del decreto [16]. Da evidenziare che l'analisi RBI trova applicazione al fine di richiedere la deroga, sotto particolari condizioni adeguatamente dimostrate, per l'effettuazione delle verifiche periodiche di legge o per la richiesta di ispezioni alternative a quelle previste dall'allegato VII del D.lgs. 81/2008 e s.m.i.. Ulteriore conferma si riscontra nella specifica tecnica UNI/TS 11325-8:2013 [17] che fa parte della serie di specifiche e norme elaborate in conformità alle indicazioni dell'art. 3 del decreto del DM 329/2004. Il documento UNI/TS 11325-8:2013 indirizza ad una gestione delle ispezioni sulla base della metodologia RBI e fornisce le indicazioni per la definizione della periodicità d'ispezione delle attrezzature a pressione che devono essere pianificate tenendo conto della valutazione del rischio legato all'effettivo stato di conservazione ed efficienza delle attrezzature stesse.

3. Struttura della norma UNI EN 16991:2018

La norma UNI EN 16991:2018, come ampiamente evidenziato, è un riferimento per la formulazione delle politiche RBI e lo sviluppo dei corrispondenti programmi di ispezione e manutenzione. Il documento si sostanzia nella descrizione del RBI framework (RBIF) e del relativo processo di attuazione a livello aziendale, rispettivamente nei capitoli 5 e 6. I successivi paragrafi (dal 7 al 12) descrivono dettagliatamente le fasi della procedura RBMI all'interno del sistema di gestione generale. Il processo RBI è suddiviso in un livello di applicazione RBI principale ed un livello di strategia di ispezione e manutenzione; nella norma viene specificato che, sebbene la RBIF comprenda sia l'ispezione che la manutenzione, la norma si concentra principalmente sulla RBI e sulla sua applicabilità nel contesto di RBIM. L'RBIF supporta, quindi, l'ottimizzazione delle operazioni e della manutenzione, nonché la gestione dell'integrità delle risorse.

Il processo RBI deve essere chiaramente documentato in procedure scritte, la norma fornisce indicazioni relative alla documentazione minima di impianto e di processo da considerare, ai requisiti del personale coinvolto in ogni fase della valutazione del rischio, alla valutazione della probabilità di accadimento e delle conseguenze del danno, ai requisiti per la valutazione del rischio.

Il cuore della norma è costituito dalla metodologia elaborata nell'ambito del progetto europeo RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry); entrambi accomunati dall'obiettivo di rendere più efficienti i costi dei programmi di ispezione e manutenzione negli impianti industriali, mantenendo allo stesso tempo, e migliorando, la sicurezza, la salute e le prestazioni ambientali. Come dettagliatamente descritto per il RIMAP [18], e confermato nello standard, la metodologia, indipendente dal settore, è stata convalidata per le industrie chimiche, petrolchimiche, energetiche e siderurgiche. La norma specifica che il processo è applicabile a diverse attività industriali e a differenti attrezzature, comunque è principalmente applicabile alle apparecchiature statiche, ma anche alle apparecchiature rotanti, ai sistemi di sicurezza e alle apparecchiature elettriche/strumentali. Il processo si articola in sei fasi principali:

- 1) Analisi iniziale e pianificazione
- 2) Raccolta dati e validazione

- 3) Analisi di rischio multilivello (valutazione del rischio)
- 4) Processo decisionale e piano di azione
- 5) Esecuzione e reporting
- 6) Revisione delle prestazioni/ fase "evergreen"

Nella figura 1 è riportato il processo RBIM, inquadrato all'interno del sistema di gestione generale.

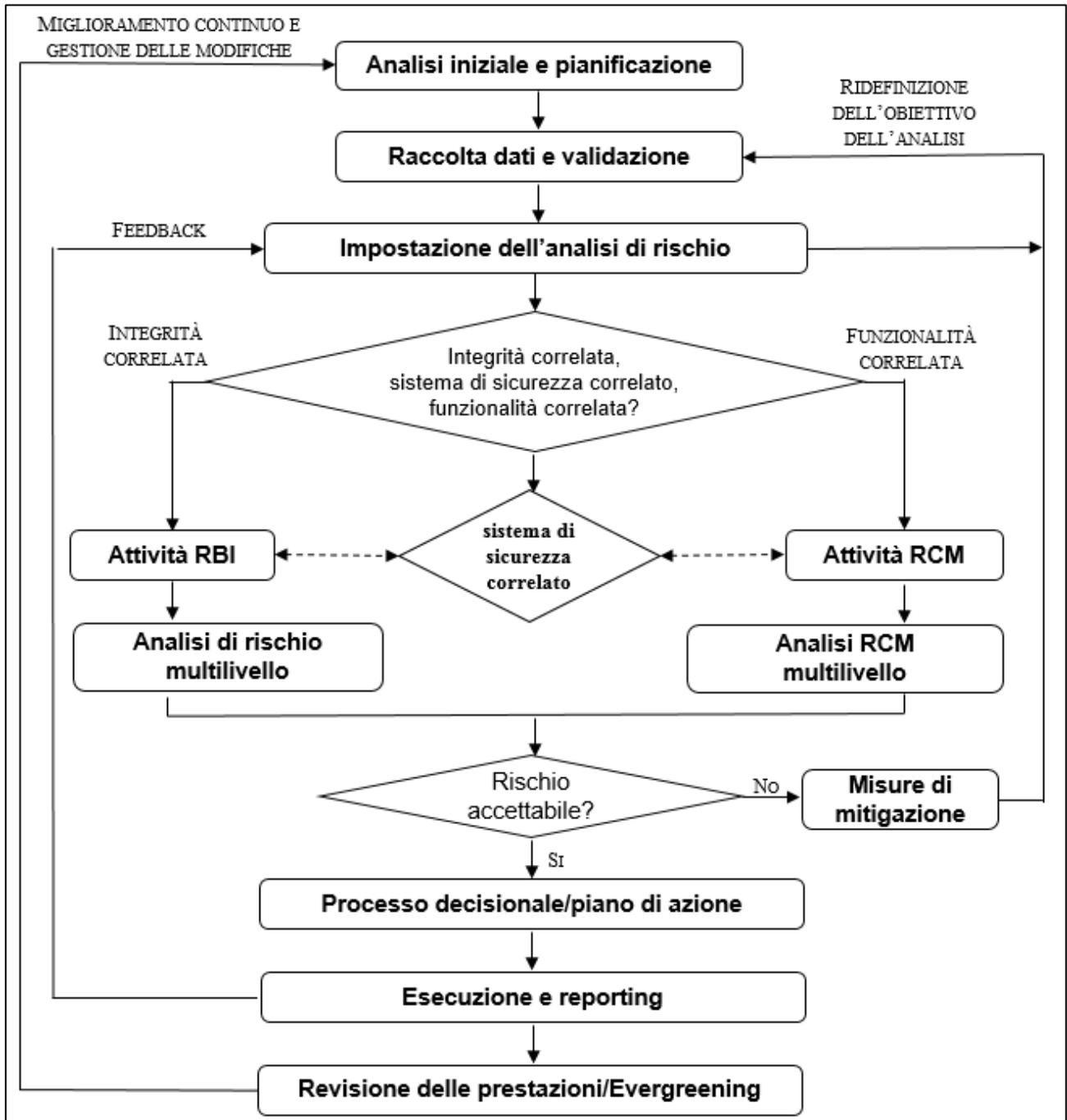


Figura 1. Framework RBIM all'interno della gestione aziendale

Per ogni fase, dettagliatamente descritta nel documento, è riportato l'obiettivo, i requisiti, gli input, le procedure e gli output, oltre che eventuali suggerimenti e limiti di applicabilità.

Senza entrare nel dettaglio della metodologia, si evidenzia soltanto che viene proposta un'analisi di rischio multilivello che tiene conto della complessità (di screening o di maggiore dettaglio) e del livello di gerarchia dell'impianto. Attraverso lo screening l'impianto è suddiviso in sistemi e in gruppi di apparecchiature con rischio medio/alto (che richiedono di essere analizzati nel dettaglio) o con rischio basso. La valutazione di dettaglio richiede che per ciascun sistema o gruppo di componenti devono essere identificati i meccanismi di degrado pertinenti e deve essere stimata l'entità del danno oltre che lo sviluppo del danno più probabile. Tra i requisiti che la norma specifica per la valutazione dei rischi, sono riportati quelli per identificare e considerare i meccanismi di danno e sono identificate le principali cause di danno. Queste informazioni sono fondamentali per definire l'intervallo di tempo massimo per la successiva attività di ispezione/manutenzione; infatti, sono propedeutiche alla fase del processo decisione e alla definizione dei piani di azione e monitoraggio.

4. Valutazione del programma di gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti Seveso

La Direttiva 2012/18/UE (Seveso III), rispetto alla precedente normativa, ha esplicitato che nell'ambito del sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti deve essere gestito il rischio associato all'invecchiamento ed alla corrosione degli impianti e delle attrezzature. Tale aspetto è presente nell'allegato 3 del D.lgs. 26 giugno 2015, n. 105, di recepimento della direttiva, che ha introdotto l'obbligo per i gestori degli stabilimenti di adottare piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose. Da qui la necessità di fornire un riferimento a supporto delle attività ispettive svolte dalle Autorità competenti sul SGS PIR ai sensi dell'art. 27 del D.lgs. 105/2015 per valutare la complessiva adeguatezza delle attività messe in atto dal management industriale al fine di gestire in modo sicuro il processo d'invecchiamento di apparecchiature e impianti critici. A tal proposito, nell'ambito delle attività svolte dal Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale (ex art. 11 del decreto), è stato istituito un gruppo di lavoro, coordinato da Inail, che ha elaborato uno strumento operativo, ad uso facoltativo, attualmente disponibile sul sito del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare.

Lo strumento operativo consiste in un metodo a indici che prevede di individuare i fattori che hanno un effetto accelerante e quelli che hanno un effetto frenante sull'invecchiamento; i fattori acceleranti danno luogo a penalità, mentre i fattori frenanti danno luogo a compensazioni. L'applicazione richiede di compilare alcuni moduli e di calcolare un indice compensato; la valutazione generale del sistema è data dalla somma algebrica delle penalità e delle compensazioni. Il punteggio ottenuto per un componente specifico suggerisce agli auditor cosa raccomandare o prescrivere ai gestori dell'impianto, al fine di portare il sistema di gestione dell'invecchiamento ad un livello adeguato [19], [20].

Il metodo rappresenta il primo strumento emanato in ambito nazionale per una valutazione dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento negli stabilimenti soggetti al D.lgs. 105/2015.

5. Confronto tra lo standard e la metodologia

La pubblicazione della norma UNI EN 16991:2018, quasi in concomitanza con la pubblicazione della metodologia descritta nel precedente paragrafo, ha determinato la necessità di verificare la reciproca consistenza dei due documenti ed, in particolare, come il metodo proposto si posizionasse nel contesto delle azioni previste dallo standard. Entrambi i documenti mirano a fornire indirizzi per la redazione ed attuazione di programmi

di ispezione e manutenzione che siano integrati con la gestione generale dell'impianto. Tale aspetto è più volte richiamato nello standard (in relazione al mantenimento degli obiettivi di salute, sicurezza, ambiente e business) ed è presente anche nell'ambito del SGSPiR che deve essere integrato con la gestione dell'azienda per gli aspetti che riguardano la produzione, la gestione della sicurezza e l'igiene del lavoro e l'eventuale gestione della qualità e dell'ambiente (cfr. allegato H appendice 3, punto 1.ii della lista di riscontro utilizzata dalle Commissioni ispettive per verificare l'attuazione del SGS PiR). Lo standard delinea un quadro di carattere sistemico e gestionale che, una volta definito, trova un'applicazione duratura nel tempo, da sottoporre a revisione nell'ottica del miglioramento continuo. Il metodo, invece, fornisce una fotografia della gestione in atto, riferita al momento cui viene applicato nello stabilimento. Esso, inoltre, non è vincolato ad alcun approccio di pianificazione dei controlli e di integrità e lascia, quindi, ampia scelta al gestore che può adottare lo strumento che più ritiene adatto alla propria realtà aziendale. I destinatari sono differenti; la norma è rivolta ai gestori, mentre la metodologia agli ispettori delle Commissioni che sono chiamati a fornire una valutazione di adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento in tempi molto ristretti. Comunque, come specificato nel testo, la metodologia può essere utilizzata anche dal gestore dello stabilimento per un'autovalutazione e dagli enti esterni (auditor privati).

Nel merito dei fattori definiti nella metodologia, conforta evidenziare che le prime analogie si riferiscono ai fattori frenanti, ovvero a quelli che danno luogo a compensazioni; in particolare:

- il fattore "sistema di gestione integrità", nell'ambito degli standard e delle linee guida di settore, richiama lo standard CEN 16991:2018. L'assegnazione del punteggio premia l'adozione di una programmazione delle ispezioni secondo un approccio RBI (livello 3) e la "dinamicità" della gestione delle ispezioni (livello 4) in coerenza con quanto richiesto nella fase di *evergreen* descritta dallo standard;
- il fattore "efficacia delle ispezioni", riferito alle ispezioni realmente fatte, tiene conto dell'appropriatezza delle misurazioni in funzione dei meccanismi di deterioramento in atto (secondo le tabelle di associazione "meccanismi di danno-metodo di ispezione") e della qualificazione degli ispettori;
- il fattore "rivestimenti e protezioni specifiche" evidenzia che, ai fini dell'assegnazione del punteggio, è necessario considerare l'intervallo massimo dall'ultima ispezione in funzione dei materiali del rivestimento.

Un aspetto essenziale di confronto riguarda i meccanismi di deterioramento, fattore accelerante del metodo. La valutazione di dettaglio descritta nell'analisi di rischio dello standard richiede di identificare i principali meccanismi di degrado e le cause di danno per ogni sistema/gruppo di componenti individuato. I danni sono distinti in "guasti" veri e propri e "cause all'origine del guasto" (ad esempio deterioramento delle attrezzature, impatto dei fattori umani, progettazione degli asset). La norma fornisce esempi per la valutazione in relazione ai meccanismi di danno ed alle loro caratteristiche (allegato 6A), alla struttura gerarchica dell'impianto (allegato 7A) ed al metodo di ispezione da adottare in relazione a determinati parametri (allegato 8A). La metodologia proposta richiede di riportare il meccanismo di deterioramento prevalente per ogni attrezzatura critica. In funzione della complessità dell'attrezzatura il metodo associa il meccanismo prevalente ad una unità logica dell'impianto o ai singoli componenti. I meccanismi sono raggruppati sulla base di tre punteggi parziali che tengono conto della rilevabilità mediante una tecnica di ispezione, della velocità di propagazione dei fenomeni ed alle loro conseguenze. La tabella 2 fornisce un primo confronto, qualitativo, tra i documenti in relazione ai meccanismi di deterioramento dimostrandone la coerenza. Sono evidenziati gli approfondimenti futuri che necessitano di un'analisi ulteriore in relazione ai riferimenti richiamati nei testi.

	Standard	Metodo	Confronto
Meccanismi	“Principali”	“Prevalenti”	OK
Applicazione	Allegato 7	Unità logica di impianto oppure singolo item	OK
Caratteristiche del meccanismo	Allegato 6	Accurata conoscenza del fenomeno (pag. 14) + velocità di propagazione	OK + approfondimento
Metodo di ispezione	Allegato 8	Rilevabilità	OK + approfondimento
Conseguenze	Allegato 8	Conseguenze fenomeni	OK + approfondimento

Tabella 2. Meccanismi di deterioramento: primo confronto tra la norma e la metodologia

Nel contesto dei controlli sulle attrezzature a pressione, infine, al fine di fornire un quadro il più possibile completo, si evidenzia, come riportato nella tabella 3, che le fasi di implementazione della RBI riportate nella specifica tecnica UNI/TS 11325-8:2013 ripercorrono quelle dello standard focalizzandosi su passaggi specifici della metodologia. L’emanazione della norma europea rappresenta l’occasione per introdurre eventuali integrazioni ed aggiornamenti alla specifica tecnica.

Fasi	CEN 16991: 2018	UNI/TS 11325-8:2013
1	Analisi iniziale e pianificazione	
2	Raccolta dei dati e validazione	Raccolta dati/informazioni
3	Analisi di rischio multilivello	Valutazione del rischio
4	Processo decisionale e piano di azione	Classificazione del rischio
		Elaborazione/attuazione del piano di ispezioni
5	Esecuzione e reporting	Definizione degli interventi di mitigazione
		Valutazione degli effetti degli interventi di mitigazione
6	Revisione delle prestazioni/ fase “evergreen”	Miglioramento continuo, attraverso il riavvio del processo RBI con la raccolta di nuovi dati ed informazioni

Tabella 3. Fasi della metodologia RBI nella UNI/TS 11325-8:2013

6. Conclusioni

La metodologia proposta in ambito Seveso rappresenta una proposta per la valutazione dell’invecchiamento, applicabile anche dai gestori. Certamente un punto di forza della metodologia è quello di aver previsto la valutazione dell’invecchiamento delle attrezzature dando una risposta più che soddisfacente alle indicazioni della Direttiva 2012/18/UE e all’obbligo imposto dal D.lgs. 105/15. L’emanazione della norma UNI EN 16991:2018 ha consentito di disporre di un riferimento europeo più vicino all’industria di processo e, pertanto, agli stabilimenti “Seveso” in relazione alla necessità di gestire l’invecchiamento e la corrosione di impianti ed attrezzature attraverso la pianificazione ed attuazione di programmi di ispezione e manutenzione. In tale contesto, conforta constatare che il contenuto della metodologia richiama le indicazioni dello standard e premia l’adozione di misure che rientrano nel framework della norma.

Essendo il metodo uno strumento applicativo, resta da chiarire come si posiziona nell’ambito delle valutazioni richieste per l’identificazione dei meccanismi di degrado in base ai risultati della RBI e dei relativi metodi di ispezione per ciascun tipo di meccanismo, come dettagliatamente specificato nella fase decision making/plan dello standard, anche in

un'ottica di certificazione da parte delle aziende. Lo studio proposto nell' articolo rappresenta una prima riflessione tra i due documenti ed assume un particolare interesse nel contesto della campagna ispettiva del 2018 sui SGSPiR, durante la quale è stata prevista la sperimentazione del metodo. Dagli esiti delle ispezioni sul SGSPiR e delle adesioni allo standard da parte delle aziende sarà possibile definire un quadro di applicabilità più chiaro che dovrà tenere comunque conto del fatto che il sistema di gestione in ambito Seveso, obbligatorio e non volontario, richiede di delineare procedure e istruzioni molto dettagliate che ben rispondono, se adeguatamente integrate, alle richieste dello standard.

Bibliografia

- [1] UNI EN 16991:2018 “Risk-Based Inspection”
- [2] Valutazione Sintetica dell'adeguatezza del programma di Gestione dell'Invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso;
http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/Valutazione_Invecchiamento_attrezzature_042018.pdf; ultimo accesso: 07.09.2018
- [3] Jovanovic A., Overview of RIMAP project and its deliverables in the area of power plants. *J. Press. Vessels Piping*. 2004; 81 (10-11) pp. 815–824
- [4] API 580:2002 “Risk-Based Inspection”, First edition Maggio 2002
- [5] API 581:2000 “Risk-Based Inspection Base Resource Document”, First edition Maggio 2000
- [6] ASME, 2007, PCC-3 Inspection Planning Using Risk-based Methods. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA
- [7] EEMUA, 2014, Users' guide to the inspection, maintenance and repair of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks, P159 4th ed. EEMUA London, UK. Energy Institute, 2016, Research Report: Guidance on available literature
- [8] CWA 15740 – CEN Workshop Agreement, Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry (RIMAP), 2008
- [9] ISO 31000:2018(en) “Risk management – Guidelines”
- [10] ISO 9001:2015(en) “Quality management system”
- [11] ISO 14000:2015(en) “Environmental management systems — Requirements with guidance for use”
- [12] ISO 55501:2014(en) “Asset management — Management systems — Requirements”
- [13] ISO 45000:2018(en) “Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use”
- [14] UNI 10617:2012 “Impianti a rischio di incidente rilevante Sistemi di gestione della sicurezza Requisiti essenziali”, Milano Italia
- [15] Fonte: <http://www.safelife.eu-vri.eu/>; ultimo accesso: 07.09.2018
- [16] V. Mazzocchi, C. Delle Site. Prospettive delle verifiche di sicurezza di attrezzature a pressione: il ruolo dell'IspeS”. Atti SAFAP 2006, in: <https://appsricercascientifica.inail.it/safap/safap2012.asp>, ultimo accesso: 10/09/2018
- [17] UNI 11325-Parte 8 (2013) Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI) Milano Italia
- [18] R. Kauer, A.S. Jovanovic, S. Angelsen, G. Vage. Plant Asset Management: RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance for European Industries) – The European

Approach. ASME PVP-Vol. 488, Risk and Reliability and Evaluation of Components and Machinery, July 25-29, 2004, San Diego, California, US PVP2004-3020

[19] P. A. Bragatto, C. Delle Site, A. Faragnoli, M. F. Milazzo. Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso. *Atti SAFAP 2016*, Milano, 15-16 novembre, pp. 31- 42, INAIL ISBN 978-88-7484-520-0

[20] P. A. Bragatto, C. Delle Site, M. F. Milazzo, A. Pirone, M.R. Vallerotonda. Managing pressure equipment aging in plants with major accident hazard: a methodology satisfying the requirements of the European Directive 2012/18/UE Seveso III. *Atti ASME PVP 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*, July 15-20, 2018, Prague, Repubblica Ceca

L'invecchiamento degli impianti e la gestione dell'integrità meccanica: prime risultanze delle attività ispettive svolte in stabilimenti Seveso e possibili opportunità di miglioramento

F. Vazzana¹, G. Capponi¹, G. Battistella¹

¹ Ispra - Servizio per i Rischi e la Sostenibilità Ambientale delle Tecnologie, delle Sostanze Chimiche, dei Cicli Produttivi e dei Servizi Idrici e per le Attività Ispettive

Sommario

Il presente articolo ha per oggetto le risultanze emerse dall'analisi delle attività di controllo, svolte dagli Organi Tecnici Nazionali nell'ambito dell'attuazione del d.lgs. 105/2015, implementazione italiana della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti (c.d. "Seveso III"), sugli stabilimenti di soglia superiore programmate nel biennio 2016-2017.

La memoria si propone di affrontare la problematica dell'invecchiamento attraverso la trattazione dei seguenti argomenti:

- panoramica sugli eventi incidentali occorsi negli ultimi anni;
- esiti delle ispezioni, in termini di principali carenze riscontrate e rapporto sul totale ispezionato con riferimento alle campagne ispettive sugli stabilimenti di soglia superiore effettuate negli anni 2016-2017; saranno fornite evidenze sulle valutazioni espresse dalle commissioni ispettive in merito alla natura degli aspetti legati alle attività di controllo e manutenzione;
- alcune indicazioni sulle modalità utilizzabili per approcciare la problematica (procedure, metodologie di manutenzione, identificazione delle apparecchiature critiche e natura dei controlli da svolgere per ciascuna di esse-specializzazione dei controlli.

1. Introduzione

Il testo di legge di riferimento, d.lgs. 105/2015 [1], enuncia gli obblighi generali del gestore di uno stabilimento soggetto a questa norma, indipendentemente dalla soglia di assoggettabilità (inferiore o superiore) nella quale esso si colloca.

In relazione al comma 2, le specificazioni sul tema del monitoraggio e del controllo dell'invecchiamento delle apparecchiature e degli impianti si trovano negli Allegati al Decreto, ed in particolare nell'Allegato 3 e nell'Allegato B che individuano i contenuti minimi del SGS-PIR, unico, rispetto agli altri sistemi di gestione volontari, obbligatorio per gli stabilimenti che ricadono nella soglia di applicabilità del Decreto stesso.

Al punto 3.4 dell'Allegato B sono esplicitati i contenuti e la necessità che:

"I criteri e le procedure di manutenzione, ispezione e verifica devono essere predisposti in modo da garantire l'affidabilità e disponibilità prevista per ogni parte dell'impianto, rilevante ai fini della sicurezza, in congruenza con quanto assunto a base delle valutazioni di cui al punto 3.3. Devono, inoltre, essere previsti piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, comprese le necessarie misure correttive e preventive. Le attività devono essere opportunamente autorizzate e documentate, anche attraverso specifici sistemi di permessi di lavoro e accesso."

L'importanza che ha assunto negli ultimi tempi la problematica dell'invecchiamento negli impianti industriali è dovuta al fatto che esso non è connesso all'età dell'apparecchiatura,

bensì alle modifiche che la stessa ha subito nel tempo, per le modalità di utilizzo e/o nell'ambiente specifico di utilizzo, in termini di grado di deterioramento e/o di danno subito in relazione alle prestazioni previste.

È fondamentale, pertanto che, nell'ambito del controllo operativo, siano adottate procedure e istruzioni per la manutenzione degli impianti, compresa la definizione delle modalità di identificazione delle apparecchiature critiche che possono essere soggette ad invecchiamento, al fine di predisporre adeguate strategie per prevenire guasti, malfunzionamenti o perdite di contenimento di sostanze pericolose.

2. L'oggetto dell'analisi

Con la nuova normativa Seveso, attraverso una sistematizzazione della pianificazione delle ispezioni, unita all'introduzione di un tariffario a carico dei gestori e con l'introduzione del Piano triennale delle ispezioni, predisposto dal Ministero dell'Interno con il supporto di Ispra, il periodo 2016-2018 è iniziato con una spinta propulsiva delle attività di controllo che porterà a fine triennio ad avere ispezionato, almeno una volta, tutti gli stabilimenti di soglia superiore, consentendo inoltre per una percentuale significativa anche l'effettuazione di una seconda ispezione. Grazie a tutta una serie di attività di supporto al sistema dei controlli, tra le quali quella della formazione di nuovi ispettori, già a partire dal 2016 si sono tenuti corsi di formazione finalizzati ad potenziare l'organico e permettere in futuro di incrementare il programma delle ispezioni fino a 190/200 ispezioni l'anno.

Ciò ha permesso, sfruttando il Database degli esiti delle ispezioni gestito da ISPRA, di esaminare le risultanze di 160 rapporti finali di ispezioni effettuate nel corso del biennio 2016-2017 e di estrapolare le situazioni in cui le Commissioni ispettive hanno evidenziato criticità legate al monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento delle apparecchiature.

3. La normativa

Il Decreto legislativo 105/2015, di recepimento della Direttiva Seveso III, in particolare l'allegato B, prescrive che:

«Devono, inoltre, essere previsti piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento (corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, comprese le necessarie misure correttive e preventive. Le attività devono essere opportunamente autorizzate e documentate anche attraverso specifici sistemi di permessi di lavoro e accesso».

Tale disposizione rappresenta una importante novità, a fronte di impianti che, in Italia come nella maggior parte dei Paesi europei, hanno sempre più anni di servizio e poche possibilità di essere sostituiti nel breve periodo.

Ma non è solo la norma di legge ad affrontare il problema. La normativa tecnica, presente in Italia dagli anni 90 e predisposta per fornire a chi la utilizza specifici strumenti per l'implementazione del SGS-PIR:

- UNI 10617: Requisiti essenziali
- UNI 10616: Linee guida per l'attuazione della UNI 10617
- UNI 10672: Sicurezza nella progettazione
- UNI 11226 parte 1 e 2: Procedure e requisiti per gli audit

fornisce ulteriori spunti per approcciare a livello di sistema la cosiddetta "integrità degli impianti". Inoltre, essendo specificamente citate nel decreto di recepimento della Direttiva Seveso, esse rappresentano lo "stato dell'arte" e permettono di garantire sia il rispetto dei requisiti di legge, sia la strutture degli altri standard ISO.

Sempre in ambito UNI, si possono ricordare le norme:

- UNI/TS11325-8 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione Parte 8: Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione rischio (RBI)
- UNI/TS11325-9 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione Parte 9: Idoneità al servizio (Fitness For Service)

Le valutazioni RBI e FFS, che permettono rispettivamente di ridurre e quantificare le probabilità di accadimento, in una logica più ampia dell'analisi del rischio, sono strumenti operativi di supporto per la gestione delle inaffidabilità impiantistiche, di processo e dei quasi incidenti. La logica delle norme tecniche API 581 [2] per RBI e API 579 [3] per FFS mira a superare la mera attuazione degli ordinari ed obbligatori adempimenti legislativi così da consentire una valorizzazione delle esperienze e una conseguente caratterizzazione delle tipologie, estensione e frequenza delle azioni manutentive.

Di estrema utilità, considerando che si tratta di una norma europea e quindi pensata nel rispetto della Direttiva Seveso, la linea guida EEMUA 159 [4] presenta informazioni dettagliate sulle modalità di danneggiamento comuni per i serbatoi, tra cui problemi del basamento, danni dovuti al vento, corrosione, scarichi e guarnizioni per tetti galleggianti. La guida include liste di controllo per l'uso durante le ispezioni, frequenze di ispezione raccomandate, quali metodi di ispezione utilizzare e come interpretare i dati di output. Essa fornisce inoltre i riferimenti relativi al calcolo della FFS e dei limiti di corrosione.

4. Il concetto di integrità meccanica

Il piano d'integrità dei sistemi e dei componenti critici per la PIR deve assicurare sia il contenimento delle sostanze pericolose all'interno delle apparecchiature e/o linee critiche sia il funzionamento dei sistemi di sicurezza attiva e passiva critici previsti dall'impianto. I diversi sistemi soggetti all'invecchiamento possono essere ricondotti a quattro tipologie di base (HSE, 2010 [5]):

- sistemi di contenimento primario;
- misure di controllo e mitigazione (salvaguardie di processo, sistemi di contenimento secondari o terziari, sistemi antincendio, salvaguardie ambientali esterne)
- sistemi di controllo, elettrici e strumentali
- strutture.

Per soddisfare quanto richiesto dalla normativa, il SGS-PIR deve essere strutturato in modo che, almeno:

1. Il controllo operativo di un impianto dalla produzione al trasferimento, stoccaggio e distribuzione di sostanze pericolose che possono dare luogo ad incidenti rilevanti (in caso di rilascio accidentale e/o anomalie di processo) deve essere attuato con specifiche procedure e/o istruzioni operative.
2. L'identificazione delle apparecchiature e delle linee critiche deve essere contenuta nell'analisi di rischio o nel RdS dell'impianto. Essa deve costituire la base di uno specifico piano d'ispezioni/controlli.
3. La manutenzione preventiva, programmata o a guasto delle apparecchiature o linee critiche può essere eseguita secondo i criteri o Best Practices di RBM (Risk Based Maintenance) disponibili.
4. Tali manutenzioni devono ridurre al minimo possibile il rischio di perdite di contenimento di sostanze pericolose e la funzionalità delle macchine (per esempio pompe, compressori e scambiatori) critiche per la PIR.

La banca dati MARS fornisce la base più appropriata per valutare il peso dell'invecchiamento nell'accadimento di incedenti rilevanti, facendo emergere che circa il

60% degli incidenti sono legati all'integrità meccanica e, di questi, il 50% ha l'invecchiamento come fattore determinante.

5. Alcuni esempi di incidenti occorsi recentemente:

- Evento incidentale consistente in uno sversamento accidentale di acido solforico da una tubazione posizionata all'interno di una canale di servizio. A seguito di tale perdita, ritenuta la causa scatenante, il basamento di sostegno di n. 3 serbatoi, nella parte terminale, ha subito un cedimento del terreno sottostante che ha comportato la rotazione dello stesso. Tale rotazione ha sbandato 1 dei 3 serbatoi, che è stato immediatamente svuotato del prodotto all'interno. Le linee di alimentazione sono state tempestivamente intercettate e per motivi di sicurezza si è ritenuto opportuno isolare il serbatoio interessato dal cedimento.
- Evento incidentale consistente nella fuoriuscita di prodotto petrolifero da una condotta e che ha interessato un'area di circa 3.000 mq.
- Rilascio di idrocarburi dal fondo di un grande serbatoio, con interessamento del ramo costiero per circa 4 miglia.
- Serbatoio costruito alla fine degli anni 90: rilascio dal fondo del serbatoio di prodotti petroliferi con presenza di surnatante per oltre due ettari. Parte delle lamiere interessata da corrosione di tipo crateriforme diffusa su quasi tutta la superficie. Riscontrati un certo numero di danneggiamenti puntuali e rilevata la presenza di fori passanti di dimensione variabile.

L'invecchiamento non è dunque correlato al tempo di servizio in quanto tale ma piuttosto alla "storia" dell'impianto o apparecchiatura e in funzione all'uso e manutenzione che ha subito.

6. Il risultato dell'analisi

La ricognizione è stata effettuata su un campione di 160 rapporti finali relativi ad ispezioni effettuate durante il biennio 2016-2017.

Nel 20% dei casi sono state riscontrate problematiche sulla corretta gestione dell'integrità meccanica delle apparecchiature e impianti. Non si può affermare che il dato sia positivo o negativo, in quanto esso può essere stato influenzato dal fatto che le Commissioni ispettive, nella maggior parte dei casi, approcciavano per la prima volta questo aspetto del "controllo operativo". Le ispezioni successive e l'accresciuta familiarità con questo argomento ci daranno la risposta. In ogni caso il dato è sicuramente significativo e meritevole di essere approfondito.

6.1 Alcuni esempi delle non conformità riscontrate

- Necessario che il gestore approfondisca le problematiche dei rischi legati all'invecchiamento (per corrosione, erosione, fatica e scorrimento viscoso) di apparecchiature e impianti, che possono portare a perdite di contenimento di sostanze pericolose, prevedendo, ove pertinente, uno specifico piano di monitoraggio e controllo, comprese le misure correttive e preventive.
- Non risulta evidenza di un piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature se non in funzione degli obblighi di legge.
- Sviluppata una procedura sull'Asset Integrity Management, ben strutturata ed in grado di gestire anche la problematica dell'invecchiamento, ma parzialmente attuata.
- Assenza di una procedura specifica per il monitoraggio e il controllo dell'invecchiamento. La procedura, indirizzata alle attrezzature a pressione (recipienti, tubazioni, ecc.) dovrà contenere per ciascuna attrezzatura:

- una analisi dei meccanismi di degrado esistenti o che potrebbero ingenerarsi nel tempo, un calcolo di vita consumata per effetto del meccanismo di danno individuato (es. fatica, corrosione, ecc.)
- un piano di controllo a scadenze prefissate o, in alternativa, un piano di monitoraggio in funzione del tempo, le tecniche da utilizzare
- un riferimento alle azioni preventive e alle eventuali azioni correttive.
- Migrare ad una forma di manutenzione legata alla vita degli elementi critici, per la conseguente gestione delle problematiche dell'invecchiamento di attrezzature e impianti, è necessario proseguire nello studio di metodologie oggettive di monitoraggio e controllo, al fine di giungere ad una definizione e codifica delle attività da svolgere.

7. Alcuni esempi di implementazione e best practice

Le criticità descritte nel paragrafo precedente forniscono gli elementi per identificare alcune azioni correttive che, agendo dalle fondamenta del SGS-PIR, possono consentire lo sviluppo di attività di manutenzione e controllo in campo specifiche per affrontare in maniera efficace la problematica dell'invecchiamento, quali ad esempio:

- Sviluppo di una procedura che:
 - Definisce la struttura organizzativa dell'Asset Integrity Management
 - Identifica le apparecchiature critiche per la sicurezza e per il processo
 - Prioritizza e revisiona i piani di Asset Integrity
 - Identifica i KPI per gli Elementi critici per l'integrità
 - Predisporre un Registro degli asset, in base a sistemi e software dei controlli, documenti, etc.
 - Evidenzia i criteri di ispezione/manutenzione di tutti gli asset (sicurezza+processo)
 - Predisporre un Inventario delle apparecchiature (vessel, piping, macchine rotanti, strumenti, etc.), identificati in modo univoco (numero di tag e/o per impianto)

Ma questo è solamente il primo passo, trattandosi di una procedura di alto livello, essa deve essere supportata da specifiche istruzioni operative che definiscono:

- La strategia delle ispezioni (in questo caso serbatoi atmosferici). Finalizzate a verificare periodicamente l'integrità strutturale dei singoli serbatoi, controllare lo stato di avanzamento dei fenomeni di degrado dei componenti principali, in modo da rendere minimo il rischio di fuoriuscite del prodotto contenuto, che potrebbero provocare danni all'uomo e all'ambiente
- I meccanismi di degrado. I meccanismi di degrado che si possono riscontrare, in base alla tipologia di serbatoi, alla natura dei fluidi stoccati, che sono alla base dell'organizzazione dei controlli ispettivi. Ad esempio, si possono fare le seguenti classificazioni:
 - corrosione: interna o esterna, localizzata o generalizzata
 - meccanismi non riconducibili alla corrosione: deformazioni, rotture meccaniche, cricche sulle saldature, cedimenti
- Le tecnologie ispettive. Oltre all'ispezione visiva, interna o esterna, i meccanismi di degrado che interessano i serbatoi sia atmosferici che in pressione, possono essere identificati tramite le comuni tecniche di CND. Come ad esempio:
 - Ispezione visiva (VT)
 - Liquidi penetranti (PT)
 - Magnetoscopia (MT)
 - Vacuum box test
 - Ultrasuoni (UT)

- Emissioni acustiche (AE)
- I componenti del serbatoio da ispezionare (tetto, mantello, fondo, fondazioni) e la tipologia di ispezioni:
 - Ispezioni con serbatoio in esercizio, ad esempio
 - Ispezione di routine
 - Ispezione esterna con serbatoio in servizio
 - Misure di spessore con ultrasuoni
 - Controllo periodico dei fondi dei serbatoi : emissioni acustiche
 - Verifica dei fondi per serbatoi dotati di doppio fondo
 - Ispezioni con il serbatoio fuori esercizio, ad esempio l'ispezione totale interna ed esterna in occasione delle manutenzioni generali del serbatoio
- Determinazione dei fattori che devono essere considerati per determinare la frequenza delle ispezioni, quali:
 - Caratteristiche costruttive
 - Natura del prodotto stoccato
 - Ratei di corrosione
 - Presenza di sistemi di prevenzione della corrosione
 - Rischi potenziali di inquinamento di suolo, acqua, aria
 - Presenza di doppi fondi o altro sistema di contenimento perdite dal fondo
 - Presenza o meno di sistemi di rilevamento perdite con serbatoi in esercizio

8. Conclusioni e suggerimenti

Per assicurare una sufficiente integrità meccanica dei componenti legati ai processi operativi è necessaria una sistematizzazione delle metodologie di controllo delle apparecchiature.

In particolare, pianificare ispezioni e controlli atti a verificare periodicamente (e prima del guasto) che i sistemi essenziali per la sicurezza mantengano la loro affidabilità per tutto il ciclo di vita operativa in modo da prevenire eventuali guasti che possano portare a perdite di contenimento di sostanze pericolose.

Per tale motivo, il SGS-PIR dovrebbe garantire che ogni apparecchiatura critica sia soggetta a un programma di controlli (manutenzione e verifica) adeguatamente calendarizzato in modo da garantire nel tempo il mantenimento dei requisiti di sicurezza fino alla messa fuori servizio

L'organizzazione dovrebbe definire specifiche strategie; monitorate e se del caso aggiornate durante tutto il ciclo di vita dell'impianto, al fine di stabilire e formalizzare i criteri per la definizione di adeguati regimi di manutenzione, quali, ad esempio:

- Manutenzione preventiva, e quindi
 - Ciclica
 - Su condizione
 - Predittiva
- Manutenzione correttiva

Soprattutto per stabilimenti Seveso, dove si processano e stoccano sostanze pericolose e dove deve essere maggiormente garantita l'integrità di apparecchiature e impianti.

Attraverso il metodo Risk Based Inspection (RBI), che consiste in specifiche attività ispettive in funzione delle reali condizioni operative delle apparecchiature, è possibile programmare una mirata pianificazione degli interventi manutentivi, mentre attraverso la metodica Fitness For Service (FFS) è possibile continuare a mantenere in esercizio, con un accurato monitoraggio, le attrezzature che presentano un degrado strutturale. Ma tali metodologie devono essere applicate contestualizzandole caso per caso, in modo da evitare la produzione di risultati eccessivamente ottimistici.

Cruciale risulta l'elemento "Gestione delle modifiche", considerando la difficoltà ad identificare l'introduzione di nuovi rischi da corrosione per modifiche alla progettazione di processo ed all'impianto e la possibilità che anche altre modifiche possano influenzare il rischio corrosione in modo meno evidente e quindi non riconosciuto (ad es. cambi nella fonte di approvvigionamento del greggio o un aumento della produzione, specie quando temporanei).

È estremamente importante la conservazione delle registrazioni relative all'esperienza operativa di stabilimento (ad esempio, le ore di funzionamento, i cicli di lavoro, le variazioni operative, come dei parametri di processo) comprese le anomalie o problematiche occorse.

Ciò significa che per garantire l'integrità degli impianti contenenti sostanze pericolose, è necessario valutare tutta la conformità (sicurezza sul lavoro, sicurezza ambientale, PIR) che confluisce in parte nella normativa Seveso.

A supporto degli ispettori/gestori, si possono indicare i seguenti fondamentali riferimenti nazionali:

- Progetto di revisione delle norme 10617 e 10616 con specifici approfondimenti relativi all'invecchiamento (best practice raccolte a livello internazionale e in base all'esperienza storica, in modo da guidare ad un utilizzo ragionato e razionale delle metodologie RBI e FFS, mutate attraverso lo sviluppo di specifici criteri all'interno del SGS-PIR).
- Gruppo di lavoro Invecchiamento delle attrezzature critiche negli stabilimenti Seveso (per ora sistemi di contenimento primari), nell'ambito degli indirizzi stabiliti dal decreto di recepimento della direttiva Seveso III, che ha portato allo sviluppo di una linea guida che fornisca per i gestori i criteri per una valutazione qualitativa delle loro apparecchiature, per gli ispettori una metodologia per valutare la corretta implementazione del SGS-PIR.

È da considerare inoltre importantissima l'azione informativa/formativa che attraverso corsi e seminari sta fornendo le basi per comprendere e affrontare efficacemente la problematica.

9. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose", GU Serie Generale n.161 del 14/07/2015 - Suppl. Ordinario n. 38.

[2] API RP 581 "Risk-Based Inspection Technology"

[3] API 579 1/ASME FFS-1 "Fitness for service assessment standard"

[4] EEMUA 159 "Above ground flat bottomed storage tanks-A guide to inspection, maintenance and repair"

[5] HSE Report RR823 "Plant ageing study"

Proposta per una piattaforma smart iot-based per la gestione delle attrezzature a pressione

S. Anastasi¹, V. Elia², L. Monica¹, M.G. Gnoni², S. Parisi²

¹ Inail - Dit

² Dip. Ingegneria dell'Innovazione - Università del Salento, Lecce

Sommario

Una delle criticità che caratterizza la gestione delle attrezzature di lavoro, e tra queste in particolare quelle a pressione, è legata alla mancanza di informazioni inerenti lo “stato” d’uso dell’apparecchio; capita, infatti, frequentemente che attività di controllo, manutenzione e verifica (ove prevista) non siano correttamente tracciate. Allo stesso modo si verifica spesso che non sia disponibile la documentazione a corredo dell’attrezzatura (Dichiarazione di Conformità del fabbricante, Istruzioni, ecc.), rendendo impossibile una conduzione sicura e coerente dell’apparecchio per l’operatore, un controllo adeguato per manutentori e verificatori e un’efficace attività di controllo da parte degli organi di vigilanza. Questa mancanza di informazioni, infatti, non consente di conoscere le corrette modalità di utilizzo e mantenimento dell’attrezzatura, né di disporre di feedback circa le azioni messe in campo dall’utilizzatore in fase di gestione dell’attrezzatura, per una pianificazione organizzativa ed economicamente efficace degli interventi di controllo, manutenzione e verifica.

Lo studio propone un prototipo di piattaforma software che integra tecnologie IOT (Internet of Things), montate sulle attrezzature a pressione, con sistemi cloud-based di gestione dei dati che consenta una univoca identificazione dell’attrezzatura a pressione e soprattutto la gestione dei dati relativi all’intero ciclo di vita della stessa, fornendo una tracciabilità dinamica e real time dei diversi interventi (ad esempio a causa di un guasto improvviso, in base alla pianificazione indicata dal fabbricante, in base a suggerimenti a valle di attività di controllo, manutenzione e/o verifica).

1. Introduzione

In base alla legislazione vigente [1, 2], il Datore di Lavoro deve sottoporre a regolari interventi di manutenzione e controllo le attrezzature di lavoro (secondo la definizione di cui all’art. 69 del d.lgs. 81/08 e s.m.i.). Oltre tali prescrizioni, per talune tipologie di attrezzature (elencate nell’allegato VII al medesimo decreto), ritenute particolarmente pericolose da parte del legislatore, il Datore di Lavoro è tenuto a far condurre verifiche periodiche da parte di Inail, Asl/Arpa o soggetti pubblici o privati abilitati.

L’esperienza maturata nella conduzione dell’attività di prima verifica periodica ha evidenziato notevoli lacune nella gestione delle attrezzature di lavoro, in particolare per quanto attiene la gestione documentale e la fase di registrazione degli interventi di manutenzione e controllo, indispensabile per la valutazione dello stato di manutenzione e conservazione dell’attrezzatura.

In tale contesto Inail, nell’ambito dell’attività di ricerca volta al miglioramento dei livelli di sicurezza nei luoghi di lavoro, ha avviato un progetto volto a realizzare uno strumento snello e di facile utilizzo per agevolare il Datore di Lavoro nell’assolvimento dei propri obblighi di gestione del parco attrezzature, anche nell’ottica di uniformare e rendere più efficace l’attività di verifica periodica.

2. Proposta di un processo di ispezione “smart”

L'idea è quella di definire un sistema integrato, sia dal punto di vista organizzativo che tecnico, per migliorare l'efficienza e l'efficacia tanto del processo di verifica periodica, quanto più in generale degli interventi di manutenzione e controllo di completa gestione del Datore di Lavoro/Utilizzatore. Tale sistema mira ad agevolare il Datore di Lavoro/Utilizzatore nelle operazioni di pianificazione e organizzazione della gestione dell'attrezzatura così da ottimizzare anche le attività di verifica svolte dai Verificatori. Si prevede di implementare alcune soluzioni:

- l'uso di etichette intelligenti basate su tecnologie IOT (Internet of Things), che identifichino univocamente l'attrezzatura e i suoi componenti,
- la standardizzazione di procedure per la classificazione, l'analisi e la regolamentazione delle attività necessarie,
- lo sviluppo un software web-based progettato per supportare sia le aziende, dal lato gestione della attrezzatura, sia i verificatori, in sede di verifica.

2.1 Figure coinvolte e ruoli

È stata condotta una prima analisi per individuare tutte le figure, che a vario titolo, sono coinvolte nel processo. Il sistema è basato sull'interazione di quattro “attori”: due dei quali sono direttamente coinvolti con il processo di ispezione – “*Datore di Lavoro/Utilizzatore*” e “*Verificatore*” – gli altri due – “*Fabbricante*” e “*Autorità Competente*” - sono coinvolti indirettamente nel processo, ma forniscono informazioni necessarie per espletare il completo funzionamento del processo. Le categorie appena definite sono fondamentali per la definizione di una linea guida a supporto della gestione dell'intero ciclo di vita delle verifiche ispettive - dalla prima verifica alle successive verifiche periodiche -, in quanto, definite le varie relazioni tra i soggetti, le informazioni che ciascuno può gestire – ed eventualmente condividere - vanno individuate in relazione ai singoli processi. Una schematizzazione delle relazioni tra le varie figure coinvolte è riportata in Figura 1:



Figura 1. Relazioni tra gli attori coinvolti nel processo di verifica.

- Attori interni (direttamente coinvolti nel processo di verifica); ■ Attori esterni

Il primo “attore interno” è l’**“Utilizzatore”** (il DDL, Datore di Lavoro): questo gestisce tutte le informazioni relative all'attrezzatura, la manutenzione e le condizioni di sicurezza. Si identifica tipicamente con il Datore di Lavoro, che acquista e utilizza l'attrezzatura per proprio conto, gestendone, inoltre, la fase di controllo e manutenzione. Questo può, a volte, identificarsi con un Noleggiatore, che, diversamente, acquista l'attrezzatura, ma raramente la utilizza. Il secondo è **“Verificatore”**: gestisce tutte le attività in fase di *Verifica Periodica*, dai controlli visivi e di funzionamento che devono essere eseguiti, alla compilazione della *Scheda Tecnica* e del *Verbale* di verifica periodica. Eseguisce inoltre i controlli relativi alla documentazione a corredo dell'attrezzatura e fornisce specifici consigli o avvertimenti in presenza di un eventuale presunta non conformità. Il Verificatore può afferire ad un ente pubblico (p.e. INAIL, ARPA o Asl) o a un soggetto privato abilitato. Gli altri due “attori esterni”

sono il **“Fabbricante”**, il quale fornisce tutte le informazioni di progetto e di manutenzione attraverso la *Dichiarazione di Conformità* e le *Istruzioni per l’uso*, e l’**“Autorità Competente”**, che può supportare gli ispettori durante le loro attività, sia dal punto di vista tecnico che organizzativo, con l’obiettivo di garantire la sicurezza delle attrezzature e di conseguenza prevenire l’eventuale rischio di incidenti.

2.2 Schema di funzionamento

Una volta definiti i ruoli è possibile entrare nel merito della logica prevista dal sistema “smart” a supporto del processo di verifica di attrezzature soggette a verifiche periodiche obbligatorie, quali quelle a pressioni indicate nell’allegato VII al D.lgs. 81/08 e s.m.i.

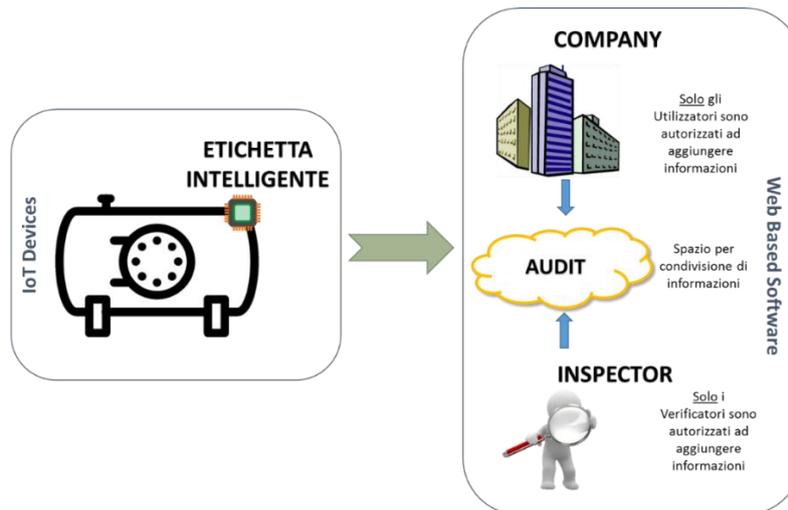


Figura 2. Interazione hardware e software nel sistema proposto.

La principale innovazione è l’introduzione di una *Etichetta Intelligente* capace di identificare univocamente l’attrezzatura e consentire l’attivazione delle funzionalità del prototipo software web-based, che sarà descritto in dettaglio nelle sezioni successive. L’idea è utilizzare tecnologie dell’IOT al fine di garantire una gestione più efficace del processo di verifica [5]. Il dispositivo intelligente è basato su tecnologie IOT, viene “attaccato” all’attrezzatura e attivato al suo primo utilizzo. Sono state individuate, nell’ambito dei sistemi di identificazione IOT, due tecnologie per lo sviluppo di queste etichette intelligenti: una basata sulla comunicazione in prossimità – la cosiddetta tecnologia NFC, Near Field Communication - e un’altra basata sulla comunicazione a lungo raggio - Bluetooth Low Energy, BLE. Attraverso l’utilizzo di un dispositivo mobile, quale smartphone o tablet, l’etichetta, solidale all’attrezzatura, permette l’identificazione univoca della stessa e l’accesso alle informazioni messe a disposizione dal prototipo software web-based. Il software prevede ambienti diversi per i due “attori” principali (es. Verificatore e Datore di Lavoro), così da garantire la riservatezza dei dati, come ad esempio per alcune informazioni, quali le strategie aziendali adottate per la manutenzione oppure i protocolli specifici seguito dal Verificatore. I dati, invece, condivisi possono essere di due tipi: quelli obbligatori, richiesti dalla legge, e quelli volontari, su scelta dell’utente. Per consentire tale condivisione è previsto un apposito spazio cloud per la comunicazione tra i due soggetti. Verranno illustrati successivamente, con maggiore dettaglio, i vari moduli che compongono la struttura del prototipo software.

3. Il prototipo software a supporto del processo di verifica “smart”

L’obiettivo del prototipo software web-based è fornire un supporto di continuo monitoraggio per l’Utilizzatore e il Verificatore. A tale scopo è di fondamentale importanza andare incontro

alle esigenze dei vari user, realizzando uno strumento di facile comprensione e semplice utilizzo anche tramite diverse modalità di accesso (es. smartphone, pc, tablet).

3.1 La struttura proposta

La struttura proposta del software è costituita da tre moduli principali: *Company*, *Inspector*, *Audit*. Di seguito, sono descritte le principali funzionalità dei singoli moduli.

Modulo Company: lo scopo principale del modulo *Company* è supportare l'Utilizzatore nella gestione delle informazioni sull'attrezzatura e sulla relativa manutenzione, oggetto di controllo da parte sia del verificatore che degli organi di vigilanza. Al suo interno sono presenti tre ulteriori moduli:

- **Anagrafica:** contenente:
 - i Dati Identificativi dell'attrezzatura, ovvero le informazioni di base quali la matricola Inail, l'identificativo dell'Etichetta Intelligente e i dati dell'Utilizzatore,
 - la Scheda Tecnica, dove sono presenti tutti i dati tecnici relativi all'attrezzatura, i parametri di lavoro, numero e tipo di componenti e dispositivi di sicurezza in dotazione. La sua redazione deve essere effettuata dal Verificatore (vedi anche Modulo *Inspector*). Inoltre, sono inseriti i documenti tecnici a corredo dell'attrezzatura come la Dichiarazione di Conformità, le Istruzioni per l'uso ed eventuali altri allegati, forniti dal Fabbricante.
- **Manutenzione:** include le varie politiche di manutenzione attuate dall'azienda; permette inoltre di registrare le attività di manutenzione/riparazione che sono state o che dovranno essere condotte sull'attrezzatura. La sua compilazione viene demandata all'Utilizzatore, che in funzione dei componenti critici da sorvegliare, ne registra le attività. Al fine di consentire un'ampia flessibilità di utilizzo, sono state definite 3 categorie di politiche di manutenzione:
 - manutenzione "Ordinaria": programma di manutenzione fornito dal fabbricante e/o da linee guida tecniche definite da Autorità Competente;
 - manutenzione "A Guasto": tiene traccia di eventi inaspettati di guasto/rottura dei componenti;
 - manutenzione "Proattiva": programma di manutenzione di politiche aziendali volto al miglioramento delle prestazioni e condizioni di sicurezza.

REGISTRO DI MANUTENZIONE						
						Data Ultima Revisione: 11/05/2018
Componente	Risorsa Titolo Manutentore	Descrizione	Foto	Allegati	Data Prevista	Data Effettuazione
Componente I	INTERNA - Marco Verdi	Controllo prestazioni	-----	Foto	11/05/2018	11/05/2018
Componente I	INTERNA - Marco Verdi	Controllo prestazioni	-----	Foto	11/11/2018	11/11/2018
Componente II	INTERNA - Giuseppe Rossi	Funzionalità	-----	Foto	11/05/2017	11/05/2017
Componente I	INTERNA - Marco Verdi	Controllo prestazioni	-----	Foto	11/05/2017	11/05/2017
Componente I	INTERNA - Marco Verdi	Controllo prestazioni	-----	Foto	11/05/2017	11/05/2017
Componente II	INTERNA - Giuseppe Rossi	Funzionalità	-----	Foto	11/05/2018	11/05/2018
Componente III	ESTERNA - Ditta Esperta S.r.l.	Controllo specifico	-----	Foto e immagini	11/05/2018	11/05/2018

Figura 3. Esempio di registrazione attività di manutenzione

- **Calendario:** all'interno di un *Registro di Manutenzione* vengono archiviate tutte le operazioni di manutenzione condotte. Inoltre, per gestire e coordinare nel modo più efficiente le attività, dispone di un'interfaccia grafica intuitiva, sotto-forma di calendario grafico (*VMC – Virtual Maintenance Calendar*). Il *Registro di Manutenzione* (Figura 3) prevede l'estrapolazione dello storico delle attività, per generare il *Registro di Controllo*. Questo poi verrà condiviso con il Verificatore attraverso il *Modulo Audit*, per la conduzione della fase di verifica periodica. Un esempio di calendario, il *VMC*, è mostrato in *Figura 4*, dove, per ogni attrezzatura sono indicati i relativi componenti monitorati, organizzati secondo i mesi di utilizzo. In

funzione della manutenzione condotta (DO) e di quella prevista (PLAN) sono presenti celle di colorazione specifica, che ne identificano le politiche di manutenzione.

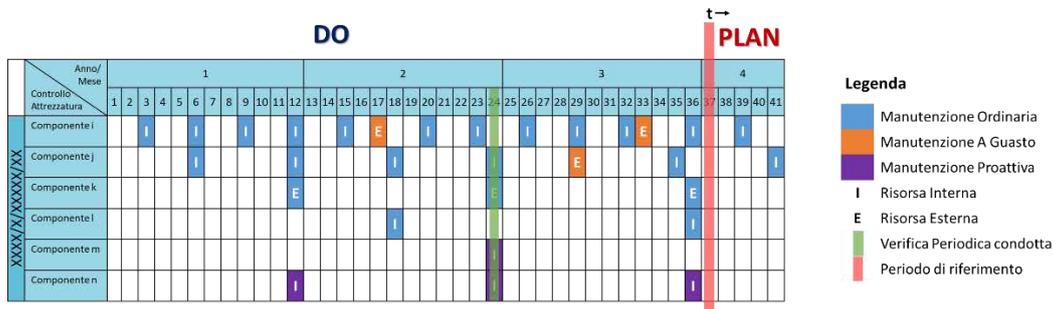


Figura 4. Esempio di Virtual Maintenance Calendar

Modulo Inspector: questo modulo è gestito esclusivamente dal Verificatore (pubblico o privato che sia) e consente di supportare le attività di verifica che è chiamato a svolgere. Si compone di due parti:

- *Scheda Tecnica*, questa sezione, già descritta nel Modulo *Company* all'interno di *Anagrafica*, è accessibile anche da qui, in quanto questo documento viene redatto dal Verificatore in occasione della prima verifica periodica accedendo alle informazioni (Documentazione tecnica, etc.) condivise nel successivo Modulo *Audit*.
- *Gestione Verifica*: è il modulo fondamentale dell'intero processo di Verifica Periodica; in esso, infatti, viene realizzata la stesura del Verbale di Verifica Periodica dell'attrezzatura. La procedura di compilazione risulta essere abbastanza intuitiva: propone al Verificatore campi appositi per stilare in maniera sintetica e pressoché standardizzata tale documento.

Questo modulo, in maniera del tutto speculare al precedente, è accessibile dal solo Verificatore e, di conseguenza, le informazioni in esso contenute rimangono riservate sino alla loro condivisione. Una ulteriore funzionalità del modulo è quella di contenere le eventuali indicazioni tecniche di indirizzo definite dall'Autorità Competente, al fine di renderle consultabili durante l'attività di verifica periodica.

Modulo Audit: il terzo e ultimo modulo è definito *Audit*. Questo ha lo scopo di mettere in comunicazione *Company* con *Inspector*, condividendo le informazioni e i dati necessari per permettere l'espletamento dell'attività di verifica periodica. Le principali informazioni condivise sono Dati Identificativi, Registro di Controllo, Documentazione (da parte *Company*), Scheda Tecnica e Verbali di verifica (da parte *Inspector*). Questo modulo costituisce uno spazio cloud separato dagli altri due, in modo tale da evitare eventuali accessi alle informazioni riservate da parte di utenti non autorizzati.

In *Figura 3* è riportato uno schema riassuntivo dei principali flussi di informazioni

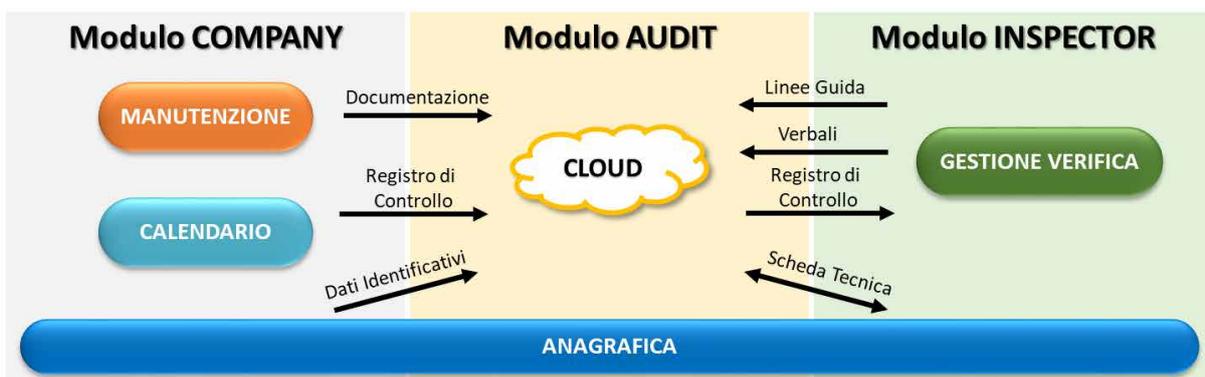


Figura 3. Principali informazioni condivise nel Modulo Audit

3.2 Le interazioni tra hardware e software

Dopo aver definito le informazioni necessarie e la struttura del software web, per meglio comprendere l'interazione dei vari attori, le fasi di applicazione e l'utilizzo dell'Etichetta Intelligente, si riportano, di seguito, due schemi esplicativi. In Figura 4 è mostrata la sequenza di interazione tra IOT device e il software.

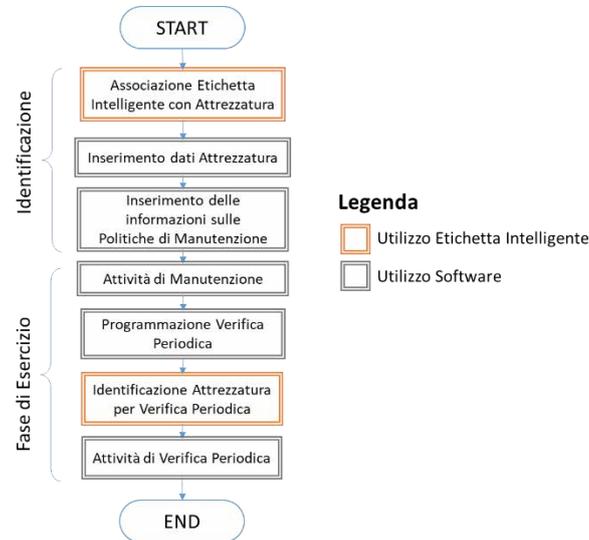


Figura 4. Diagramma di flusso interazione IoT device-Software

In Figura 5, invece, sono mostrati su scala temporale quali siano gli step fondamentali di interazione tra i vari user ed il prototipo software.

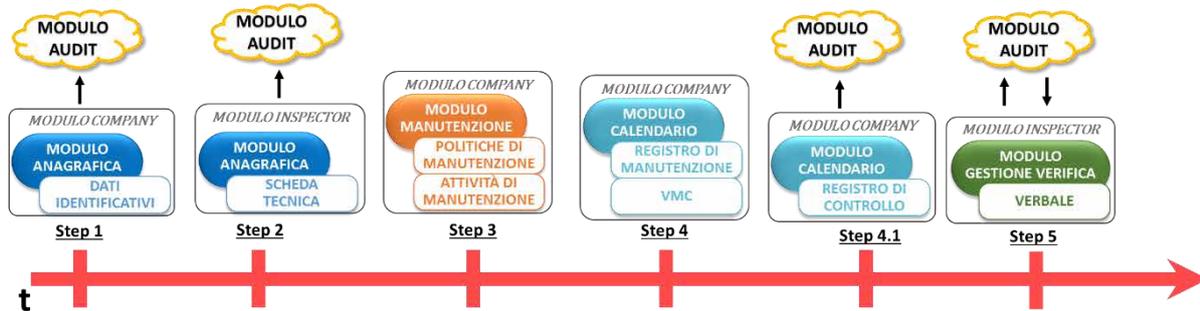


Figura 5. Step di compilazione del software web

In dettaglio, la sequenza delle attività da sviluppare è:

- *Step 1*: inserimento, da parte dell'Utilizzatore, dei dati fondamentali per poter attivare il software e utilizzare l'attrezzatura. Condivisione di tali dati nel cloud;
- *Step 2*: inserimento di ulteriori dati, da parte del Verificatore, per poter gestire completamente tutte le informazioni relative all'attrezzatura. Condivisione di tali dati nel cloud, poiché accessibili da due moduli differenti;
- *Step 3*: inserimento, da parte dell'Utilizzatore, delle informazioni relative alla manutenzione dell'attrezzatura e compilazione delle relative attività manutentive in funzione della vita lavorativa;
- *Step 4*: monitoraggio e redazione della documentazione relativa alle attività di manutenzione attraverso funzioni software specifiche;
- *Step 4.1*: generazione del Registro di Controllo, come dato necessario ai fini delle attività di Verifica Periodica;

- *Step 5*: redazione, da parte del Verificatore, del Verbale di Verifica Periodica. In questa fase, tramite il cloud, si realizza un flusso di informazioni bidirezionale, in quanto vengono recepite le informazioni condivise con i precedenti moduli e aggiornate le informazioni relative ai verbali redatti.

4. Conclusioni

Il progetto che si sta realizzando si propone, partendo dalle criticità rilevate nell'espletamento dell'attuale processo di verifica periodica – la prima e le successive – di realizzare uno strumento operativo a supporto sia degli Utilizzatori/Datori di Lavoro che dei verificatori. Il prototipo proposto consentirà sia di identificare univocamente l'attrezzatura soggetta a verifica periodica che di gestire in modalità snella e coordinata le informazioni essenziali per supportare le attività di verifica da svolgersi periodicamente, tra le altre, anche sulle attrezzature a pressione, fornendo uno strumento per la gestione degli obblighi di manutenzione e controllo stabiliti dal legislatore.

5. Acknowledgement

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC 2016-2018, progetto Smartbench ID 15

6. Bibliografia

- [1] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106) – Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [2] d.m. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
- [3] Gallo, M., Miele, D., Montella, D. R., & Natale, P., 2012, L'analisi dei rischi residui nell'uso delle apparecchiature a pressione: lo sviluppo di pratiche gestionali in ottica di miglioramento continuo. Atti della Conferenza Safap, Napoli 2012.
- [4] Regione Emilia Romagna, Anomalie attrezzature a pressione. Terza Edizione, 2016.
- [5] Gnoni, M. G., Lettera, G., Tundo, P., Tonti, A., Fiodo, A., 2010, Proposta di una piattaforma RFID-based per la gestione delle verifiche di apparecchi a pressione. Atti della Conferenza SAFAP, Venezia 2010.

Esempio di classificazione di aree con atmosfere potenzialmente esplosive generate dall'evaporazione di pozze di biocombustibili: un caso studio

R. Lauri¹, B. Grospietro², B. Pietrangeli¹

¹ Inail - Dit

² Italian Bio Products (Gruppo Mossi-Ghisolfi)

Sommario

La produzione di biocombustibili, sia liquidi che gassosi, ha subito un forte impulso dalla spinta, che è stata impressa dall'Unione Europea, a livello politico, per favorire l'utilizzo delle fonti rinnovabili. In questo contesto è stata avanzata una proposta di modifica della Direttiva Red (la Direttiva europea sulle energie rinnovabili), che fornisce un potenziale schema quadro per la diffusione delle fonti rinnovabili nei Paesi dell'Unione nel periodo compreso tra il 2021 ed il 2030. Questa iniziativa è finalizzata a garantire, mediante vettori energetici rinnovabili, la copertura del 27% del consumo di energia e a ridurre progressivamente l'impiego di biocarburanti prodotti da biomasse ad uso alimentare al fine di incrementare la quota di mercato di quelli generati da materie prime non destinate al settore agro-alimentare. Quindi è evidente che i biocombustibili possono avere importanti ricadute sull'economia nazionale in termini di indipendenza energetica, valorizzazione di terreni marginali per la produzione agro-industriale e sviluppo occupazionale. Ciò ha determinato una crescente attenzione verso alcuni potenziali pericoli connessi con l'esercizio degli impianti dedicati alla loro produzione. Tra questi va annoverata la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive, generate da rilasci accidentali da vari componenti (flange, compressori, pompe, valvole, etc.). In particolar modo la Direttiva Atex 99/92/CE riporta, tra gli obblighi spettanti al datore di lavoro, quello di classificare le aree lavorative in zone, in cui potrebbero formarsi delle miscele potenzialmente esplosive. Questa classificazione risulta particolarmente complessa nel caso di emissioni di liquidi infiammabili, poiché la formazione della nube di vapori dipende sia da alcune proprietà chimico-fisiche del fluido che dai parametri atmosferici (velocità del vento, irraggiamento solare, etc.), che influenzano fortemente la portata massica evaporante dalla pozza. Nel lavoro viene illustrato un caso studio, che, applicando le indicazioni riportate nella Norma CEI 31-87 e considerando l'influenza della velocità del vento, è focalizzato sulla classificazione di una zona potenzialmente pericolosa, generata da una sorgente di emissione, presente in una bioraffineria italiana, che produce bioetanolo. In particolar modo, il calcolo della portata evaporante dalla pozza, verrà eseguito mediante uno specifico software, che consente di valutare il trasporto di materia, legato ai gradienti di concentrazione tra la superficie del liquido e l'atmosfera circostante, e gli scambi termici con l'ambiente (includendo il contributo dell'irraggiamento solare) e con il suolo, che sono fenomeni, che influenzano l'evaporazione e quindi il volume della nube di vapori infiammabili.

1. Il caso studio: l'impianto di produzione di bioetanolo

Il caso studio ha avuto per oggetto una bioraffineria, situata a Crescentino (Vc), la quale produce bioetanolo (circa 40000 t/anno) a partire da biomasse lignocellulosiche. In particolar modo è stata condotta un'analisi, finalizzata a classificare la zona pericolosa (formazione di atmosfere potenzialmente esplosive), derivante dal rilascio accidentale del suddetto biocombustibile durante le operazioni di carico delle autobotti, che si

svolgono in un'area adiacente ai serbatoi di stoccaggio (figura 1). Tale zona è costituita da una pensilina, sulla quale è installato un contatore, una tubazione girevole in grado di raggiungere la bocca di carico dell'autocisterna e un'apposita tubazione per l'evacuazione dell'aeriforme, presente all'interno dell'automezzo, verso l'impianto di ossidazione. L'attività di trasferimento dell'alcool etilico nell'autobotte viene eseguita dall'autista del mezzo e dall'addetto al carico.



Figura 1. Area di carico delle autobotti (Fonte: Italian Bio Products)

Nella zona sono presenti varie potenziali sorgenti (flange, pompe, etc.) di emissione di bioetanolo, ma nel caso analizzato, è stata focalizzata l'attenzione sul raccordo (figura 2) tra la tubazione di carico e l'autocisterna, poiché la sua perdita ha una maggiore frequenza di accadimento rispetto alle altre.



Figura 2. Carico (raccordo) del bioetanolo (Fonte: Italian Bio Products)

A tal proposito, è stato ritenuto plausibile che, durante il collegamento/scollegamento della tubazione, possa verificarsi una perdita di alcool di circa 5 litri nell'arco temporale di 90

secondi (0,05 kg/s). Per classificare la zona pericolosa, derivante dalla formazione di vapori, generati dall'evaporazione di liquidi infiammabili, occorre calcolare la portata massica evaporante dalla pozza. Per ricavare tale parametro, nell'analisi effettuata, è stata considerata come variabile la velocità del vento, che lambisce la pozza, poiché, nelle condizioni di rilascio esaminate, il bioetanolo si comporta come un liquido poco volatile, per il quale è il trasferimento di materia, fortemente influenzato dal flusso dell'aria, il termine, che assume il maggiore peso specifico nel processo di evaporazione. Per quanto concerne la temperatura e l'umidità relativa dell'aria [6] sono stati assunti, nel caso studio, dei valori medi, desunti dalle rilevazioni riportate in figura 3.



Figura 3. Crescentino: andamenti della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria
(Fonte: www.meteoblue.com)

1.1 Il caso studio: l'evaporazione del bioetanolo

Considerando che il bioetanolo, caricato sulle autocisterne, ha una temperatura di circa 30°C ed analizzando alcuni suoi parametri [10] termodinamici (tabella 1), che influenzano la modalità di evaporazione, si evince che, durante il rilascio, dovuto alle operazioni di riempimento delle autobotti, il biocombustibile non subisce flash [11] e genera una pozza non bollente, poiché si trova ad una temperatura inferiore a quella di ebollizione [1] ed ha una bassa (inferiore alla pressione atmosferica) tensione di vapore a 30°C. Per i liquidi non bollenti (come il caso trattato) il fenomeno, che incide maggiormente sulla portata evaporante (m_v), è il trasferimento di materia dovuto alla diffusione [7]. Il software utilizza, per calcolare m_v , la seguente equazione, valida sia per bassi che alti flussi di massa [3]:

$$m_v(\text{kg/s}) = \frac{k \cdot PM_b \cdot p_a \cdot A_p}{RT} \ln \left(1 + \frac{p_v - p}{p_a - p_v} \right) \quad (1)$$

In cui:

- k è il coefficiente di trasferimento di massa (m/s);
- PM_b è il peso molecolare del bioetanolo (46,07 kg/kmol);
- p_a indica la pressione atmosferica (101325 Pa);
- A_p (m^2) è l'area della pozza;
- R rappresenta la costante universale dei gas (8314 J/kmol K);
- T è la temperatura di rilascio del biocombustibile (303,15 K);
- p_v indica la tensione di vapore del bioetanolo alla temperatura di rilascio (100 hPa);
- p rappresenta la pressione parziale del liquido in atmosfera (Pa).

Nel caso di liquidi poco volatili come il bioetanolo, l'equazione 1, in presenza di bassi flussi di massa, assume la seguente espressione semplificata [2]:

$$m_v \text{ (kg/s)} = \frac{k \cdot PM_b \cdot A_p \cdot (p_v - p)}{RT} \quad (2)$$

Il parametro k viene calcolato mediante la relazione di MacKay e Matsugu [9], che è stata validata da varie prove sperimentali e considera l'influenza sia dei parametri atmosferici (velocità del vento) che di quelli geometrici (raggio della pozza):

$$k = 2 \cdot 10^{-3} \cdot v_{10}^{0,78} \cdot r^{-0,11} \quad (3)$$

Dove:

- v_{10} (m/s) indica la velocità del vento alla quota di 10 m;
- r (m) rappresenta il raggio della pozza.

Parametri termodinamici	
Temperatura di ebollizione (°C)	78
Tensione di vapore a 30°C (hPa)	100
Limite inferiore di infiammabilità (% v/v)	3,3
Limite superiore di infiammabilità (% v/v)	15
Flash-point (°C)	13

Tabella 1. Parametri termodinamici del bioetanolo

2. Materiali e metodi

La classificazione della zona con possibile presenza di un'atmosfera potenzialmente esplosiva, generata dalla presenza di vapori, derivanti dall'evaporazione del bioetanolo durante la fase di carico, è stata eseguita conformemente alle indicazioni, riportate nella Norma CEI 31-87. In particolar modo il suddetto Standard tecnico prevede la determinazione dei tre seguenti parametri per raggiungere tale scopo [4]:

- 1) grado di rilascio della sorgente di emissione (SE);
- 2) disponibilità della ventilazione;
- 3) grado di diluizione.

Il primo termine può essere ricavato mediante l'analisi delle condizioni di esercizio, il secondo con la valutazione della velocità dell'aria nel sito di interesse, mentre il terzo è stato determinato mediante il software Effects, utilizzato per calcolare la portata massica evaporante dalla pozza. Per valutare la velocità del vento nella stazione di carico sono stati consultati i valori riportati nell'Atlante eolico dell'Italia per la località di Crescentino [5]. Poiché essi sono riferiti alla quota di 25 metri dal suolo e il modello, utilizzato per ricavare la portata di bioetanolo, che evapora, richiede il valore della velocità a 10 metri di altezza, è stata applicata la seguente equazione per convertire la velocità dell'aria [8]:

$$v(z) = v_{10} \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4)$$

In cui:

- $v(z)$ indica la velocità (m/s) del vento alla quota z ;
- p è un parametro adimensionale, che è stato assunto pari a 0,07 sulla base della tipologia di ambiente (rurale) e della classe di stabilità atmosferica.

In particolar modo il software consente di mettere in relazione vari fenomeni ed in questa circostanza è stato applicato un modello combinato rilascio liquido/evaporazione da pozza. Con la determinazione dei tre parametri, precedentemente indicati, è possibile classificare

la zona mediante l'utilizzo della seguente tabella 2 [4], riportata nella Norma Tecnica CEI 31-87.

Grado di emissione	Efficacia della ventilazione						
	Grado di diluizione						
	Alto			Medio			Basso
	Disponibilità						
	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
continuo	Zona non pericolosa ^a (Zona 0 NE)	Zona 2 ^a (Zona 0 NE)	Zona 1 ^a (Zona 0 NE)	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
primo	Zona non pericolosa ^a (Zona 1 NE)	Zona 2 ^a (Zona 1 NE)	Zona 2 ^a (Zona 1 NE)	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0 ^b
secondo	Zona non pericolosa ^a (Zona 2 NE)	Zona non pericolosa ^a (Zona 2 NE)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 e anche Zona 0 ^b

Legenda

“+” significa “circondata da”.

^aZona 0 NE, 1 NE o 2 NE indicano zone teoriche in cui, in condizioni normali, l'estensione è trascurabile.

^bSi ha una Zona 0 se la ventilazione è particolarmente debole e l'emissione è tale che un'atmosfera esplosiva, dovuta alla presenza di gas, persiste praticamente con continuità (condizione di assenza di ventilazione).

Tabella 2. Classificazione di zone con presenza di atmosfere potenzialmente esplosive

3. Risultati e discussione

Essendo periodica l'operazione di carico del bioetanolo nelle autobotti, il raccordo, utilizzato per il collegamento della tubazione all'automezzo, viene classificato come una sorgente di emissione di primo grado, poiché la sua perdita è prevista che avvenga periodicamente durante il normale funzionamento (esecuzione del riempimento delle autocisterne). Per quanto concerne la velocità del vento, consultando l'Atlante eolico dell'Italia, è emerso che, per la località di Crescentino, il suo valore medio annuale (alla quota di 25 m dal suolo) è inferiore a 3 m/s [5]. Pertanto nel caso studio sono stati esaminati i seguenti valori: 2 m/s, 4 m/s e 6 m/s. Essi sono stati convertiti sia all'altezza di 10 m (in quanto il software richiede tale valore) che a quella di 0,03 m per valutare la disponibilità della ventilazione (flusso di aria, che lambisce la pozza) e il grado di diluizione. Si riportano in tabella 3 i risultati della conversione, effettuata mediante l'equazione 4. La Norma tecnica CEI 31-87 stabilisce che, per un luogo all'aperto, la disponibilità della ventilazione è buona quando la velocità dell'aria è superiore a 0,5 m/s [4]. Pertanto, dall'analisi dei valori riferiti alla quota di 0,03 m dal suolo, si evince che essa deve essere considerata “buona” in tutti i casi esaminati.

	Quota di riferimento (z=25 m)	Quota di riferimento (z=10 m)	Quota di riferimento (z=0,03 m)
Velocità del vento (m/s)	2	1,9	1,2
	4	3,7	2,4
	6	5,6	3,7

Tabella 3. Conversione della velocità del vento

Per determinare il grado di diluizione, che serve per la classificazione della zona pericolosa, è stata esaminata la variabilità della velocità del vento. La scelta di considerare la stagione estiva dipende dal fatto che tale classificazione deve essere effettuata considerando le condizioni più sfavorevoli, che, in questa circostanza, coincidono con i mesi estivi, in quanto caratterizzati da valori più alti dell'irraggiamento solare, il cui incremento determina una crescita del tasso di evaporazione e conseguentemente del volume della nube esplosiva. Relativamente alla valutazione del contributo dell'irraggiamento solare Effects consente due opzioni:

- 1) assegnare un dato valore al flusso termico incidente, espresso in kW/m^2 ;
- 2) determinare l'irraggiamento, inserendo come input il mese dell'anno, la latitudine del sito e il grado di copertura del cielo (da sereno a nuvoloso), che influenzano l'entità della radiazione.

Questa seconda possibilità è stata scelta per definire in modo più dettagliato lo scenario. Pertanto, come mese di riferimento è stato scelto luglio, come livello di copertura del cielo è stato assunto un 30% (cielo poco nuvoloso), mentre la latitudine di Crescentino è pari a circa 45°N . Con tali parametri il software ha ricavato la radiazione solare incidente, che è risultata uguale a $1,42 \text{ kW/m}^2$. I parametri costanti, utilizzati per calcolare m_v e che si aggiungono alle grandezze variabili (velocità del vento), sono riportati in tabella 4.

Parametri	Valori
Portata massica rilasciata (kg/s)	0,05
Temperatura di rilascio del bioetanolo ($^\circ\text{C}$)	30
Durata del rilascio (s)	90
Massa totale rilasciata (kg)	4,5
Densità del bioetanolo a 30°C (kg/m^3)	781
Umidità dell'aria (%)	60
Temperatura esterna ($^\circ\text{C}$)	30
Temperatura del suolo ($^\circ\text{C}$)	30
Irraggiamento solare (kW/m^2)	1,42
Tempo di analisi dell'evaporazione da pozza (s)	600
K (coefficiente di sicurezza)	0,5
LFL (limite inferiore di infiammabilità espresso in percentuale volumetrica)	3,3

Tabella 4. Parametri di ingresso

In tabella 5 sono invece riportati i risultati dell'analisi condotta mediante l'utilizzo del software. Da questi emerge che il passaggio di v_{10} da $1,9 \text{ m/s}$ a $5,6 \text{ m/s}$ determina un sensibile incremento percentuale di m_v (passa da $1,6 \text{ g/s}$ a $2,4 \text{ g/s}$), che è pari al 50% anche se la portata evaporante è di bassa entità, ed una conseguente diminuzione dell'area dello spandimento (A_p), che passa da $0,94 \text{ m}^2$ a $0,82 \text{ m}^2$. Nelle figure 4 e 5 si riportano rispettivamente gli andamenti di M_{ev} (massa evaporata di bioetanolo) e del raggio della pozza in funzione di v_{10} .

Velocità del vento (m/s)	Parametri	Valori
1,9	m_v (kg/s)	$1,6 \cdot 10^{-3}$
	A_p (m ²)	0,94
	ρ_g (kg/m ³)	1,16
	M_{ev} (kg)	0,84
3,7	m_v (kg/s)	$2,1 \cdot 10^{-3}$
	A_p (m ²)	0,87
	ρ_g (kg/m ³)	1,16
	M_{ev} (kg)	1,07
5,6	m_v (kg/s)	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	A_p (m ²)	0,82
	ρ_g (kg/m ³)	1,16
	M_{ev} (kg)	1,23

Tabella 5. Risultati

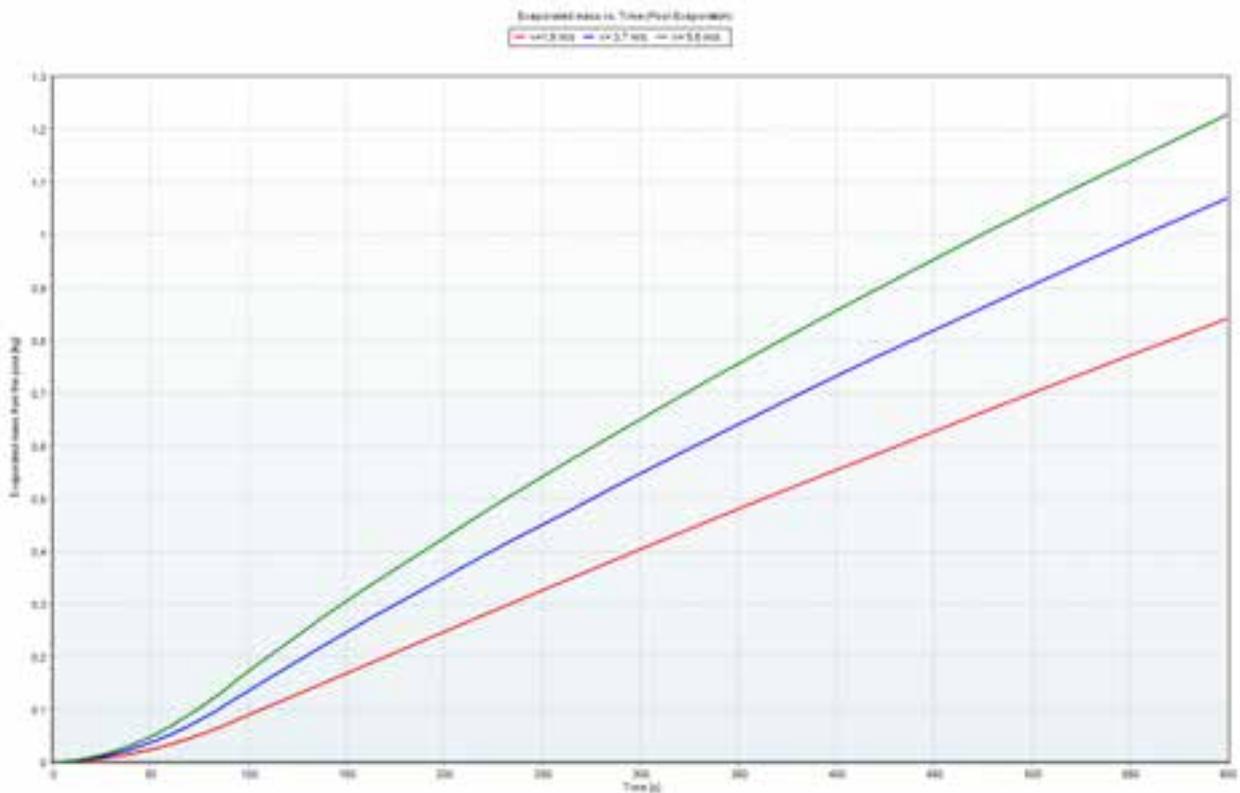


Figura 4. Andamento della massa evaporata di bioetanolo

Invece risulta praticamente costante la densità (ρ_g) della nube potenzialmente esplosiva dopo la miscelazione con l'aria. Ciò dipende principalmente dalla modesta quota (l'ordine di grandezza è di g/s) di biocombustibile evaporante dalla pozza.

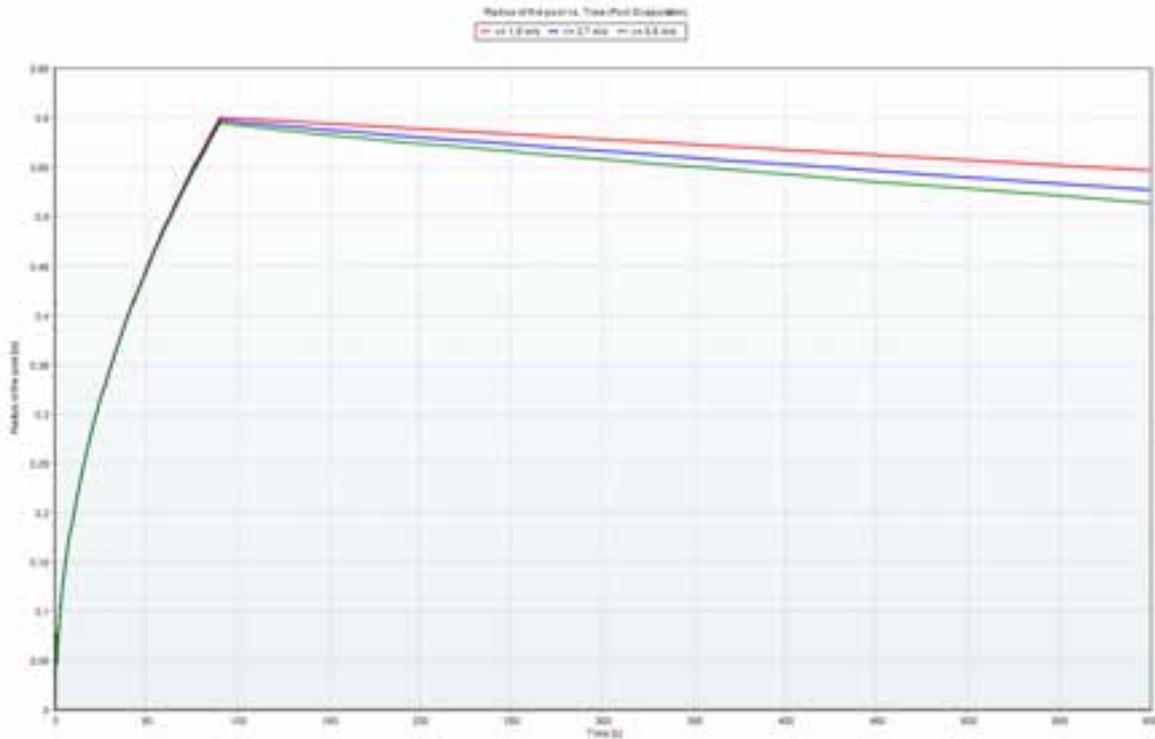


Figura 5. Andamento del raggio della pozza di bioetanolo

Sulla base dei valori assunti da m_v è stata calcolata la “caratteristica di emissione” $(\frac{W_g}{\rho_g \cdot K \cdot LFL})$ e quindi definito il grado di diluizione con l’ausilio del diagramma [4] riportato in figura 6. Nel caso studio la grandezza W_g è uguale ad m_v .

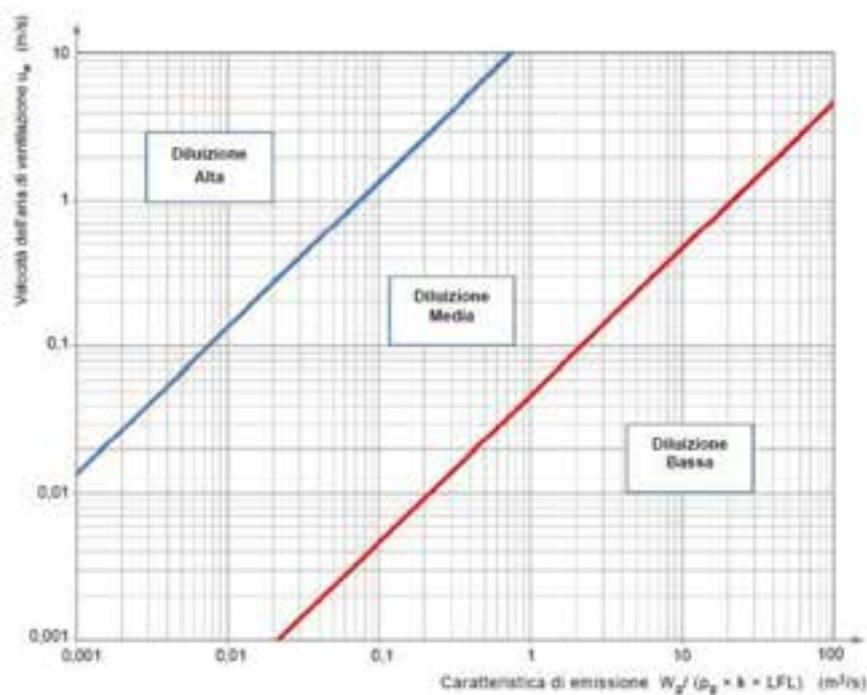


Figura 6. Valutazione del grado di diluizione

Successivamente, essendo stati precedentemente determinati sia il grado (primo) di emissione della SE che la disponibilità della ventilazione (buona), è stata effettuata la

classificazione della zona pericolosa (utilizzando la tabella 2), derivante dall'emissione della sorgente esaminata (raccordo impiegato per le operazioni di carico delle autocisterne). In tabella 6 si riportano i risultati della classificazione effettuata. Per determinare il grado di diluizione sono stati considerati, come valori di riferimento per la velocità dell'aria, quelli calcolati alla quota di 0,03 m dal suolo.

Velocità del vento (m/s)	Caratteristica di emissione (m ³ /s)	Grado di emissione della SE	Disponibilità della ventilazione	Grado di diluizione	Zona pericolosa
1,2	0,09	primo	buona	medio	zona 1
2,4	0,11	primo	buona	alto	zona 1 NE (zona non pericolosa)
3,7	0,13	primo	buona	alto	zona 1 NE (zona non pericolosa)

Tabella 6. Classificazione della zona pericolosa

Considerando come valori di partenza 4 m/s e 6 m/s si ottiene un "alto" grado di diluizione e quindi delle zone "non pericolose" relativamente alla formazione di un'atmosfera esplosiva, mentre con 2 m/s si ha un grado "medio" di diluizione e quindi si genera una Zona 1. Dovendo effettuare la classificazione dell'area potenzialmente pericolosa, generata dall'emissione del raccordo, si deve valutare lo scenario più avverso, cioè con la minore intensità del flusso di aria ($v=2$ m/s), che in questa circostanza coincide con la condizione più plausibile, analizzando i dati statistici riportati nell'Atlante eolico dell'Italia (la velocità media annua del vento, registrata nella località di Crescentino, è inferiore a 3 m/s). Nonostante l'incremento di velocità determini un aumento della produzione di vapori infiammabili, si formano aree non pericolose, perché questo fenomeno viene sopraffatto dal notevole miglioramento dell'azione di diluizione. Pertanto la perdita del raccordo, utilizzato per il carico del biocombustibile nelle autocisterne, genera una zona 1 ai sensi della Direttiva Atex 99/92/CE.

4. Conclusioni

La formazione di miscele esplosive di gas/vapori è un pericolo ricorrente nel settore industriale. La classificazione delle aree con possibile presenza di atmosfere potenzialmente esplosive, generate da rilasci di liquidi infiammabili alto bollenti come il bioetanolo, richiede un'attenta valutazione dei parametri atmosferici, con particolare riferimento alla velocità del vento, poiché essa ha una forte incidenza sul trasferimento di materia, che, per questa categoria di fluidi (poco volatili), è il fenomeno che, rispetto agli scambi termici con l'aria ed il suolo, maggiormente influenza la portata evaporante dallo spandimento liquido. In tale contesto l'utilizzo di software, finalizzati a stimare le conseguenze di eventi incidentali nell'industria di processo e quindi in grado di studiare l'evaporazione dalla pozza, costituisce uno strumento molto importante per poter applicare modelli, che cercano, con un'inevitabile incertezza, dovuta principalmente alla repentina variabilità del flusso di ventilazione, di riprodurre il fenomeno fisico, ampliando la gamma di parametri utili per la simulazione. I risultati, ottenuti dallo studio, hanno costituito la base per il miglioramento del livello di sicurezza, relativo alle operazioni di carico delle autobotti, mediante l'adozione di dispositivi automatici "a chiusura sicura" in grado di limitare fortemente sia le perdite durante l'aggancio e lo sgancio del raccordo e quindi il volume della nube di vapori infiammabili che gli errori di manovra. Dall'analisi condotta è emerso che la mancanza di tali soluzioni tecniche aumenterebbe la probabilità di insorgenza di

scenari potenzialmente pericolosi (formazione di atmosfere esplosive) per l'incolumità degli operatori.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Gruppo Mossi-Ghisolfi per la collaborazione.

Bibliografia

- [1] Accardi D., Lauri R., Pietrangeli B. Comparative study in the safety aspects of the production of ethanol from renewable and non-renewable sources. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2015; 3: 149-153.
- [2] Brighton P.W.M. Further verification of a theory for mass and heat transfer from evaporating pools. *J. of Hazardous Materials*. 1990; 23: 215-234.
- [3] Cavanaugh T.A., Siegell J.H., Steinberg K.W. Simulation of vapor emissions from liquid spills. *J. of Hazardous Materials*. 1994; 38: 41-63.
- [4] CEI. CEI 31-87 Classificazione dei luoghi. Atmosfere esplosive per la presenza di gas. Milano, 2016.
- [5] <http://atlanteeolico.rse-web.it/viewer.htm>.
- [6] https://www.meteoblue.com/it/tempo/previsioni/archive/crescentino_italia_3177833?fcstlength=1m&year=2017&month=7
- [7] Lauri R. Le atmosfere potenzialmente esplosive derivanti da rilasci di biocombustibili liquidi. *L'Ambiente*. 2017; 2: 30-34.
- [8] Lauri R., Grospietro B., Cova A., Accardi D., Pietrangeli B. Pool fires: a model for assessing meteorological parameters influence on thermal radiation. *Chemical Engineering Transactions*. 2017; 57: 230.
- [9] Mackay D., Matsugu R.S. Evaporation rates of hydrocarbon spills on land and water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1973; 51: 434-439.
- [10] Pietrangeli B., Lauri R., Accardi D. Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile: Applicazioni e Sicurezza. Inail. Milano, 2014, ISBN 978-88-7484-385-5, 47-48.
- [11] Webber D.M., Brighton P.W.M. An integral model of spreading vaporizing pools. UKAEA report SRD R390.1987, 16-19.

Rischio di esplosione in presenza di batterie al litio in un ciclo di trattamento e recupero batterie al piombo

C. De Toro¹, M. Gaita¹, E. Urciuoli¹, J. Pardi², B. Mauro³, A. Cotumaccio⁴

¹ Inail - Uot di Avellino

² Esperto

³ Analista di rischio junior - Engineering Organization Safety srl

⁴ Ordine Periti Industriali Napoli

Sommario

La presente analisi si pone l'obiettivo di analizzare il rischio aggiuntivo di esplosione e incendio introdotto dalla presenza di batterie agli ioni di litio nella fase di frantumazione del ciclo di "trattamento delle batterie al piombo", nonché di presentarne una possibile riduzione.

1. Introduzione

Il riciclaggio delle batterie al piombo esauste è di fondamentale importanza, per i vantaggi sia economici sia ambientali a esso collegati. Il metallo riciclato dalle batterie esaurite rappresenta oltre il 40% della produzione italiana di piombo nonché il 37% del fabbisogno nazionale di metallo. Tale produzione secondaria richiede altresì minore energia rispetto a quella necessaria per la lavorazione del minerale ¹.

La richiesta crescente di apparecchiature sempre più efficienti per l'accumulo dell'energia elettrica ha avuto come conseguenza un aumento esponenziale della produzione e dell'utilizzo delle batterie al litio e, quindi, anche delle problematiche legate al loro smaltimento a fine vita e ai possibili rischi di incendio e/o esplosione.

Una batteria agli ioni litio, come ogni batteria, funziona grazie ad un processo chimico che ruota attorno a due elementi, l'anodo e il catodo. Quando la batteria viene caricata, gli ioni di litio passano dal catodo all'anodo e, allo stesso modo, quando una batteria si scarica, ossia quando alimenta un dispositivo, gli ioni partono dall'anodo per tornare al catodo. Rif Per facilitarne il passaggio, gli ioni vengono dissolti in una sostanza denominata elettrolita, che non può essere acquosa: solitamente viene utilizzato un composto organico per sua natura volatile e infiammabile².

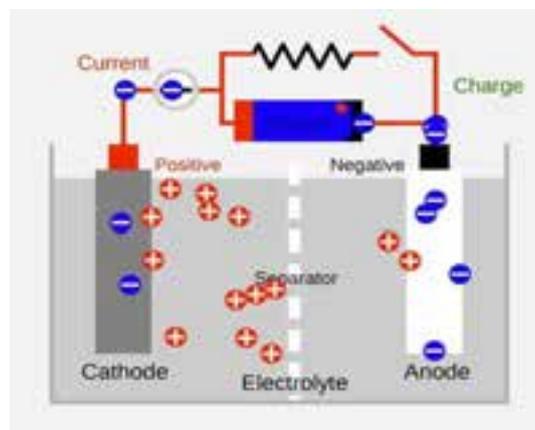


Figura 1. Schema di funzionamento di una batteria²

¹ Rivista Automazione e strumentazione- http://automazione-plus.it/cobat-il-processo-di-riciclaggio-delle-batterie-al-piombo-esauste_3481/

² <https://www.dday.it/redazione/21002/perche-una-batteria-al-litio-puo-esplosione>

2. Descrizione del ciclo di trattamento e recupero batterie al piombo

Nell'azienda presa a riferimento nel presente studio si effettua la rottamazione di batterie al piombo esauste, con conseguente produzione di piombo metallico, leghe del piombo in pani, plastiche destinati alla vendita.

L'alimentazione del processo di riciclo ha globalmente la seguente composizione:

- batterie esauste 75-80%
- rottami e residui piombosi 10-15%
- metalli primi per alligazione 5-10%

L'utilizzo dei metalli primi è subordinato alla necessità di integrare i mix di carica per le opportune correzioni di lega o integrazione di carica. Si riporta di seguito lo schema a blocchi descrittivo del processo produttivo che si sviluppa nell'impianto in oggetto.

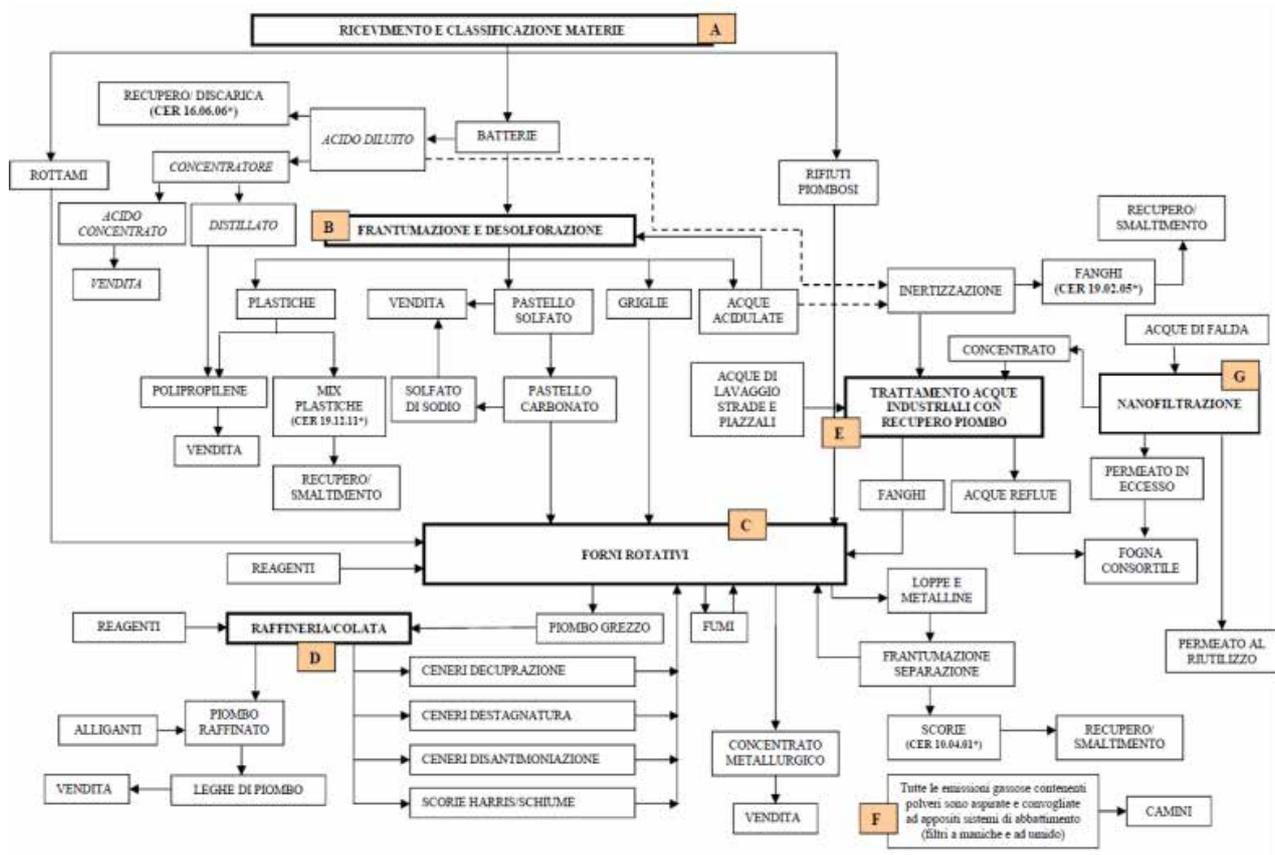


Figura 2. Schema a blocchi del processo produttivo

In sintesi, l'intero processo si esplica nello svolgimento dei seguenti sotto-processi (di seguito *fasi*):

- fase A [Ricevimento e classificazione materie prime in ingresso]
- fase B [Frantumazione e Desolforazione]
- fase C [Fusione in forni rotativi]
- fase D [Raffinazione colata]
- fase E/G [Trattamento acque industriali e recupero piombo]
- fase F [Emissione in atmosfera]

3. Tecnologia costruttiva di base delle batterie al litio

Il principale vantaggio delle moderne batterie agli ioni di litio è quello di avere una elevata densità di energia e di potenza, maggiore di molte altre tipologie di batterie ricaricabili.

I modelli più comuni utilizzano carbonio all'elettrodo negativo (cioè l'anodo durante la scarica), con composti di intercalazione litio/carbonio come materiale attivo, e ossidi di litio metallico come materiale attivo per l'elettrodo positivo (il catodo durante la scarica), mentre l'elettrolita è solitamente costituito da una soluzione organica di un sale di litio. I due elettrodi sono separati da un film poroso (separatore) e sottili fogli di metallo sono impiegati come collettori di corrente. I diversi elementi citati sono poi assemblati in maniera differente nelle diverse tipologie di singole celle.

In linea generale la tecnologia utilizzata per la costruzione delle batterie ricaricabili (litio-ione) usa anodi di grafite e vari componenti per il catodo. L'elettrolita è un sale di litio sciolto in un solvente organico anidro.

La tecnologia dei primi modelli prevedeva il catodo in litio metallico. Questo era soggetto a una implicita instabilità chimica, durante la fase di ricarica poteva incorrere in surriscaldamenti che portavano alla fusione del litio e a una ossidazione veloce e incontrollabile.

In seguito ad alcuni incidenti verificatisi per questo inconveniente la produzione di batterie si è concentrata sulla sostituzione del catodo a litio metallico con un catodo a litio non metallico, costituito da ioni di litio dispersi in una matrice cristallina di un ossido stabile.

Di seguito le differenti tecnologie utilizzate:

- litio - cobalto (LiCoO_2): è il tipo più diffuso per la costruzione del catodo. Ovviamente il cobalto utilizzato è l'isotopo non radioattivo. È tuttora usato per i computer portatili e per i cellulari. Soffre ancora di problemi di riscaldamento, come pure di qualche instabilità in caso di perforazione del contenitore. Per questi motivi è il meno adottato per la trazione elettrica;
- litio-ferro-fosfato (LiFePO_4): possiede una stabilità termica superiore. Il litio fosfato è incombustibile e sotto corto circuito non si decompone. Queste batterie hanno energia più bassa di quelle Litio-Cobalto, ma potenza superiore. Sono comunque superiori per sicurezza, costo e tossicità;
- litio-ossido di manganese (LiMn_2O_4): offre una alta tensione di cella e stabilità termica, ma una energia un po' minore delle altre. Il costo è basso ed i materiali non sono tossici. Buone prestazioni ad alta temperatura;
- litio-nichel-cobalto-manganese ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ - NCM): rappresentano un buon compromesso tra le varie caratteristiche delle tecnologie;

litio-ossido di titanio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ - LTO): queste celle rimpiazzano l'anodo di grafite con uno di titanato di litio. Questo è in genere usato in accoppiamento con un catodo a base di manganese. Offrono caratteristiche elettriche soddisfacenti ed evitano i pericoli di combustione della grafite³.

4. Il rischio. Una possibile soluzione: pre-crusher

Il processo di recupero delle batterie esauste inizia con la loro frantumazione nel mulino a martelli del reparto denominato CX. Una eventuale presenza in questa fase di batterie al litio, potrebbe determinare un'esplosione con conseguente innesco di un incendio.

In realtà, quella che viene normalmente definita esplosione, deve essere più correttamente classificata come reazione del tipo *thermal runaway*, ovvero un aumento incontrollato e difficilmente arrestabile della temperatura all'interno di un componente capace di innescare

³ Giornale installatore elettrico giugno 2017

una reazione a catena, la quale, nel peggiore dei casi, può portare prima a una reazione di combustione e poi, in assenza di uno sfogo, a una deflagrazione.

Si tratta quindi di un'esplosione chimica che può avvenire in fase vapore, oppure in fase condensata (liquida o solida) e può essere:

- uniforme, nel caso in cui coinvolga tutta la massa di reazione, come avviene in un reattore a miscelazione totale.
- propagante, quando la reazione inizia in un punto per poi propagarsi all'intera massa di reazione. Esempi ne sono la combustione di un vapore infiammabile all'interno di una condotta, l'esplosione di una nube di vapore, o la decomposizione di un solido instabile.

Per ridurre questo rischio di incendio /esplosione, è stata introdotta nel processo produttivo una modifica non sostanziale che prevede la "prefrantumazione delle batterie". È stato installato, a tal fine, in ambiente aperto adiacente al capannone di stoccaggio batterie esauste, un nuovo mulino tritatore aggiuntivo (*pre-crusher*), successivamente, il frantumato ottenuto viene prelevato tramite pala gommata e caricato nella tramoggia per alimentare il mulino a martello seguendo il ciclo di lavorazione riportato in Figura 2.

5. Analisi degli eventi incidentali

Dal punto di vista fenomenologico, gli eventi incidentali dovuti alla presenza di batterie al litio all'interno del processo di riciclo delle batterie al piombo, possono essere rappresentati dal seguente schema logico:

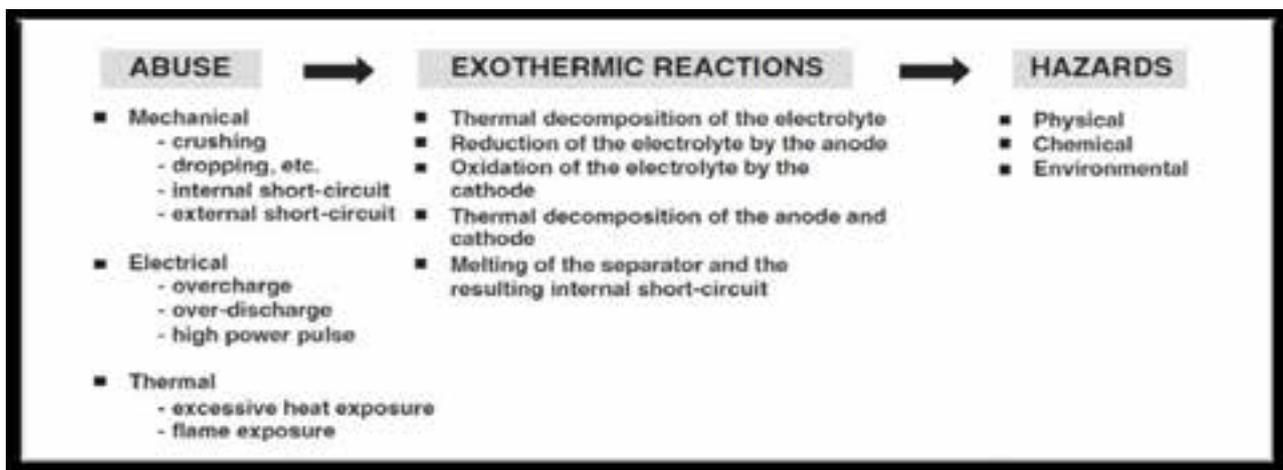


Figura 3. Schema logico eventi incidentali

A seguito di incidenti occorsi negli anni e riguardanti l'incendio o l'esplosione di apparecchiature contenenti batterie al litio, la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), un'agenzia federale statunitense ha condotto uno studio sul rischio incendio connesso alle batterie agli ioni di litio. Tale studio ha concluso che le condizioni anomale che possono condurre al *thermal runaway* sono tre:

1. urti meccanici;
2. problemi elettrici (cortocircuito, sovraccarico, eccessiva scarica);
3. problemi termici (eccessivo riscaldamento dovuto a cause interne oppure a cause esterne).

6. Analisi dei rischi

Il processo di valutazione che segue, denominato “*Probabilistic Risk Analysis*” (PRA), si inquadra in una più generale analisi di sicurezza i cui obiettivi sono:

- una complessiva riduzione delle occasioni di rischio, ovvero adozione di misure preventive, eventualmente con l'introduzione di ulteriori apprestamenti impiantistici;
- il contenimento delle conseguenze incidentali, ovvero l'adozione di misure protettive;
- una valutazione analitica della probabilità di accadimento di ogni singolo evento incidentale, mirata al miglioramento della conoscenza degli scenari che ne conseguono, al fine di un miglioramento e perfezionamento delle procedure in emergenza;
- l'identificazione degli elementi critici sui quali incentrare l'attenzione durante l'esercizio dell'impianto e calibrare le procedure che compongono il sistema di gestione della sicurezza.

Le misure preventive sono quindi mirate alla riduzione della frequenza con cui si possono manifestare gli incidenti, mentre le misure protettive tendono alla riduzione dell'entità del danno (*magnitudo*).

Nel presente studio si assumono le seguenti definizioni:

frequenza (f) → numero di eventi per unità di tempo.
probabilità (p) → numero che esprime, in una scala tra 0 ed 1, la possibilità che un dato evento si verifichi.

I valori di probabilità o frequenza associati a eventi elementari sono ricavati, nella maggior parte dei casi, dalla letteratura specialistica (es. Rapporti ENEA, NFPA, etc.) e, in un numero molto limitato, da stime ingegneristiche dovute all'esperienza dell'analista di rischio e/o derivate dalla comparazione di dati relativi ad altre discipline non direttamente legate al caso in esame (CEI-UNI-API). In particolare, per la frequenza di accadimento relativa alle carenze operative è stato utilizzato l'abaco “*Probability of human error arising from different operations*”.

Di seguito le principali ipotesi alla base del presente studio:

- si assegna una probabilità $\ll 10^{-6}$ occ/anno all'ipotesi di eventi incidentali (guasti) dovuti a cause intrinseche (es. errore progettuale, difetto BMS, etc.). Tale assunto è supportato dal fatto che le batterie sono apparecchiature di largo consumo, quindi sottoposte a stringenti test di validazione della sicurezza prima di raggiungere il mercato.
- si assegna una probabilità $\ll 10^{-6}$ occ/anno all'ipotesi che grandi quantitativi di batterie al litio siano conferiti in azienda eludendo le procedure di ispezione dedicate all'identificazione, e conseguente esclusione dal ciclo produttivo, di tali elementi;
- si assegna una probabilità $\geq 10^{-6}$ occ/anno all'ipotesi che piccoli quanti di batterie possano entrare nel ciclo produttivo, sfuggendo al processo di verifica e selezione. Tale assunto è supportato dall'attuazione di stringenti procedure di controllo, sia in fase di acquisto che al check-in, finalizzate a ridurre al minimo la probabilità di accesso di batterie al litio: due sono gli step di verifica previsti:
 - step 1 (1,0EXP-3 occ/anno) – Controllo dell'efficienza del raccoglitore (consorzi) in fase di selezione delle batterie al piombo, finalizzato a evitare il

conferimento di elementi indesiderati presenti nel carico, quali le batterie al litio;

- step 2 (1,0EXP-2 occ/anno) – Controllo dell’efficienza del personale addetto alla cernita durante lo scarico delle batterie al piombo nella rilevazione dell’eventuale presenza di batterie al litio. L’eventualità che gli operatori addetti alla cernita non rilevino la presenza di un elemento al litio è fortemente condizionata dalle difficoltà insite nelle modalità di scarico massivo, che non consentono lo svolgimento di una selezione accurata;
-
- si assegna una probabilità $\ll 10^{-6}$ occ/anno all’ipotesi di eventi incidentali dovuti a stress elettrico (*overcharge* e *overdischarge*). Tale ipotesi è sufficientemente cautelativa visto che si tratta di batterie esauste;
- si assegna una probabilità $\ll 10^{-6}$ occ/anno all’ipotesi di eventi incidentali dovuti stress termico (es. per incendio esterno). Tale ipotesi è sufficientemente cautelativa visto che le batterie vengono scaricate e controllate in area presidiata;
- si assegna una probabilità elevata all’ipotesi che, in fase di scarico, resti integra la protezione esterna della batteria: infatti, la resistenza meccanica del case è una delle più importati caratteristiche garantite dai costruttori per tali apparecchiature.
- si assegna una probabilità elevata all’ipotesi che si verifichi l’innesco in caso di rottura del contenitore: infatti, pur non essendo previste alcune delle principali cause di ignizione (es. calore esterno), è molto probabile la presenza di vapori altamente infiammabili dovuti alla reazione delle sostanze water-reactive (es. alluminio) presenti in tali batterie con le acque acidule (fortemente ossidanti) provenienti dalla rottura delle batterie al piombo.

È, quindi, necessario analizzare le fasi del ciclo produttivo, al fine di ricercare le modalità di intervento per il miglioramento del processo di captazione, o, eventualmente, disattivazione, delle batterie al litio, prima che accedano al cuore del processo produttivo. Tale analisi è svolta con l’ausilio della tecnica dell’albero degli eventi (Event Tree Analysis, ETA).

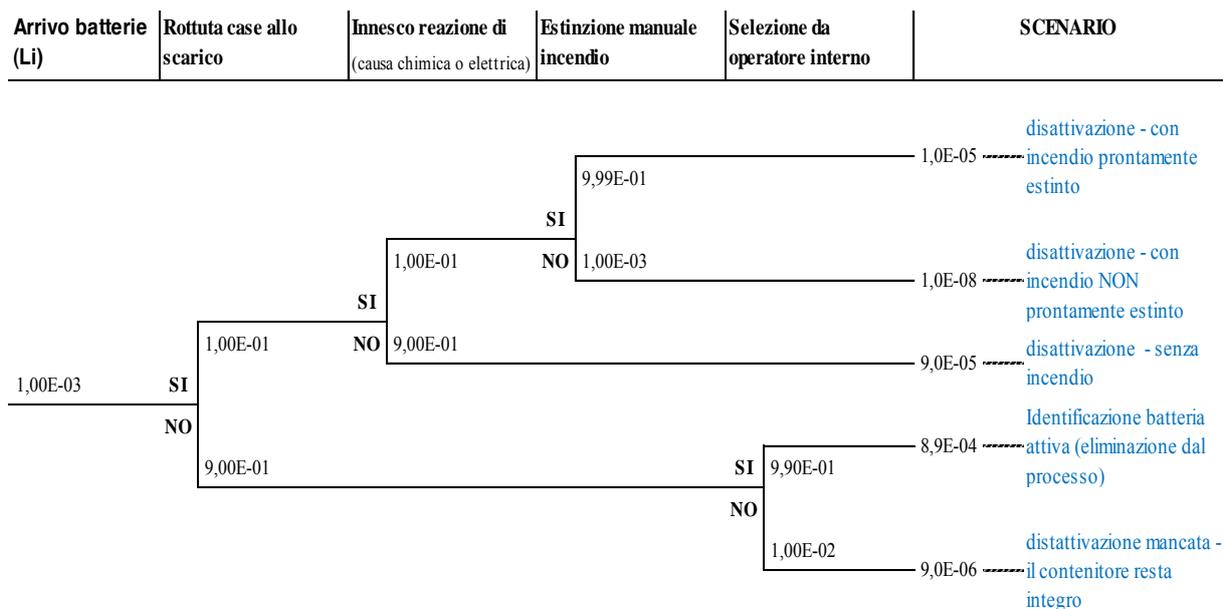


Figura 4. Albero degli eventi senza pre-crusher

Dallo studio dell'albero degli eventi si individua il punto del processo sul quale è possibile intervenire per ridurre drasticamente la probabilità che le batterie al litio raggiungano il cuore del processo produttivo.

Atteso che la forte infiammabilità delle batterie, se gestita in un'area lontana da depositi di elementi combustibili, oltre che opportunamente presidiata da operatori interni e adeguatamente attrezzata con sistemi di spegnimento incendi, non può evolvere in scenari con effetti rilevanti, risulta evidente che lo sforzo della società nella disattivazione delle batterie al litio deve concentrarsi nel migliorare la capacità "rottura del contenitore esterno" prima che tali elementi rientrano nel ciclo produttivo, qualora sfuggano al processo di cernita. La "disattivazione" consiste nella scomposizione del case e nella separazione delle sostanze (es. elettrolita infiammabile) presenti al suo interno, prima che entrino nel cuore del ciclo produttivo dell'azienda; per ridurre i rischi di esplosione e incendio che potrebbero derivarne si è scelto di inserire, tra il capannone di stoccaggio batterie esauste e il frantumatore, un sistema meccanico ad alta efficienza di separazione (*pre-crusher*) finalizzato a garantire che le batterie siano meccanicamente scomposte prima di accedere al ciclo produttivo.

Inserendo il pre-crusher nella metodologia di analisi precedentemente applicata, è stato elaborato il seguente albero degli eventi (*Event Tree Analysis, ETA*):

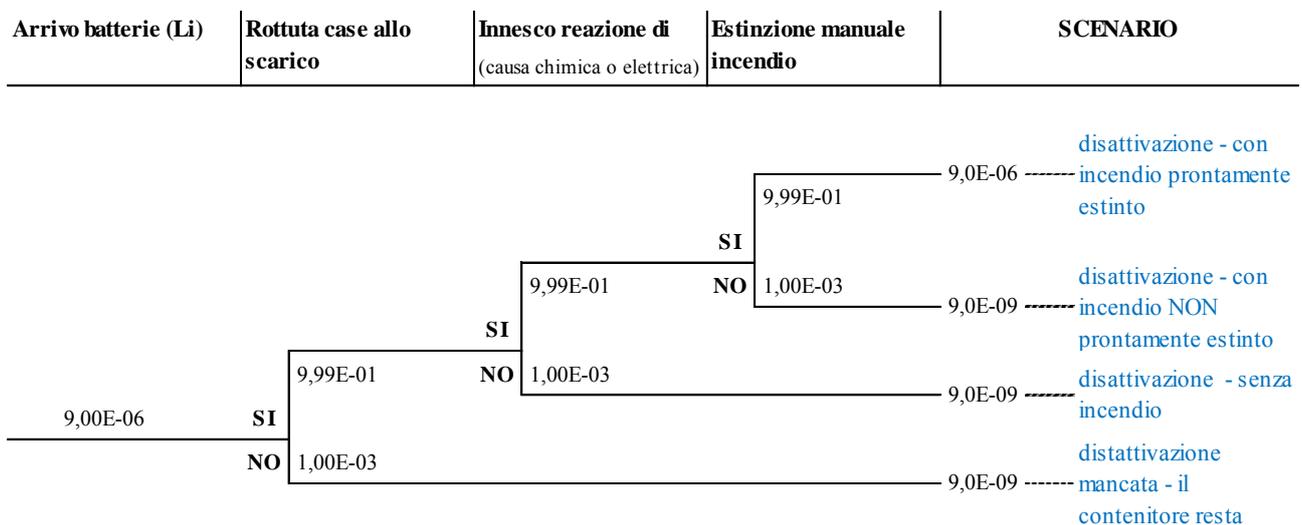


Figura 5. Albero degli eventi con pre-crusher

Secondo tali ipotesi, il pre-crusher permette un'elevata efficienza di triturazione:

- si ritiene altamente improbabile (1EXP-3) che gli elementi in esame possano attraversare il tritratore senza che siano completamente disassemblati;
- si assegna una probabilità molto elevata (1EXP-3) all'innesco, in ragione della grande energia meccanica con la quale si svolge la triturazione.
- si assegna una probabilità molto elevata (1EXP-3) alla capacità di spegnimento da parte degli operatori.

Da ciò deriva che l'eventuale incendio si svilupperebbe in posizione controllata, e secondo una dinamica che possa prevedere un intervento molto efficiente da parte della squadra d'emergenza: si tratta di un potente innesco, causato dalla fiamma della batteria al litio, ma in presenza di materiale con bassa velocità di combustione (involucro in plastica).

7. Misure in caso d'incendio

L'impianto antincendio esistente sarà integrato con apparecchiature mobili (*schiumogeni*) per l'estinzione dell'eventuale incendio atteso a bordo del *pre-crusher*. La scelta del sistema estinguente aggiuntivo è basata, nell'ambito di un vuoto legislativo, sull'evidenza che la presenza delle batterie al litio, dovuta a un errore nel processo di conferimento e successiva selezione allo scarico, è una condizione anomala del processo; ciò rende ragionevole l'ipotesi che il numero degli elementi al litio contemporaneamente presenti nel processo di triturazione, e quindi che partecipano all'incendio, sia molto limitato.

Le batterie al litio, quindi, pur essendo causa dell'ipotetico innesco nel trituratore, non sono da considerarsi il combustibile che alimenta l'incendio, che è rappresentato in massima parte dai *case* delle batterie tradizionali (elementi plastici).

La scelta dell'agente estinguente per tale tipologia di incendio è stata indirizzata dalle seguenti condizioni:

- incendio di elementi plastici a bassa velocità di combustione;
- presenza di liquidi infiammabili di carattere organico (es. elettrolita);
- sviluppo in ambiente sostanzialmente aperto;
- necessità di garantire un'azione estinguente che si protrae per un tempo sufficiente a ridurre la probabilità di ri-accensione del combustibile.

Di seguito è riportata una tabella rappresentativa delle principali caratteristiche delle sostanze estinguenti utilizzate:

ESTINGUENTE	EFFETTI SULL'UOMO	TIPOLOGIA DI AZIONE			
		SEPARAZIONE	SOFFOCAMENTO	RAFFREDDAMENTO	INIBIZIONE CHIMICA
Acqua					
Anidride carbonica	Congelamento (e soffocamento)				
Polvere	Irritazione occhi e vie respiratorie				
Schiuma					
Idrocarburi alogenati	Possibile formazione di sostanze tossiche per decomposizione				

LEGENDA	Qualità dell' AZIONE ESTINGUENTE			
		BUONA	MEDIOCRE	NULLA

Figura 6. Schema tipologia estinguenti

Le caratteristiche dell'incendio atteso hanno indirizzato la scelta dell'estinguente sulla schiuma che, oltre a garantire un rapido intervento estinguente (es. soffocamento), assicura una potente azione di raffreddamento finalizzata, per quanto possibile, a interrompere il processo *thermal runaway*. Si evidenzia, inoltre, che la scelta dell'estinguente è stata indirizzata soprattutto dall'impossibilità di utilizzare gas (es. Alogenati) e nell'ipotesi di un piccolo quantitativo di batterie al litio, e, in conseguenza, di sostanze *water-reactive*.

È, inoltre, fondamentale ricordare che tale tipologia incendi potrebbe produrre vapori di sostanze tossiche, e deve quindi essere affrontata con i necessari DPI che, oltre alla protezione dalla radiazione termica, garantiscano la protezione delle vie respiratorie.

8. Conclusioni

Al fine di ovviare a eventi incidentali dovuti alla presenza di batterie al litio nel processo di riciclo delle batterie al piombo esauste, è stata progettata la modifica non sostanziale del processo produttivo consistente nell'inserimento della fase di "prefrantumazione delle batterie". È stato, a questo scopo, installato, in ambiente aperto adiacente al capannone stoccaggio batterie, un mulino tritatore aggiuntivo che esegue una loro prefrantumazione direttamente all'atto del ricevimento in stabilimento.

Il risultato che ne deriva è un miglior controllo a ogni singolo scarico e il confinamento di un eventuale incendio/esplosione dovuto allo schiacciamento e/o movimentazione delle batterie al litio.

9. Bibliografia

[1] Direttiva 2006/66/CE pile e accumulatori e s.m.i.

[2] Abaco "*Probability of human error arising from different operations*".

Vantaggi della (nuova) norma IEC/EN 60079-10-1 e ausili per la sua applicazione

A. Barberio¹

¹ Studio di Consulenza dott. ing. Angelo Barberio

Sommario

La norma IEC/EN 60079-10-1:2015 è pienamente in vigore dal 13.10.2018, data ultima di ritiro della precedente edizione, e occorre rapidamente affrontare le parti ermetiche e i limiti applicativi per valutare e proporre strumenti di ausilio che ne consentano una maggiore confidenza d'uso e una più ampia applicazione ai casi che realmente si incontrano nella pratica industriale.

Abbreviazioni

Nel presente documento vengono impiegate le seguenti abbreviazioni:

norma	norma IEC/EN 60079-10-1:2015 [1]
SE	sorgente di emissione
ZP	zona pericolosa di una emissione
V_z	volume (ipotetico pericoloso) della ZP [m ³]
X_b	concentrazione di sottofondo della sostanza infiammabile nell'ambiente [vol/vol]
X_{crit}	concentrazione critica pari a $k \cdot LEL$ (concentrazione obiettivo) [vol/vol]
k	coefficiente di sicurezza variabile tra 0 e 1 (numero adimensionale)
LFL	limite inferiore volumetrico di infiammabilità [vol/vol]
d_z	distanza pericolosa (estensione della ZP) [m]

1. Vantaggi applicativi e limiti

La norma ha notevoli punti di forza:

- semplicità di classificazione almeno nei casi più comuni (individuata una emissione SE e la sua caratteristica di emissione, con due semplici verifiche, si determina il grado di diluizione della ZP e quindi il tipo di ZP e la relativa distanza pericolosa);
- rimanda a norme nazionali e codici di settore per maggiori dettagli o esempi di applicazione;
- fornisce le indicazioni operative negli allegati informativi (non normativi);
- non impone la determinazione del grado di diluizione in base al grafico C.1 (cfr. paragrafo C.3.5 della norma);
- non impone la stima del tipo di ZP in base alla tabella D.1 (cfr. paragrafo D.2 della norma);
- fornisce una guida per determinare l'estensione delle ZP attraverso il diagramma D.1 e possono quindi essere applicate altre metodologie di calcolo o di valutazione basate su "fonti qualificate" (cfr. paragrafo D.3 della norma e figure F.2, F.3 ed F.4);

che suggeriscono di continuare ad investire nello sviluppo della norma per superare i limiti che vedremo (i principali) nei paragrafi successivi.

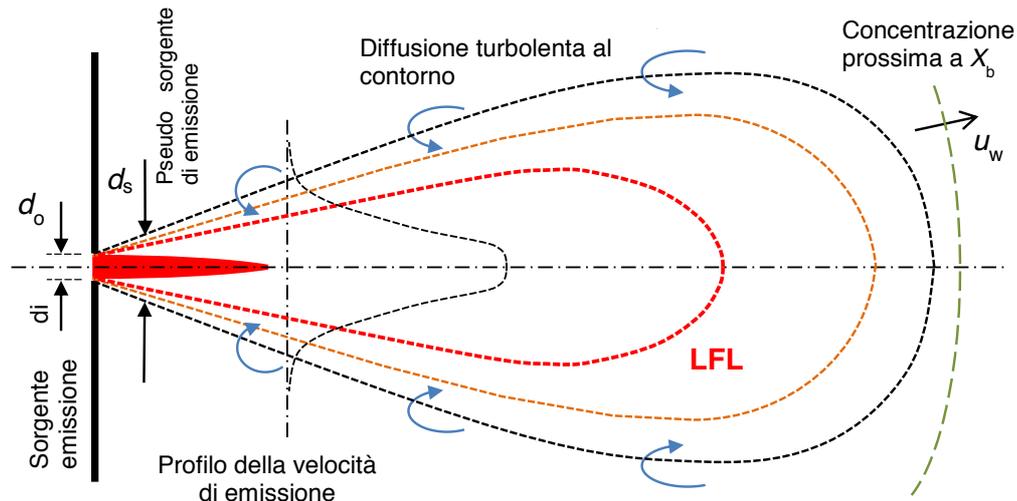


Figura 1. Sviluppo di un getto veloce

2. Grado di diluizione della ZP

Il grado di diluizione della ZP ovvero la misura dell'ampiezza della ZP e della sua persistenza nel tempo al cessare dell'emissione si determina attraverso il grafico in figura 2 con diverse limitazioni:

- è proposto nella sola forma grafica;
- non considera gli effetti "estensivi" dovuti alla X_b ;
- "is based on an initial zero background concentration" (non è significativo che la X_b sia "inizialmente" nulla ma, per la corretta stima, occorre conoscere il grafico su tutta la storia dell'emissione ovvero, generalmente, nelle condizioni di regime);
- non considera alcun rapporto tra *volume infiammabile*¹ e volume dell'ambiente;
- non tiene conto del tempo di persistenza dell'atmosfera esplosiva.

Per superare le dette limitazioni, occorrerebbe innanzi tutto conoscere le equazioni sottostanti al grafico in figura 2 ma, considerando che la norma non fornisce indicazioni, non rimane che interpolare osservando che le curve "rossa" e "blu" sono rette su scala logaritmica e, pertanto, sono funzioni potenza del tipo $y = A \cdot x^b$.

¹ Termine impiegato dalla norma senza definirlo ma che, intuitivamente, potrebbe essere il volume di diluizione ovvero quello che qui è definito il volume della ZP.

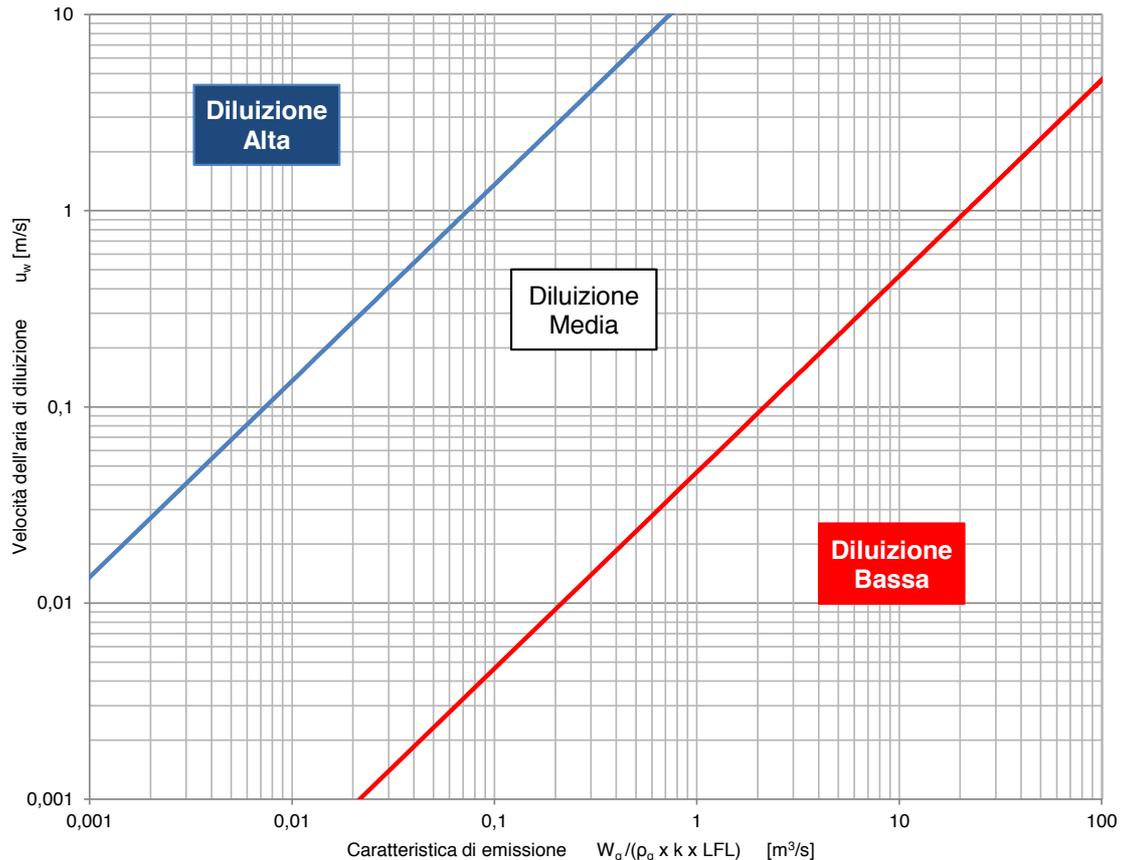


Figura 2. Grafico per la valutazione del grado di diluizione (grafico C.1 della norma)

Rilevando con righello e squadretta le curve “rossa” e “blu” della figura 2, si ottengono le due seguenti funzioni mediante interpolazione²

$$u_w(\text{rossa}) = 0,046 \cdot \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} \quad (1)$$

$$u_w(\text{blu}) = 13,57 \cdot \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} \quad (2)$$

dove

u_w velocità dell’aria di ventilazione [m/s];

W_g portata di emissione della sostanza infiammabile [kg/s];

ρ_g densità della sostanza infiammabile nelle condizioni atmosferiche [kg/m³].

3. Grado di diluizione della ZP e V_z

L’esame dei documenti preparatori della norma e della sua bibliografia indicherebbe che le equazioni sottostanti al grafico in figura 2 derivino da una nuova formulazione del V_z [2]

² Altri autori come Fernando Girardin, Marzio Marigo, ecc, danno valori leggermente differenti.

$$V_z = 0,74 \cdot \left(\frac{W_g}{k \cdot \text{LFL}_m \cdot u_w} \right)^{3/2} \quad (3)$$

dove, oltre i simboli già visti, abbiamo

V_z volume ipotetico pericoloso assunto come un tubo di flusso conico con origine nella (pseudo) sorgente di emissione (sezione di ingresso per applicare l'equazione di continuità) in cui la corrente fluida (emissione) è stazionaria, incomprimibile e priva di attrito che si espande con un angolo $\phi = 30^\circ$ senza miscelazione turbolenta con l'aria circostante sino alla sezione dove la velocità della corrente diventa pari alla velocità dell'aria ambiente e la concentrazione X_{crit} trascurabile dell'ordine pari a 0,01 vol/vol (sezione di uscita per applicare l'equazione di continuità) [m^3];

LFL_m limite inferiore massico di infiammabilità della sostanza emessa [kg/m^3].

Dalla (3), esplicitando la velocità dell'aria di diluizione u_w e uniformando le grandezze a quelle della (2) e della (1), si ottiene

$$u_w = \left(\frac{0,74}{V_z} \right)^{2/3} \cdot \frac{W_g}{k \cdot \text{LFL}_m} \cong \left(\frac{0,74}{V_z} \right)^{2/3} \cdot \frac{W_g}{k \cdot \rho_g \cdot \text{LFL}} \cong \left(\frac{0,74}{V_z} \right)^{2/3} \cdot \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \quad (4)$$

ossia esattamente la (2) e la (1) attraverso cui è così possibile determinare i valori di V_z adottati per tracciare le curve "rossa" e "blu", ovvero per verificare la bassa, l'alta e i casi intermedi di diluizione, rispettivamente nel settore "rosso" (quello in basso a destra), nel settore "blu" (quello in alto a sinistra) e nel settore "centrale" del grafico in figura 2.

Combinando la (2) e la (1) con la (4) ed esplicitando V_z si ottiene

$$V_z(\text{rossa}) = \frac{0,74}{0,046^{3/2}} \cong 74 \text{ m}^3 \quad (5)$$

$$V_z(\text{blu}) = \frac{0,74}{13,57^{3/2}} \cong 0,015 \text{ m}^3 \text{ (15 litri)} \quad (6)$$

Assumendo i volumi così ottenuti, è possibile rideterminare la (2) e la (1) preliminarmente ottenute per via grafica

$$u_w(\text{rossa}) = \left(\frac{0,74}{74} \right)^{2/3} \cdot \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \quad (7)$$

$$u_w(\text{blu}) = \left(\frac{0,74}{0,015} \right)^{2/3} \cdot \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \quad (8)$$

4. Limiti di rappresentatività del V_z

Il modello impiegato per determinare il V_z e le ipotesi di sviluppo sono estremamente semplificate rispetto alla reale complessità del fenomeno e quindi contiene dei limiti che non ne invalidano l'utilità a fronte della facilità di calcolo e del suo impiego (valutazione semi-quantitativa del rischio di esplosione).

In ogni caso, a volerne indicare alcuni, partendo da quelli già indicati sopra per il grado di diluizione, si può così continuare con:

- la ventilazione controlla semplicemente l'angolo di espansione ϕ del tubo di flusso conico variabile tra 22° e 60° , assunto pari a 30° per semplicità;
- la rappresentazione mediante un tubo di flusso conico è segnatamente applicabile ai getti veloci (figura 1) [6];
- non considera fenomeni di diluizione turbolenta della corrente fluida e quindi non si assume alcun profilo realistico di decadimento delle concentrazioni ma una variazione fittizia della concentrazione derivante dall'espansione del getto che, nella sezione di uscita, si considera avere una concentrazione media pari a X_{crit} trascurabile;
- non considera il fattore di (in)efficacia della ventilazione f ovvero la concentrazione di fondo X_b perché le ipotesi di sviluppo del modello utilizzato non ne permettono l'uso [1];
- che cos'è il V_z ? è un volume ipotetico e un volume reale? che rapporto ha con il d_z ?

Una qualche risposta aggiuntiva verrebbe dalla seguente formula per i getti veloci (*free jet*) [2][3]

$$V_z \cong \frac{9\pi r_s^3}{16\alpha} \cdot \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1-X_b}{X_{crit}-X_b}\right)^3 \quad (9)$$

e dalla seguente formula per i getti lenti (*plume*) [3]

$$V_z \cong \frac{\sqrt{3} \cdot \pi r_s^3}{\alpha} \cdot \left(\frac{1-X_b}{X_{crit}-X_b}\right)^3 \quad (10)$$

dove, oltre i simboli già visti, abbiamo

r_s raggio della pseudo sorgente di emissione [m];

α coefficiente di autodiluizione assunto pari a 0,05 (adimensionale).

ρ_b densità della miscela gas-aria di sottofondo pari a $\rho_a + \left(1 - \frac{M_a}{M}\right) \cdot f \frac{Q_g}{Q_1} \cong \rho_a$ [kg/m³];

ρ_s densità del gas nella pseudo sorgente pari a $\frac{M p_s}{RT_s} = \frac{M p_a}{RT_s} \cong \frac{M p_a}{R \cdot 293}$ [kg/m³];

M_a massa molare dell'aria [kg/kmol];

M massa molare del gas emesso [kg/kmol];

R costante universale dei gas pari a 8314,5 J/kmol · K;

p pressione di emissione [Pa];

p_a pressione atmosferica [Pa];

osservando che il fattore correttivo $(1 - X_b/X_{crit} - X_b)^3$ della (9) e della (10) potrebbe “artificialmente” modulare il V_z calcolato nei capitoli precedenti.

5. Estensione della ZP e V_z

L'estensione della ZP si determina attraverso il grafico in figura 3 con diverse limitazioni alcune delle quali sono le medesime per il grado di diluizione della ZP [7]:

- non tiene conto della massa molare della sostanza emessa;
- non considera gli effetti “estensivi” dovuti alla X_b ;
- “is based on an initial zero background concentration”;
- non fornisce valori sotto il metro.

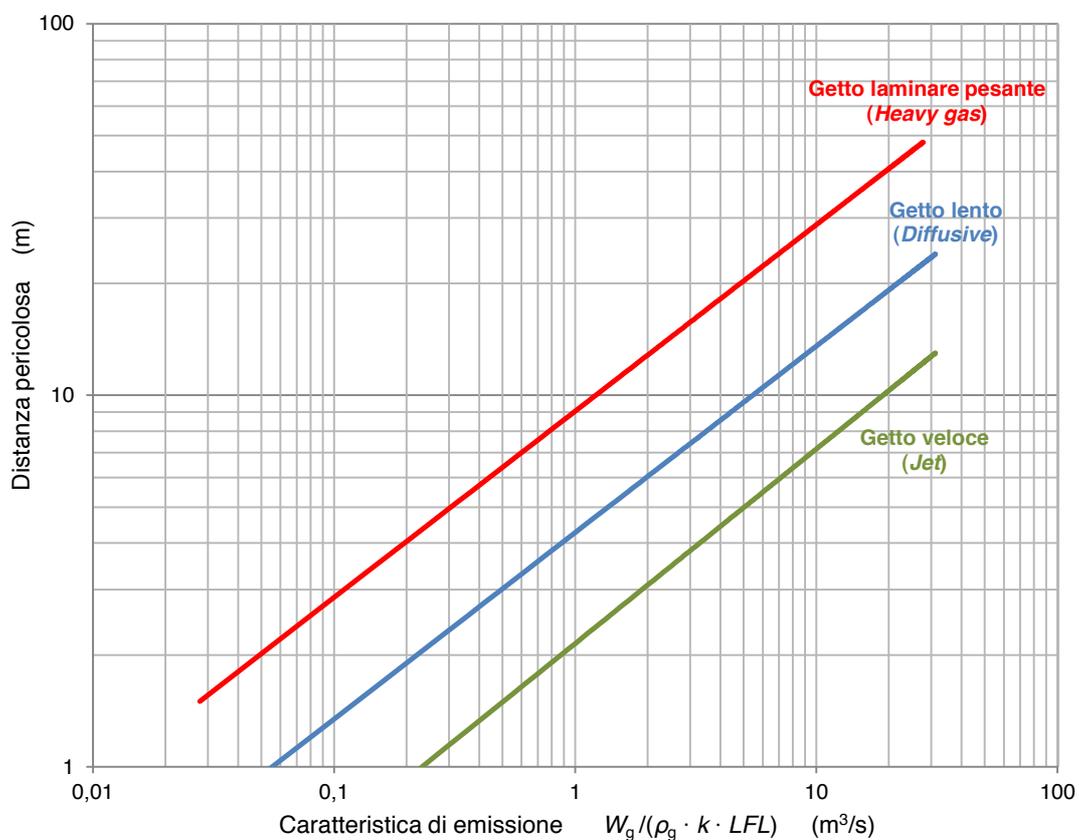


Figura 3. Grafico per la stima delle distanze pericolose (diagramma D.1 della norma)

Anche in questo caso, la norma non fornisce indicazioni e non rimane che rilevarle con righello e squadretta osservando che anche le curve “**rossa**” (getto laminare pesante), “**blu**” (getto lento) e “**verde**” (getto veloce) della figura 3 sono rette su scala logaritmica, quindi, sono funzioni potenza del tipo $y = A \cdot x^b$, ottenendo le seguenti funzioni

$$d_z(\text{getto laminare pesante}) \cong 9,05 \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} \right)^{0,501} \quad (11)$$

$$d_z(\text{getto lento}) \cong 4,27 \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \right)^{0,501} \quad (12)$$

$$d_z(\text{getto veloce}) \cong 2,15 \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \right)^{0,52} \quad (13)$$

Verifichiamo se anche le equazioni sottostanti al grafico in figura 3 sono legate al V_z .

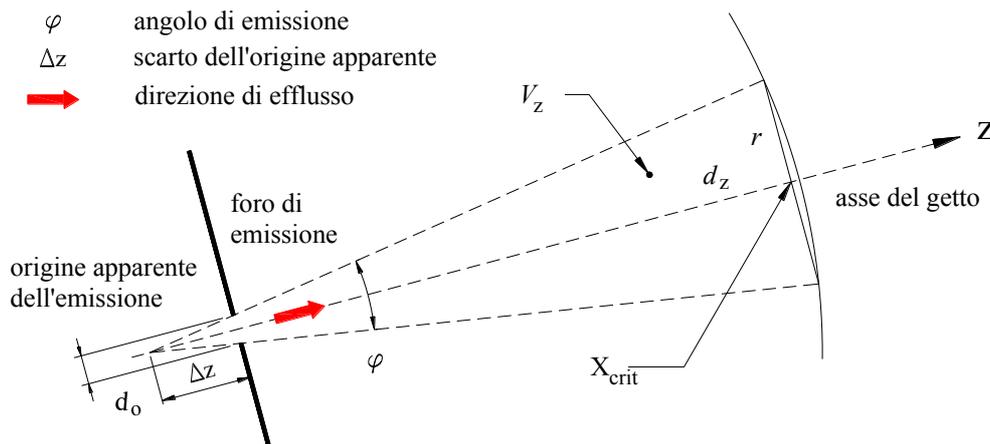


Figura 4. Sviluppo geometrico del V_z

Sulla base della figura 4, assumendo che il V_z (i) sia tale per cui la concentrazione media nel cilindro circoscritto sia pari a X_{crit} , (ii) abbia una altezza pari alla distanza pericolosa d_z e (iii) che l'angolo di espansione ϕ sia sempre pari a 30° [2], abbiamo

$$V_z \cong d_z \cdot \pi \cdot r^2 = d_z \cdot \pi \cdot \left(d_z \cdot \text{tg} \frac{\phi}{2} \right)^2 = \pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\phi}{2} \cdot d_z^3 \cong 0,226 \cdot d_z^3 \quad (14)$$

Combinando la (14) e la (3), uniformando le grandezze ed esplicitando la distanza pericolosa si d_z ottiene

$$d_z \cong \frac{\left(\frac{0,74}{0,226} \right)^{1/3}}{\sqrt{u_w}} \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \right)^{1/2} = f(u_w) \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Con la (14) è possibile rideterminare la (11), la (12) e la (13) preliminarmente ottenute per via grafica e dedurre le condizioni di ventilazione di controllo attraverso il coefficiente $f(u_w)$.

	Getto laminare pesante	Getto lento	Getto veloce
Coefficiente $f(u_w)$ [s/m ²]	9,05	4,27	2,15
Velocità dell'aria di ventilazione u_w [m/s]	0,027	0,12	0,56

Tabella 1. Coefficienti caratteristici di controllo dei getti

Prima osservazione: l'esponente nella (13) diverge leggermente da quella nella (15) aspetto apprezzabile anche osservando la pendenza dell'originale curva "verde" (figura 3).

Seconda osservazione: recenti documenti preparatori della prossima norma indicano che la curva "blu" is based on an air velocity of 0,5 m/s mentre la curva "rossa" on 0,3 m/s (nulla è detto per la curva "verde").

Quest'ultima indicazione porterebbe a rideterminare la (15) generalizzandola [2]

$$d_z \cong \frac{\left(\frac{2}{3\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1 - \cos \frac{\varphi}{2}}{\sin^3 \frac{\varphi}{2}} \right)^{1/3}}{\sqrt{u_w}} \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} \right)^{1/2} = \frac{f(\varphi)}{\sqrt{u_w}} \cdot \left(\frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot LFL} \right)^{1/2} \quad (16)$$

ottenendo i seguenti nuovi parametri osservando che l'angolo di espansione ϕ non assume valori compresi tra 22° e 60° come detto sopra.

	Getto laminare pesante	Getto lento	Getto veloce
Velocità dell'aria di ventilazione u_w [m/s]	0,3	0,5	-
Coefficiente $f(u_w)$ [s/m ²]	9	4,24	-
Angolo di espansione ϕ [°]	9,1	15	-

Tabella 2. Rideterminazione dei coefficienti caratteristici di controllo dei getti

Come per il V_z , anche per il d_z occorre valutare come modularlo in base all' X_b e una qualche risposta verrebbe dalla seguente formula per i getti veloci (*free jet*) [3][4]

$$d_z = \frac{r_s}{2\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_s}} \cdot \frac{1 - X_{crit}}{X_{crit} - X_b} \cong \frac{r_s}{2\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_s}} \cdot \frac{1 - X_{crit}}{X_{crit} - X_b} \quad (17)$$

e dalla seguente formula per i getti lenti (*plume*) [3]

$$d_z = \frac{r_s}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_b}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} \cdot \frac{1 - X_{crit}}{X_{crit} - X_b}} - 1 \right) \quad (18)$$

osservando che il fattore correttivo $(1 - X_b / X_{crit} - X_b)$ non è direttamente applicabile per modulare "artificialmente" il d_z dei getti lenti avendo forma complessa.

6. Conclusioni

La norma rappresenta certamente un importante passo avanti rispetto alla precedente tuttavia occorre ancora di interventi che devono essere fatti approfittando dei lavori in cui il

normatore internazionale è già impegnato per preparare la prossima versione di norma prevista per il 25.12.2020.

Nel frattempo, rammentando che non è obbligatorio conformarsi a una norma [8] e che una norma non necessariamente costituisce regola dell'arte solo per il fatto di essere in vigore, sarebbe auspicabile che la guida CEI 31-35 [6] non venga ritirata contestualmente al ritiro della precedente norma [5] previsto per il 13.10.2018 e rimanga in vigore per avere un utile strumento per affrontare in maniera alternativa o aggiuntiva i problemi che dovessero nascere (sopra abbiamo visto solo qualche caso) anche per il fatto che è richiamata nel testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro [9] e che la norma stessa indica essere uno dei documenti da poter impiegare per la classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione (cfr. paragrafo 5.3 della norma e relativo Allegato K).

7. Bibliografia

- [1] Norma IEC/EN 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, edition 2.0, e corrigendum COR1:2015.
- [2] Hypothetical Volume of Potentially Explosive Atmosphere in the Context of IEC Standard 60079-10-1, Predrag Peršić, Ex-Bulletin, 40:1-2, Croatia 2012.
- [3] Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification, David M. Webber, Matthew J. Ivings, Roger C. Santon, Journal of Loss prevention in the Process Industries, 2011.
- [4] New methods for hazardous area classification for explosive gas atmospheres, Roger Santon, Mat Ivings, David Webber, Adrian Kelsey, Hazards XXIII, IChemE Symposium series no. 158, Southport, UK on 12-15 November 2012.
- [5] Norma IEC 60079-10-1:2008 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, edition 1.0 (la versione EN è stata pubblicata nel 2009 che rimane in vigore fino al 13.10.2018).
- [6] Guida CEI 31-35:2012 Atmosfere esplosive - Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87) e variante V1:2014.
- [7] Hazloc 2.0: l'evoluzione normativa nella classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione, criticità della nuova norma IEC/EN 60079-10-1, Angelo Barberio, Paolo Scardamaglia, SAFAP 2016, Sicurezza e affidabilità delle attrezzature in pressione - La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio, Milano 15 e 16 novembre 2016.
- [8] Regolamento (UE) n. 1025/2012 del Parlamento europeo e del consiglio del 25 ottobre 2012 sulla normazione europea, che modifica le direttive 89/686/CEE e 93/15/CEE del Consiglio nonché le direttive 94/9/CE, 94/25/CE, 95/16/CE, 97/23/CE, 98/34/CE, 2004/22/CE, 2007/23/CE, 2009/23/CE e 2009/105/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga la decisione 87/95/CEE del Consiglio e la decisione n. 1673/2006/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, articolo 2, comma 1.
- [9] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro e successive modificazioni e integrazioni (testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro).

Trasporto su gomma di serbatoi per liquidi pericolosi: rischi associati al moto del fluido, normative, soluzioni tecniche

S. Carra¹, G. Vignali², L. Monica¹

¹ Inail - Dit

² Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma, Centro di Eccellenza per la Ricerca e l'Innovazione Tecnologica (CERIT) di Parma

Sommario

Il trasporto su gomma di liquidi pericolosi in pressione viene tipicamente effettuato all'interno di cisterne (autobotti, autotreni). In caso di incidente, laddove il veicolo si danneggi ed il contenuto venga rilasciato o esploda, si possono avere danni importanti alle persone (in primo luogo ai trasportatori stessi), all'ambiente, alle infrastrutture e abitazioni circostanti.

Uno dei fattori di rischio a riguardo è rappresentato dal movimento del pelo libero del liquido conseguente al moto del veicolo (il cosiddetto fenomeno di "sloshing").

Il presente lavoro è volto ad analizzare le normative esistenti a riguardo, le soluzioni tecniche eventualmente già adottate nella prassi, approfondendo poi lo stato dell'arte a livello di ricerca scientifica internazionale, al fine di evidenziare possibili ulteriori interventi di riduzione del rischio.

1. Incidenza del fenomeno e riferimenti normativi

In Italia i liquidi pericolosi (tra cui il GPL) vengono trasportati su strada secondo modalità stabilite dalla normativa europea ADR ("Agreement Dangerous Road") [1]; in particolare, viene trasportato su strada più del 50% del GPL distribuito tra le varie regioni, così come la totalità del GPL in arrivo alle utenze. Nella ADR sono regolamentati tutti gli aspetti relativi al trasporto di merci pericolose: disposizioni generali, classificazione delle merci pericolose, condizioni di trasporto (carico, scarico e movimentazione), imballaggio.

Uno dei potenziali fattori di rischio incidentale nel settore è la formazione, all'interfaccia liquido-gas, di onde superficiali a bassa frequenza ("sloshing"), che possono avere effetti significativi sulla risposta dinamica del veicolo e dunque sulla sua integrità e stabilità.

La sorgente innescante lo sloshing può essere di varia natura: essa è costituita principalmente dalle accelerazioni del veicolo (per curve, frenate, sterzate) ma anche, per esempio, indirettamente, da vibrazioni prodotte dal passaggio su terreno disconnesso, perché disturbi, anche se piccoli, ritornano amplificati nel fluido. Gli studi reperibili in campo internazionale mostrano come il movimento del pelo libero del fluido contenuto nelle cisterne possa modificare le forze di contatto tra gli pneumatici ed il terreno fino a comportare, in casi estremi, il sollevamento delle ruote ed il conseguente ribaltamento ("rollover") del veicolo [2], specie se in abbinamento al rischio associato alle accelerazioni laterali [3], anche in caso di velocità ridotta.

Lo sloshing contribuisce anche a rendere difficoltosa la guidabilità, soprattutto quando la massa liquida rappresenta una grossa percentuale della massa totale del veicolo, ostacolando quindi anche la capacità del guidatore di reagire prontamente agli imprevisti (ostacoli, etc.).

In merito alla quantificazione dei tassi di incidentalità, molti più progetti di valutazione del rischio sono stati sviluppati nei paesi nordamericani rispetto ai paesi europei, al fine di comprendere a fondo il meccanismo di rollover e la maggiore propensione al ribaltamento mostrata dalle cisterne qualora parzialmente piene. Inoltre, nel Nord America esistono

database regolarmente aggiornati che raccolgono le segnalazioni di incidenti a partire dal 1970, mentre nella comunità europea solo nel 1993 è stata pubblicata la banca dati *CARE* per cercare di colmare questa lacuna e, in ogni caso, i dati e le statistiche sugli incidenti ai mezzi pesanti (e ancor più alle cisterne per trasporto di sostanze pericolose) sono ancora limitati.

E' dunque già dagli anni '70 che la ricerca internazionale ha cominciato ad approfondire questa tematica specifica, spinta anche da alcuni incidenti eclatanti. Negli USA, per esempio, nel 1976 un'autocisterna che trasportava circa 40.000 litri di ammoniaca anidra liquefatta in pressione urtò e scavalcò il parapetto del ponte sulla rampa che collega due strade a Houston, in un tratto di curva con pendenza a 12°. La motrice si sganciò dal rimorchio e si produsse una frattura fra il fondo della cisterna e il corpo cilindrico con conseguente fuoriuscita del liquido, successiva rapida espansione, vaporizzazione ed esplosione dell'ammoniaca liquida, che causò diversi morti e moltissimi feriti. Nel caso specifico, apposite istituzioni statunitensi stabilirono che la causa probabile dell'incidente fu l'eccessiva velocità del veicolo che, unitamente allo spostamento del liquido all'interno della cisterna (solo parzialmente riempita), determinò il ribaltamento del mezzo, insieme all'inadeguata resistenza del parapetto che delimitava la rampa.

Appare comunque evidente che – in assenza di simili studi “dedicati” al singolo incidente (non sempre realizzati) - è spesso difficile individuare una relazione diretta tra ribaltamento e sloshing, dato che non c'è un'evidenza oggettiva di tale correlazione. Gli incidenti vengono più spesso attribuiti solo all'eccessiva velocità, anche qualora sicuramente la componente di carico laterale prodotta dal fluido abbia dato un contributo non trascurabile. Analizzando però dati incidentali forniti da diversi database (sia europei che nordamericani [4]), emerge come in realtà la maggior parte dei ribaltamenti con cisterna parzialmente riempita sia avvenuta per perdita di controllo mentre il veicolo non stava viaggiando a velocità eccessiva.

L'errore del conducente è risultato essere il fattore più rilevante in circa l'85% dei casi di incidente. In particolare, spesso i ribaltamenti dei veicoli pesanti avvengono durante una curva. In quasi un terzo dei casi le autocisterne sono uscite di strada prima di ribaltarsi, pur non viaggiando troppo velocemente. Incidenti dovuti a sonnolenza e sonno si sono invece verificati di rado.

Nel nostro Paese, le tipologie di cisterne presenti sul mercato possono essere estremamente varie, a seconda del fluido trasportato. In generale, esse si distinguono in fisse o ribaltabili e possono lavorare a pressione atmosferica o essere messe in pressione da compressori. Le più comuni sono quelle per trasporto carburante per riscaldamento o autotrazione (benzina, gasolio, cherosene, benzina avio), suddivisibili in un alto numero di tipologie e configurazioni a seconda delle diverse esigenze dei vettori e dei committenti. Esse possono variare per sezione, presenza e numero di scomparti, sistemi di misurazione.

Nel caso specifico del trasporto di GPL, necessariamente in cisterna è applicata un forte pressione per mantenere lo stato liquido. La geometria è tipicamente a corpo cilindrico ad asse orizzontale con testate emisferiche, al fine di assicurare la naturale espansione del gas (con una bombatura simile ma più pronunciata rispetto a quella usata per trasporto di altri gas tecnici) e garantendo così l'uniformità della pressione in tutti i punti della cisterna. Il materiale di costruzione è l'Alluminio e le dimensioni sono estremamente variabili, andando dalle grandi cisterne fino agli autocarri medi e piccoli a seconda dei contesti di utilizzo.

L'emissione accidentale di sostanze pericolose può avvenire, oltre che durante il trasporto dal luogo di produzione ai siti di utilizzo o trasformazione, anche durante la fase di produzione, utilizzo e deposito (impianti fissi). A ben guardare, tipologia ed entità delle conseguenze sono simili in entrambi i casi, ma mentre nel secondo caso esiste una

normativa ben specifica in relazione al rischio di *incidente rilevante* (direttiva Seveso III, recepita in Italia tramite d.lgs. n. 105/2015), essa non è applicabile al caso specifico dei trasporti. Ecclatante è il caso del recente incidente di Bologna (agosto 2018), dove un'autocisterna che trasportava GPL ha tamponato un tir, causando fuoriuscita di combustibile, con conseguente incendio ed esplosione, poi propagatisi a catena nelle auto di due concessionarie limitrofe, secondo uno schema da classico "effetto domino", tipicamente presente negli scenari incidentali degli impianti fissi a rischio di incidente rilevante.

Tale differenza nelle normative applicabili rispettivamente a trasporti ed impianti fissi per sostanze pericolose rappresenta, a parere di molti, una carenza nella sicurezza del trasporto, solo in parte giustificabile considerando l'estrema variabilità del contesto e delle modalità in cui il trasporto si realizza, il numero considerevole di trasporti effettuati giornalmente ed il loro carattere trans-nazionale. Non esistono cioè in questo settore valutazioni del rischio o analisi di sicurezza mirate così come accade invece per le installazioni fisse [5], nonostante in esso si sommino rischi dovuti all'affidabilità tecnica dei veicoli, alla sicurezza stradale e – in misura molto maggiore che nei fissi – al fattore umano (livello di formazione, esperienza, fretta, distrazione, stanchezza); le eventuali soluzioni per la mitigazione degli effetti avversi sono comunque di più difficile applicazione. Qui di seguito verrà analizzato nello specifico il comportamento dinamico di sistemi-cisterna (specie per trasporto di GPL) soggetti a sloshing, specificando le relative modalità di modellazione ed analisi. In secondo luogo, si approfondiranno le possibili tecniche di riduzione del fenomeno, a partire dalle soluzioni adottate nella prassi per giungere infine alle più recenti innovazioni proposte dalla letteratura scientifica internazionale.

2. Lo sloshing nelle cisterne per trasporto di liquidi pericolosi

Nella maggior parte dei ribaltamenti sono coinvolti camion cisterna che trasportano carichi liquidi e viaggiano parzialmente riempiti. Nel serbatoio parzialmente pieno, infatti, l'accelerazione laterale data dal moto del liquido aumenta a causa del movimento di imbardata e ciò può comportare il superamento del *limite di ribaltamento statico (SRT)*, che dovrebbe essere il più alto possibile per massimizzare la sicurezza dei veicoli pesanti. Lo sloshing all'interno di un serbatoio in movimento è noto per essere un fenomeno piuttosto complesso, in particolare sotto l'influenza di eccitazioni su più assi, come riscontrato nelle cisterne per trasporto stradale. Le forze dinamiche di sloshing all'interno delle autocisterne derivano dai campi di accelerazione laterale o longitudinale o da una combinazione dei due durante una manovra di sterzata e/o di frenata, con l'aggiunta di eventuali contributi dati dal vento o dal fondo stradale particolarmente irregolare. Gli effetti sono più pronunciati quando si cade in condizioni di risonanza e la frequenza di eccitazione esterna corrisponde alla frequenza naturale della geometria in studio; essi inoltre dipendono dalla quantità di liquido contenuto e dal rapporto tra il volume occupato dal fluido e il volume libero all'interno del serbatoio.

In genere, le peggiori condizioni di sloshing si verificano quando il serbatoio viene riempito nell'intervallo dal 40% al 70% del volume del serbatoio.

In caso di frenata, il liquido nel serbatoio parzialmente pieno si solleva in avanti, causando un carico irregolare sulle ruote; in caso di brusca frenata, si può addirittura arrivare ad un vero e proprio sollevamento delle ruote posteriori. Ciò può portare a difficoltà nel controllo del veicolo e a maggiori distanze di arresto a causa del minore contatto stradale e la diminuzione della stabilità può comportare il ripiegamento in due parti ("jack-knifing") dei veicoli con rimorchi.

Quando invece si entra in una curva o si esegue un cambio di corsia, le forze centrifughe esterne provocano lo spostamento laterale del fluido, che causa un carico irregolare sulle

ruote. In casi estremi di alta velocità o di piccolo raggio di curvatura, questi cambiamenti potrebbero essere abbastanza significativi da indurre il sollevamento delle ruote interne e aumentare la possibilità di ribaltamento rispetto a un veicolo equivalente che trasporti materiali solidi. Inoltre, nei casi in cui le forze di attrito dello pneumatico siano ridotte, come su strade bagnate o ghiacciate, la possibilità di instabilità del veicolo aumenta ulteriormente e i conducenti devono prestare particolare attenzione.

Dati USA del 2012 della Federal Motor Carrier Safety Administration dicono che molti ribaltamenti (56%) si verificano su tratti rettilinei, tipicamente quando un autista fa una manovra correttiva dopo aver fatto scendere una ruota dalla superficie stradale o essersi distratto. Inoltre, solo il 28% degli incidenti di veicoli per trasporto merci è legato ad una guida troppo veloce per le condizioni del tratto stradale, il 66% dei ribaltamenti coinvolge conducenti con più di dieci anni di esperienza di guida e il 78% dei ribaltamenti è dovuto ad un errore dell'autista. Questi ultimi dati dimostrano come il fattore umano sia fondamentale, anche in caso di grande esperienza di guida nel settore materiali pericolosi. Dal punto di vista dello studio numerico-analitico di tali problematiche, il moto del liquido può essere modellato, includendo forze e momenti che esso esercita sul veicolo, ed il modello può variare in base alla geometria della cisterna ed al suo livello di riempimento.

I primi modelli di sloshing rappresentavano il fluido come una serie di pendoli planari o sistemi massa-smorzatore; i pendoli sferici e composti sono stati successivamente utilizzati per catturare le non-linearità nel movimento e lo smorzamento è stato aggiunto per includere l'effetto della dissipazione di energia. In particolare, in tempi recenti un "trammel pendulum" equivalente in un serbatoio parzialmente pieno è stato usato per descrivere lo sloshing del liquido, analizzandone il movimento e ricavandone le equazioni del moto [6]. Ne è emerso che le variabili di guida (angolo di rollio, etc.) fluttuano con frequenza che scende all'aumentare del livello di riempimento del liquido e che la stabilità di guida dell'autocisterna è fortemente influenzata dallo sloshing liquido transitorio. Pertanto, il controllo dei valori massimi delle variabili di guida deve essere considerato fondamentale a supporto della sicurezza di guida. Inoltre, un livello di riempimento di liquido vicino al 50% è da considerarsi lo stato peggiore in termini di carico e dovrebbe essere evitato.

I modelli inerziali discreti sono stati ampiamente utilizzati nello studio della dinamica dello sloshing, specie nell'industria aerospaziale, a partire dagli anni '60. Tuttavia, nonostante essi siano stati migliorati nel tempo, non possono essere utilizzati per catturare con precisione il cambiamento di inerzia dovuto ad un cambiamento nella forma del fluido e della dinamica complessa risultante dal movimento del veicolo. Inoltre, i modelli a corpo rigido discreto non consentono di modellare la superficie libera continua del fluido, ed è stato trovato che tali modelli sottostimano significativamente l'ampiezza massima di oscillazione e la frequenza di sloshing. Tuttavia, i modelli a pendolo discreto sono ancora in uso per studiare l'effetto dello sloshing fluido sulla dinamica e sulla stabilità dei veicoli, soprattutto a causa delle difficoltà incontrate nell'integrazione tra moderna fluidodinamica computazionale e algoritmi di modellazione del veicolo.

La fluidodinamica computazionale (CFD) è un metodo che utilizza algoritmi di analisi numerica per risolvere e analizzare problemi di fluidodinamica, utilizzando diversi possibili metodi di discretizzazione, e rappresenta un mezzo efficace soprattutto per predire la non-linearità dello sloshing fluido dinamico. Tale metodo ha recentemente guadagnato una maggiore attenzione, ma presenta ancora alcune limitazioni. Uno studio recente [2] propone un nuovo approccio in grado di catturare l'inerzia distribuita e la viscosità del fluido, prevedendo con precisione il cambiamento di inerzia dovuto al cambiamento di forma del fluido e visualizzando il cambiamento nella superficie libera, utilizzando una specifica formulazione ad elementi finiti nella coordinata nodale assoluta (ANCF) in combinazione con algoritmi di modellazione multi-body.

Nel 2010 [7] è stato sviluppato un modello dinamico del piano di beccheggio di un camion, includendo la fluidodinamica dello sloshing, per analizzare l'interazione fluido-veicolo in caso di manovre di frenatura su rettilineo. I risultati mostrano che le risposte del veicolo sono altamente associate alle caratteristiche di forza e momento di sloshing. In tale studio, lo sloshing del fluido in tre dimensioni è studiato sperimentalmente in un serbatoio di laboratorio di dimensioni relativamente grandi, dotato di paratie.

Tipici set-up per questo tipo di analisi sperimentali includono dinamometri alla base dei serbatoi (per misurare le forze dinamiche), sensori di accelerazione e spostamento ed attuatori guidati da servo-controller. In alcuni casi, anche la Velocimetria ad immagini di particelle fluorescenti (f-PIV) è stata individuata come strumento affidabile per la caratterizzazione del fenomeno di sloshing ed il rilevamento della superficie libera mediante elaborazione di immagini. La selezione della densità delle particelle fluorescenti per applicare l'algoritmo di individuazione è fondamentale; inoltre, anche una specifica elaborazione per recuperare la velocità da doppie immagini PIV è già stata testata in letteratura [8].

3. Modalità di riduzione del rischio da sloshing nelle cisterne

Test e prototipazione virtuale sono strumenti ottimali per garantire una migliore progettazione (e conseguentemente una maggior stabilità dinamica) dei veicoli. Poiché la prototipazione fisica è costosa e dispendiosa in termini di tempo, è spesso necessario sviluppare modelli predittivi accurati per indagare l'effetto dello sloshing liquido sulla dinamica dei veicoli autostradali soggetti a diverse condizioni di carico e scenari di movimento.

La sfida è riuscire a catturare con precisione l'effetto delle forze di sloshing, per esempio, mentre si affronta una curva, durante un cambio rapido di corsia e negli scenari di accelerazione e frenata.

Le soluzioni anti-sloshing sono diverse, sia considerando le prassi consolidate, sia guardando ai più recenti risultati ottenuti dalla ricerca scientifica. Per ciascun caso specifico, e relative possibili soluzioni, vanno valutati margini di stabilità, criteri progettuali e risposte dinamiche ai disturbi. Fattori fondamentali sono l'interazione del moto del liquido con la struttura elastica della cisterna e con l'eventuale sistema di controllo del veicolo.

3.1. Le soluzioni anti-sloshing nella prassi

Le soluzioni tecniche adottate regolarmente dai produttori europei di camion e rimorchi e le normative europee in termini di "stabilità laterale" garantiscono la sicurezza delle autocisterne. Ad esempio, l'uso della ruota singola invece delle doppie ruote aumenta i momenti di ripristino elastico dovuti alle sospensioni e consente l'uso di serbatoi a basso profilo (con baricentro basso), meno sensibili alla problematica dello sloshing. Inoltre, considerare un *SRT* limite di 0.4g, così come l'evitare di circolare con serbatoio riempito nell'intervallo compreso tra il 40% ed il 70%, consentono di aver maggior garanzia di stabilità laterale.

La regolamentazione in materia europea è ricca, specie se confrontata con altri contesti; per esempio, in nordamerica mancano requisiti minimi sulle condizioni di riempimento, con conseguente aumento del rischio in strada. Nonostante ciò, la mancanza di software commerciale in grado di simulare facilmente la dinamica delle autocisterne rende molto difficile il miglioramento della loro stabilità durante la fase di progettazione.

Uno degli strumenti passivi più utili per controllare il flusso e sopprimere lo sloshing è l'uso di paratie all'interno dei serbatoi. Il regolamento europeo (seppur solo per liquidi

pericolosi) stabilisce che quando i serbatoi destinati al trasporto di liquidi non sono suddivisi da paratie in sezioni di capacità non superiore a 7500 litri, essi devono essere riempiti almeno all'80% della loro capacità, a meno che non siano praticamente vuoti.

Ma le paratie servono anche per prevenire danneggiamenti del serbatoio. Nel caso di un serbatoio utilizzato per il trasporto di liquidi, con una sezione trasversale circolare o ellittica, con un raggio massimo di curvatura di 2m, il guscio viene dotato di elementi di rinforzo comprendenti divisori, piastre di compensazione o anelli esterni o interni posizionati in modo tale che la distanza fra due elementi di rinforzo adiacenti non superi 1.75 metri o il Volume contenuto tra due partizioni o piastre di compensazione sia non più di 7500 litri.

Le paratie dovrebbero essere dotate di un incavo, con una profondità del piatto non inferiore a 10 cm, oppure possono essere corrugate, profilate o altrimenti rinforzate per fornire una resistenza equivalente. L'area della piastra deve essere almeno pari al 70,0% dell'area della sezione trasversale del serbatoio in cui essa è installata.

Poiché i fattori principali che influenzano la *SRT* sono la distanza tra le ruote in direzione trasversale al moto e l'altezza del baricentro, l'uso di pneumatici larghi anziché pneumatici doppi consente di aumentare la larghezza del telaio, consentendo peraltro di progettare un serbatoio con sezione parzialmente integrata in esso e quindi con un inferiore altezza di baricentro. Inoltre, aumentando la larghezza del telaio aumenta la rigidità a rotolamento a causa della rigidità delle sospensioni, con conseguente innalzamento della soglia di ribaltamento.

L'uso di sospensioni pneumatiche e pneumatici singoli larghi per gli assi del rimorchio consente ai produttori europei di conformarsi facilmente ad un limite di stabilità adeguato per i serbatoi che trasportano merci pericolose.

Un'osservazione dovrebbe essere fatta sull'uso di paratie laterali, dato che né negli standard europei né in quelli nordamericani ne viene particolarmente suggerito l'uso. I costi e l'aumento della complessità della pulizia dei serbatoi sono i motivi principali che disincentivano l'uso di questo tipo di paratie, nonostante il fatto che il loro uso possa invece limitare fortemente il pericolo dovuto allo sloshing del liquido nei serbatoi parzialmente pieni.

3.2. Innovazione e ricerca nelle tecniche anti-sloshing

L'ottimizzazione della progettazione della sezione trasversale delle cisterne contenenti liquido e il controllo passivo e attivo dello sloshing sono a tutt'oggi studiati dagli ingegneri ricercatori per cercare di ridurre al minimo il problema del ribaltamento [3].

Tra i possibili metodi per la riduzione dell'effetto destabilizzante del moto del liquido, analizzati dalla ricerca scientifica, si possono annoverare paratie rigide, pareti elastiche, come membrane elastomeriche, e coperture parziali della superficie libera, tipicamente utilizzate come soluzioni di controllo passivo, ma a volte anche abbinata a tecnologie di controllo attivo. Recenti studi mostrano anche la possibilità di realizzare soluzioni ibride per generici serbatoi per carburante [9].

Dotare i serbatoi di paratie in fase di progetto è una buona soluzione per ridurre lo sloshing. Tuttavia, le paratie possono modificare le caratteristiche di una struttura e aumentare il suo peso totale. Esistono molte variabili di progettazione, come dimensioni, intervallo, posizione di installazione, numero di paratie, che influiscono sullo sloshing.

L'utilizzo di paratie anti-sloshing (rigide o elastiche, continue o forate, anulari o radiali, verticali o orizzontali, etc.) per serbatoi di varie geometrie è stato ampiamente investigato in letteratura, ma più limitata è la produzione scientifica relativamente al caso specifico di reali cisterne per trasporto. Gli studi disponibili hanno prevalentemente

analizzato diversi tipi di paratie (piene, parziali o con orifici di varia geometria) in presenza di accelerazioni longitudinali o combinate laterali/longitudinali, notando come in generale esse agiscano direttamente su frequenze naturali e ampiezze dei modi di sloshing, dimostrando significativa efficacia anche per condizioni di guida particolarmente a rischio, quali frenate e movimenti di imbardata.

In letteratura, è stato proposto un dispositivo di controllo per l'eliminazione dello sloshing durante il trasferimento di un liquido utilizzando un veicolo con assorbimento attivo e passivo delle vibrazioni [10], tramite una coppia di risuonatori con ritardo costituenti un controllore lineare in output-feedback che utilizza le misurazioni dello spostamento angolare del veicolo, lo spostamento angolare del serbatoio e la velocità di rotazione. Il moto del liquido viene approssimato usando un modello a pendolo.

Uno studio recente [11] presenta inoltre uno studio numerico comparativo sull'effetto dell'uso di paratie e della relativa progettazione sul comportamento di sloshing in un'autocisterna parzialmente riempita che trasporta GPL (in particolare, un contenitore cilindrico orizzontale a sezione circolare utilizzato industrialmente per il trasporto di GPL). Vengono mostrate le distribuzioni di velocità, i tempi di stabilizzazione dello sloshing ed i livelli di energia cinetica turbolenta, che sono di grande importanza nella scelta del miglior design delle paratie. I risultati mostrano i tempi di stabilizzazione delle paratie a croce (tipo I) e a forma di X (tipo II), che suddividono parzialmente lo spazio interno delle cisterne in vani di pari dimensioni, trovando valori inferiori di energia cinetica turbolenta per il tipo II. I tempi di arresto del liquido nelle autocisterne con paratie risultano fino al 45% inferiori rispetto al tempo necessario per raggiungere lo stesso stato nella cisterna semplice, a dimostrazione dell'utilità di questo tipo di strutture.

Studi precedenti, negli anni, hanno inoltre affrontato i seguenti aspetti:

- l'effetto dell'altezza di una paratia verticale;
- l'effetto di un design a paratie che combini setti orizzontali e verticali con fori di diverse dimensioni;
- l'uso di due paratie che dividano un'autocisterna in tre scomparti;
- l'uso di paratie sfalsate a forma circolare;
- la variazione dell'area delle aperture superiori e inferiori nelle paratie;
- l'effetto dell'uso di paratie isoterme e isolate.

Infine, in un recentissimo lavoro scientifico [3], viene presentata l'analisi modale della superficie libera liquida per varie geometrie di sezioni trasversali (circolari, ellittiche e generiche), unitamente ai corrispondenti modelli meccanici equivalenti. E' infatti di grande interesse la valutazione della dinamica dei sistemi in studio al variare della geometria della sezione, che fu già oggetto di una prima fondamentale ottimizzazione da parte di Kang [12]. Quest'ultimo studio sviluppò infatti un modello tridimensionale quasi-statico per un generico serbatoio a sezione trasversale, così da valutare le risposte dinamiche alla frenatura e al rotolamento di autocisterne parzialmente piene, arrivando a suggerire una sezione a "triangolo reuleaux", che dimostrò di avere un limite di ribaltamento più elevato rispetto a quella circolare e anche rispetto ai serbatoi ovali modificati.

4. Conclusioni

Attualmente in Italia non esiste ancora un vero e completo monitoraggio dell'incidentalità su strada relativamente al trasporto di sostanze pericolose, né soprattutto esistono specifiche modalità di analisi sistemica del rischio ad esso

connesso, come invece accade per le corrispondenti installazioni fisse grazie alla Direttiva Seveso III.

Tale attuale limite legislativo rende ancora più importante sottolineare, tra i vari rischi connessi, quello associato alla problematica dello sloshing, in parte già tenuta in conto nella progettazione di autocisterne nella prassi attuale, ma potenzialmente ancora più mitigabile e gestibile se valutata alla luce dei risultati via via raggiunti dalla recente ricerca scientifica sul tema.

Nel presente lavoro sono state analizzate prescrizioni come la soglia minima di ribaltamento e l'uso di paratie per la limitazione dello sloshing del liquido in un serbatoio parzialmente pieno.

La ricerca scientifica internazionale è oggi rivolta principalmente a migliorare i metodi di modellazione fluidodinamica computazionale, per esempio tramite confronto tra gli elementi finiti convenzionali ed altri metodi di discretizzazione, anche per riuscire a definire regole generali per la riduzione della velocità delle autocisterne nelle situazioni più a rischio (come l'ingresso in curva) al fine di massimizzare la stabilità del veicolo e la sicurezza del guidatore. Sono inoltre oggetto di studio, in particolare, l'influenza di eventuali modifiche alla geometria del serbatoio sulla riduzione dell'ampiezza delle forze di sloshing e l'effetto di viscosità e incomprimibilità sul comportamento fluidodinamico del sistema.

5. Bibliografia

- [1] Economic Commission for Europe inland transport Committee. European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ACR). United Nations, 2017.
- [2] Nicolsen, B., Wang, L., Shabana, A. Nonlinear finite element analysis of liquid sloshing in complex vehicle motion scenarios. *J. Sound Vib.* 2017; 405: 208-233.
- [3] Ibrahim, R.A., Singh, B. Assessment of ground vehicle tankers interacting with liquid sloshing dynamics. *Int. J. Heavy Veh. Syst.* 2018; 25(1): 23-112.
- [4] Pape, D.B., Harback, K., McMillan, N., Greenberg, A., Mayfield, H., Chitwood, J.C. Cargo tank roll stability study. Technical report. U.S. Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, 2007.
- [5] Carpignano, A., Cattaneo, F., Montrucchio, M. Trasporto di sostanze pericolose in autostrada: valutazioni e proposte per una migliore gestione del rischio. Atti del Convegno Nazionale *Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali (VGR2k)*. Pisa, Italia, 24-26 Ottobre 2000.
- [6] Li, X., Zheng, X., Ren, Y., Wang, Y., Cheng, Z. Study on driving stability of tank trucks based on equivalent trammel pendulum for liquid sloshing. *Discrete Dyn. Nat. Soc.* 2013; article ID 659873.
- [7] Yan, G., Rakheja, S. Fluid structure interaction induced by liquid slosh in partly filled road tankers. *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 2010; 4(10): 701–706.
- [8] Simonini, A., Vetrano, M.R., Colinet, P., Rambaud, P. Particle Image Velocimetry applied to water sloshing due to a harmonic external excitation. Atti della Conferenza *17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbona, Portogallo, 7-10 Luglio 2014.
- [9] Rosario, L.P., Sivasubramanian, B., Das, S., Gangadharan, S. Active damping of fuel slosh using a hybrid magneto-active propellant management device. Atti della Conferenza 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, USA, 4-8 Gennaio 2016.

- [10] Tzamtzi, M.P., Koumboulis, F.N., Kouvakas, N.D., Panagiotakis, G.E. A simulated annealing controller for sloshing suppression in liquid transfer with delayed resonators. *Atti della Conferenza 14th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06)*, articolo n° 1700653. Ancona, Italia, 28 -30 Giugno 2006.
- [11] Bautista-Jacobo, J.L., Rodríguez-Morales, E., Montes-Rodríguez, J.J., Gámez-Cuatzín, H. Effect of baffles on the sloshing in road tankers carrying LPG: a comparative numerical study. *Math. Probl. Eng.* 2015; article ID 359470.
- [12] Kang, X., Rakheja, S., Stiharu, I. Effects of tank shape on the roll dynamic response of a partly filled tank vehicle. *Vehicle Syst. Dyn.* 2001; 35: 75-102.

Miglioramento della sicurezza degli apparecchi a pressione dotati di portelle con sistemi di chiusura realizzati con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera ed omologati dall'IspeSI secondo la legislazione antecedente al d.lgs. 93/2000

F. Di Tosto¹, E. Pichini², E. Ferrari², N. Palumbo³, G. Bagordo⁴, A. Cicaterri¹

¹ Inail - Uot di Roma

² Inail - Dit

³ Inail - Uot di Brescia

⁴ Inail - Uot di Firenze

Sommario

Il presente lavoro si riferisce al funzionamento in sicurezza dei sistemi di chiusura dei coperchi/portelle a corredo di particolari apparecchi in pressione denominati comunemente "autoclavi" ovvero apparecchi a chiusura ermetica capaci di resistere a pressioni superiori a quella atmosferica, e, nella maggior parte dei casi, a temperature elevate, dotati di coperchi o portelle che permettono la frequente o saltuaria apertura dei predetti apparecchi. Il documento è stato elaborato a seguito dell'analisi di una serie di incidenti, anche di natura mortale, avvenuti nel corso degli ultimi anni ed i cui esiti hanno permesso di individuare dei fattori di rischio "tipici" che sono stati riscontrati alla base delle motivazioni incidentali. In particolare, ci si riferisce ai sistemi di chiusura a corredo delle autoclavi industriali, utilizzate nei luoghi di lavoro, che sono state costruite, ed omologate dall'Ancc e dall'IspeSI in data antecedente all'entrata in vigore della direttiva europea 97/23/CE, così come modificata dalla direttiva 2014/68/UE di cui al d.lgs. 15 Febbraio 2016, n. 26 (di seguito PED). Si tratta pertanto di attrezzature a pressione dotate di libretto matricolare (previsto dal r.d. 824/1927 e successive modifiche ed integrazioni) e non di dichiarazione di conformità secondo le direttive europee sopra citate. Il documento pone l'attenzione sui sistemi di chiusura del tipo ad anelli cavi anche se la trattazione adottata risulta ugualmente applicabile ad analoghi tipi di chiusura a manovra unica (quali ad esempio incastri periferici di denti ricavati sui bordi delle chiusure o da leve a raggiera). Il documento si riferisce esclusivamente alla sicurezza del sistema di chiusura e dei relativi dispositivi di sicurezza, non entrando nel merito della stabilità dell'intero apparecchio (fasciame, fondi, bocchelli) per la quale si ritiene che le valutazioni siano state correttamente eseguite nel rispetto delle regole tecniche applicabili.

1. Introduzione e scopo

L'obiettivo principale del lavoro è quello di rendere disponibile al datore di lavoro uno strumento utile a valutare lo stato di sicurezza degli apparecchi in argomento, con particolare riguardo al sistema di chiusura e dei relativi dispositivi di sicurezza ed identificare le eventuali misure di sicurezza da applicare ai fini della riduzione del rischio. Al riguardo, è utile ricordare che la regolamentazione in materia di salute e sicurezza dei luoghi di lavoro, di cui al d.lgs. 81/2008, stabilisce che il datore di lavoro e i dirigenti che organizzano e dirigono le attività, secondo le attribuzioni e competenze ad essi conferiti hanno, tra gli altri, l'obbligo di aggiornare le misure di prevenzione in relazione al grado di evoluzione della tecnica della prevenzione e della protezione (art.18, comma 1) lettera z).

Allo stesso modo, il datore di lavoro deve rielaborare il documento di valutazione dei rischi aziendali, tra l'altro, in relazione al grado di evoluzione della tecnica, della

prevenzione o della protezione o a seguito di infortuni significativi (art.29, comma 3).

Ad esito dei risultati emersi dall'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi, il datore di lavoro assoggetta le attrezzature di lavoro alle misure di aggiornamento dei requisiti minimi di sicurezza (art. 71, comma 4).

2. Legislazione e regolamentazione di riferimento

Gli apparecchi trattati risultano omologati e messi in servizio in accordo alla legislazione sugli apparecchi a pressione previgente all'entrata in vigore della direttiva PED. Il tutto era regolato dalle seguenti disposizioni:

- r.d. 12.05.1927 n.824 - Titolo I - Norme per la prevenzione contro gli infortuni.
- d.m. 21.11.1972 - Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione.
- d.m. 21.05.1974 - Norme integrative al r.d. 824/27 ed esoneri.

Con le relative specifiche tecniche applicative riguardanti sia la costruzione che l'esercizio come riportato nella figura 1 seguente.

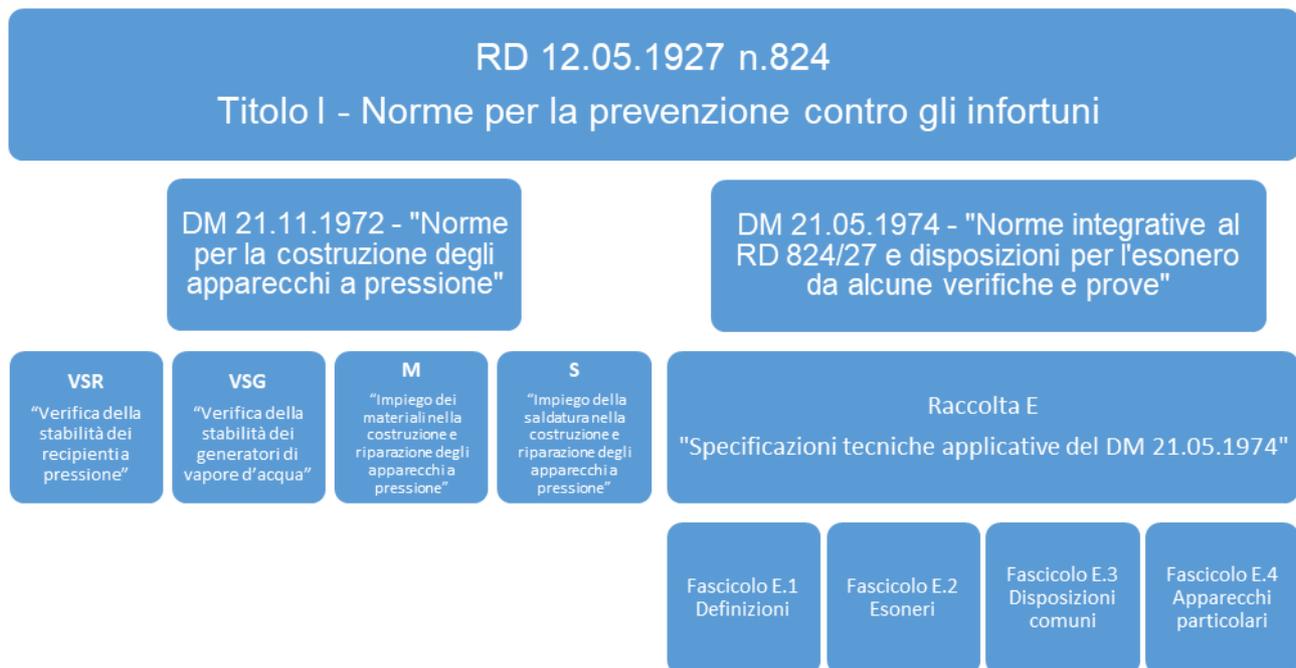


Figura 1. Regolamentazione di riferimento per gli apparecchi ante disciplina PED

In particolare, l'esercizio delle autoclavi dotate di portelle/coperchi e relativi sistemi di chiusura era regolato dalle disposizioni contenute nel fascicolo E.4 della Raccolta E, come riportato nel seguente estratto:

E.4.A.4 - Dispositivi di sicurezza per la chiusura ed apertura di coperchi o portelle di apparecchi a pressione elaboratori

1. Generalità

1.1. Oggetto delle presenti norme è quello di stabilire i dispositivi di sicurezza per la chiusura ed apertura di coperchi o portelle di apparecchi a pressione elaboratori, e precisamente di quegli apparecchi nel cui interno avvengono particolari processi di lavorazione che rendono necessaria l'apertura frequente o saltuaria dei predetti coperchi o portelle.

1.2. I dispositivi di sicurezza debbono evitare:

1.2.1. l'immissione del fluido in pressione nell'interno dell'apparecchio ed agente sui coperchi o

portelle prima che il sistema di chiusura sia in corretta posizione di chiusura;

1.2.2. l'apertura spontanea dei coperchi o portelle durante l'esercizio a pressione dell'apparecchio;

1.2.3. l'inizio della manovra di apertura del sistema di chiusura qualora esista ancora pressione nell'apparecchio.

1.3. Le presenti norme non si riferiscono alla resistenza ed alla verifica della stabilità dei sistemi di chiusura, che debbono essere accertate a parte, in sede di esame dei disegni.

2. Sistemi di chiusura

2.1. Ai fini delle presenti norme i sistemi di chiusura dei coperchi o portelle amovibili, in relazione al tipo di fissaggio adottato, vengono suddivisi in:

2.1.1. sistemi di chiusura "a manovra multipla", quali quelli con chiusura assicurata da più bulloni, viti, prigionieri, tiranti ribaltabili, morsetti, disposti sul perimetro del coperchio o portella, o da cavallotti, manovrabili singolarmente;

2.1.2. sistemi di chiusura "a manovra unica", quali quelli con chiusura assicurata da incastri periferici di denti ricavati sui bordi delle chiusure o da leve a raggiera o da anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera, manovrabili con unica operazione.

3. Sistemi di chiusura a manovra multipla

3.1. Il piano di appoggio dei tiranti ribaltabili, morsetti e cavallotti deve essere munito di incavo o di risalto all'orlo tale da impedire durante l'esercizio il divaricamento dalla loro posizione normale, nonché, per i tiranti e morsetti ribaltabili, l'inclinazione verso l'esterno.

3.2. Gli apparecchi dotati del sistema di chiusura a manovra multipla debbono essere corredati di manometro indicante la pressione agente sul coperchio o portella, sistemato in posizione ben visibile dal posto di manovra della chiusura e con l'indicazione dello zero ben chiara.

3.3. I recipienti contenenti fluidi non nocivi né infiammabili debbono essere provvisti di un rubinetto di spia della pressione interna, applicato o sul coperchio o portella o in prossimità di essi, e sistemato in modo che lo scarico non rechi danno alle persone.

3.4. Nella operazione di chiusura del coperchio o portella, gli organi periferici di fissaggio debbono essere stretti, agendo su elementi in posizioni periferiche opposte, in modo graduale ed uniforme, in dipendenza del tipo di guarnizione impiegata.

3.5. La manovra di apertura deve essere iniziata esclusivamente con il manometro nella posizione di zero.

3.6. La manovra di apertura deve essere iniziata dopo accertamento della mancanza di pressione nell'apparecchio mediante apertura del rubinetto di spia.

3.7. La manovra di apertura deve essere effettuata iniziando lo svitamento dei singoli organi di chiusura in modo parziale e graduale.

4. Sistemi di chiusura a manovra unica

4.1. Gli apparecchi provvisti di sistemi di chiusura a manovra unica di cui al punto 2.1.2 debbono essere provvisti di dispositivo che impedisca la immissione nell'apparecchio del fluido sotto pressione prima che il sistema di chiusura abbia assunto la posizione corretta di incastro per la chiusura.

4.2. Gli apparecchi debbono essere provvisti di dispositivo che impedisca l'inizio della manovra unica di apertura prima che la pressione agente sul coperchio o portella sia nulla.

4.3. Gli apparecchi debbono essere corredati di manometro indicante la pressione agente sul coperchio o portella, sistemato in posizione ben visibile dal posto di manovra della chiusura e con l'indicazione dello zero ben chiara.

4.4. I recipienti contenenti fluidi non nocivi né infiammabili debbono essere provvisti di un rubinetto di spia della pressione interna, applicato o sul coperchio o portella o in prossimità di essi, e sistemato in modo che lo scarico non rechi danno alle persone.

4.5. Gli apparecchi, la cui chiusura è realizzata con sovrapposizione di denti, debbono essere provvisti di dispositivo di blocco meccanico della posizione di chiusura, tale che impedisca la rotazione del coperchio o portella durante l'esercizio.

4.6. I sistemi di chiusura a raggiera di leve debbono essere tali che sia resa visibile la completa posizione di incastro delle leve e, se questa non è visibile, debbono essere provvisti di dispositivo

che indichi l'avvenuto completo incastro.

4.7. La chiusura del sistema realizzato con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera deve essere assicurata durante l'esercizio sotto pressione con chiavistelli o dispositivi analoghi.

4.8. Il costruttore è tenuto a precisare nei disegni costruttivi degli apparecchi, da presentare alla Sezione competente della ANCC per l'accertamento della rispondenza della costruzione alle vigenti disposizioni, i dispositivi di sicurezza previsti, di cui ai punti da 4.1 a 4.7, con una nota accompagnatoria illustrativa del loro funzionamento.

4.9. Nel caso in cui la chiusura sia a tenuta realizzata mediante guarnizioni a pressione di fluido proveniente da sorgente esterna, oltre a quanto previsto in 5.2, deve essere accertato mediante prove sperimentali su prototipo presso il costruttore che i dispositivi sono atti a garantire, in caso di mancanza del fluido proveniente dall'esterno, la tenuta della guarnizione o comunque ad evitare la fuoriuscita del fluido contenuto nel recipiente.

5. Accertamenti

5.1. I dispositivi di sicurezza debbono essere citati nel libretto delle verifiche e prove.

5.2. L'efficienza dei dispositivi di sicurezza deve essere accertata dall'agente tecnico dell'ANCC in sede di prima prova di funzionamento dell'apparecchio e nelle stesse successive verifiche periodiche annotandone l'esito sul libretto matricolare. In particolare dovrà essere verificata l'integrità nonché la sensibilità alle basse pressioni del dispositivo di blocco dei portelli, in modo che in esercizio, l'apertura non possa avvenire prima che la pressione all'interno dell'apparecchio sia tornata a zero.

Con l'emanazione della direttiva PED, a seguito del cosiddetto "nuovo approccio" per la libera circolazione delle merci nel mercato unico europeo, l'attuale quadro relativo all'esercizio degli apparecchi a pressione è mutato e risulta regolato dalle seguenti disposizioni:

- d.m. n. 329 del 2004, del 01/12/2004 "*Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93*";
- d.m. 11 aprile 2011 "*Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo*";

3. Risultanze di indagini tecniche a seguito di incidenti

Nel corso degli ultimi anni si sono verificati alcuni incidenti riconducibili al non corretto funzionamento dei sistemi di chiusura e dei relativi dispositivi di sicurezza.

Si fa notare che, per quanto attiene gli aspetti relativi alla funzionalità dei dispositivi di sicurezza, risultavano applicabili le disposizioni contenute nel fascicolo E.4 della "Raccolta E" mentre, per ciò che riguardava la verifica della stabilità dei sistemi di chiusura non risultavano disponibili indicazioni tecniche di dettaglio. Il d.m. 21 novembre 1972 prevedeva che, ai fini della stabilità dei sistemi di chiusura dovessero comunque essere prese in considerazione le seguenti condizioni:

- a) pressione interna;
- b) pressione esterna;
- c) temperature;
- d) carico idrostatico massimo del fluido contenuto in condizioni di esercizio;
- e) peso dell'apparecchio e del suo contenuto;
- f) carichi massimi previsti per le condizioni di prova;
- g) carichi dovuti al vento;
- h) eventuali sovraccarichi dovuti alle sollecitazioni sismiche secondo le modalità previste dagli appositi regolamenti;

- i) sollecitazioni localizzate dovute ai supporti, irrigidimenti, strutture interne e tubazioni di collegamento;
- j) carichi dinamici;
- k) momenti flettenti dovuti all'eccentricità dell'asse neutro dell'apparecchio rispetto al centro di azione della pressione;
- l) differenza di temperatura e differenza dei coefficienti di dilatazione termica dei materiali adottati;
- m) fluttuazione di pressione e temperatura;
- n) possibilità di corrosioni o erosioni durante l'esercizio;
- o) altre eventuali condizioni ragionevolmente prevedibili.

Lo stesso decreto prevedeva che il progettista dichiarasse di aver tenuto conto delle condizioni di carico sopra elencate e di essere a conoscenza che l'ISPEL avrebbe proceduto esclusivamente alle verifiche di stabilità nelle condizioni di massima pressione e temperatura previste in esercizio e nelle condizioni prodotte durante le prove di pressione. Ciò nonostante gli accertamenti eseguiti sugli eventi incidentali hanno evidenziato principalmente le seguenti criticità:

- la progettazione dei sistemi di chiusura non sempre ha tenuto conto in maniera adeguata delle condizioni sopra riportate con particolare riferimento alle condizioni di cui alle lettere j), l) ed o).
- la carenza di manutenzione (relativa agli apparecchi, al sistema di chiusura e ai dispositivi di sicurezza) ha fatto sì che iniziasse la pressurizzazione dell'apparecchio prima del corretto posizionamento del sistema di chiusura.

Al riguardo, tenuto conto degli obblighi del datore di lavoro come richiamati al paragrafo 2, si fornisce di seguito una serie di indicazioni utili ai fini dell'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi che tenga conto anche delle risultanze degli accertamenti a seguito degli incidenti analizzati.

4. Indicazioni tecniche per l'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi

Quanto di seguito esposto riguarda le indicazioni per l'aggiornamento della valutazione dei rischi unicamente per quanto attiene le condizioni di pericolo introdotte da una non corretta progettazione e gestione dei sistemi di chiusura e dei relativi dispositivi di sicurezza.

I sistemi di chiusura analizzati si riferiscono ai così detti sistemi di apertura/chiusura a "manovra unica" conosciuti anche come sistemi di chiusura ad azionamento rapido.

In generale detti sistemi, oltre a rispondere a quanto riportato nel paragrafo 2, dovrebbero essere stati progettati in modo tale che il guasto di un singolo componente del sistema quando il recipiente risulta pressurizzato non determini le seguenti condizioni:

- apertura o perdita di prodotto;
- successivo guasto ad altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta;
- incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta (entro il limite di elasticità del materiale);

La valutazione del rischio deve tenere in considerazione, oltre che gli aspetti già regolamentati dalle disposizioni in vigore e richiamate nel paragrafo 2, anche le condizioni emerse a seguito delle analisi incidentali richiamate al paragrafo 3.

Al riguardo, si riporta in appendice A-1 una lista di riscontro che potrà essere utilizzata come elemento guida per l'aggiornamento del documento di valutazione del rischio.

5. Modalità attuative dell'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi

Le apparecchiature oggetto delle presente documento, pur essendo state costruite, omologate e messe in servizio in data antecedente all'entrata in vigore della direttiva PED, risultano soggette al regime di verifica periodica stabilito dal d.m. 11 aprile 2011 e dal d.m. 329/04.

Inoltre, qualora a seguito dell'analisi si rendano necessari interventi sull'apparecchio o sul sistema di chiusura, dovranno essere attuate le procedure previste in relazione al tipo di intervento effettuato quale ad esempio:

- intervento di riparazione o modifica sull'apparecchio o sul coperchio.
- intervento di riparazione o modifica su membrane in pressione del sistema di chiusura.
- intervento di riparazione o modifica su elementi del sistema di chiusura saldati o stabilmente collegati con membrane in pressione.
- intervento sulla logica di comando del sistema di chiusura che non riguarda membrane in pressione.

6. Controlli e manutenzione

Ai sensi degli artt. 70 e 71 del d.lgs.81/2008 e s.m.i., è obbligo del datore di lavoro mettere a disposizione dei lavoratori solamente attrezzature di lavoro in possesso dei requisiti di sicurezza previsti dalla normativa, garantendone la permanenza nel tempo. Pertanto, oltre a sottoporre le attrezzature a tutte le verifiche di legge, il datore di lavoro dovrà provvedere affinché le stesse siano soggette a controlli e manutenzioni secondo programmi e procedure dettagliate, contenenti scadenze, compiti, operazioni da eseguire, ecc. riportando inoltre su un apposito Registro dei Controlli, i risultati degli stessi e delle manutenzioni eseguiti.

Con particolare riguardo agli apparecchi oggetto del presente documento, il datore di lavoro dovrà dunque provvedere affinché sia attuato un programma di manutenzione ordinaria e straordinaria delle parti in pressione, dei sistemi di chiusura e dei dispositivi di sicurezza.

Trattandosi di componenti il cui guasto potrebbe evolvere in un evento incidentale, i sistemi di chiusura e i dispositivi di sicurezza dovranno essere oggetto di particolari controlli e manutenzioni al fine di garantire:

- la funzionalità e l'efficacia dell'intera "catena di sicurezza" (insieme di elementi meccanici ed elettronici che concedono o negano il consenso all'avvio del processo);
- la compatibilità dello stato di usura delle parti meccaniche con l'ulteriore esercizio in sicurezza delle apparecchiature.

Laddove gli apparecchi oggetto del presente documento siano installati in ambienti industriali soggetti a sporcizia, umidità, ecc., si dovrà tenere conto del contributo negativo al funzionamento sicuro e affidabile degli stessi e dei relativi sistemi e dispositivi di sicurezza. Al riguardo risulta dunque fondamentale adottare anche un adeguato programma di pulizia dei componenti.

Una puntuale trascrizione sul Registro dei Controlli dell'esito dei controlli stessi e delle manutenzioni eseguiti, degli eventuali malfunzionamenti rilevati e delle misure attuate per correggerli, permetterà di monitorare con continuità l'efficienza e la sicurezza degli apparecchi.

7. Formazione

Si dovrà provvedere affinché gli addetti incaricati all'uso ed alla manutenzione degli apparecchi ricevano adeguata formazione e specifico addestramento, tali da consentirne l'utilizzo idoneo e sicuro, anche in relazione a quanto indicato nel manuale d'uso e manutenzione dell'apparecchio oltre che nelle procedure operative appositamente elaborate in relazione ai rischi individuati nelle presenti linee di indirizzo.

In particolare, nella progettazione dell'attività formativa si dovrà tener conto dei seguenti argomenti:

- generalità sugli apparecchi e normativa di riferimento;
- sistemi di chiusura ad apertura rapida;
- carichi applicati;
- caratteristiche chimico-fisiche del fluido contenuto;
- guarnizione di tenuta;
- metodi di prova (di pressione, di funzionamento, ecc.);
- malfunzionamento del sistema di chiusura;
- preparazione del piano di controllo;
- controllo dei giochi e dell'usura fra i componenti del sistema di sicurezza;
- periodicità delle verifiche e dei controlli;
- valutazione dei risultati dei controlli;
- stesura del verbale di controllo;
- compilazione del registro dei controlli;
- verifica di messa in servizio, prima verifica periodica e verifiche periodiche successive.

8. Segnaletica di sicurezza

Ad esito dell'aggiornamento della valutazione dei rischi si adotterà l'opportuna segnaletica di sicurezza comprendente almeno gli avvisi di pericolo, obbligo e divieto riportati in appendice A-2.

9. Normativa applicabile

Ai fini dell'aggiornamento della valutazione del rischio e delle eventuali misure tecniche da apportare al sistema di chiusura risulta opportuno fare riferimento agli standard tecnici consolidati che costituiscono lo stato dell'arte in materia.

Si riporta di seguito un elenco non esaustivo di norme/standard tecnici applicabili.

- UNI EN 13445 - Recipienti a pressione non esposti a fiamma;
- ASME - VIII Rules for construction of pressure vessels - Division 1;
- UNI EN ISO 12100 - Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio;
- UNI EN ISO 11111 - Macchinario tessile - Requisiti di sicurezza;
- UNI EN ISO 13849-1 Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza Parte 1: Principi generali per la progettazione;
- UNI EN ISO 13349-2 - Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 2: Validazione;
- UNI/TS 11325 - Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione;
- Raccolta VSR: Specificazioni tecniche applicative del decreto ministeriale 21/11/72 per la verifica della stabilità dei recipienti a pressione;
- Raccolta E: Specificazioni tecniche applicative del decreto ministeriale 21/05/74;

10. Conclusioni

Le analisi realizzate a seguito di alcuni eventi incidentali hanno condotto alla predisposizione del presente documento quale strumento utile al datore di lavoro per la valutazione dello stato di sicurezza degli apparecchi a pressione trattati. Il lavoro si è basato sulla pluriennale esperienza acquisita nella costruzione degli apparecchi a pressione in epoca di legislazione e normativa nazionale, oltre che sull'utilizzo degli standard tecnici utilizzati attualmente nei metodi di progettazione. Il tutto con l'obiettivo di coniugare al meglio l'individuazione delle idonee misure tecniche da implementare sugli apparecchi in questione in relazione con gli aspetti di tipo organizzativo (formazione, istruzioni ecc.) che il datore di lavoro è chiamato a pianificare.

11. APPENDICI

APPENDICE A-1			
Lista di riscontro dei requisiti di sicurezza considerati per l'aggiornamento del documento di valutazione del rischio sull'apparecchio dotato di sistema di chiusura a manovra unica.			
<i>Utilizzatore:</i>			
<i>Costruttore:</i>			
<i>Matricola:</i>		<i>Numero di fabbrica:</i>	
Requisiti di sicurezza previsti	Applicabilità	Misure adottate	Riferimenti a disegni/schemi/relazioni/manuali
Requisiti generali			
I dispositivi di sicurezza evitano l'immissione del fluido in pressione nell'interno dell'apparecchio ed agente sui coperchi o portelle prima che il sistema di chiusura sia in corretta posizione di chiusura	SI		
I dispositivi di sicurezza evitano l'apertura spontanea dei coperchi o portelle durante l'esercizio a pressione dell'apparecchio;	SI		
I dispositivi di sicurezza evitano l'inizio della manovra di apertura del sistema di chiusura qualora esista ancora pressione nell'apparecchio.	SI		
Requisiti specifici di funzionalità			
L' apparecchio è dotato di dispositivo che impedisca la immissione nell'apparecchio del fluido sotto pressione prima che il sistema di chiusura abbia assunto la posizione corretta di incastro per la chiusura.	SI		
L'apparecchio è dotato di dispositivo che impedisca l'inizio della manovra unica di apertura prima che la pressione agente sul coperchio o portella sia nulla.	SI		
L' apparecchio è dotato di manometro indicante la pressione agente sul coperchio o portella, sistemato in posizione ben visibile dal posto di manovra della chiusura e con l'indicazione dello zero ben chiara.	SI		
L'apparecchio contenente fluido non nocivi né infiammabili è dotato di un rubinetto di spia della pressione interna, applicato o sul coperchio o portella o in prossimità di essi, e sistemato in modo che lo scarico non rechi danno alle persone.	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		

L'apparecchio, la cui chiusura è realizzata con sovrapposizione di denti, è dotato di dispositivo di blocco meccanico della posizione di chiusura, tale che impedisca la rotazione del coperchio o portella durante l'esercizio.	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
I sistemi di chiusura a raggiera di leve sono tali che sia resa visibile la completa posizione di incastro delle leve e, se questa non è visibile, sono provvisti di dispositivo che indichi l'avvenuto completo incastro.	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
La chiusura del sistema realizzato con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera è assicurata durante l'esercizio sotto pressione con chiavistelli o dispositivi analoghi.	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
Per le apparecchiature in cui la chiusura sia a tenuta realizzata mediante guarnizioni a pressione di fluido proveniente da sorgente esterna i dispositivi sono atti a garantire, in caso di mancanza del fluido proveniente dall'esterno, la tenuta della guarnizione o comunque ad evitare la fuoriuscita del fluido contenuto nel recipiente.	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
Requisiti specifici di costruzione del sistema di chiusura			
E' verificata la stabilità del sistema di chiusura	SI		
Ai fini della verifica di stabilità del sistema di chiusura sono stati considerati i seguenti elementi:			
pressione interna;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
pressione esterna;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
temperature;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
carico idrostatico massimo del fluido contenuto in condizioni di esercizio;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
peso dell'apparecchio e del suo contenuto;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
carichi massimi previsti per le condizioni di prova;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
carichi dovuti al vento;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
eventuali sovraccarichi dovuti alle sollecitazioni sismiche secondo le modalità previste dagli appositi regolamenti;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
sollecitazioni localizzate dovute ai supporti, irrigidimenti, strutture interne e tubazioni di collegamento;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
carichi dinamici;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
momenti flettenti dovuti all'eccentricità dell'asse neutro dell'apparecchio rispetto al centro di azione della pressione;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
differenza di temperatura e differenza dei coefficienti di dilatazione termica dei materiali adottati;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
fluttuazione di pressione e temperatura;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
eventuali corrosioni o erosioni durante l'esercizio;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
altre eventuali condizioni ragionevolmente prevedibili;	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		
Requisiti specifici a seguito di guasti ai componenti del sistema di chiusura e ai dispositivi di sicurezza			
Il guasto di un componente del sistema di chiusura non determina l'apertura o la perdita significativa di prodotto	SI		
Il guasto di un componente del sistema di chiusura non determina il guasto di altri componenti del sistema di chiusura o degli elementi di tenuta	SI		
Il guasto di un componente del sistema di chiusura non determina un incremento significativo delle sollecitazioni su altri	SI		

componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta			
Requisiti specifici a seguito di guasto alle guarnizioni di tenuta			
Il guasto della guarnizione di tenuta non determina l'apertura o la perdita significativa di prodotto	SI		
Il guasto della guarnizione di tenuta non determina un incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta	SI		
Requisiti specifici a seguito dell'usura degli elementi di accoppiamento			
L'usura degli elementi di accoppiamento delle membrature in pressione non determina un incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta	SI		
Requisiti organizzativi			
Programma di manutenzione dell'apparecchio, del sistema di chiusura e dei dispositivi di sicurezza	SI		
Programma di formazione del personale addetto all'esercizio dell'apparecchio, del sistema di chiusura e dei dispositivi di sicurezza	SI		
Segnaletica di sicurezza (cartelli di pericolo, divieto, obbligo)	SI		
Requisiti documentali			
Documentazione tecnica di progetto a corredo dell'apparecchio comprensiva del sistema di chiusura	SI		
Manuale d'uso e manutenzione a corredo dell'apparecchio comprensivo del sistema di chiusura e dei dispositivi di sicurezza	SI		
Altri requisiti			
Nel caso di recipienti per tintoria contenenti liquidi a temperatura ustionante è attuato l'adeguamento previsto dalla Circolare ANCC n. 34457 del 25/09/1980	<input type="checkbox"/> SI - <input type="checkbox"/> NO		

NOTA: Laddove nella colonna "Applicabilità" della lista di riscontro è indicato il "SI", si intende che il relativo requisito deve essere soddisfatto. In tal caso si dovranno riportare nella relativa colonna le "Misure adottate" per rispettare il requisito richiesto e nella colonna "Riferimenti a disegni/schemi/relazioni/manual" le evidenze documentali.

APPENDICE A-2	
Aggiornamento del documento di valutazione del rischio sull'apparecchio dotata di sistema di chiusura a manovra unica – Segnaletica di sicurezza.	
	Pericolo di scoppio
	Pericolo di organi in moto
	Pericolo superfici calde
	Dispositivi di protezione individuali
	Dispositivi di sicurezza efficienti
	Divieto di rimozione dispositivi di sicurezza

Apparecchi a pressione dotati di portelle con sistemi di chiusura realizzati con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera - indicazioni tecniche per il miglioramento della sicurezza e per l'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi

A.Tonti¹, F. Di Tosto², E. Ferrari¹, N. Palumbo³, G. Bagordo⁴, F. Massaro¹

¹ Inail - Dit

² Inail - Uot di Roma

³ Inail - Uot di Brescia

⁴ Inail - Uot di Firenze

Sommario

L'obiettivo principale del lavoro è l'approfondimento tecnico operativo di quanto contenuto nelle "linee di indirizzo" che l'Inail sta elaborando al fine di rendere disponibile al datore di lavoro uno strumento utile a valutare lo stato di sicurezza delle attrezzature a pressione in argomento.

Il lavoro si focalizza sui sistemi di chiusura ed in particolare sui così detti sistemi di apertura/chiusura a "manovra unica" conosciuti anche come sistemi di chiusura ad azionamento rapido.

Il lavoro offre una visione dello stato dell'arte disponibile sull'argomento in considerazione degli attuali standard disponibili in materia prendendo spunto anche dalle considerazioni emerse a seguito delle analisi incidentali su dette apparecchiature nel corso degli ultimi anni.

1. Introduzione

Il miglioramento della sicurezza dei suddetti apparecchi a pressione è un aspetto fondamentale per tutti gli addetti ai lavori. La legislazione e regolamentazione vigente di riferimento ci fornisce indicazioni tecniche per il miglioramento della sicurezza e per l'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi. La legislazione sugli apparecchi a pressione previgente all'entrata in vigore della direttiva PED prevedeva le seguenti disposizioni:

- r.d. 12.05.1927 n.824 - Titolo I - Norme per la prevenzione contro gli infortuni.
- d.m. 21.11.1972 - Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione.
- d.m. 21.05.1974 - Norme integrative al r.d. 824/27 ed esoneri.

Con l'emanazione della direttiva PED, a seguito del "nuovo approccio" per la libera circolazione delle merci nel mercato unico europeo, l'attuale quadro relativo all'esercizio degli apparecchi a pressione è mutato e risulta regolato dalle seguenti disposizioni:

- d.m. n. 329 del 2004, del 01/12/2004 "*Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93*";
- d.m. 11 aprile 2011 "*Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo*".

1.2 Sistemi di chiusura a manovra unica

Il lavoro si focalizza sui sistemi di chiusura a "manovra unica" conosciuti anche come sistemi di chiusura ad azionamento rapido. In generale gli apparecchi provvisti di sistemi di

chiusura a manovra unica debbono essere provvisti di:

- Dispositivo che impedisca la immissione nell'apparecchio del fluido sotto pressione prima che il sistema di chiusura abbia assunto la posizione corretta di incastro per la chiusura;
- Dispositivo che impedisca l'inizio della manovra unica di apertura prima che la pressione agente sul coperchio o portella sia nulla.

Gli apparecchi debbono essere corredati di manometro indicante la pressione agente sul coperchio o portella, sistemato in posizione ben visibile dal posto di manovra della chiusura e con l'indicazione dello zero ben chiara.

I recipienti contenenti fluidi non nocivi né infiammabili debbono essere provvisti di un rubinetto di spia della pressione interna, applicato o sul coperchio o portella o in prossimità di essi, e sistemato in modo che lo scarico non rechi danno alle persone.

Gli apparecchi, la cui chiusura è realizzata con sovrapposizione di denti, debbono essere provvisti di dispositivo di blocco meccanico della posizione di chiusura, tale che impedisca la rotazione del coperchio o portella durante l'esercizio.

I sistemi di chiusura a raggiera di leve debbono essere tali che sia resa visibile la completa posizione di incastro delle leve e, se questa non è visibile, debbono essere provvisti di dispositivo che indichi l'avvenuto completo incastro.

La chiusura del sistema realizzato con anelli cavi in due o più segmenti apribili a cerniera deve essere assicurata durante l'esercizio sotto pressione con chiavistelli o dispositivi analoghi.

Il costruttore è tenuto a precisare nei disegni costruttivi degli apparecchi, da presentare alla Sezione competente della Ancc per l'accertamento della rispondenza della costruzione alle vigenti disposizioni, i dispositivi di sicurezza previsti, con una nota accompagnatoria illustrativa del loro funzionamento.

Nel caso in cui la chiusura sia a tenuta realizzata mediante guarnizioni a pressione di fluido proveniente da sorgente esterna, deve essere accertato mediante prove sperimentali su prototipo presso il costruttore che i dispositivi sono atti a garantire, in caso di mancanza del fluido proveniente dall'esterno, la tenuta della guarnizione o comunque ad evitare la fuoriuscita del fluido contenuto nel recipiente.

Per quanto riguarda gli accertamenti:

- I dispositivi di sicurezza debbono essere citati nel libretto delle verifiche e prove.
- L'efficienza dei dispositivi di sicurezza deve essere accertata dall'agente tecnico dell'Ancc in sede di prima prova di funzionamento dell'apparecchio e nelle stesse successive verifiche periodiche annotandone l'esito sul libretto matricolare. In particolare dovrà essere verificata l'integrità nonché la sensibilità alle basse pressioni del dispositivo di blocco dei portelli, in modo che in esercizio, l'apertura non possa avvenire prima che la pressione all'interno dell'apparecchio sia tornata a zero.

2. Approfondimento tecnico operativo di quanto contenuto nelle “linee di indirizzo”

2.1 Indicazioni tecniche per il miglioramento della sicurezza

Nel miglioramento della sicurezza ricopre un ruolo fondamentale la manutenzione degli impianti. Sotto questo aspetto è obbligo del datore di lavoro (art. 70 comma 1 del d.lgs. 81/08) mettere a disposizione dei lavoratori solamente attrezzature di lavoro in possesso dei requisiti di sicurezza previsti dalla normativa, garantendone la permanenza nel tempo (art. 71 comma 4 lettera a) punto 2 del d.lgs. 81/08). Pertanto, oltre a sottoporle a tutte le verifiche previste per legge, il datore di lavoro dovrà provvedere affinché le attrezzature siano soggette a controlli e manutenzioni secondo un programma e delle procedure dettagliate (scadenze, compiti, operazioni da eseguire). Il datore di lavoro dovrà inoltre

riportare per iscritto, su un apposito Registro di Controllo, i risultati dei controlli e delle manutenzioni eseguiti (art. 71 comma 9 del d.lgs. 81/08).

Con particolare riguardo alle apparecchiature oggetto del presente lavoro, il datore di lavoro dovrà dunque provvedere affinché sia attuato un programma di manutenzione ordinaria e straordinaria delle parti in pressione, dei sistemi di chiusura e dei dispositivi di sicurezza. Trattandosi di componenti il cui guasto costituisce un pericolo immediato per i lavoratori, i sistemi di chiusura e i dispositivi di sicurezza dovranno essere frequentemente oggetto di controlli e manutenzioni al fine di garantire la funzionalità e l'efficacia della 'catena di sicurezza' (insieme di elementi meccanici ed elettronici che danno o negano il consenso all'avvio del processo) e la compatibilità dello stato di usura delle parti meccaniche con l'ulteriore esercizio in sicurezza delle apparecchiature.

I controlli e le manutenzioni programmate – il cui scopo è prevenire guasti che possono causare incidenti e/o infortuni - non dovranno tuttavia indurre a procrastinare interventi sulle apparecchiature qualora e non appena nel loro utilizzo si rilevino malfunzionamenti anche minimi.

Una puntuale trascrizione sul Registro di Controllo dell'esito dei controlli e delle manutenzioni eseguiti, degli eventuali malfunzionamenti rilevati e delle misure attuate per correggerli, permetterà di monitorare con continuità l'efficienza e la sicurezza delle apparecchiature.

In generale, possiamo sintetizzare che bisognerebbe controllare e mantenere:

- I sistemi di chiusura affinché il guasto di un componente
 - o Non determini l'apertura dell'apparecchiatura o la perdita significativa di prodotto;
 - o Non determini il guasto di altri componenti del sistema di chiusura o degli elementi di tenuta;
 - o Non determini un incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta
- Le guarnizioni di tenuta affinché la loro usura o un loro guasto
 - o Non determini l'apertura o la perdita significativa di prodotto;
 - o Non determini un incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta;
- Gli elementi di accoppiamento delle membrature in pressione affinché l'usura delle superfici in contatto non determini la perdita significativa di prodotto e/o un incremento significativo delle sollecitazioni su altri componenti del sistema di chiusura o elementi di tenuta;
- I dispositivi di sicurezza affinché siano sempre efficaci nell'evitare
 - o L'immissione del fluido in pressione nell'interno dell'apparecchiatura e agente su coperchi o portelle prima che il sistema di chiusura sia in corretta posizione di chiusura;
 - o L'apertura spontanea dei coperchi o portelle durante l'esercizio a pressione, anche bassa, dell'apparecchio;
 - o L'inizio della manovra di apertura del sistema di chiusura qualora esista ancora pressione nell'apparecchio;
- I dispositivi di controllo e regolazione avendo cura che
 - o Il manometro indicante la pressione agente sul coperchio o sulla portella, sia di adeguata sensibilità anche per valori della pressione prossimi allo zero, sia correttamente tarato, sia sempre ben visibile dal posto di manovra della chiusura e con l'indicazione dello zero ben chiara;

- L'eventuale rubinetto di spia della pressione interna applicato o sul coperchio o sulla portella o in prossimità di essi, sia posizionato in modo che il suo scarico non rechi danno alle persone.

Nell'ottica di un miglioramento della sicurezza, un altro aspetto importante da non trascurare riguarda la formazione del personale, infatti:

si dovrà provvedere affinché gli addetti incaricati all'uso delle apparecchiature ricevano una formazione, informazione ed addestramento adeguati e specifici, tali da consentirne l'utilizzo in modo idoneo e sicuro, anche in relazione a quanto indicato nel manuale d'uso e manutenzione dell'apparecchio oltre che nelle procedure operative appositamente elaborate in relazione ai rischi individuati nelle presenti linee di indirizzo.

In particolare, nella progettazione dell'attività formativa si dovrà tener conto dei seguenti argomenti:

- Sistemi di chiusura ad apertura rapida
- Carichi applicati
- Metodi di verifica
- Guarnizioni
- Metodi di prova
- Prova idraulica e metodi sostitutivi
- Verifica di funzionamento
- Caratteristiche chimico-fisiche del fluido contenuto
- Verifica dei giochi fra i componenti del sistema di sicurezza
- Periodicità delle verifiche
- Preparazione del piano di controllo
- Verifica dell'usura
- Malfunzionamento del sistema di chiusura
- Valutazione dei risultati
- Stesura del verbale di controllo
- Verifica di messa in servizio
- Prima verifica periodica
- Verifiche periodiche successive
- Normativa di riferimento

2.2 Indicazioni tecniche per l'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi

Per quanto le modalità attuative dell'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi è importante rilevare che:

Le apparecchiature oggetto del presente articolo, pur essendo state costruite, omologate e messe in servizio in data antecedente all'entrata in vigore della direttiva PED, risultano soggette al regime di verifica periodica stabilito dal d.m. 11 aprile 2011 e dal d.m. 329/04.

Il datore di lavoro, con l'ausilio di un progettista abilitato secondo le disposizioni in vigore ed iscritto al relativo albo professionale, provvederà all'aggiornamento del documento di valutazione del rischio in accordo ai principi contenuti nelle presenti linee di indirizzo.

Gli esiti di tale aggiornamento, descritti e riassunti in una relazione tecnica aggiuntiva a firma del datore di lavoro e del professionista competente da lui individuato, saranno conservati e tenuti a disposizione per eventuali adempimenti futuri.

Qualora a seguito dell'analisi non si rendano necessari interventi sull'apparecchio o sul sistema di chiusura, in occasione della successiva verifica periodica, il soggetto incaricato della stessa prenderà in esame l'apparecchio e quanto contenuto nella relazione tecnica aggiuntiva dell'aggiornamento della valutazione del rischio.

Ad esito dell'aggiornamento della valutazione dei rischi si adotterà l'opportuna segnaletica di sicurezza comprendente almeno gli avvisi di pericolo, obbligo e divieto.

3. Stato dell'arte

3.1 Considerazioni emerse a seguito delle analisi incidentali nel corso degli ultimi anni

Nel corso degli ultimi anni si sono verificati numerosi incidenti riconducibili al non corretto funzionamento dei sistemi di chiusura e dei relativi dispositivi di sicurezza. Gli accertamenti tecnici hanno rilevato:

- Criticità dovute alla mancata permanenza delle condizioni di sicurezza a garanzia della funzionalità del sistema di chiusura e dei dispositivi di sicurezza;
- Criticità relative alla carenza e/o non adeguata manutenzione.

Si fa notare che per quanto attiene agli aspetti relativi alla funzionalità dei dispositivi di sicurezza risultano applicabili le disposizioni contenute nel fascicolo E.4 della "Raccolta E" mentre, per ciò che riguarda la verifica della stabilità dei sistemi di chiusura non risultano disponibili indicazioni tecniche di dettaglio.

Gli accertamenti eseguiti hanno evidenziato principalmente le seguenti criticità:

- La progettazione dei sistemi di chiusura non sempre ha tenuto conto in maniera adeguata delle condizioni sopra riportate;
- La carenza di manutenzione (relativa agli apparecchi, al sistema di chiusura e ai dispositivi di sicurezza) ha fatto sì che iniziasse la pressurizzazione dell'apparecchio prima del corretto posizionamento del sistema di chiusura.

3.2 Modello matematico e simulazione numerica dell'analisi incidentale

Tra i tipi di incidenti più frequenti che possono capitare ai recipienti a pressione ad azionamento rapido, c'è sicuramente l'incidente esplosivo causato dalla pressione residua. Per questa ragione è importante mettere a punto dei metodi affidabili, i quali possano fornire un'analisi ragionevolmente esatta degli effetti dell'esplosione.

In generale, è possibile mettere a punto un modello matematico relativamente affidabile basato sulla combinazione del modello a viscosità turbolenta di Spalart-Allmaras e della seconda legge di Newton per il movimento solido. Tale modello può essere risolto con il metodo del recupero locale.

3.2.1 Presupposti del modello matematico

Come tutti i modelli matematici, anche quello utilizzabile per simulare la situazione incidentale suddetta, è applicabile sulla base di alcune ipotesi fondamentali, senza le quali il modello non restituisce più risultati attendibili.

Si può dire che, in linea generale, durante l'esplosione è il coperchio del recipiente ad azionamento rapido che determina le condizioni di sicurezza dal campo di flusso generato dall'esplosione. Ci sono due fattori importanti che possono influenzare la performance del coperchio: in primo luogo, la deformazione del recipiente, ed in secondo luogo ci sono anche alcuni carichi aggiuntivi originati dalle connessioni strutturali che possono causare l'asimmetria dei processi. Questi carichi aggiuntivi sono difficili da misurare e quindi da applicare nel modello.

Dalla visione conservatrice dell'energia cinetica e della velocità equivalente del coperchio di azionamento rapido, i carichi aggiuntivi possono essere anche trascurabili.

Trascurando i fattori precedenti, si può dire che il processo di esplosione può essere considerato come un problema di simmetria assiale, perché le caratteristiche fisiche del

campo di flusso sono simmetriche. Quindi si può risolvere in un campo di simmetria assiale bidirezionale.

Possiamo sintetizzare dicendo che il processo di esplosione può essere semplificato dalle ipotesi descritte di seguito:

- (1) Tutti i componenti solidi sono considerati come solidi rigidi adiabatici.
- (2) L'influenza causata dal processo di rotazione del morsetto è trascurabile e lo stato iniziale è considerato il rilascio improvviso del coperchio.
- (3) Gli spazi tra il morsetto e il cilindro sono equivalenti con quelli attuali.
- (4) La pressione dell'atmosfera è stabile e impostata inizialmente a 0,01 MPa; la pressione residua (pressione dell'aria interna) è anch'essa inizialmente stabile.
- (5) All'inizio, la temperatura nel recipiente è come quella dell'atmosfera e impostata per 300 K.

3.2.2 Equazioni che governano il problema

Basato sulle ipotesi descritte nel paragrafo precedente, il modello è costruito considerando il trasferimento di calore, la turbolenza e le proprietà ideali del gas considerato. Le equazioni specifiche che governano il fenomeno del flusso considerato sono descritte di seguito.

L'equazione di conservazione della massa è:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

dove ρ è la densità, t è il tempo, U indica il tensore di velocità, e x indica la distanza. L'indice i indica la direzione e $i = 1, 2, 3$ indica rispettivamente le direzioni x, y, z .

Nel sistema di coordinate inerziali, la legge di conservazione della quantità di moto da vita alle seguenti equazioni:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho U_i' U_j')}{\partial x_j} \quad (2)$$

dove p è la pressione. In questo modello, vengono applicate le tecniche di calcolo della media di Reynolds. L'apice ' indica il componente fluttuante turbolento e indica la componente mediata dal tempo di Reynolds.

Il problema può essere affrontato utilizzando il modello di turbolenza Spalart-Allmaras.

Tale modello può essere impiegato per risolvere i problemi dove il fluido comprimibile (L'aria è considerata comprimibile durante il processo di esplosione) è confinato (Spalart e Allmaras, 1994).

3.2.3 Considerazioni

Le simulazioni numeriche basate sul modello matematico appena descritto (convalidato dai risultati sperimentali) forniscono risultati confrontabili con quanto riscontrato a seguito di analisi incidentali avvenuti negli ultimi anni. In letteratura i risultati sperimentali mostrano:

- Una certa dipendenza tra l'altezza massima espulsa del coperchio e la pressione residua iniziale.
- Che il processo di accelerazione del coperchio è molto breve, e la temperatura interna del recipiente scende in modo significativo.

Usando questo modello, è stato possibile notare come l'altezza massima espulsa dipende dalla struttura del recipiente.

4. Funzioni di sicurezza dei sistemi di comando

Nel presente paragrafo si descrive la modalità di valutazione effettuata su una autoclave a vapore dotata di portella dal punto di vista dell'approccio della sicurezza del macchinario in accordo a quanto previsto dalla norma EN ISO 13849-1 ed in particolare per quanto attiene alle funzioni di sicurezza legate al sistema di apertura/chiusura delle portelle.

Secondo tale approccio le parti dei sistemi di comando del macchinario intese a fornire funzioni di sicurezza sono denominate parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza (SRP/CS) e possono consistere di hardware e software ed essere separate dal sistema di comando della macchina o esserne parte integrante. Oltre a fornire funzioni di sicurezza, le parti dei sistemi di comando possono consentire anche funzioni operative.

La capacità delle parti dei sistemi di comando (legate alla sicurezza) di eseguire una funzione di sicurezza in condizioni prevedibili è descritta da un parametro denominato "livello di prestazione (PL)" suddiviso in un set di cinque livelli. Tali livelli sono definiti in termini di probabilità di guasto pericoloso per ora come mostrato in figura 1.

PL	Probabilità media di guasto pericoloso per ora (PFH _D) 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ fino a $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ fino a $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ fino a $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ fino a $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ fino a $< 10^{-7}$

Figura 1

La probabilità che la funzione di sicurezza venga perduta dipende da numerosi fattori quali:

- la struttura hardware e software;
- l'estensione dei meccanismi di rilevamento delle avarie [copertura diagnostica-DC];
- l'affidabilità dei componenti [tempo medio al guasto pericoloso-MTTFD];
- il guasto da causa comune [CCF];
- il processo di progettazione;
- le sollecitazioni operative e le condizioni ambientali.

Per ogni funzione di sicurezza che deve essere svolto da un sistema di comando si deve determinare un livello di prestazione richiesto (PLr). La determinazione del livello di prestazione richiesto è il risultato della valutazione del rischio e si riferisce all'entità della riduzione del rischio che ci si aspetta dall'implementazione delle parti del sistema di comando legate alla sicurezza. Ovviamente quanto maggiore è l'entità della riduzione del rischio richiesta da parte della SRP/CS, tanto più elevato deve essere il livello di prestazione richiesto.

La maggioranza dei circuiti di controllo normalmente utilizzati sono rappresentabili mediante una struttura a blocchi logici di tipo:

- Input (ingresso di segnali);
- Logic (logica di elaborazione dei segnali);
- Output (uscita del segnale di controllo);

tra di loro variamente interconnessi a seconda della struttura del circuito di controllo.

Una tipica presentazione schematica delle funzioni di sicurezza è fornita in figura 2.

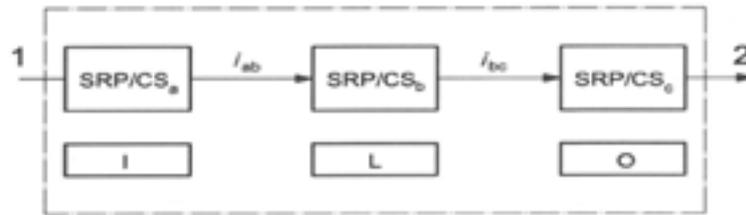


Figura 2

I: ingresso (per esempio interruttore di fine corsa, sensore pressione, sensore portella ecc)

L: logica

O: uscita (per esempio valvola, contattore, convertitore di corrente, ecc)

i_{ab}, i_{bc}: mezzi di interconnessione (per esempio elettrici, ecc).

La norma ammette cinque diverse strutture circuitali di base (architetture designate del sistema). Le architetture combinate con le richieste di comportamento al guasto del sistema e con dei valori minimi di MTTFD, DC e CCF indicano la categoria di sicurezza del sistema di controllo.

Ai fini della determinazione del livello di prestazione richiesto si utilizza il grafico riportato in figura 3 (tratto da EN ISO 13849-1, figura A.1) che si basa sulla situazione precedente all'attuazione della funzione di sicurezza prevista.

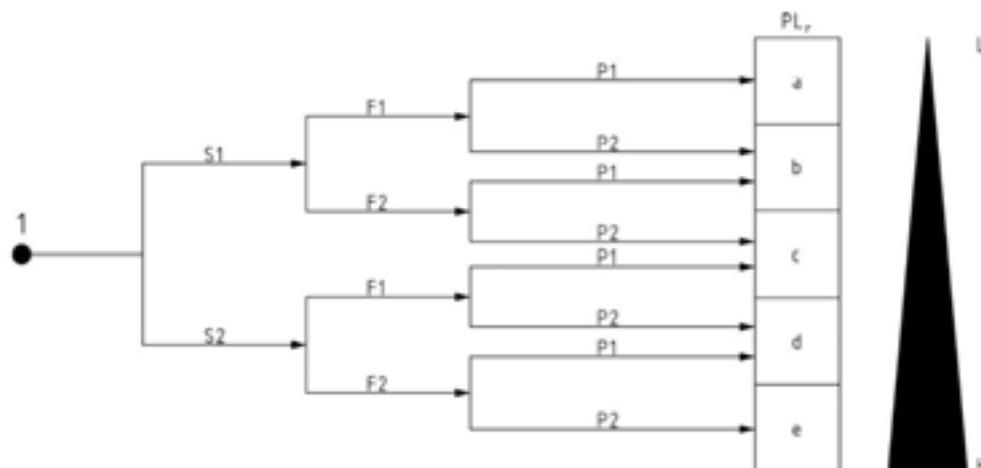


Figura 3. Grafico utilizzato per determinare il PLr richiesto per la funzione di sicurezza

Dove:

1= Punto iniziale per la valutazione del contributo della funzione di sicurezza alla riduzione del rischio

L = Basso contributo alla riduzione del rischio

H = Elevato contributo alla riduzione del rischio

PLr = Livello di prestazione richiesto

Parametri di rischio:

S: Gravità della lesione

S1: Leggera (lesione normalmente reversibile)

S2: Grave (lesione normalmente irreversibile o morte)

F: Frequenza e/o esposizione al pericolo

- F1: Da rara a infrequente e/o tempo di esposizione breve
 F2: Da frequente a continua e/o tempo di esposizione lungo
 P: Possibilità di evitare il pericolo o limitare il danno
 P1: Possibile in condizioni specifiche
 P2: Scarsamente possibile

Applicando i principi sopra descritti ad una autoclave a vapore dotata di portella si valuta che le condizioni di pericolo da analizzare risultano le seguenti:

1. pericolo di imprigionamento durante il movimento della portella;
2. esposizione al vapore caldo che fuoriesce dalla guarnizione;
3. esposizione al vapore caldo a porta aperta.

Ci si sofferma nel seguito sulla situazione di pericolo descritta al punto 3 che rappresenta senza dubbio una situazione di maggior rischio da parte dell'utilizzatore che può risultare esposto ad una grande quantità di vapore caldo che viene scaricato dalla camera quando la porta è aperta, o se la porta si apre durante la pressurizzazione.

Il livello di prestazione richiesto risulta così facilmente individuabile dalla figura 4:

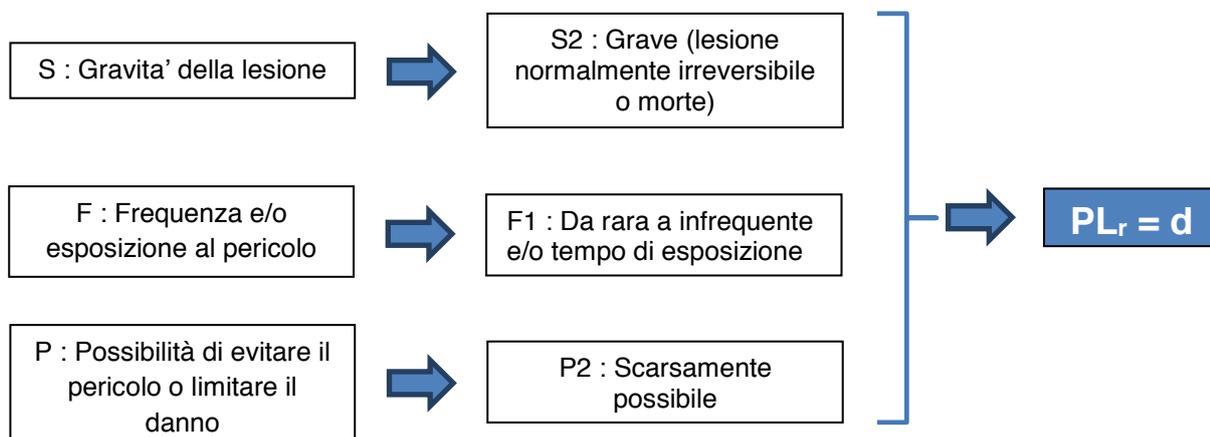


Figura 4

Con riferimento alla procedura semplificata per la stima degli aspetti quantificabili delle prestazioni (PL) si possono quindi evidenziare tutte le possibili soluzioni che forniscono quel livello di PL ovvero le possibili strutture circuitali che forniscono il medesimo PL. Dal grafico riportato in figura 5 (punto 4.5 della EN ISO 13849-1) si ricavano le possibili quattro soluzioni:

1. Sistema in categoria 3 con componenti affidabili (MTTFD=medio) e DC media.
2. Sistema in categoria 3 con componenti affidabili (MTTFD=medio) e DC bassa.
3. Sistema in categoria 2 con componenti molto affidabili (MTTFD=alto) e DC media.
4. Sistema in categoria 2 con componenti molto affidabili (MTTFD=alto) e DC bassa.

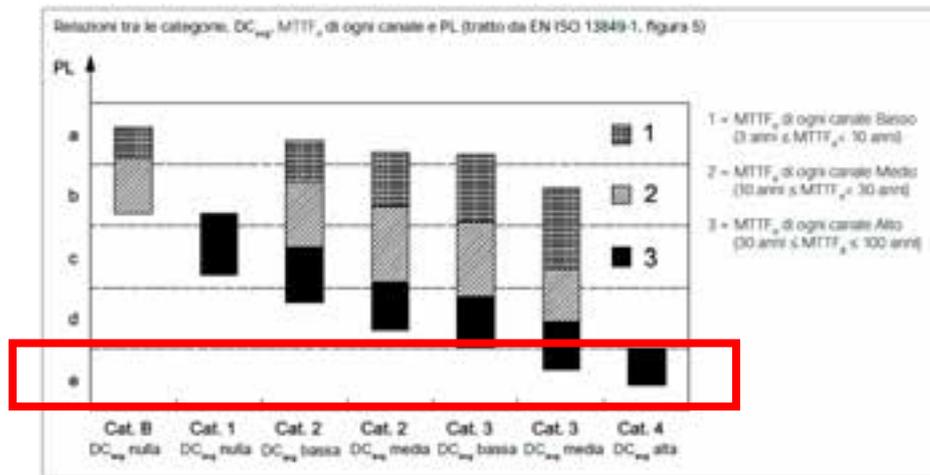


Figura 5

5. Conclusioni

Attraverso un attento esame dell'evoluzione della normativa nel tempo, delle linee di indirizzo tecniche-operative e della letteratura scientifica, si è cercato di dare un contributo per offrire una visione quanto più completa possibile dello stato dell'arte disponibile sull'argomento.

In particolare, ci si è soffermati sulle indicazioni tecniche per il miglioramento della sicurezza e sull'aggiornamento del documento di valutazione dei rischi.

Nel primo caso, ricoprono un ruolo fondamentale la manutenzione degli impianti, i controlli e le manutenzioni programmate, e non è da trascurare anche l'aspetto che riguarda la formazione del personale.

Nel secondo caso è stata posta in evidenza la responsabilità del datore di lavoro, il quale con l'ausilio di un progettista abilitato secondo le disposizioni in vigore ed iscritto al relativo albo professionale, dovrà provvedere all'aggiornamento del documento di valutazione del rischio.

Analizzando gli incidenti avvenuti sulle suddette apparecchiature, nel corso degli ultimi anni, si è cercato di mettere in luce le più frequenti cause di criticità negli apparecchi, che hanno poi causato gli incidenti. Ed abbiamo sottolineato come le fonti di maggiore criticità erano da ricercare nella progettazione dei sistemi di chiusura, e nella carenza di manutenzione.

Infine, prendendo a riferimento un modello matematico, si è messo in evidenza come sia possibile studiare questi i fenomeni incidentali attraverso una simulazione numerica che riesca a fornire risultati confrontabili con quanto osservato sperimentalmente. Tale considerazione è importante, perché può avere un risvolto pratico. Infatti, dallo studio della simulazione numerica è possibile capire le maggiori criticità che presenta il sistema e quindi a valle di questo, ottimizzazione la struttura dei recipienti in modo mitigare gli effetti del fenomeno.

6. Bibliografia

- [1] r.d. 12.05.1927 n.824 - Titolo I - Norme per la prevenzione contro gli infortuni.
- [2] d.m. 21.11.1972 - Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione.
- [3] d.m. 21.05.1974 - Norme integrative al r.d. 824/27 ed esoneri.

[4] d.m. n. 329 del 2004, del 01/12/2004 “*Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93*”.

[5] d.m. 11 aprile 2011 “*Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo*”.

[6] Gesi Liu, Yongzhi Zhao, Yanlei Liu, Jinyang Zheng, Shuiping Sheng, Shuxin Han. Numerical and experimental study of the explosions caused by residual pressure in quick actuating vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (pag.156-165). 2011.

[7] Juho Kallio - Standardin SFS-EN ISO 13849-1 selvitystyö Autoklaavin turvapiirit.

[8] EN ISO 13849-1 Safety of machinery - Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design.

Applicazione delle direttive ATEX per la valutazione del rischio esplosione in una officina farmaceutica

G. Vignali¹, R. Melloni², L. Di Donato³, D. Gattamelata³

¹ Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma - Centro di Eccellenza per la Ricerca e l'Innovazione Tecnologica (CERIT)

² Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Centro CRIS, Università di Modena e Reggio Emilia

³ Inail - Dit

Sommario

Nella maggioranza dei processi industriali, possono essere presenti ambienti sospetti di inquinamento con ad esempio polveri o sostanze volatili combustibili che, se innescate, possono provocare un'esplosione. Per garantire la sicurezza in tali impianti e gli ambienti ad essi associati, la comunità europea ha emanato direttive che fissano i requisiti da applicare a tutti gli equipaggiamenti installati in ambienti potenzialmente esplosivi.

Nel caso di una officina farmaceutica spesso possono presentarsi situazioni pericolose, dovute appunto a zone inquinate che possono portare ad un rischio di esplosione. Questo lavoro intende illustrare una possibile procedura di valutazione basata sull'analisi FMEA al fine di identificare il componente più critico per le attrezzature analizzate.

Tramite il tasso di guasto del componente, tenendo conto della zona e del tasso di inquinamento è stata inoltre definita la probabilità di innesco efficace che moltiplicata per la probabilità di avere atmosfera esplosiva ha portato ad ottenere il fattore di probabilità totale. In funzione della cifra di rischio complessiva sono state quindi stabilite le misure protettive da adottare.

In ultima analisi un elenco di interventi migliorativi e una stima dei costi è stata eseguita.

Keywords: Ambienti sospetti di inquinamento, ATEX, officina farmaceutica, analisi costi/benefici, attrezzature di lavoro

1. Introduzione

Il contesto normativo, pertinente ai luoghi con pericolo di esplosione, nasce con l'emanazione della Direttiva Generale 89/391/CE e si rafforza con le direttive ATEX: 94/9/CE e 99/92/CE e la più recente 2014/34/UE, tali riferimenti normativi hanno consentito di sviluppare un metodo di valutazione del rischio esplosione.

Tale rischio interessa diversi settori produttivi: dall'agricolo all'alimentare, dalla produzione di carta a quello per la produzione di prodotti chimici e farmaceutici.

Un'esplosione di un'apparecchiatura o di un impianto può portare sia a effetti immediati (morti, feriti, danni alle strutture e all'ambiente etc.), sia a effetti a lungo termine (dispersione di sostanze cancerogene con ripercussioni di tipo sanitario, di tipo ambientale e di tipo psicologico per tutta la popolazione); si pensi ad esempio ai disastri nucleari verificatisi in passato. La gravità di tali eventi determina la necessità di un metodo di valutazione del rischio efficace, in termini di probabilità di innesco e valutazione dell'atmosfera esplosiva, e attinente alla realtà produttiva da analizzare.

Partendo da tali premesse, la finalità del presente elaborato è proporre una metodologia analitica da tradurre in algoritmo per poter effettuare la valutazione del rischio esplosione in una officina farmaceutica mediante l'applicazione di tecniche desumibili dalle direttive ATEX e dalle norme associate. In particolare, ricordando che la cifra di rischio R è data

dal prodotto tra probabilità e magnitudo, lo scopo risulta determinare il fattore P_{tot} di esplosione in base alle caratteristiche prima descritte.

La struttura dell'articolo è tale da poter essere divisa in tre macroaree. Nella prima si focalizzano i punti salienti della normativa Atex, evidenziandone le novità nel panorama legislativo europeo. Nella seconda parte si propone una metodologia per la valutazione della probabilità di innesco. L'applicazione di questa metodologia al caso concreto dell'officina farmaceutica costituisce la terza parte dell'elaborato.

2. La teoria del fenomeno esplosione e le direttive ATEX

I "Luoghi con pericolo di esplosione" hanno assunto particolare attenzione sin dall'emanazione della direttiva Generale 89/391/CE, concernente l'attuazione di misure volte a promuovere il miglioramento e la tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori. Questa importanza è stata rafforzata con l'emanazione delle Direttive Atex, le quali hanno sia reso obbligatoria la classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione sia hanno fissato le prescrizioni minime di sicurezza (Essential Safety Requirement) e modalità di certificazione cui devono conformarsi gli apparecchi e i sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.

Art 288 del d.lgs. 81/08 definisce atmosfera esplosiva una miscela con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell'insieme della miscela incombusta.

L'esplosione è definita deflagrazione (UNI EN 1127-1) se la propagazione del fronte di fiamma e dell'onda d'urto avvengono a una velocità subsonica. In questo caso la propagazione della reazione chimica di esplosione è una forma di combustione endogena che, nel materiale, genera un aumento di pressione pari a 8 volte quella iniziale. Si parla, invece, di detonazione (UNI EN 1127-1) se in seguito alla propagazione della reazione chimica di esplosione si ha una decomposizione diretta della molecola di combustibile, innescata direttamente dall'onda d'urto: la reazione di esplosione procede quindi a velocità supersonica (2000-3000 m/s) in quella particolare sostanza attraverso tutto il materiale. La pressione e temperatura finale dei prodotti di reazione sono quindi molto più elevate. In particolare il valore di pressione aumenta di 40 volte rispetto al valore iniziale ed in questo caso l'onda di pressione precede generalmente il fronte di reazione.

Per quanto attiene al corpo legislativo in tema di sicurezza nei luoghi con pericolo di esplosione, esso è costituito da una serie numerosa e complessa di atti legislativi di emanazione comunitaria recepiti nell'ambito dell'ordinamento legislativo dai vari stati membri. In questo senso fondamentali sono le Direttive Atex (2014/34/UE) e (99/92/CE) che, come novità significative nel panorama legislativo associato alla sicurezza industriale, attualmente costituiscono il riferimento normativo per la protezione contro il rischio esplosione.

La 2014/34/UE è una direttiva di prodotto mentre la 99/92/CE è una direttiva sociale. Entrambe si rivolgono al rischio di presenza di atmosfera esplosiva in ambienti di lavoro ma mentre la 2014/34/UE (che abroga la 94/9/CE) si rivolge all'attrezzatura e/o allo strumento di lavoro, la 99/92/CE si rivolge all'uomo e all'ambiente di lavoro che lo circonda. Il comune obiettivo perseguito è la "sicurezza integrata", cioè una sicurezza basata su frasi logiche che in ordine di priorità sono:

- Eliminare o ridurre i rischi alla sorgente
- Prevedere protezioni per i rischi che non possono essere eliminati
- Informare l'utilizzatore sui rischi residui che non possono essere eliminati alla sorgente o con protezioni.

Insieme al Testo Unico d.lgs. 81/08 tali direttive hanno sostituito le Direttive 82/130/ CEE, 79/196/CEE e i d.p.r. 547/55 e 320/56 che già si occupavano di ambienti e luoghi di lavoro con pericolo di formazione di atmosfera esplosiva. Il recepimento in Italia della (94/9/CEE)

è avvenuto mediante il d.p.r. 126/98 (mentre quello della 2014/34/UE con d.lgs. 19 maggio 2016, n. 85), mentre con il con il d.lgs. 233/03, entrato in vigore il 10 settembre 2003, è stata recepita la seconda direttiva (99/92/CE), concludendo così il rinnovamento di tutta la legislazione relativa ai luoghi pericolosi, iniziata con l'emanazione della 94/9/CEE. In realtà, il Decreto 233/03, fortemente connotato dal punto di vista tecnico-ingegneristico, non è da considerare un provvedimento legislativo a sé stante, in quanto le prescrizioni contenute al suo interno vanno ad aggiungersi a quelle contenute nel d.lgs. 81/08 e successive integrazioni. Infatti, ai sensi di questo decreto, il datore di lavoro, nell'assolvere agli obblighi connessi con la valutazione dei vari rischi presenti nelle attività da svolgere è obbligato anche a valutare il rischio esplosione.

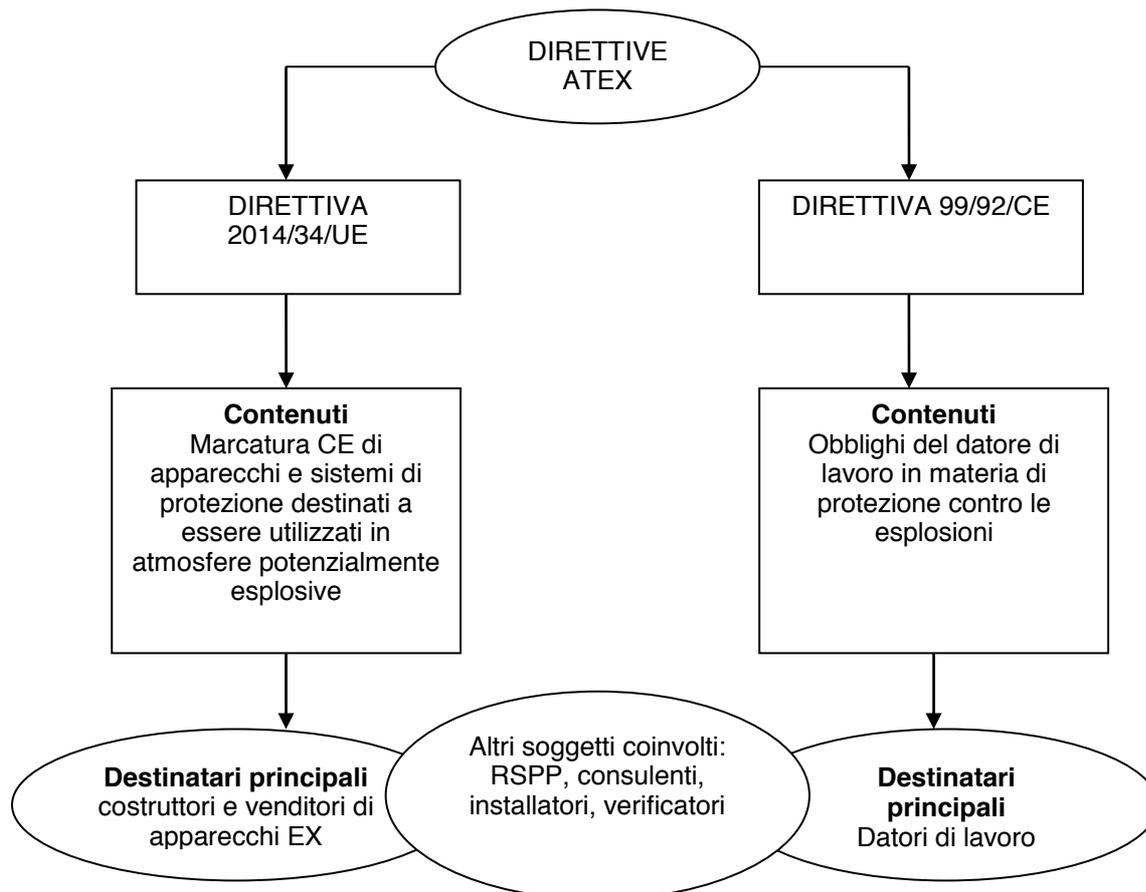


Figura 1. Relazione tra le direttive ATEX

A differenza della legislazione precedente che restringeva ad un numero circoscritto di attività lavorative l'obbligo di valutazione e verifica dei propri impianti, limitando il controllo agli ambienti (con rischio di esplosione) solo nell'eventualità in cui fossero installati impianti elettrici ora, indipendentemente dal luogo di produzione, tutte le aziende che producono, utilizzano o distribuiscono apparecchiature operanti in atmosfere esplosive che quelle realizzano prodotti appositamente costruiti per l'impiego in aree ad alto rischio di deflagrazione hanno dovuto conformarsi ai requisiti di sicurezza e sanitari di base contenuti nelle direttive ATEX.

3. Valutazione dei rischi in un'officina farmaceutica: approccio metodologico conforme alle direttive

Per l'analisi di una officina farmaceutica come di altri luoghi di lavoro a rischio esplosione due soggetti sono fondamentali:

- 1) un Datore di Lavoro che deve classificare la sua azienda per conoscere le zone nelle quali potrebbero formarsi atmosfere potenzialmente esplosive e nelle quali deve installare delle apparecchiature
- 2) un Fabbricante che realizza apparecchiature a norma, le quali possono diventare sorgenti di innesco efficaci a causa di problemi affidabilistici.

Considerando che un'esplosione si può innescare solo quando in uno stesso ambiente coesistono nello spazio e nel tempo due condizioni quali manifestazione della causa di innesco e presenza di un'atmosfera esplosiva, ne scaturisce che il processo di analisi e valutazione del rischio di esplosione si compone di due fasi fondamentali quali:

- Analisi Atex per identificare le apparecchiature che, a causa di problemi affidabilistici, possono diventare sorgenti efficaci di innesco
- Analisi Atex per valutare il grado di esplosività dell'ambiente di lavoro

Queste analisi vanno effettuate in maniera graduale non presentando una soluzione aprioristicamente valida ma individuando ed adottando una o più metodologie non obbligatorie che tengano conto della complessità dell'azienda/impianto produttivo che si sta valutando e che, soprattutto, siano sistematiche in quanto consentono all'utente l'analisi integrale di tutte le componenti di un sistema anche complesso, delle interazioni in essere tra le stesse, delle varie fasi di utilizzo, etc.

Nel caso specifico l'attività aziendale consiste nella produzione di principi attivi di origine biologica ottenuti sia mediante estrazioni da organi animali con solventi sia per sintesi chimica. Le sostanze oggetto di indagine sono state acetone e metanolo.

3.1. Le check list

Il primo ed essenziale passo per la stima del rischio esplosione è la realizzazione di una pre analisi mediante l'utilizzo di check lists, insieme di proposizioni, spesso sotto forma di domande, finalizzate a verificare lo stato del sistema valutandone il funzionamento e la correttezza delle opere di manutenzione. Le proposizioni sono raggruppate per componente oppure per argomento (materiali, attrezzature, procedure). e possono provenire direttamente da banche dati di componenti, ma nella maggior parte dei casi devono essere redatte dal personale che opera l'analisi e valutazione del rischio.

Nel caso in esame, i sopralluoghi presso l'area hanno consentito di compilare le check lists, dalle quali si sono ottenute informazioni su:

- Ambienti e relative caratteristiche
- Caratteristiche delle sostanze infiammabili presenti nell'area più pericolosa
- Individuazione delle sorgenti di emissione

In particolare circa l'ultimo punto le sorgenti di emissione sono state individuate nell'apertura dei boccaporti dei reattori (1 minuto per 3 volte al giorno) per controllare lo stato di avanzamento del processo di rimescolamento nei reattori. A queste emissioni si possono affiancare emissioni strutturali indipendenti dal ciclo produttivo legate alle valvole facenti parte del sistema di convogliamento fluidi dei reattori.

3.2. Stima della probabilità di innesco efficace

In presenza di atmosfera esplosiva, da innesco efficace dovuto a componenti di apparecchiature o di sistemi di protezione è necessario sia che questi risultino conformi ai requisiti delle direttive sia considerare che tutti i componenti devono essere comunque correttamente mantenuti al fine del non raggiungimento di uno stato nel quale il componente stesso possa comunque fungere da innesco efficace. E' necessario, praticamente, tener conto sia di pericoli potenziali ed esistenti derivanti da mancanze nell'attività di progettazione e di costruzione o da non conformità dell'impiego dei dispositivi stessi, sia di potenziali pericoli derivanti da una non corretta opera di manutenzione.

Ragionando secondo la presunzione di conformità, per questo articolo si ritengono più importanti i pericoli legati a problemi affidabilistici. L'analisi dei rischi dovuti a tali problemi è definibile Analisi Atex del prodotto o valutazione del pericolo di innesco.

La valutazione è stata limitata agli aspetti intrinsecamente connessi all'apparecchio e non ha riguardato gli aspetti per i quali è responsabile l'utilizzatore finale.

Nel caso in esame si sono raccolte le informazioni circa la presenza su attrezzature e componenti di marchiatura CE e Ex , verificandola per tutti.

Non sono previste lavorazioni di tipo meccanico che porterebbero alla produzione di scintille e non esiste pericolo da innesco elettrico in quanto l'illuminazione è garantita da neon realizzati in materiale antideflagrante e tutti i dispositivi sono collegati a terra. E' inoltre presente all'esterno dell'area una gabbia di Faraday contro l'innesco da fulminazioni. Ragionando secondo la presunzione di conformità, nessuna delle apparecchiature presenti rappresenterebbe, come tale, una fonte di innesco efficace, ma come detto è necessario considerare nel tempo anche la loro possibile usura o guasto. Se si considera, per esempio, il caso di un cuscinetto mal lubrificato e nel tempo usurato dal proprio ciclo di vita nonché da un disassamento all'atto del montaggio, esso potrebbe diventare sede di innesco di scintille nelle zone di contatto tra elementi volventi e la pista dall'asse di rotazione. Tali scintille diverrebbero fonti di ignizione efficaci. Il tutto è stato tradotto nella seguente in analisi FMEA:

IDENTIFICAZIONE	Agitatore interno del reattore
COMPONENTE	Cuscinetto
DESCRIZIONE	Supporto dell'albero e garanzia del moto relativo di rotazione.
MODI DI GUASTO	Assenza di lubrificazione comporta eccessivo attrito e quindi usura delle piste
EFFETTI SUL PROCESSO	Interruzione del processo produttivo e danni quantificabili in migliaia di euro
EFFETTI SUL SISTEMA	Produzione di innesco efficace che, interagendo con l'atmosfera esplosiva, comporta l'esplosione dell'area in questione e propagazione della stessa a aree adiacenti
INTERVENTO	Manutenzione regolare e completa del componente in questione
SISTEMA DI PROTEZIONE	Sistema automatico di lubrificazione

Figura 6. Analisi FMEA per il componente più a rischio (Agitatore interno del reattore)

Questa analisi qualitativa rappresenta l'input per la determinazione della *probabilità della presenza di un innesco efficace*.

3.2.1 Uso dell'affidabilità per la determinazione della probabilità di innesco

Le analisi di affidabilità si basano su modelli previsionali, modelli cioè che riguardano tutto ciò che non si può o non si vuole trattare in maniera deterministica (causa-effetto). Questi modelli non intendono fornire una rappresentazione del comportamento fisico dei meccanismi di guasto dei componenti, ma rappresentano la miglior stima dei migliori dati osservati. Nel caso specifico di Agitatore interno del reattore è stato calcolato il valore del tasso di guasto del componente in funzione delle caratteristiche tecnologiche, dello stress applicato e delle condizioni ambientali in cui il componente/sistema opera. Il tasso di guasto complessivo per il componente individuato è

$$\text{Guasti/anno} = 6,84 \cdot 10^{-5} \cdot 3080 \left[\frac{\text{guasti}}{\text{ore}} \cdot \frac{\text{ore}}{\text{anno}} \right] = 0,021 \left[\frac{\text{guasti}}{\text{anno}} \right]$$

3.3. Analisi del grado di esplosività dell'ambiente

La stima corretta del rischio esplosione è possibile solo affiancando alla Analisi Atex per stimare le sorgenti di innesco efficace anche l'Analisi Atex per valutare il grado di esplosività dell'ambiente di lavoro. Questo tipo di stima del rischio esplosione va effettuata per ogni sorgente di emissione e si tratterà, come nel caso delle apparecchiature, di un

processo statistico di valutazione conosciuto come classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione definito dalla norma UNI EN 1127-1 come la “determinazione della quantità di atmosfera esplosiva e della probabilità di formazione di un’atmosfera esplosiva”. In pratica permette di suddividere lo stabilimento o lo spazio occupato dalla macchina in esame in zone a diversa probabilità di rischio evidenziandone i parametri, i componenti di processo e gli elementi della struttura che concorrono ad aumentare il rischio esplosione al fine di poter intervenire già in sede di progetto o con idonee procedure operative, per ridurre al minimo l’estensione delle zone a maggior rischio.

Negli ambienti così classificati si utilizzeranno misure tanto più severe quanto maggiore è la probabilità di presenza di atmosfere esplosive. La valutazione delle zone a volte viene ripetuta per uno stesso impianto in modo tale da avere una classificazione preliminare e una definitiva.

In ogni caso è distinta in due fasi quali:

- Determinazione del tipo o dei tipi di zona
- Determinazione della sua/loro estensione

La qualifica della zona oltre che dipendere delle sostanze infiammabili e pericolose presenti è strettamente legata anche ad altri fattori quali individuazione della tipologia delle sorgenti di emissione, assegnazione del grado dell’emissione (continuo, primo o secondo), il tipo di ambiente (aperto o chiuso) e le condizioni ambientali quali pressione e temperatura che servono, rispettivamente, per definire la portata dell’emissione e per definire il grado e la disponibilità della ventilazione nell’intorno delle singole sorgenti di emissione e, di conseguenza, il tipo e l’estensione delle zone.

La norma CEI 31-30 stabilisce tre gradi fondamentali di emissione: **grado continuo** indica un’emissione continua o che può avvenire per lunghi periodi ed è tipica di superfici di liquidi infiammabili contenuti in serbatoi a tetto fisso con sfiato nell’atmosfera; di **primo grado** se avviene periodicamente ed occasionalmente durante il normale funzionamento; di **secondo grado** un’emissione non prevista durante il funzionamento normale e, se avviene, è possibile solo poco frequentemente e per brevi periodi.

Oltre alle emissioni anche la **ventilazione** ha influenza sia sulla probabilità che si formi un’atmosfera esplosiva sia sull’estensione delle zone pericolose. Indipendentemente dalla natura (naturale e artificiale), la ventilazione è classificata in **buona** se è presente con continuità, **media** se presente durante il normale funzionamento con interruzioni poco frequenti e comunque di breve durata e **scarsa** se è una ventilazione che non presenta i requisiti per essere considerata buona o adeguata, pur non presentando interruzioni di lunga durata. Legata alla ventilazione si definisce la portata di ventilazione e quando la ventilazione è artificiale la portata è desunta dalle caratteristiche dell’impianto di ventilazione mentre nel caso di ventilazione naturale, una serie di formule permette il calcolo per ambienti chiusi dove il ricambio dell’aria è dovuto alla spinta del vento sulle aperture e/o all’ “effetto camino” dovuto alla differenza di temperatura tra interno ed esterno del locale. Inoltre alla ventilazione è legato anche un fattore di efficacia variabile da 1 a 5 sia per ambienti aperti che per ambienti chiusi. Nel caso specifico si opera in ambiente chiuso a 20°C con una apertura verso esterno, P atmosferica con ventilazione naturale e artificiale (1m³/s) velocità del vento di 0.5m/s su un’area di dimensioni 21.50*11.50*5.60m.

Tenuto conto di tutti questi parametri, si calcola la distanza dalla sorgente di emissione a partire dalla quale la concentrazione della sostanza esplosiva è inferiore al LEL (nel caso specifico applicando CEI 31-35 e considerando l’efflusso della sostanza in seguito all’apertura dell’oblò subsonico o non turbolento, si è trovata una distanza di 0,058m. Calcolato anche questo parametro queste aree sono state poi divise in tre zone (classificazione) ciascuna in base alla frequenza di formazione e alla permanenza nel tempo dell’atmosfera esplosiva e le caratteristiche di ogni zona sono identiche per il gas e

per la polvere, ma la loro numerazione è differente. Le zone 0, 1 e 2 si riferiscono al gas mentre le zone 20, 21 e 22 si riferiscono alla polvere.

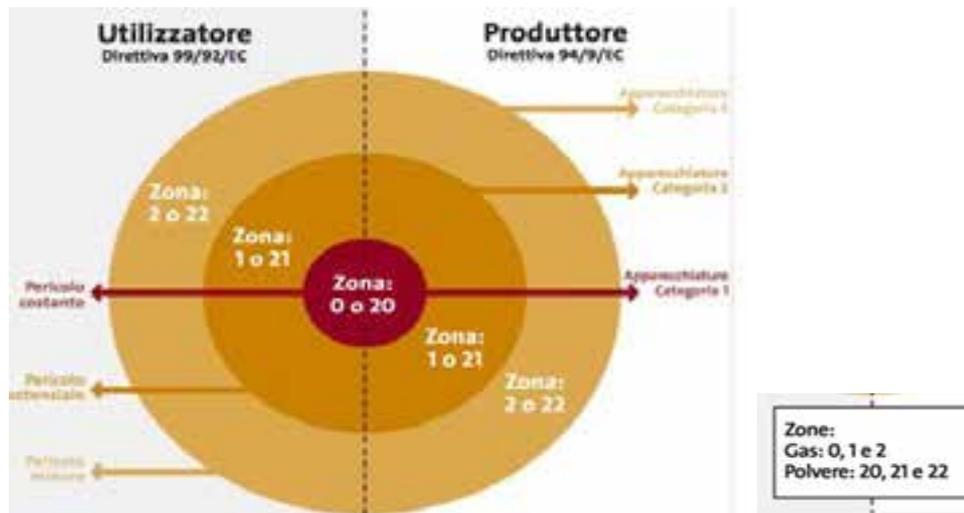


Figura 3. Classificazione delle tipologie di zone a rischio esplosione¹

Il tipo di zona pericolosa è quindi individuato in base alla sorgente di emissione e al grado di disponibilità della ventilazione. La relazione tra questi due parametri la si può esprimere come in Tabella 1: In generale un'emissione di grado continuo dà luogo a una zona 0, una sorgente di emissione di primo grado dà luogo a una zona 1 e una sorgente di emissione di secondo grado dà luogo a una zona 2. Detta corrispondenza può essere alterata dal grado di ventilazione

Grado della Sorgente di Emissione (SE)	Grado della ventilazione		
	ALTO	MEDIO	BASSO
CONTINUO	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0
PRIMO	ZONA 1	ZONA 1	ZONA 1 o ZONA 0
SECONDO	ZONA 2	ZONA 2	ZONA 1 o ZONA 0

Tabella 1. Relazione tra SE e grado della ventilazione

4. Metodologia per determinazione livello di rischio complessivo

A seguito della applicazione al caso specifico di tutte le procedure sopra riportate è stata proposta la seguente metodologia per la determinazione del livello di rischio complessivo. La probabilità di avere presenza di atmosfera esplosiva e la probabilità di avere innesco efficace devono essere ora tra loro correlati per poter avere un unico valore di *probabilità totale* P_{tot} da poter utilizzare per la determinazione della cifra di rischio R.

Per poter fare ciò si utilizza il *metodo della decomposizione*, metodo associato alla probabilità soggettiva (dove "soggettivo" vuol dire legato alle conoscenze del soggetto) il cui dominio di definizione è costituito prevalentemente da eventi rari. Possono quindi rientrare anche le esplosioni. Si considera che un evento finale H o K può accadere per l'avverarsi di eventi A e B indipendenti tra loro, secondo una delle relazioni logiche:

$$H = A \text{ or } B;$$

$$K = A \text{ and } B$$

In particolare l'esplosione può avvenire solo se è presente la sorgente di accensione efficace ed è presente l'atmosfera esplosiva. Pertanto avvalendosi solo della seconda relazione, indicato con:

¹ <http://www.supergap.it/bestmatch/glossario/atex/>

K = esplosione; A = presenza di miscela esplosiva; B = presenza di innesco

si può scrivere $K = A \text{ and } B$ e $P(K) = P(A) \cdot P(B)$

4.1. Determinazione della probabilità di avere atmosfera esplosiva

Per determinare la probabilità di presenza di atmosfera esplosiva si ricorre alla classificazione del luogo che è stato ripartito in zone a diversa probabilità di esplosione. Tale probabilità è esprimibile mediante un numero detto *fattore di pericolo* il cui range lo si assume da 0 a 3, con significati associabili a questi indici spiegati nella tabella seguente:

GRADO DEL FATTORE DI PERICOLO	DEFINIZIONE QUALITATIVA DEL FATTORE PERICOLO
P3	Il luogo, interessato da atmosfera esplosiva presente continuamente o frequentemente, presenta pericolo frequente.
P2	Il luogo, interessato da presenza occasionale di atmosfera esplosiva durante il normale funzionamento, è talvolta pericoloso
P1	Il pericolo è raramente presente in quanto è improbabile la presenza di atmosfera esplosiva durante il normale funzionamento.
P0	Il pericolo non esiste. È impossibile la formazione di atmosfera esplosiva

Tabella 2. Definizioni qualitative del fattore di pericolo

Riferendo al caso di studio, al primo tipo di zona (zona 1) è associabile un fattore 2. Infatti si ha occasionale formazione di atmosfera esplosiva proprio vicino al reattore in seguito all'apertura del passo d'uomo da parte di addetti alla produzione per visionare lo stato raggiunto nel processo. L'interposizione del boccaporto al flusso d'aria proveniente dal sistema di aspirazione localizzata rende possibile la dispersione della sostanza pericolosa per circa 1 minuto, tempo di apertura dichiarato. Al secondo tipo di zona (zona 2) è legato un fattore di pericolo 1. Infatti, in accordo alla definizione, questa zona, che rappresenta la quasi totalità dell'area in esame, è interessata solo di riflesso dalle emissioni legate all'apertura del passo d'uomo. Essendo in presenza di 2 zone diverse, a scopo cautelativo è bene assumere come probabilità di presenza di atmosfera esplosiva dell'intera area quella associata alla zona più pericolosa. Pertanto essa vale 2.

4.2. Determinazione della probabilità di avere innesco efficace

L'innesco efficace può anche essere definito "fattore di contatto" in quanto è l'elemento che permette di passare dal pericolo al danno. L'origine dell'innesco, essendo tutte le apparecchiature presenti marchiate CE e Ex è stata ritrovata nei problemi affidabilistici legati al funzionamento del componente "più stressato" degli impianti di processo presenti. Come descritto in precedenza di ogni componente è stato individuato il tasso di guasto $\lambda(t)$ associando a questo valore una probabilità di innesco efficace secondo la stima qualitativa presente nella seguente tabella:

GRADO DEL FATTORE DI CONTATTO	DEFINIZIONE QUALITATIVA DEL FATTORE DI CONTATTO
C3	Contatto presente permanentemente nella zona considerata. Le sorgenti di accensione sono efficaci.
C2	Contatto talvolta presente nella zona considerata. Le sorgenti di accensione efficaci si manifestano in circostanze rare e unicamente a seguito di disfunzioni.
C1	Contatto quasi mai presente nella zona. Le sorgenti di accensione efficaci si manifestano in circostanze molto rare e unicamente a seguito di rare disfunzioni.
C0	Contatto mai presente nella zona considerata.

Tabella 3. Definizione qualitativa del fattore di contatto

Tra i fattori di contatto presenti quello più idoneo è 1 in quanto il valore percentuale della possibilità di manifestazione del guasto è molto basso tale da poter parlare di contatto quasi mai presente.

4.3. Valori della P_{tot} per un'area del caso applicativo

In accordo a quanto detto, la P_{tot} di esplosione per l'area caso di studio è data dal prodotto tra la probabilità di avere atmosfera esplosiva con la probabilità di avere innesco efficace. In base alle scelte la P_{tot} di esplosione per l'area in esame vale 2.

4.4. Stima della magnitudo

La scelta del valore di magnitudo non risponde a processi analitici in senso stretto. E' una scelta da basare su stime qualitative considerando prevalentemente i soggetti che possono essere esposti al danno. Il livello di danno è desumibile dalla seguente classificazione:

GRADO DEL FATTORE DI DANNO	DEFINIZIONE QUALITATIVA DEL FATTORE DI DANNO
D3	Entità del danno gravissima. Tanto determinati beni materiali che individui presenti permanentemente o frequentemente possono subire danni molto gravi
D2	Entità del danno media o grave. Tanto determinati beni materiali che individui talvolta presenti possono subire danni gravi.
D1	Entità del danno lieve. Tanto determinati beni materiali che individui talvolta presenti subiscono danni lievi
D0	Entità del danno trascurabile o nulla. Beni materiali non subiscono danni e individui non sono mai presenti nella zona.

Tabella 4. Definizione qualitativa del fattore di danno

A fronte di una probabilità di esplosione bassa, si è potuta constatare la presenza pressoché costante di 3 operatori nell'area. Pertanto, per una stima cautelativa della magnitudo, si è scelto il grado 3 del fattore di danno.

4.5. Calcolo della cifra di rischio e interventi migliorativi

La cifra di rischio si calcola come $R_{tot} = M \cdot 3 \cdot 6$ su una scala che per il caso in esame va da 0 a 27, essendo P_{tot} da 0 a 9 e M da 0 a 3. Per il caso in questione, il rischio è risultato basso. E questa è da ritenersi un'ottima situazione essendo l'area in esame quella più critica di tutta l'officina a causa dei processi in essa realizzati e dell'elevato numero di apparecchiature presenti. Il fatto che, però, che il rischio sia basso non implica che sia trascurabile. Nell'area si può ancora agire in prevenzione riducendo ulteriormente le emissioni inserendo affianco alla già adottata aspirazione localizzata, un sistema computerizzato, da installare su ogni reattore dotato di indicatore visivo per il monitoraggio di processo (24300€), alternativo alla continua apertura del boccaporto dei reattori. Volendo coniugare protezione e economicità, si può pensare all'adozione di pannelli di rottura per lo scarico dell'esplosione muniti di sensore di segnalazione di intervento collegabile a un circuito a sicurezza intrinseca, da installare nella parte superiore delle pareti perimetrali dell'area che non presentano superfici finestrate senza intaccare l'illuminazione naturale già garantita all'area. Inoltre è consigliato il ricorso a misure organizzative quale segnalazione delle zone pericolose e formazione dei lavoratori in materia di protezione delle esplosioni mediante corso di formazione Atex (circa €400).

Si invita infine a una attenta manutenzione di tutti i componenti delle apparecchiature (stimata in 13500€, con due interventi di manutenzione all'anno su tutti i reattori). Ciò porterebbe una riduzione ulteriore della cifra di rischio a 2 data dal prodotto tra una P_{tot} pari a 1 (data, a sua volta, dal prodotto di probabilità di atmosfera esplosiva pari a 1 e di

innesco pari a 1) a da una magnitudo pari a 2 (il sistema computerizzato di monitoraggio evita la presenza costante di operatori nel luogo).

5. Conclusioni

L'analisi esposta si basa sull'osservazione che le esplosioni di miscele d'aria con gas o polveri sono eventi rari, se ci riferiamo alle normali condizioni industriali con riferimento alle aziende del settore farmaceutico. Le esplosioni sono rare ma "raro" non è sinonimo di "impossibile". Se accade, un'esplosione può coinvolgere in modo grave molte persone, quindi è necessaria una particolare cautela. Le direttive ATEX, se vengono affrontate correttamente, non creano preoccupazioni. Così come non crea preoccupazioni il d.lgs. 233/03 e il d.lgs. 81/08, dalla cui applicazione si evince che per garantire la giusta protezione dei lavoratori nei confronti di un rischio così significativo come è quello di esplosione è importante creare una sinergia di specialisti di settori diversi: tecnico, progettista, processista, analista di rischio, classificatore, datore di lavoro. Ma il decreto, oltre a presentare una forte connotazione tecnico-ingegneristica, dovrebbe muoversi anche in un'altra direzione, quella delle coscienze. Questo perché l'apparato legislativo italiano è molto evoluto e come tale, spesso è difficile da gestire per gli imprenditori ma anche per chi deve controllare. Se si lega il tutto al concetto di mercato globalizzato, in cui si adopera sempre più manodopera a basso costo, si giunge alla immediata conclusione che a volte le norme restano inapplicate. Si pensa solo a risparmiare, nonostante sia risaputo che nei riguardi della sicurezza sul lavoro questo non deve essere fatto e nonostante i diversi governi che si succedono, pur essendo di ideologie diverse, seguono un filone comune: inasprimento delle sanzioni a chi non rispetta le fondamentali leggi della sicurezza.

6. Bibliografia

- [1] Cardillo P., Guida allo studio e alla valutazione delle esplosioni di gas e vapori, Monografia, Stazione Sperimentale per i combustibili
- [2] Cardillo P., Guida allo studio e alla valutazione delle esplosioni di polveri, Monografia, SC Sviluppo chimico, Milano, 2002
- [3] Cavaliere A., Scardamaglia P., 2005, Guida all'applicazione delle direttive ATEX, EPC Libri
- [4] d.lgs. 19 maggio 2016, n. 85 Attuazione della direttiva 2014/34/UE concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.
- [5] d.lgs. 12 giugno 2003, n. 233 - Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute
- [6] d.p.r. del 23 marzo 1998, n. 126. Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.
- [7] Marigo M., 2004, La deflagrazione delle polveri e le direttive ATEX, EPC Libri
- [8] Ispesl, 2004, DIRETTIVA 94/9/CE-ATEX: Guida alla certificazione di prodotti destinati ad essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive
- [9] Rizzo R., 1998, La sicurezza degli Impianti industriali, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli;
- [10] Sghedoni S., 2006, "Tutela della salute: un diritto di tutti che presuppone migliore informazione e maggiori sinergie", pag. 34,35 in "Folio, Organo Ufficiale del Consiglio Nazionale dei periti industriali e dei periti industriali laureati"

[11]UNI EN 1127-1:2011: Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia

[12]UNI EN ISO 12100:2010: Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio

Vincoli di sicurezza derivanti dall'applicazione delle norme IEC 61508 e IEC 61511: applicazione dell'analisi SIL ai sistemi di sicurezza di un impianto di processo

F. P. Nigri¹, V. De Lisio², C. Delle Site³, R. Iovene⁴

¹ Inail - Uot di Bari

² Eco Certificazioni

³ Inail - Dit

⁴ Inail - Uot di Pescara

Sommario

Al giorno d'oggi, la gestione delle funzioni di sicurezza critiche di molti impianti industriali è affidata, in misura sempre maggiore, a sistemi strumentali di sicurezza (Safety Instrumented Systems, SIS). Di conseguenza, nel corso degli ultimi anni, le norme internazionali IEC 61508 e IEC 61511 hanno acquisito sempre più rilevanza nel settore della sicurezza impiantistica.

Entrambi gli standard, infatti, affrontano gli aspetti correlati alla corretta progettazione e gestione dei sistemi di sicurezza costituiti da apparecchiature elettriche, elettroniche oppure "elettroniche programmabili", collegate fra loro al fine di svolgere una funzione di sicurezza. In particolare, la IEC 61511 trova specifica applicazione nell'industria di processo.

Le norme citate hanno notevolmente contribuito all'evoluzione della sicurezza in ambito industriale, spingendo i progettisti di impianti tecnologici ad arricchire le proprie conoscenze in tema di analisi di affidabilità dei sistemi di sicurezza abbinati ai processi critici.

Allo scopo di affrontare un "caso studio", si concentra l'attenzione su un impianto di chimica fine, nel quale è inserito un reattore funzionante in modalità "batch".

La finalità del lavoro è duplice:

- 1) descrivere l'iter di valutazione del livello di integrità della sicurezza (Safety Integrity Level, SIL) richiesto al sistema strumentale di sicurezza (SIS) del reattore;
- 2) definire, in termini di affidabilità, le caratteristiche richieste ai singoli componenti del SIS.

Nel corso della trattazione (figura 4) si rileva che, al pari del "sistema strumentale di sicurezza (SIS)", il c.d. "sistema di controllo base del processo (BPCS)" contribuisce alla riduzione del rischio di impianto, attuando efficacemente il controllo e la regolazione del processo in atto.

Al riguardo, si evidenzia da subito la differenza sostanziale fra il SIS e il BPCS. Quest'ultimo è pur sempre un "sistema strumentale", destinato a rimanere continuamente attivo al fine di analizzare gli input di processo e generare le necessarie azioni correttive senza, però, incorrere nelle logiche di intervento proprie del SIS, che sono basate sulla stima della Probabilità di Guasto su Richiesta (Probability of Failure on Demand, PFD).

Nei "sistemi base di controllo del processo (BPCS)" rientrano i "dispositivi di controllo e regolazione per la sicurezza" di cui fa cenno, utilizzando l'acronimo SRMCR, il D.M. 1 dicembre 2004, N. 329 (art. 9, comma 1, lettera a, punto 2).

Il lavoro è stato diviso in due parti. La prima parte ha carattere introduttivo: illustra il processo in esame ed elabora l'analisi LOPA (Layers Of Protection Analysis) del reattore chimico inserito nel processo; la seconda parte sviluppa il "caso studio" in termini numerici.

PARTE PRIMA

1. Il contributo della sicurezza funzionale

Nella sua forma più semplice, un SIS è composto da:

- 1) un sensore (sensor);
- 2) un controllore logico (logic solver);
- 3) un attuatore finale (final actuator).

Questi tre elementi, disposti in serie, costituiscono nel complesso un “sistema di guardia”, che resta “dormiente” fino a quando l’impianto richiede il suo intervento. Ciò normalmente avviene con una frequenza molto bassa, inferiore a una volta all’anno. La “sicurezza funzionale” introduce il concetto di Probabilità di Guasto su Richiesta (Probability of Failure on Demand, PFD). La PFD rappresenta la probabilità che il SIS non riesca ad adempiere al suo compito, ossia la probabilità che il “sistema di guardia” resti inattivo nell’istante in cui è chiamato a intervenire. Se, per esempio, il SIS non interviene una sola volta su dieci in un anno, allora la sua PFD è uguale a $\frac{1}{10}$. Un tale sistema di sicurezza contribuisce a

ridurre il rischio di processo di un fattore pari a 10. In altri termini, il SIS garantisce un Fattore di Riduzione del Rischio (Risk Reduction Factor, RRF) uguale a 10. Si deduce, allora, che $RRF = \frac{1}{PFD}$, come evidenziato dalla seconda colonna di tabella 1.

PFD	RRF	SIL
$10E-1 \leq PFD < 10E-2$	$10 \leq RRF < 100$	1
$10E-2 \leq PFD < 10E-3$	$100 \leq RRF < 1000$	2
$10E-3 \leq PFD < 10E-4$	$1000 \leq RRF < 10000$	3
$10E-4 \leq PFD < 10E-5$	$10000 \leq RRF < 100000$	4

Tabella 1

Quanto più è elevato il valore di PFD, tanto minore è il valore di RRF e, di conseguenza, il livello di affidabilità del sistema di sicurezza. In termini di SIL, tale livello di affidabilità si esprime mediante un numero intero, variabile da 1 a 4, laddove a 1 corrisponde il livello di affidabilità più basso. All'aumentare del rischio di processo, deve necessariamente aumentare il SIL, ossia il livello di affidabilità del sistema di sicurezza che è deputato all'interruzione del processo. Tale interruzione si rende necessaria in caso di superamento del valore di soglia prefissato da parte di una o più variabili di processo, che tipicamente sono la pressione, la temperatura e il livello del fluido coinvolto nel processo. Per semplicità, giova concentrare l'attenzione sulla sola variabile “temperatura”.

In figura 1, T_0 è la temperatura nominale o di progetto, mentre l'intervallo $[T_0 \div T_{PAR}]$ rappresenta il range di controllo accettabile del processo. La simbologia adottata risulta più comprensibile se si chiarisce che il pedice “PAR” è un acronimo che sta per Process Acceptable Range. È impossibile mantenere il processo esattamente alla temperatura T_0 , ma esiste un intervallo di valori di temperatura all'interno del quale il processo è considerato in esecuzione in modo accettabile. Il sistema di controllo basico del processo (BPCS) ha il compito di mantenere la temperatura nell'intervallo $[T_0 \div T_{PAR}]$. L'allarme di avvertimento viene attivato quando il processo eccede T_{PAR} , dando all'operatore la possibilità di riportare il processo sotto controllo. In tal caso, l'allarme di avvertimento si

disattiva automaticamente. Il gap che separa T_W da T_{PAR} dipende da vari fattori, fra i quali spicca il tempo morto, ossia il tempo necessario al sistema di allarme per intervenire. Superato il valore di allarme critico T_{CA} , l'intervento del SIS è richiesto con immediatezza.

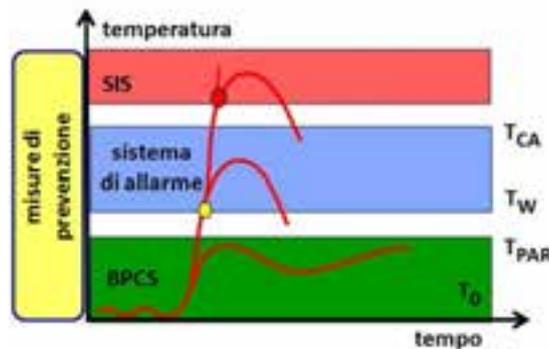


Figura 1

2. Descrizione del processo

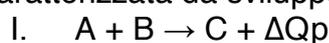
Si ritiene opportuno descrivere brevemente le caratteristiche dell'impianto di processo da esaminare, del quale è parte integrante un reattore chimico funzionante a batch, provvisto di agitatore palettato e di camicia di raffreddamento. Il monitoraggio dello stato di avanzamento della reazione consiste nel tenere sotto controllo la composizione chimica della miscela in reazione, la temperatura e la pressione all'interno del reattore. Le operazioni di avviamento (start up) e spegnimento (shut down) del reattore, nonché le acquisizioni di eventuali allarmi dovuti ad anomalie di processo, sono effettuate dagli operatori in turno. Come tutti i processi batch, anche quello in esame necessita di sporadici interventi manuali: si pensi, ad esempio, al prelievo di campioni. Tali interventi sono gestiti tramite l'adozione di rigorose procedure operative e supervisionati allo scopo di verificarne le condizioni di sicurezza e la compatibilità con altre attività già intraprese.

Se la reazione è esotermica, non si può escludere la possibilità che la potenza termica prodotta dalla reazione risulti maggiore della potenza termica sottratta al reattore per effetto dello scambio termico. In tale situazione, la dipendenza esponenziale della velocità di reazione dalla temperatura (equazione di Arrhenius) determina un rapido incremento della cinetica della reazione che, pertanto, può sfuggire al controllo (runaway reaction). La situazione descritta è condizione necessaria ma non sufficiente affinché si verifichi un'esplosione. Infatti, qualora la reazione non comporti sviluppo di gas o vapori, nel reattore non si registrano aumenti di pressione tali da determinare un cedimento della struttura del reattore, con conseguente fuoriuscita delle sostanze coinvolte. In tal caso, la temperatura interna del reattore aumenta fino al consumo dei reagenti, senza che si verifichino esplosioni. Nel caso in cui sussistano le condizioni che determinano un aumento considerevole e repentino della pressione interna del reattore, si può avere un'esplosione termica.

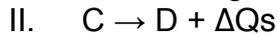
Le reazioni, che solitamente avvengono in un reattore funzionante a batch, sono di 2 tipi:

- 1) primarie, reazioni che permettono di ottenere il prodotto per il quale il processo è stato sviluppato;
- 2) secondarie, reazioni che portano a prodotti diversi da quelli desiderati.

Fatta questa precisazione, si prenda in esame la seguente reazione primaria di addizione, caratterizzata da sviluppo di calore ΔQ_p :



Con B si denota il catalizzatore, la cui massa è trascurabile rispetto a quella del reagente A. Si supponga che il prodotto C della reazione primaria sia in grado di trasformarsi nella sostanza D, a seguito di polimerizzazione ad alta temperatura.



La reazione secondaria si può considerare fortemente esotermica se $\Delta Q_s \gg \Delta Q_p$.

Una stima della pericolosità del processo si ottiene confrontando T_s , temperatura di innesco della reazione secondaria, con T_{MAX} , temperatura massima raggiungibile all'interno del reattore a seguito della perdita del controllo termocinetico della reazione primaria. Nel caso di processo condotto in modalità batch, si ha:

$$T_{MAX} = T_P + \Delta T_{ad} \quad \text{dove} \quad \Delta T_{ad} = \frac{m_A \cdot \Delta H}{m \cdot c_p}$$

I simboli introdotti hanno il seguente significato:

T_P : temperatura di innesco della reazione primaria;

m_A : massa del reagente A;

ΔH : quantità di calore prodotto dalla reazione primaria per unità di massa del reagente A;

m : massa della miscela di reazione;

c_p : calore specifico medio, a pressione costante, della miscela di reazione.

Se $T_s > T_{max}$, non esiste pericolo di innesco della reazione secondaria. Se, invece, $T_s \leq T_{max}$, sussistono le condizioni perché la reazione primaria, sfuggendo al controllo, possa innescare una reazione di polimerizzazione del prodotto C, che è fortemente esotermica. In tal caso, occorre predisporre le misure di mitigazione più opportune al fine di arrestare il processo di runaway. Tali misure in genere comportano l'attivazione di sistemi di:

- 1) "quenching" fisico (brusco raffreddamento) o chimico (inibitori di reazione);
- 2) svuotamento rapido del reattore in un serbatoio di emergenza;
- 3) convogliamento di gas e vapori in un "venting" progettato per evitare esplosioni.

I problemi relativi al controllo della temperatura del reattore sono in pratica connessi alla capacità di drenaggio del calore di reazione da parte del BPCS. Poiché il calore prodotto dalla reazione passa attraverso le pareti del reattore e si riversa nella camicia di raffreddamento, il BPCS deve provvedere a un aumento della portata di fluido refrigerante in caso di aumento della temperatura all'interno del reattore. Il passaggio del fluido attraverso lo scambiatore collegato al riscaldatore (heater) avviene nel breve tempo necessario alla miscela di reazione per raggiungere T_P (temperatura di innesco della reazione primaria). Con riferimento allo schema riportato in figura 2, si intuisce che la valvola 1 è normalmente chiusa (NC) nel senso che porta al primo scambiatore.

In definitiva, al BPCS è affidato il compito di mantenere la temperatura all'interno del reattore al di sotto di T_w (temperatura di avvertimento). T_{CA} (temperatura di allarme critico) deve essere a sua volta regolata in modo da risultare inferiore a T_s (temperatura di innesco della reazione secondaria di polimerizzazione).

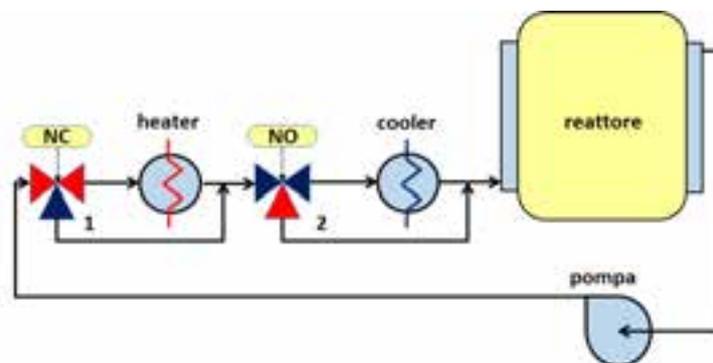


Figura 2

3. L'analisi LOPA e il livello di rischio "ALARP"

Con queste premesse, l'applicazione dell'analisi LOPA (Layers Of Protection Analysis), proposta dalla IEC 61511-3, consente di valutare con immediatezza il numero e l'efficacia dei livelli di mitigazione che si desidera adottare al fine di garantire la sicurezza del processo:

- 1) BPCS (Basic Process Control System);
- 2) sistema di allarme;
- 3) SIS (Safety Instrumented System);
- 4) PSV (Pressure Safety Valve).

L'analisi LOPA si basa su due presupposti:

- 1) i singoli layers si dispongono intorno al reattore (Equipment Under Control, EUC) come se fossero strati sovrapposti di una cipolla ideale (fig. 3): ciò equivale a considerare ogni strato del tutto indipendente dagli altri, ossia non influenzabile dall'eventuale mancato funzionamento delle altre misure di mitigazione;
- 2) ciascuno strato contribuisce a ridurre il rischio di processo di una quantità inversamente proporzionale alla propria PFD.

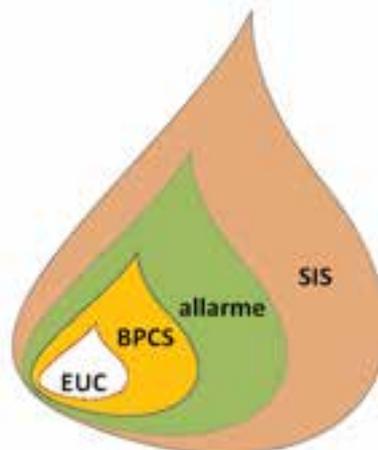


Figura 3. LOPA onion

Un rischio è considerato "tollerabile" a condizione che sia stato ridotto a un livello in cui il vantaggio, derivante da un'ulteriore riduzione del rischio, non è giustificato dai costi da affrontare per conseguire tale ulteriore riduzione del rischio. L'Annex A della IEC 61511-3 definisce tale livello di rischio introducendo l'acronimo anglosassone "ALARP", che sta per As Low As Reasonably Practicable. Il livello ALARP dipende da vari fattori, fra i quali spicca l'esigenza di protezione delle persone e dell'ambiente. Non di rado, però, intervengono altri fattori, riconducibili a problemi di ordine economico e di reputazione aziendale. Senza introdurre ulteriori complicazioni, si può supporre che il livello ALARP corrisponda a una probabilità di accadimento dell'evento indesiderato pari a 1×10^{-5} , pienamente accettabile anche se l'impianto di processo è inserito in uno stabilimento soggetto alla direttiva Seveso. Fatta questa precisazione, si prenda in esame la figura 4, che rappresenta il complesso delle misure di prevenzione adottate per garantire la sicurezza del reattore. Come si vede, ciascuna misura introduce una riduzione della probabilità di accadimento dell'evento indesiderato (aumento di temperatura all'interno del reattore) inversamente proporzionale alla propria PFD. Quanto più la PFD è piccola, tanto più la riduzione della probabilità di accadimento è grande.

Tornando al caso in esame, l'analisi dell'esperienza operativa suggerisce, per il BPCS, il sistema di allarme e la PSV, un valore di PFD = 0,1. In altri termini, alla luce dell'esperienza pregressa, si ritiene plausibile l'ipotesi secondo la quale la PSV del reattore può rimanere incollata mediamente una sola volta all'anno, ogni dieci richieste di

intervento. In questa ipotesi di lavoro, affinché il SIS compori una riduzione del rischio di processo tale da consentire il raggiungimento del livello ALARP, si deve optare per un sistema di sicurezza strumentale caratterizzato da $PFD = 0,01$. Il valore di PFD_{SIS} cade sulla linea di confine fra SIL2 e SIL1 (tab. 1). Dal momento che il SIL tende a decrescere nel tempo, si preferisce adottare per il SIS il valore più elevato del SIL, e cioè SIL2. Poiché SIL2 deve essere mantenuto nel corso del tempo, nel seguito si illustrano le tecniche da mettere in campo per garantire al SIS un livello di affidabilità cui corrisponde SIL2.

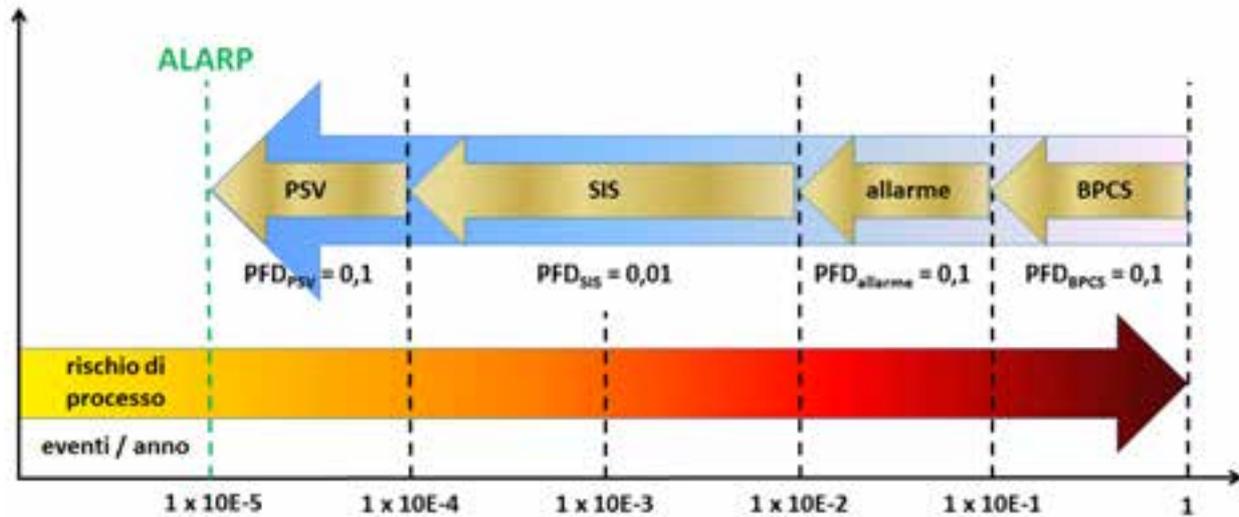


Figura 4. Misure di riduzione del rischio di processo

Si opta per un sistema strumentale di sicurezza idoneo a garantire, in caso di emergenza, lo svuotamento rapido del reattore in un serbatoio di stoccaggio ausiliario. Le caratteristiche di tale sistema sono dettagliatamente esaminate nella seconda parte.

PARTE SECONDA

4. Il sistema strumentale di sicurezza (SIS)

Il SIS è composto da:

- 1) un sensore di temperatura PT100;
- 2) un controllore di temperatura TC;
- 3) un attuatore finale (valvola di svuotamento rapido).

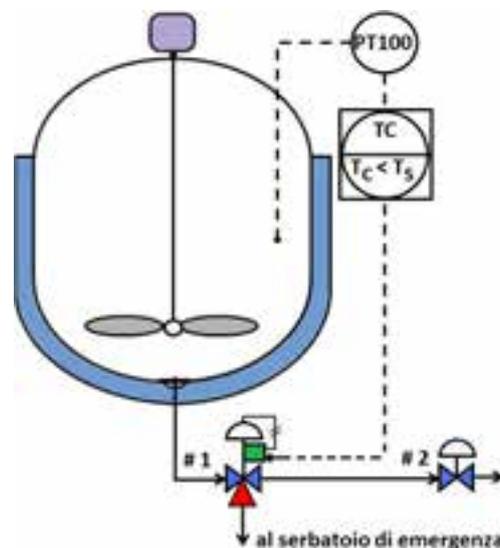


Figura 5. Sistema strumentale di sicurezza del reattore

- 1) Il sensore di temperatura PT100 è una termoresistenza al platino, che sfrutta la variazione della resistività del platino al variare della temperatura e presenta buona precisione e curva caratteristica quasi lineare in un ampio intervallo di valori di temperatura.
- 2) Il corretto funzionamento del controllore di temperatura TC è reso possibile da un programma, caricato dall'utente nella memoria dell'unità centrale di elaborazione del PLC del quale il controllore TC fa parte. L'informazione digitale, elaborata dal "programma utente", viene convertita in segnale analogico normalizzato 4÷20 mA, utilizzato per il comando dell'elettrovalvola abbinata all'attuatore finale del SIS. Oltre a elaborare le informazioni provenienti dalla PT100, il processore provvede alla gestione degli ingressi/uscite (autodiagnosi), nonché alla diagnosi dei componenti del SIS mediante una serie di test avviati alla messa sotto tensione e poi eseguiti ciclicamente, in corso di funzionamento. Queste funzioni, che consentono al PLC di rilevare e segnalare eventuali avarie dei componenti del SIS, sono svolte dal processore mediante un software programmato in fabbrica e residente in una memoria di sistema non accessibile all'utente.
- 3) In condizioni ordinarie di processo, la valvola #1 consente il flusso del prodotto della reazione verso la valvola #2, che è modulante e non è parte integrante del SIS. In condizioni di emergenza, ossia al raggiungimento della temperatura di innesco della reazione di polimerizzazione secondaria T_s , la valvola #1, indipendentemente dal grado di apertura della valvola #2, convoglia il prodotto della reazione verso il serbatoio di stoccaggio ausiliario, garantendo in tal modo lo svuotamento rapido del reattore.

5. Guasti sicuri e guasti pericolosi

Il diagramma a blocchi del SIS (fig. 6) evidenzia un'architettura del tipo 1oo1 (1 out of 1), costituita cioè da un unico canale di comunicazione. In queste condizioni, il guasto di un singolo componente (device) del SIS, inficia la funzione di sicurezza (SIF) affidata al SIS. Pertanto, particolare attenzione dovrà essere posta ai ratei di guasto dei singoli componenti del SIS, evidenziati in figura 6 unitamente ai dati di Copertura Diagnostica (Diagnostic Coverage of dangerous failures, DC). Tali dati sono forniti dai costruttori della componentistica.

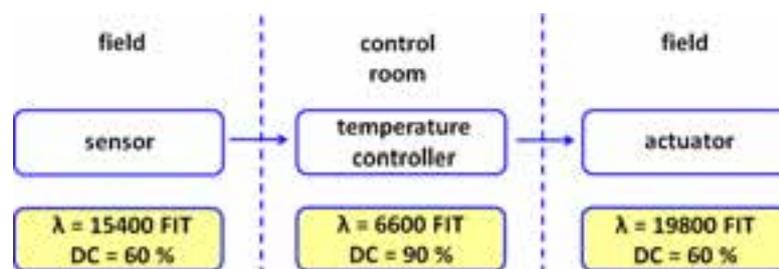


Figura 6. Diagramma a blocchi del SIS e ratei di guasto

I tassi di guasto sono espressi in FIT (Failure In Time), unità di misura che indica il numero di guasti atteso dopo un miliardo di ore di funzionamento. Essi sono importanti perché consentono di risalire alla PFD del SIS, vero obiettivo della seconda parte. Purtroppo, i tassi di guasto evidenziati in figura 6 non permettono la stima immediata della PFD del SIS. Occorre iniziare a distinguere i guasti sicuri da quelli pericolosi.

Un guasto è pericoloso se impedisce al SIS di portare a compimento con successo la missione che gli è stata affidata. Per semplicità, si concentri l'attenzione sul sensore di

temperatura PT100. Tale componente può essere affetto da una disconnessione interna, dovuta all'improvviso allentamento di un collegamento elettrico, oppure da un cortocircuito. Nel primo caso, il guasto è rilevato dal PLC sotto forma di "Fail Low", ossia nel collegamento fra sensore e PLC la corrente si porta al di sotto di 4 mA. Il cortocircuito è invece rilevato dal PLC sotto forma di "Fail High", e cioè nel collegamento fra sensore e PLC la corrente si porta improvvisamente al di sopra di 20 mA. Non vi è dubbio che entrambi i guasti esaminati sono pericolosi, perché impediscono il corretto funzionamento del sensore PT100. Entrambi i guasti, però, generano un segnale (Fail Low oppure Fail High) che consente al PLC di rilevare la situazione di avaria mediante l'esecuzione di "test di diagnostica" effettuati con cadenza regolare durante il funzionamento. Disconnessioni e cortocircuiti rientrano, pertanto, nel novero dei guasti pericolosi rilevati (Dangerous Detected).

Diverso è il caso della staratura che porta il sensore PT100 a rilevare una temperatura diversa da quella interna del reattore. Apparentemente, il sensore funziona correttamente e il PLC non è assolutamente in grado di rilevare la condizione di guasto. Tale situazione anomala potrà essere messa in luce solo attraverso l'esecuzione di "test manuali periodici (proof tests)", effettuati in occasione dei periodi di fermo dell'impianto. Questi test non devono essere confusi con i test diagnostici eseguiti dal PLC. Essi sono espressamente richiesti dalla norma IEC 61508 al fine di riportare i singoli componenti del SIS alla loro originaria funzionalità. In altri termini, la norma tecnica individua nei test manuali periodici l'unica arma di cui si dispone attualmente per contrastare efficacemente gli effetti nefasti del grande nemico dell'affidabilità di un sistema di sicurezza: il tempo. In conclusione, la staratura del sensore di temperatura rappresenta un esempio di guasto pericoloso non rilevato (Dangerous Undetected), particolarmente subdolo.

Non resta che esaminare il caso del guasto sicuro, ossia "non pericoloso", in linea con la definizione data poc'anzi. A tal fine, si supponga che il sensore di temperatura sia provvisto di display LCD retroilluminato. Se il display si rompe, di fatto impedisce all'operatore in campo la lettura del valore di temperatura all'interno del reattore. Ciò nonostante, il sensore continua a rilevare correttamente la temperatura interna del reattore, assicurando il funzionamento dell'intera catena di sicurezza. La rottura del display retroilluminato del sensore PT100 rappresenta un guasto sicuro che, in ogni caso, dovrà essere eliminato in occasione dei "test manuali periodici".

6. La Copertura Diagnostica (DC)

A questo punto, fra i guasti pericolosi, è necessario evidenziare quelli che sono rilevati dalla "copertura diagnostica".

La norma IEC 61508-2 definisce Diagnostic Coverage of dangerous failures (DC) la frazione, espressa in percentuale, fra il tasso dei guasti pericolosi rilevati dalla diagnostica interna λ_{DD} e il tasso totale dei guasti pericolosi λ_D :

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \quad (1)$$

Dalla (1) si deduce che:

$$\lambda_{DD} = \lambda_D \cdot DC \quad (2)$$

$$\text{Evidentemente } \lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (3)$$

dove λ_{DU} rappresenta il tasso dei guasti pericolosi non rilevati dalla diagnostica interna. In assenza di dati attendibili forniti dai fabbricanti, la norma IEC 61508-6 (Annex B, Table B.1) suggerisce di ritenere il tasso totale dei guasti pericolosi λ_D uguale al tasso totale dei guasti sicuri λ_S .

Ossia, in termini analitici: $\lambda_S = \lambda_D$.

$$\text{Poiché } \lambda = \lambda_S + \lambda_D \quad (4)$$

$$\text{segue che: } \lambda_S = \lambda_D = \frac{1}{2} \cdot \lambda \quad (5)$$

$$\text{Di conseguenza: } \lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2} \cdot DC \quad (6)$$

$$\text{Poiché dalla (3) si ricava che: } \lambda_{DU} = \lambda_D - \lambda_{DD}$$

$$\text{si ottiene: } \lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} \cdot DC$$

$$\text{In definitiva, si ha: } \lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} \cdot (1 - DC) \quad (7)$$

Nota il valore della Copertura Diagnostica (DC) per ciascun componente del SIS, le relazioni (6) e (7) consentono di risalire rispettivamente a λ_{DD} e a λ_{DU} , a partire dai ratei di guasto λ evidenziati in figura 6. I risultati ottenuti dal calcolo sono riassunti in tabella 2.

device	sensor	temp. controller	actuator
λ (FIT)	15400	6600	19800
λ_S (FIT)	7700	3300	9900
λ_D (FIT)	7700	3300	9900
DC (%)	60	90	60
λ_{DD} (FIT)	4620	2970	5940
λ_{DU} (FIT)	3080	330	3960

Tabella 2

7. Safe Failure Fraction (SFF)

La norma IEC 61508-2 definisce SFF (Safe Failure Fraction) la frazione, espressa in percentuale, che al numeratore presenta la somma dei “guasti sicuri” e dei “guasti pericolosi rilevati”, al denominatore il numero totale dei guasti:

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda_S + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}} \quad (8)$$

Più alto è il valore di SFF, minore è la probabilità di un “guasto pericoloso non rilevato” del sistema di sicurezza. Per esempio, un valore di SFF pari al 67%, indica che 33 guasti su 100 possono avere impatto sulla funzione di sicurezza affidata al SIS.

La norma IEC 61508-2 distingue tra componenti semplici e complessi. I primi sono componenti di “tipo A” e comprendono relè, resistori e transistor, le cui modalità di guasto sono state a lungo indagate e, allo stato attuale, risultano completamente note. I componenti di “tipo B” sono dispositivi “complessi”, contenenti componentistica elettronica e microprocessori. Per questi componenti e, in particolare, per il software di base che presiede al loro corretto funzionamento, è molto difficile prevedere tutte le modalità di guasto, molte delle quali sono ancora oggi oggetto di studio da parte degli specialisti del settore.

Con queste premesse, dopo aver provveduto a esprimere i ratei di guasto di tabella 2 in hr^{-1} (si veda in merito la tabella 3), si procede al calcolo del valore di SFF per ogni singolo

componente del SIS. I risultati ottenuti dal calcolo sono sinteticamente riportati nel sinottico di tabella 4.

device	sensor	temp. controller	actuator
λ_S (hr ⁻¹)	$7,70 \times 10^{-6}$	$3,30 \times 10^{-6}$	$9,90 \times 10^{-6}$
λ_{DD} (hr ⁻¹)	$4,62 \times 10^{-6}$	$2,97 \times 10^{-6}$	$5,94 \times 10^{-6}$
λ_{DU} (hr ⁻¹)	$3,08 \times 10^{-6}$	$3,30 \times 10^{-7}$	$3,96 \times 10^{-6}$

Tabella 3

device	sensor	temp. controller	actuator
type	A	B	A
SFF	0,80	0,95	0,80

Tabella 4

Un altro importante parametro introdotto dalla norma IEC 61508-2 è l'HFT (Hardware Fault Tolerance), idoneo a indicare l'abilità di un componente del SIS a eseguire la funzione di sicurezza richiesta, nonostante la presenza di guasti. Un'HFT pari a N indica che (N + 1) guasti possono causare la perdita della funzione di sicurezza. Ad esempio, un'HFT pari a 0 significa che un solo guasto può inficiare la funzione di sicurezza.

Ciò premesso, per comprendere appieno l'importanza dei parametri appena introdotti (SFF e HFT), è opportuno concentrare l'attenzione sulla tabella 5, di seguito riportata e interamente mutuata dalla norma IEC 61508-2.

SFF Safe Failure Fraction	HFT (type A device)		
	0	1	2
SFF < 60%	SIL1	SIL2	SIL3
60% ≤ SFF < 90%	SIL2	SIL3	SIL4
90% ≤ SFF < 99%	SIL3	SIL4	SIL4
99% ≤ SFF	SIL3	SIL4	SIL4

Tabella 5

Prendendo in esame il sensore di temperatura PT100 (componente semplice di tipo A; SFF compresa fra 60 % e 90 %), dalla tabella 5 si deduce con immediatezza che esso garantisce un SIL2 con un'HFT = 0, e cioè senza necessità di ridondanze. Il risultato conseguito può essere esteso all'attuatore finale e dimostra che il sensore PT100 è, di per sé, idoneo a essere inserito in un SIS al quale si richiede SIL2. Qualora, invece, l'SFF del sensore fosse risultata minore del 60%, il sensore avrebbe assicurato un SIL2 con un'HFT uguale a 1. Per comprendere il significato fisico di tale affermazione, si prenda nuovamente in esame la relazione (8):

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda_S + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}} \quad (8)$$

Tenendo conto che: $\lambda_s + \lambda_{DD} + \lambda_{DU} = \lambda$

(9)

la relazione (8) può essere così riproposta in questi termini:

$$SFF = \frac{\lambda - \lambda_{DU}}{\lambda} = 1 - \frac{\lambda_{DU}}{\lambda} \tag{10}$$

Al diminuire di SFF, ossia all'aumentare del rateo dei guasti pericolosi non rilevati λ_{DU} , l'esigenza di soddisfare un determinato SIL impone, al singolo componente del SIS, vincoli di architettura sempre più severi che, in pratica, si traducono in una o due ridondanze. Il concetto appena espresso è reso più chiaro dall'esame della figura 7.

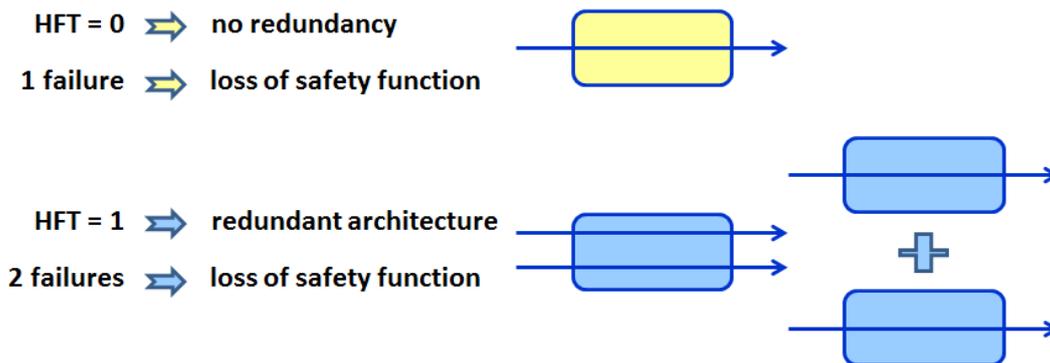


Figura 7

In definitiva, se per assurdo il sensore di temperatura PT100, provvisto di un solo canale di comunicazione con il controllore di temperatura, fosse caratterizzato da un'SFF minore del 60%, sarebbe inidoneo in partenza a essere inserito in un SIS al quale si richiede SIL2, come quello oggetto di studio.

Fatta questa precisazione, non resta che stabilire l'idoneità del controllore di temperatura a divenire parte integrante del SIS in esame. Allo scopo, si ricorda che il controllore è parte integrante di un PLC, che è riguardato dalla norma IEC 61508 come un componente complesso di "tipo B". Per componenti di questo tipo, la norma IEC 61508-2 propone la tabella 6, di seguito riportata.

SFF Safe Failure Fraction	HFT (type B device)		
	0	1	2
SFF < 60%	---	SIL1	SIL2
60% ≤ SFF < 90%	SIL1	SIL2	SIL3
90% ≤ SFF < 99%	SIL2	SIL3	SIL4
99% ≤ SFF	SIL3	SIL4	SIL4

Tabella 6

Il controllore di temperatura (componente complesso di tipo B; SFF compresa fra 90 % e 99 %), garantisce un SIL2 con un'HFT = 0, e cioè senza necessità di ridondanze. Ciò equivale a dire che il controllore di temperatura è, di per sé, idoneo a essere inserito in un SIS al quale si richiede SIL2.

8. Conclusioni

Il risultato ottenuto, durante i calcoli di progettazione della catena di sicurezza, prova che tutti i componenti del SIS hanno caratteristiche di affidabilità che corrispondono al SIL richiesto (SIL2). Non resta che verificare che l'intera catena di sicurezza, dal sensore all'attuatore finale, mantenga una PFD inferiore a 0,01 (si veda la tabella 1) fino al primo test manuale di controllo (manual proof test) che si prevede di eseguire, a impianto fermo, dopo un anno solare (8760 hr).

9. Bibliografia

- [1] De Lisio V., Nigri F.P. "Utilizzo di sistemi strumentali nell'esercizio di impianti di processo". *La Termotecnica*. Dicembre 2014; pagina 57.
- [2] De Lisio V., Nigri F.P. "Affidabilità di sistemi di sicurezza in impianti di processo". *SAFAP 2016*.
- [3] De Lisio V., Nigri F.P. "Sistemi di sicurezza: un'analisi basata sull'affidabilità". *Ambiente & Sicurezza sul Lavoro*. Marzo 2017; pagina 41.
- [4] De Lisio V., Nigri F.P., Pette S. "La sicurezza funzionale negli impianti industriali". *Ambiente & Sicurezza sul Lavoro*. Ottobre 2017; pagina 27.
- [5] IEC 61508-2.
- [6] IEC 61508-6.
- [7] IEC 61511-3.

Analisi SIL di un blocco di sicurezza di un generatore di vapore alimentato con combustibile solido non polverizzato

G. De Gennaro¹, F. P. Nigri¹, A. Nuzzo¹, E. Bruni², F. Leone²

¹ Inail - Uot di Bari

² IA.ING

Sommario

I Generatori di Vapore delle centrali termoelettriche a biomasse presentano aspetti peculiari rispetto alle centrali convenzionali a gas e a combustibili liquidi, sia nei riguardi del funzionamento, sia nei riguardi delle catene di sicurezza, legati soprattutto all'eterogeneità del combustibile e ai conseguenti pericoli insiti in esso, all'impiantistica di adduzione dello stesso, ai sistemi di estrazione delle ceneri ecc. Ciò si traduce in una particolare architettura di intervento delle catene di sicurezza, allorquando si verificano deviazioni dei parametri di processo.

Scopo del lavoro è la descrizione dell'analisi SIL (Safety Integrity Level) di uno dei numerosi blocchi di sicurezza di un generatore di vapore a biomasse solide, inserito nel ciclo di funzionamento di una centrale termoelettrica oggetto di verifica di messa in servizio, ai sensi dell'art. 4 del DM 329/04, da parte dell'Inail - Uot di Bari.

La valutazione del "SIL richiesto" dal blocco di sicurezza considerato viene eseguita utilizzando il metodo desunto dallo standard internazionale IEC 61511-3: il grafico del rischio (Risk Graph), inizialmente proposto da uno standard nazionale tedesco (DIN VDE 19250). Preso in esame il funzionamento del generatore, viene inizialmente valutato il rischio di processo e sono singolarmente analizzate le diverse "barriere di prevenzione", per poi stabilire le prestazioni della strumentazione di sicurezza, in termini di affidabilità e, quindi, di riduzione complessiva del rischio.

1. Introduzione

Rispetto alle centrali convenzionali, a gas e a combustibili liquidi, diversi sono gli aspetti di sicurezza oggetto di attenzione insiti nella tipologia di combustibile e nell'impiantistica tipo di una centrale termoelettrica a biomasse. In primis, l'eterogeneità del combustibile in termini di composizione, pezzatura, grado di umidità, potere calorifico, ecc. con le relative caratteristiche di pericolosità intrinseca (potenziale formarsi di polveri infiammabili in condizioni ambientali particolari) ed il relativo impianto di trattamento e adduzione dello stesso; ancora, i sistemi di estrazione delle ceneri, la dissipazione della potenza residua in camera di combustione allorquando intervengono sistemi di blocco, ecc. Di conseguenza, nell'architettura delle catene di sicurezza, anche i parametri di processo da controllare e gli attuatori finali (tipo blocco aria comburente e coclea di adduzione, dissipazione della potenza residua, ecc.) gestiti da DCS (distributed control system), assumono aspetti particolari per siffatti GV.

Nel presente lavoro non potendo, per brevità di trattazione, analizzare tutti i SIL (Safety Integrity Level) significativi di un GV nell'ambito di una centrale termoelettrica a biomasse, si analizza il SIL relativo al blocco per alta pressione nel corpo cilindrico superiore, come esempio di metodologia di approccio. Come noto il SIL è associato alla "Probability of Failure on Demand" (PFD), ossia alla probabilità di guasto mediata nel tempo intercorrente tra due ispezioni / verifiche successive del sistema strumentale di sicurezza. Ad esempio, secondo la norma IEC EN 61508, al SIL pari a 1 corrisponde un valore di PFD che ricade nell'intervallo $10^{-2} \leq PFD < 10^{-1}$.

La valutazione del “SIL richiesto” dal blocco di sicurezza considerato viene eseguita utilizzando il metodo desunto dallo standard internazionale IEC 61511-3: il grafico del rischio (Risk Graph), inizialmente proposto da uno standard nazionale tedesco (DIN VDE 19250).

L’IEC 61511-3, sviluppato come implementazione dell’IEC 61508 per l’industria di processo, in modo semplice e intuitivo, consente l’applicazione della c.d. “Risk Based Safety Analysis (RBSA)”, tecnica innovativa che studia le aspettative di funzionamento attese da parte di sistemi di mitigazione del rischio, chiamati a intervenire in condizioni di emergenza operativa o, comunque, di discostamento delle variabili di processo dal range ritenuto accettabile (Process Acceptable Range).

2. Il livello di Rischio Tollerabile

Principio fondamentale alla base dell’IEC 61511-3 consiste nel fatto che i diversi layers di mitigazione del rischio dell’apparecchiatura sotto controllo (EUC, Equipment Under Control) devono essere identificati solo dopo aver definito il livello di Rischio Tollerabile, soglia di rischio diversa da zero accettabile da un’organizzazione. Un rischio è considerato “tollerabile” se rispettoso, oltre nei riguardi della normativa tecnica vigente e dello stato dell’arte, anche dei “target propri” che l’organizzazione che l’azienda si prefigge legati ad esempio all’immagine e alla reputazione aziendale. L’Annex A della IEC 61511-3 definisce tale livello di rischio introducendo l’acronimo anglosassone “ALARP”, che sta per As Low As Reasonably Practicable. Il livello ALARP dipende da vari fattori, fra i quali spicca l’esigenza di protezione delle persone e dell’ambiente. Non di rado, però, intervengono altri fattori, riconducibili a problemi di ordine economico e di reputazione aziendale. Questo primo passo è fondamentale ed è alla base di tutta l’analisi di rischio che verrà eseguita con l’ausilio della metodologia del grafico del rischio. Tale metodologia è, ovviamente, una tecnica qualitativa intrisa di soggettività del valutatore / analizzatore.

Come già detto, di seguito si esamina il SIL relativo al blocco per alta pressione nel corpo cilindrico superiore. Sulla base di questa semplice informazione, occorre innanzitutto identificare le variabili di processo e le potenziali deviazioni pericolose.

EUC	variabile di processo	potenziale deviazione
corpo cilindrico superiore	livello	alto
		basso
	temperatura	alta
		bassa
	pressione	alta
		bassa

Tabella 1

Per ciascuna delle sei potenziali deviazioni individuate è possibile applicare l’analisi Lopa (Layers Of Protection Analysis). Tale analisi, una volta identificata la causa iniziatrix e la frequenza annua di accadimento dell’evento indesiderato, permette di valutare il contributo di tutti i livelli di mitigazione indipendenti (ad esempio, sistemi di controllo basico del processo, sistemi di allarme, valvole di sicurezza, ecc.), che contribuiscono a ridurre l’entità del rischio.

In questo caso, l’analisi LOPA consiglia inizialmente l’adozione di tre strati indipendenti di mitigazione del rischio:

- 1) un sistema di controllo basico del processo (BPCS);
- 2) un sistema di allarme di alta pressione;

3) una o più valvole di sicurezza (PSV).

Ciascuno di questi tre strati contribuisce a ridurre il rischio, derivante dall'alta pressione nel corpo cilindrico del generatore, di una quantità inversamente proporzionale alla sua Probabilità di Guasto su Richiesta (Probability of Failure on Demand, PFD). La PFD rappresenta la probabilità che il singolo strato non riesca ad adempiere al suo compito, ossia la probabilità che il "singolo layer" resti inattivo nell'istante in cui è chiamato a intervenire. L'analisi dell'esperienza operativa suggerisce, per il BPCS, il sistema di allarme e la PSV, un valore di PFD = 0,1. In altri termini, alla luce dell'esperienza pregressa, si ritiene plausibile l'ipotesi secondo la quale la PSV del corpo cilindrico può rimanere incollata mediamente una volta all'anno, ogni dieci richieste di intervento.

analisi SIL	
elemento strutturale	corpo cilindrico superiore
variabile di processo	pressione
potenziale deviazione	alta pressione
conseguenze	cedimento strutturale
cause	malfunzionamento valvola di presa vapore
	mancato intervento allarme di alta pressione
	mancato intervento PSV

Tabella 2

analisi SIL		
conseguenze	cedimento strutturale	decesso di più persone gravi danni al generatore

Tabella 3

analisi SIL		PFD
misure di mitigazione	valvola di presa vapore	0,1
	allarme di alta pressione	0,1
	PSV	0,1

Tabella 4

Nell'ipotesi di lavoro adottata, secondo la quale PFD = 0,1 per tutti i layers utilizzati, tutt'altro che lontana dalla realtà operativa di una centrale termoelettrica, ciascuna misura di mitigazione contribuisce a ridurre il rischio di processo di un fattore pari a 10.

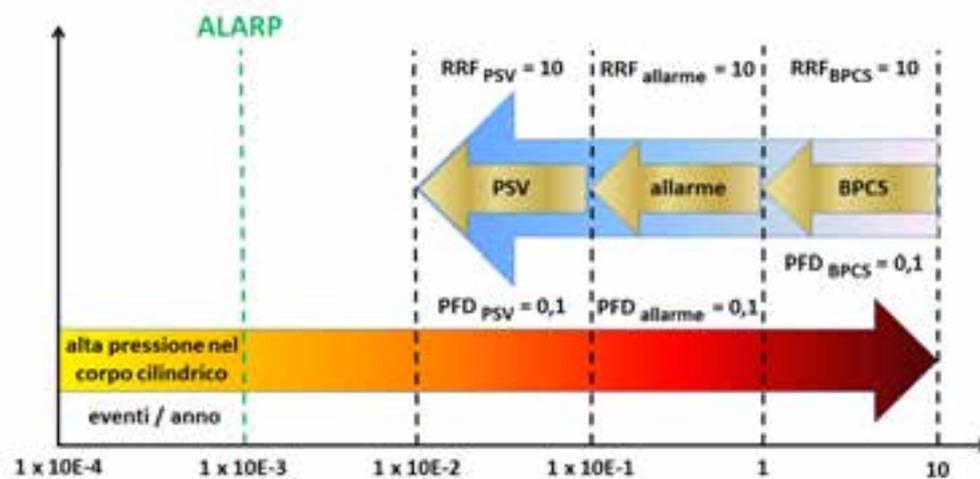


Figura 1

L'adozione di tre soli strati di mitigazione del rischio si rivela appropriato solo se la riduzione complessiva del rischio è tale da portare il rischio residuo al di sotto del livello ALARP. Diversamente, poiché ogni livello del rischio al di sopra del livello ALARP è intollerabile, occorre adottare un'ulteriore misura di mitigazione che, generalmente, consiste in un blocco di sicurezza, ossia in un sistema strumentale di sicurezza (Safety Instrumented System, SIS)

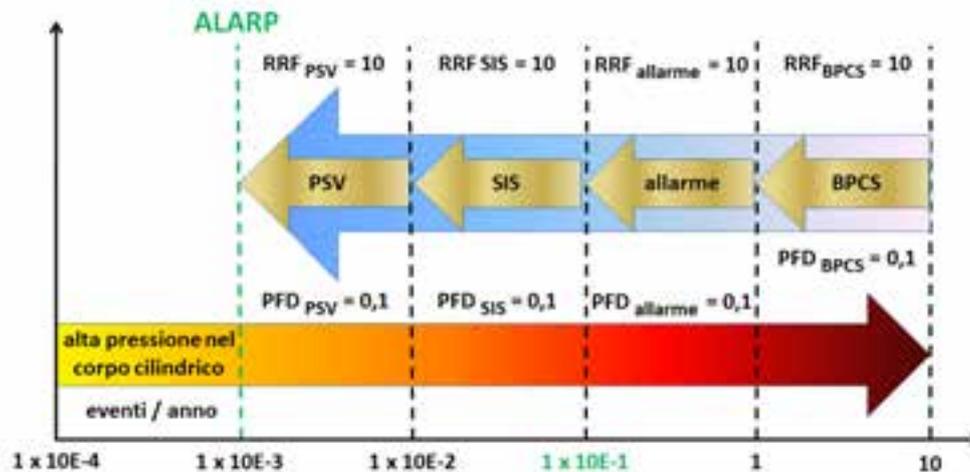


Figura 2

La figura 2 consente di valutare il contributo alla riduzione del rischio che si può attribuire ad ogni misura di mitigazione inserita nell'impianto: controllo base del processo (BPCS), del quale fa parte la valvola modulante di presa vapore del generatore, sistema di allarme e SIS. Il BPCS, il sistema di allarme e il SIS sono misure di prevenzione, a differenza della PSV che, invece, rientra fra le misure di protezione. Le misure di prevenzione contribuiscono alla riduzione del rischio di processo con una riduzione della frequenza annua di accadimento dell'evento indesiderato (aumento di pressione nel corpo cilindrico del generatore). Sulla base delle informazioni disponibili, tale frequenza passa da 10 volte all'anno a una volta all'anno in seguito all'intervento del BPCS; da una volta all'anno a 0,1 volte all'anno in seguito all'intervento del sistema di allarme. Pertanto, 0,1 volte all'anno è la massima frequenza annua di accadimento dell'evento indesiderato nell'istante in cui il SIS può essere chiamato a intervenire. Per comodità, i valori delle frequenze mitigate

dall'inserimento delle varie misure di mitigazione sono stati sinteticamente riportati in tabella 5, nella quale l'acronimo IPL sta per "Independent Protection Layer".

evento indesiderato	frequenza di accadimento iniziale [eventi/anno]	IPL1 (PFD = 0,1)	frequenza di accadimento mitigata da IPL1 [eventi/anno]	IPL2 (PFD = 0,1)	frequenza di accadimento mitigata da IPL1 + IPL2 [eventi/anno]
aumento di pressione	10	BPCS	1	sistema di allarme	0,1

Tabella 5

Prima di proseguire, è opportuno soffermarsi sul valore della frequenza di accadimento dell'evento indesiderato che è stato adottato per la definizione del livello di rischio ALARP. Come sostiene l'Health and Safety Executive Board del Regno Unito nel Reaserch Report N. 216, non esistono "limiti fissi" per la c.d. "regione di rischio ALARP". Tuttavia, 1×10^{-6} eventi all'anno è considerato un valore di frequenza cui corrisponde un livello di rischio ampiamente accettabile dalle società più avanzate. Tale valore identifica il limite inferiore della "regione di rischio ALARP". Il limite superiore di tale regione è più o meno variabile tra i vari settori di attività fra i quali spicca, per potenziale pericolosità, quello industriale. Comunemente, si ritiene che 1×10^{-3} eventi all'anno costituisca un valore di frequenza di accadimento dell'evento indesiderato, cui corrisponde un livello di rischio adeguato al settore dell'industria di processo. In definitiva, la regione Alarp rappresenta un campo di tollerabilità nel quale un'attività è permessa perché il rischio ad essa associato è tale da essere il più basso ragionevolmente praticabile in relazione allo sviluppo tecnologico. Al di sopra del limite superiore di questa regione, il rischio non può essere giustificato. Il limite inferiore della regione Alarp è il livello di rischio minimo (minimum risk level), al di sotto del quale si individua la regione del rischio largamente accettabile (broadly acceptable risk) nella quale il rischio è così basso che nessuna ulteriore riduzione del rischio è giudicata efficiente se posta in relazione alle spese che è necessario affrontare.

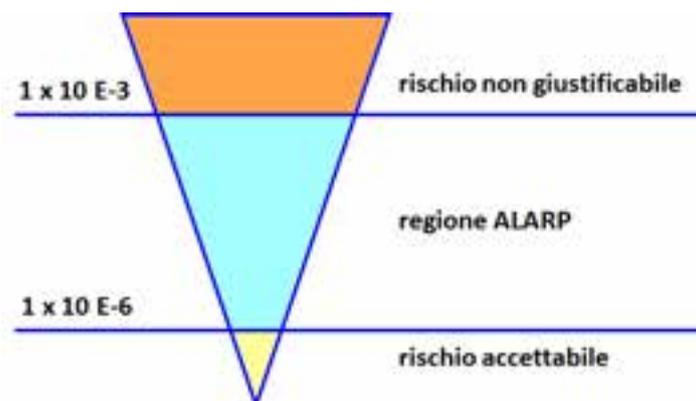


Figura 3

3. Il sistema strumentale di sicurezza (SIS)

È fondamentale analizzare i singoli componenti del SIS, il cui comportamento è strettamente correlato al funzionamento del generatore di vapore. Il generatore è alimentato da combustibile solido non polverizzato derivante da biomassa, ossia dalla frazione biodegradabile di residui di natura biologica provenienti dall'agricoltura. Il sistema di caricamento del combustibile trasporta automaticamente il cippato dal serbatoio di stoccaggio alla tramoggia di alimentazione. A seconda della produzione di vapore richiesta, il combustibile viene disteso in strati più o meno spessi su una griglia rotante. L'aria comburente viene insufflata al disotto della griglia, attraverso opportune aperture laterali, da un ventilatore di elevata potenza. Il generatore in esame può essere, pertanto, classificato come un generatore a tubi d'acqua fornito di focolare meccanico e sistema di adduzione meccanica dell'aria comburente.

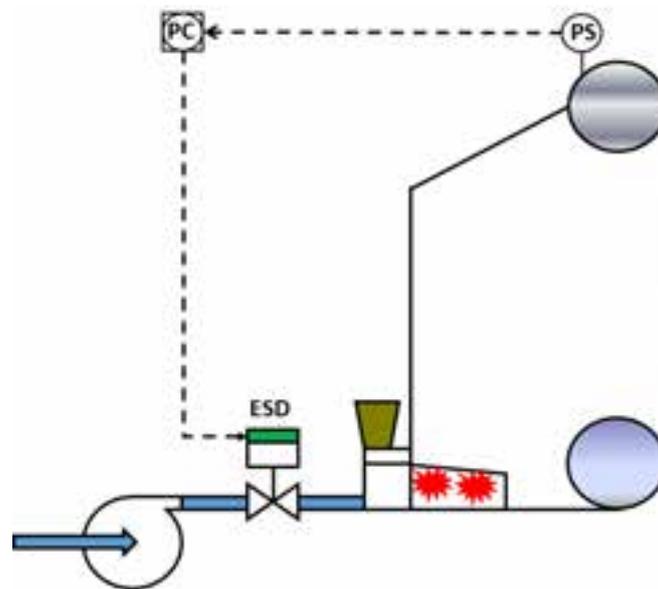


Figura 4

Il generatore è provvisto di:

- 1) sistema di allarme per alta pressione, che interviene al raggiungimento di una pressione superiore di pochi bar a quella che rappresenta il limite superiore del PAR (Process Acceptable Range);
- 2) sistema di arresto dell'immissione dell'aria comburente nel generatore, in seguito verificarsi di condizioni di alta pressione nel corpo cilindrico superiore. Tale sistema, che si identifica con il SIS, è costituito da:
 - a. un sensore di pressione PS, inserito nel corpo cilindrico superiore del generatore;
 - b. un controllore di pressione PC, parte integrante di un PLC inserito in un quadro elettrico ubicato in sala controllo;
 - c. una valvola di blocco ESD, idonea a comandare automaticamente la chiusura del condotto di aerazione del generatore al raggiungimento di una pressione di qualche bar superiore a quella che determina l'intervento del sistema di allarme.

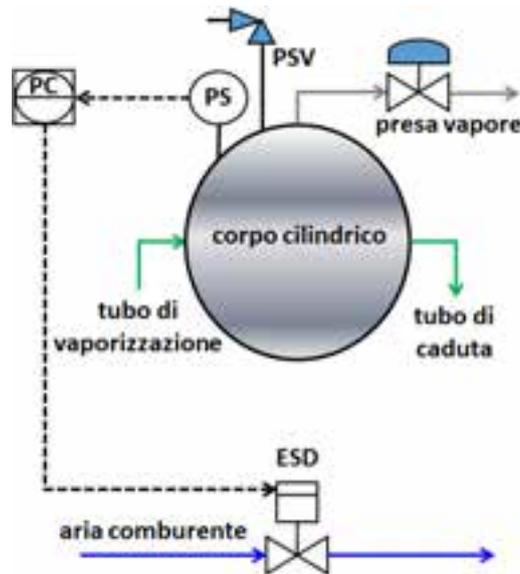


Figura 5

3.1 Il grafico del rischio (Risk Graph)

Si hanno a disposizione diversi strumenti per assegnare il SIL (Safety Integrity Level) alla funzione di sicurezza (SIF) presa in esame. In questa sede, si preferisce adottare il metodo proposto dalla IEC 61511-3: il grafico del rischio. Il metodo utilizzato parte dalla gravità del danno (C) e giunge a stimare il SIL dopo un percorso obbligato che consiste nella valutazione dei seguenti tre fattori:

- 1) grado di esposizione delle persone al pericolo (F);
- 2) probabilità di evitare l'accadimento dell'evento indesiderato (P), prima che il SIS cominci a intervenire;
- 3) frequenza annua di accadimento dell'evento indesiderato (w), mitigata dalle barriere di prevenzione che precedono l'intervento del SIS. Nel caso in esame, tali barriere si identificano con:
 - a. il BPCS, del quale fa parte la valvola di presa vapore,
 - b. il sistema di allarme per alta pressione nel corpo cilindrico superiore del generatore.

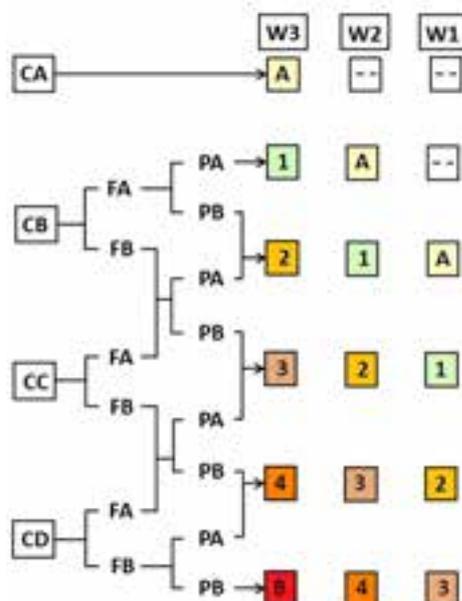


Figura 6

Nel grafico della IEC 61511-3, i simboli hanno il seguente significato:

- 1) la lettera B indica un rischio così elevato da non poter essere tenuto sotto controllo con l'adozione di una singola funzione di sicurezza (SIF);
- 2) la lettera A indica un rischio tanto basso da non richiedere alcuna particolare funzione di sicurezza;
- 3) i numeri interi, da uno a quattro, indicano i diversi livelli di integrità (SIL) richiesti dalla funzione di sicurezza in esame.

Le tabelle 6 e 7, di seguito riportate, integrano il grafico della IEC 61511-3 e facilitano la sua applicazione al caso in esame.

gravità del danno	C_A	danni minori
	C_B	danni irreversibili
	C_C	decesso di una persona
	C_D	decesso di più persone

Tabella 6

frequenza annua di accadimento dell'evento indesiderato (eventi/anno)	w3	$1 \leq w < 10$
	w2	$0,1 \leq w < 1$
	w1	$w < 0,1$

Tabella 7

La tabella 8 è incompleta e lascia intendere che la stima del SIL può essere effettuata, con l'uso del grafico del rischio, solo dopo aver provveduto a valutare:

- 1) il parametro F (grado di esposizione delle persone al pericolo);
- 3) il parametro P (probabilità di evitare l'accadimento dell'evento indesiderato).

gravità del danno	C_D	decesso di più persone
esposizione al pericolo	F	?
probabilità di evitare l'evento indesiderato	P	?
frequenza annua di accadimento (eventi/anno)	w1	< 0,1

Tabella 8

Prima di procedere alla stima dei parametri citati, è necessario adattare il grafico di figura 6 al caso esaminato. Ciò al fine di garantire la coerenza dell'analisi di rischio che è finalizzata alla valutazione del SIL (analisi SIL). Questo passo è fondamentale in quanto è alla base delle valutazioni che saranno effettuate nel seguito.

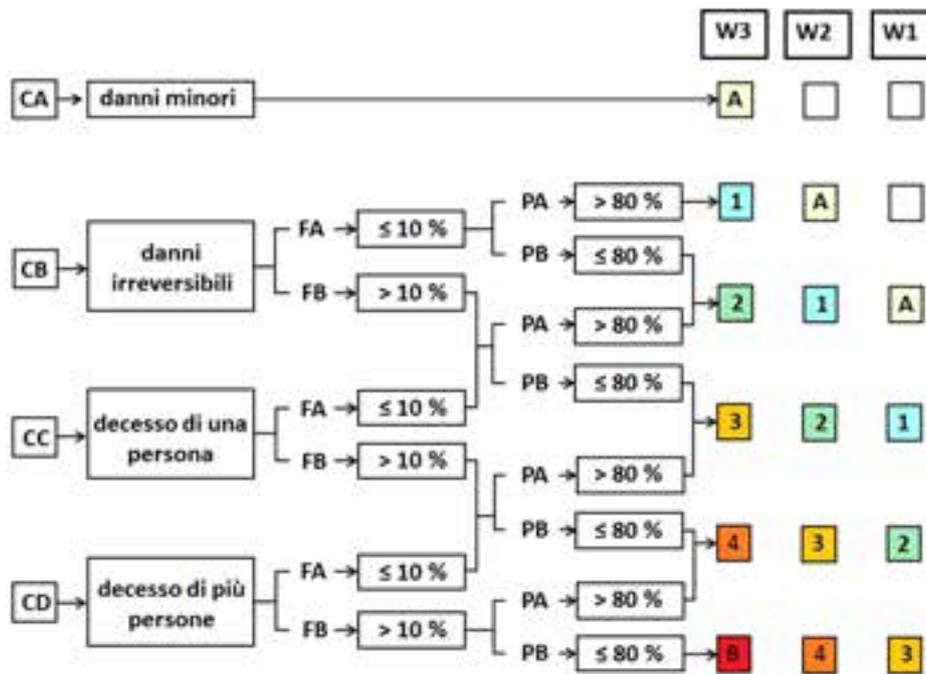


Figura 7

3.2 Valutazione del parametro F (grado di esposizione al pericolo)

Si prendono contemporaneamente in considerazione:

- 1) il numero delle persone che possono stazionare nelle adiacenze del generatore e sono quindi potenzialmente esposte al pericolo derivante dallo scoppio del corpo cilindrico;
- 2) la percentuale annua di ore lavorative (T) che il personale sopra indicato spende mediamente nelle immediate vicinanze del generatore.

I risultati ottenuti sono riportati nel sinottico sottostante.

	corpo cilindrico superiore	edificio che ospita il generatore	area interna della centrale	ambiente esterno
tecnici di manutenzione (3 persone/turno)	T ≤ 1%	T ≤ 2%	T ≤ 97%	non rilevante
tecnico di sala controllo (1 persona/turno)	non ammessi	T ≤ 0,1%	T ≤ 99,9%	non rilevante
tecnico di logistica e approvvigionamento (1 persona)	non ammessi	T ≤ 0,1%	T ≤ 9,99%	non rilevante
ispettori (tipicamente 2 persone)	T ≤ 0,01%	T ≤ 0,01%	T ≤ 0,03%	T ≤ 99,95%
visitatori (massimo 3 persone)	non ammessi	non ammessi	T ≤ 0,05%	T ≤ 99,95%
popolazione	non ammessa	non ammessa	non ammessa	T ≤ 100%

Tabella 9

Dall'analisi dei risultati, riportati in forma tabellare, si evince che è lecito assumere per il parametro F il valore FA ≤ 10%.

3.3 Valutazione del parametro P (probabilità di evitare l'accadimento dell'evento indesiderato)

Si prende inizialmente in considerazione l'albero degli eventi (event tree), relativo al caso in esame.

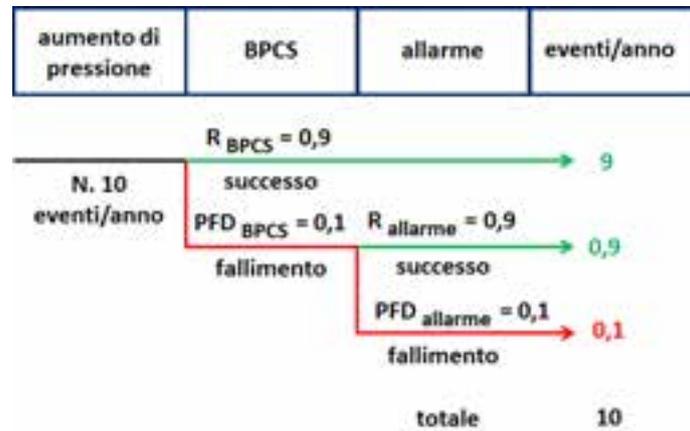


Figura 8

Dall'albero degli eventi si deduce che:

- 1) 9 volte su 10 in un anno, l'aumento di pressione nel corpo cilindrico viene efficacemente contrastato dall'intervento del BPCS;
- 2) in caso di fallimento del BPCS, 0,9 volte su 10 in un anno, l'aumento di pressione nel corpo cilindrico viene interrotto dall'intervento del sistema di allarme;
- 3) solo 0,1 volte su 10 in un anno, entrambe le misure di prevenzione innanzi citate si rivelano inefficaci, per cui la pressione interna del corpo cilindrico continua ad aumentare.

In definitiva, 9,9 volte su 10 in un anno, le barriere adottate intervengono con efficacia. Questa semplice considerazione dovrebbe spingere ad adottare, per il parametro P, il valore $PA > 80\%$. Al fine di avvalorare la conclusione raggiunta, risulta opportuno ragionare in termini di affidabilità. A tale scopo, si concentra l'attenzione sul BPCS, che è caratterizzato da una $PFD = 0,1$, ossia da un grado di inaffidabilità uguale al 10%. Il complemento a 100 di tale grado di inaffidabilità, ossia il 90%, rappresenta il livello di affidabilità del BPCS. Il risultato ottenuto con questo ragionamento elementare si può estendere al sistema di allarme. La catena di sicurezza comprendente il BPCS e il sistema di allarme è, dunque, costituita da due elementi, ciascuno caratterizzato da livello di affidabilità uguale al 90% dopo un anno di funzionamento. Quanto esposto risulta più chiaro se si considera la figura 9.

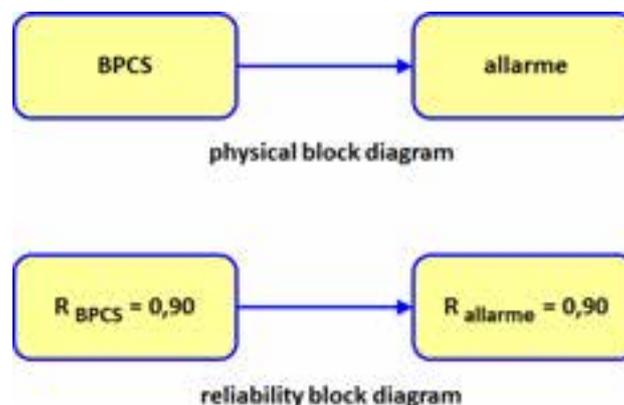


Figura 9

L'affidabilità complessiva della catena di sicurezza di figura 9 è data dal prodotto delle affidabilità dei singoli componenti [2]:

$$R_{chain} = R_{BPCS} \times R_{allarme} \tag{1}$$

$$R_{chain} = 0,9 \times 0,9 = 0,81 \tag{2}$$

$$R_{chain} = 81\% \tag{3}$$

Poiché l'affidabilità della catena di sicurezza è una misura della capacità della catena a contrastare l'accadimento dell'evento indesiderato, il risultato evidenziato dalla (3) giustifica pienamente il fatto che si assuma, per il parametro P, il valore $PA > 80\%$. A questo punto, la tabella 8 può essere completata come segue.

gravità del danno	C_D	decesso di più persone
esposizione al pericolo	F_A	$\leq 10\%$
probabilità di evitare l'evento indesiderato	P_A	$> 80\%$
frequenza annua di accadimento (eventi/anno)	w1	$< 0,1$

Tabella 10

3.4 Valutazione del SIL (SIL allocation)

In possesso dei dati ricavati, il grafico del rischio consente con immediatezza la valutazione del SIL, step conclusivo dell'analisi effettuata: allo scopo, procedendo da sinistra verso destra, è sufficiente seguire il percorso indicato in figura 10 dai riquadri in rosso, incrociando opportunamente il valore di SIL che corrisponde a w1. In definitiva, si ricava che il SIL richiesto dal blocco di sicurezza esaminato (required SIL) è uguale a 1.

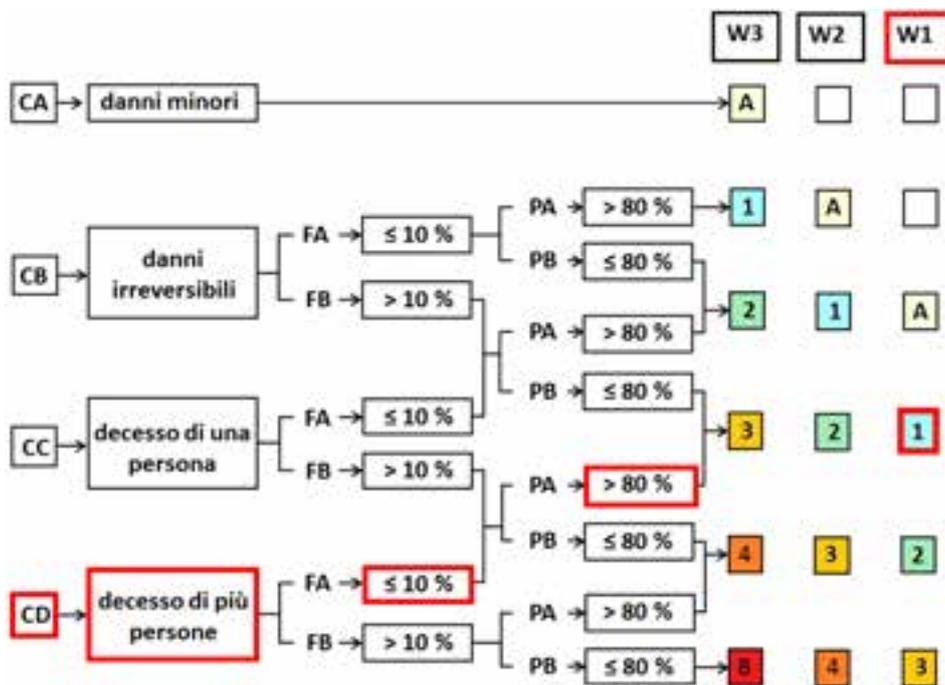


Figura 10

4. Conclusioni

Lo spirito e l'approccio adottato nelle valutazioni sin qui trattate, collima con l'approccio probabilistico sancito dalla direttiva 2014/68/UE, nota come PED, riguardo l'affidabilità ed efficacia dei sistemi SRMCR (Safety Related Measurement Control and Regulation System).

Con riferimento all'impianto oggetto di studio, si può concludere che l'assunzione del SIL pari a 1, avendo valutato una "Probability of Failure on Demand" compresa tra $10^{-2} \leq PFD < 10^{-1}$, è congruente con il "livello di rischio tollerabile", ossia del target di sicurezza che l'organizzazione aziendale si è prefissato, funzione anche dell'efficacia del sistema di gestione della sicurezza aziendale (manutenzioni, ispezioni, verifiche, ecc.).

Ovviamente, il fallimento della richiesta di intervento della sicurezza strumentale per alta pressione nel corpo cilindrico, non corrisponde per il caso in esame al TOP EVENT "esplosione per alta pressione", in quanto va considerato l'intervento degli organi meccanici contro la sovrappressione rappresentato dalle valvole di sicurezza; la probabilità pertanto del verificarsi del citato fallimento del sistema strumentale, va moltiplicata con la probabilità della mancata apertura delle PSV.

Bibliografia

[1] IEC 61511-3.

[2] De Lisio V., Nigri F.P. "Sistemi di sicurezza: un'analisi basata sull'affidabilità". *Ambiente & Sicurezza sul Lavoro*. Marzo 2017; pagina 41.

Valutazione della vita residua di due generatori di vapore di età superiore a 45 anni

M. Oss¹, R. Longo², L. Battello³

¹ Inail - Uot di Bolzano

² Inail - Uot di Catanzaro

³ Studio Tecnico Battello

Sommario

L'Ancc (Associazione Nazionale Controllo Combustione) già dal 1957 si preoccupò della necessità di valutare lo stato di conservazione dei generatori di vapore entro il quarantacinquesimo anno d'età.

Il problema è stato affrontato successivamente dall'Ispesl (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro) che, con la circolare n. 60/97, ha definito le modalità amministrative e tecniche per ottenere l'estensione dell'esercizio dei generatori oltre questo limite.

Nel presente lavoro vogliamo riferire dell'esperienza svolta nell'applicazione di tale circolare all'estensione dell'esercizio di un generatore di vapore di un Presidio Ospedaliero dell'Alto Adige e confrontare le metodologie di ispezione ivi utilizzate con quelle adottate per la valutazione dello stato di conservazione di un generatore di vapore simile installato presso una ditta della provincia di Milano.

1. La circolare Ispesl n. 60/97

Con Circolare n. 7367 del 21 agosto 1957, l'allora Ancc, impose per i generatori di vapore entro il 45° anno di età la revisione della pressione di bollo e la verifica del loro presunto degrado. Ricordiamo infatti che i generatori di inizio del '900 venivano costruiti in assenza di conoscenze specifiche sul degrado dei materiali in esercizio, né di conoscenze approfondite sul trattamento dell'acqua di alimento che creava sia formazione di depositi isolanti sulle superfici di scambio termico, fonte di pericolosi surriscaldamenti localizzati, sia corrosioni ed attacchi acidi sulle superfici metalliche.

Grazie all'esperienza acquisita nei successivi quaranta anni, la Circolare del 1957 è stata aggiornata e sostituita dall'ex Ispesl con la Circolare n. 60 del 14 luglio 1997 [1], che è attualmente in vigore. L'oggetto della circolare specifica che la sua applicazione riguarda i generatori di vapore "in situ" non soggetti a trasferimento per nuovo impianto.

Al fine di poter esercire il generatore oltre i 45 anni, il proprietario deve farne richiesta all'Uot dell'Inail di competenza.

La richiesta deve essere presentata in marca da bollo e deve contenere una proposta di piano di controlli cui sottoporre l'attrezzatura per verificarne lo stato. Per poter ricostruire correttamente la storia del generatore di vapore, con particolare riguardo alle eventuali riparazioni subite, è necessario allegare anche tutti i verbali delle verifiche periodiche cui è stata sottoposta l'attrezzatura. Inoltre è necessario allegare il libretto di costruzione rilasciato dall'Ancc (l'Ispesl è diventato operativo dal 1 gennaio 1983).

1.1 Il piano dei controlli

Il piano deve essere sottoscritto da un "tecnico qualificato secondo le disposizioni vigenti". In base alla giurisprudenza corrente ed alle regolamentazioni degli ordini professionali [3] per tecnico qualificato nel settore degli apparecchi a pressione è da intendersi un perito industriale o un ingegnere dotati di esperienza professionale nel settore e/o di attestati di qualifica specifica rilasciati da Enti specializzati (esempio tipico sono i corsi tenuti

dall'Istituto Italiano di Saldatura). La norma UNI 11706 [2] dà un contributo fondamentale nella scelta del tecnico qualificato in quanto al paragrafo 4.1 chiarisce che è necessario avere *“almeno cinque anni di esperienza documentata nella valutazione di stabilità di componenti in esercizio e di verifiche di progetto ed esercizio di attrezzature a pressione”*.

Nel piano dei controlli è necessario riportare almeno i seguenti dati:

- indicazione delle parti del generatore più sollecitate in esercizio;
- posizione dei punti o delle zone da controllare, anche a mezzo di apposito disegno;
- numero e tipologia dei controlli da eseguire per ogni punto o zona.

I controlli previsti dalla Circolare 60/1997, non cogenti ma considerati utili al fine di valutare lo stato di conservazione sono:

- analisi chimica su trucioli o limature del materiale costituente il generatore, allo scopo di verificare l'eventuale presenza di elementi infragilizzanti oppure per appurare la tipologia del materiale qualora fossero andati persi gli allegati tecnici al libretto di costruzione del generatore;
- micrografie per replica morfologica al fine di evidenziare cricche, fenomeni di danneggiamento o altre anomalie metallurgiche;
- esami con metodi non distruttivi per determinare lo spessore delle membrane;
- esami con metodi non distruttivi per l'individuazione di eventuali difetti;
- misure di durezza sulle membrane più critiche e più sollecitate.

Il piano dei controlli viene valutato da un tecnico dell'Unità Operativa Territoriale dell'Inail a seguito di un sopralluogo durante il quale vengono esaminate le membrane internamente ed esternamente. Tenendo anche conto della storia del generatore, desunta dai precedenti verbali di verifica, il tecnico dell'Uot può prescrivere ulteriori controlli.

1.2 L'autorizzazione al prolungamento della vita del generatore

Completati i controlli, il generatore viene sottoposto a visita interna, prova idraulica e prova a caldo. Se le prove hanno esito positivo viene rilasciata dall'INAIL autorizzazione all'ulteriore esercizio con l'indicazione del numero di anni entro i quali dovrà essere sottoposto di nuovo ai controlli per un eventuale ulteriore periodo di esercizio. Il generatore nel ricevere l'autorizzazione all'ulteriore esercizio può anche subire un declassamento della pressione di bollo.

2. La norma UNI 11706

La già citata norma UNI 11706: *“Attrezzature a pressione - Valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione a seguito del degrado strutturale e metallurgico da esercizio dei materiali”* è stata adottata il 29 marzo 2018. Sulle modalità di svolgimento dell'attività di prolungamento della vita del generatore non contiene aspetti innovativi rispetto alla Circolare IspeSl n. 60/1997, che rimane un riferimento obbligatorio per i proprietari di generatori di vapore, ma introduce due punti tecnici molto importanti oltre a definire i requisiti professionali del valutatore: i 45 anni di età non oltre i quali bisogna fare la valutazione vengono ridotti a 40; viene raccomandata l'esecuzione di un'analisi preliminare per l'individuazione dei meccanismi di danno entro i 10 anni, in corrispondenza della prima verifica di integrità decennale. E per agevolare quest'ultimo compito, nell'allegato A vengono elencati tutti i possibili meccanismi di danno. Nell'allegato B sono presentati degli esempi molto utili di come redigere la relazione tecnica.

3. Il generatore di vapore di un ospedale dell'Alto Adige

3.1 La documentazione presente

Il generatore di vapore oggetto dell'attività di autorizzazione è una caldaia multitubolare uniblock costruita dalle Officine di Seveso SpA nel 1971, superficie totale di scambio termico 220 m², potenzialità 8 t/h, pressione di bollo 20 Kg/cm², temperatura vapore saturo 213 °C, volume complessivo, ripartito tra corpo superiore, corpo inferiore e fascio tubiero, pari a 7850 litri. E' dotato di libretto originale di costruzione rilasciato dall'Ancc di Milano dal quale si evincono tutti i materiali utilizzati con i relativi spessori delle membrature. Sono inoltre presenti tutti i verbali di verifica subiti dal generatore dall'installazione in poi. La conservazione di tali documenti è fondamentale per la valutazione della possibilità di prolungare la vita del generatore, potendone ricostruire l'intera storia.

3.2 La storia del generatore

Il generatore di vapore ha subito la prova idraulica di costruzione in data 11/06/1971 ed è rimasto inutilizzato fino al settembre 1973, come si evince dalla comunicazione dell'Ospedale in data 01/12/1971 e dal verbale di visita interna del 20/09/1973 eseguita su richiesta di messa in servizio da parte dell'utente. Il 24/09/1973 veniva eseguita la prova idraulica di installazione alla pressione di 25 kg/cm², mentre la prova a caldo veniva eseguita solo il 07/10/1974 in quanto il generatore non era ancora stato messo in servizio. Questo dato si evince da un verbale di sopralluogo a vuoto del 29/05/1974 in cui senza alcuna spiegazione compare una pressione di bollo di 15 kg/cm² anziché di 20 kg/cm² come nei precedenti due verbali del settembre 1973. Questo valore della pressione di bollo sarà ripetuto, sempre inspiegabilmente, in tutti gli altri verbali successivi, di fatto declassificando tacitamente la pressione di bollo del generatore. Nel verbale di visita interna del 29/11/74 per la prima volta vengono evidenziate delle *"leggere corrosioni sparse"* nel corpo cilindrico inferiore *"che allo stato non si ritengono pericolose"*. Tali corrosioni vengono citate in quasi tutti i successivi verbali di visita interna, ma sempre senza dar luogo a preoccupazione riguardo alla stabilità del generatore. Nel verbale di visita interna del 21/07/87 viene invece evidenziata la necessità di ritoccare il rivestimento refrattario del pavimento della camera di combustione. In occasione della prova idraulica decennale del 03/11/98 si evidenziano due tubi con corrosione passante sul cielo della camera di combustione. A causa dell'urgenza di riavviare il generatore di vapore, l'Ente di controllo, Provincia Autonoma di Bolzano, autorizza l'eliminazione dei due tubi con l'apposizione di idonei tappi. L'operazione viene eseguita da ditta specializzata ed il generatore riprende a funzionare a seguito di prova idraulica eseguita il 06/11/98. La stessa tipologia di intervento viene eseguita nel mese di maggio 2002 a causa di un tubo che evidenzia una foratura nella parte del cielo della camera di combustione ed un altro con foratura nella parte formante la parete destra della camera di combustione. Con la prova idraulica del 06/06/2002 si approva il lavoro di chiusura mediante tappi dei due tubi, ma nella successiva visita interna del 24/05/2005 si riscontrano cricche, non pericolose per la stabilità, sul bordo di 8 tubi, 4 nel corpo cilindrico inferiore e 4 in quello superiore (verbalizzate anche nelle successive visite interne), e si contesta il non rispetto della procedura approvata per il taglio, e relativa apposizione di tappi dei due tubi nel 2002. Nella visita interna del 05/09/2006 si evidenziano per la prima volta vaiolature nel corpo cilindrico superiore, riportate anche nei verbali del 20/05/2008 in occasione del quale i tubi con il bordo criccato diventano 10, per diventare 11 con la visita interna del 01/06/2010. In occasione della visita interna del 30/05/2012 si nota in camera di combustione un tubo rotto leggermente incurvato, che viene accecato. Nel verbale di visita interna del 22/03/2016 il verificatore oltre ad evidenziare i difetti già presenti nei verbali precedenti,

invita il proprietario, considerata l'età del generatore, ad eseguire i controlli previsti dalla Circolare ISPEL n. 60/97 per poter proseguire l'esercizio del generatore.

Dalla ricostruzione della storia del generatore si nota lo scrupolo con cui lo stesso è stato sottoposto alle verifiche periodiche da parte del datore di lavoro e l'importanza della professionalità dei verificatori succedutisi negli anni. E' infatti grazie a tali controlli ed alla loro annotazione puntuale che il datore ha potuto tenere sotto controllo la stabilità del generatore ed avviare tempestivamente la pratica prevista dalla Circolare n. 60/97.

3.3 Il piano dei controlli

A causa dell'impossibilità di rimuovere la coibentazione si è reso necessario eseguire i controlli non distruttivi solo dall'interno. I controlli proposti sono stati i seguenti:

- a) per i corpi cilindrici
 - esame visivo completo dall'interno dei due corpi cilindrici con particolare attenzione ai punti critici segnalati in occasione delle verifiche periodiche precedenti;
 - prelievo trucioli con analisi chimica in laboratorio, per la determinazione degli elementi fragilizzanti, in corrispondenza della saldatura fondo/fasciame e, se presenti zone di sufficiente sovrappessore, anche da fasciame e fondo del corpo cilindrico superiore;
 - esame metallurgico per replica all'interno dei corpi cilindrici da individuare a seguito di esame visivo;
 - prove di durezza nelle stesse zone dell'esame metallurgico;
 - controllo magnetoscopico delle saldature nelle zone accessibili dall'interno, delle saldature di riparazione e dei tubi con rotture longitudinali all'imbocco;
 - rilievo spessimetrico ad ultrasuoni;
- b) per la camera di combustione
 - esame visivo completo;
 - esame spessimetrico ultrasonoro dei tubi in camera di combustione nelle zone individuate all'esame visivo come più deteriorate.

3.4 L'effettuazione dei sopralluoghi e l'esecuzione dei controlli

I controlli, eseguiti da ditta specializzata, si sono svolti in quattro giornate, con tre sopralluoghi da parte dell'UOT di Bolzano in occasione dei quali sono state evidenziate e discusse insieme alla ditta le seguenti criticità:

- sono state esaminate con attenzione alcune zone segnalate nei precedenti verbali di verifica, ubicate nella parte inferiore del corpo cilindrico inferiore;
- sono state individuate 12 tubazioni da indagare con maggiore attenzione, con particolare riferimento ai bordi lesionati di due tubazioni;
- per l'effettuazione degli esami spessimetrici il corpo cilindrico superiore è stato suddiviso in 8 generatrici ed 11 sezioni (distanziate di circa 400 mm), quello inferiore in 4 generatrici e 7 sezioni (distanziate di circa 600 mm). I primi rilievi hanno evidenziato lungo la generatrice inferiore del corpo cilindrico inferiore uno spessore variabile da 15.0 mm a 16.1 mm, valore inferiore allo spessore nominale da disegno pari a 17.5 mm, mentre sulle generatrici laterali lo spessore variava da 17.3 mm a 19.2 mm e addirittura sulla generatrice superiore da 19.4 mm a 21.6 mm. A seguito di tali risultati si prescriveva alla ditta di eseguire ulteriori controlli lungo altre generatrici tra C e D e tra C e B (figura 1) distanti tra loro 100 mm, allo scopo di verificare in maniera più puntuale l'andamento degli spessori nella zona inferiore del corpo cilindrico;

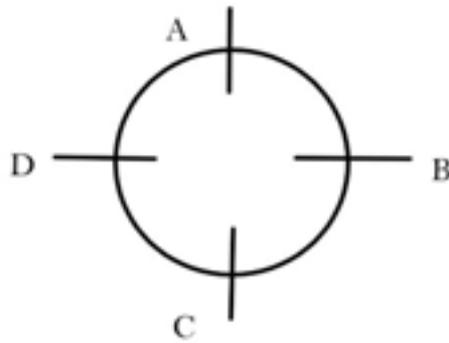


Figura 1. Generatrici corpo cilindrico inferiore

- si sono prescritti esami ultrasonori sul bocchello di uscita del vapore essendo particolarmente ossidato (figura 2).



Figura 2. Bocchello di uscita del vapore

3.5 I risultati dei controlli

3.5.1 Esame visivo

L'esame visivo ha evidenziato in particolare:

- il refrattario all'imbocco del passo d'uomo danneggiato;
- la particolare ossidazione del bocchello di uscita vapore;
- ossidazione sul fondo per tutta la lunghezza del corpo cilindrico inferiore. L'ossido è stato eliminato facilmente mediante spazzolatura;
- tre tubi col bordo rotto nel corpo cilindrico inferiore e cinque in quello superiore;
- una zona con riduzione dello spessore di materiale nel corpo cilindrico inferiore di dimensioni 1800 mm x 230 mm;
- porosità sulla superficie della saldatura circonferenziale tra il fondo col passo d'uomo ed il fasciame del corpo cilindrico inferiore, sicuramente risalenti al procedimento di saldatura originario.

3.5.2 Analisi sui trucioli

L'analisi chimica sui trucioli prelevati sul fasciame e sulla saldatura circonferenziale fondo/fasciame del corpo cilindrico superiore non ha evidenziato particolari anomalie circa la presenza di elementi fragilizzanti.

3.5.3 Esame metallografico per replica e durezza

Tutti i metalli di base delle posizioni esaminate (saldature fasciame/fondo con passo d'uomo dei due corpi cilindrici, saldatura longitudinale del fasciame del corpo cilindrico superiore) hanno evidenziato microstrutture costituite da grani fini di ferrite e piccoli blocchi di perlite compatti, senza visibili fenomeni di degrado dei microcostituenti. Le zone termicamente alterate e le zone fuse sono caratterizzate da prodotti intermedi di trasformazione del tipo bainite e ferrite con assenza di cricche e di strutture fragili.

Le prove di durezza eseguite negli stessi punti sono in linea con quelli tipici dei materiali costituenti i corpi cilindrici.

3.5.4 Controlli magnetoscopici

I controlli magnetoscopici hanno permesso di indagare i punti critici riscontrati con l'esame visivo, oltre quelli indicati nel piano dei controlli, senza evidenziare particolari problematiche, in particolare in corrispondenza dei bordi rotti dei tubi sopra indicati.

3.5.5 Controlli spessimetrici

I controlli spessimetrici, integrati nei punti precedentemente descritti, hanno messo in evidenza la presenza nel corpo cilindrico inferiore di uno spessore del fasciame (15.0 mm) inferiore a quello di progetto (17.5 mm). E' stato pertanto eseguito il calcolo dello spessore minimo secondo le regole della Raccolta VSG per la pressione di progetto di 20 kg/cm² e per una pressione di prova idraulica di 25 bar. Lo spessore minimo è risultato pari a 11.24 mm verificando pertanto la stabilità dell'apparecchio. L'infittimento delle generatrici di controllo per il fasciame ha permesso di capire che questa variazione di spessore non è dovuta alla corrosione del fasciame, ma ad un difetto di fabbrica della tubazione utilizzata per la realizzazione del corpo cilindrico inferiore a cui sono stati saldati i due fondi, con una distribuzione non uniforme del materiale lungo la circonferenza della tubazione stessa (figura 3). Questa situazione fa capire l'importanza dei controlli dimensionali in fase di costruzione degli apparecchi a pressione che forse in questo caso non sono stati eseguiti con accuratezza.

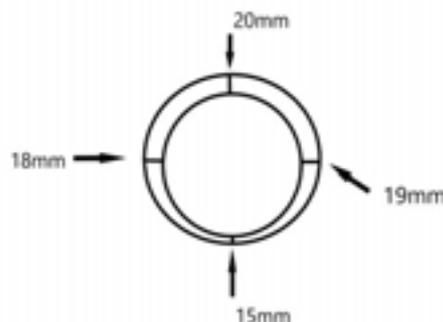


Figura 3. Variabilità degli spessori del corpo cilindrico inferiore

Il controllo spessimetrico sul bocchello di uscita del vapore ha anche tranquillizzato sul livello di corrosione dello stesso, che all'esame visivo aveva destato qualche preoccupazione.

3.6 Le considerazioni dell'Uot di Bolzano ed il rilascio dell'autorizzazione all'ulteriore esercizio

A seguito dell'esame dei verbali di tutte le verifiche periodiche subite dal generatore, dell'esame visivo eseguito in occasione dei sopralluoghi eseguiti durante l'esecuzione dei controlli, e dell'analisi della relazione tecnica fornita dalla ditta esecutrice dei controlli, la Uot di Bolzano giungeva alla determinazione che la vasta zona di apparente vaiolatura presente nel corpo cilindrico inferiore fosse un difetto del materiale base, a causa della sua presenza già nei primi verbali di verifica. Poiché il generatore 34 giorni prima dell'esecuzione dei controlli aveva subito una prova idraulica alla presenza di un soggetto abilitato, con esito positivo, la Uot ha ritenuto di non procedere ad una nuova prova idraulica che avrebbe inutilmente risollecitato le membrature, imponendo però le seguenti attività pedepedeutiche al rilascio del benestare all'ulteriore esercizio del generatore:

- riparazione del refrattario all'imbocco del passo d'uomo del corpo cilindrico inferiore;
- esecuzione di una verifica a caldo in presenza di un tecnico dell'Uot.

A seguito della verifica a caldo e dell'esecuzione delle riparazioni prescritte la Uot concedeva l'autorizzazione all'ulteriore esercizio per cinque anni, con declassamento della pressione massima di esercizio da 20 a 15 bar (finalmente in forma ufficiale), e con l'obbligo di effettuazione, con le procedure del d.m. 11/04/2011, ogni anno, di una prova a caldo con particolare attenzione al bocchello di uscita vapore, e ogni due anni di una visita interna con particolare attenzione alle zone di minimo spessore individuate in occasione dei citati controlli.

4. Il generatore di vapore di una ditta in provincia di Milano

4.1 La documentazione presente

Questo generatore di vapore è una caldaia a tubi d'acqua di marca Macchi & C. s.a.s., modello Titan M680, costruita nel 1975, pressione di bollo 30 Kg/cm², volume 21820 litri, producibilità 40 t/h. E' dotato di libretto di costruzione rilasciato dall'Ancc sezione di Como in data 17/12/1975 dal quale si evincono tutti i materiali utilizzati con i relativi spessori delle membrature. Il generatore è inoltre fornito dei verbali delle verifiche periodiche, ma per brevità di trattazione ci limiteremo ad esporre i risultati degli ultimi 4 anni di esercizio. In particolare in data 18/08/2014 veniva sottoposto a prova idraulica sia per la verifica d'integrità che di riparazione a seguito di sostituzione del surriscaldatore; nel verbale su richiedevano ulteriori esami non distruttivi che venivano esaminati in occasione della verifica del 19/03/2015, non evidenziando, mediante repliche metallografiche, problematiche riguardo alla struttura del materiale dei corpi cilindrici. Dai controlli spessimetrici invece risultavano ridotti gli spessori nominali dei fondi del corpo cilindrico inferiore, di tutto il corpo cilindrico superiore, e di molti tubi di tre pareti della camera di combustione. I successivi calcoli di stabilità con gli spessori misurati risultavano sufficienti per cui la verifica d'integrità veniva chiusa con esito positivo in data 01/07/2015. Le successive verifiche di funzionamento del 07/03/2016, di visita interna del 24/08/2016 (*"le membrature e le giunzioni ispezionabili e soggette a pressione, dei corpi cilindrici e della camera di combustione, si presentano in discrete condizioni"*), e di funzionamento del 04/09/2017, avevano tutte esito positivo.

4.2 L'esito dei controlli

Anche se in anticipo sulla data di scadenza dei 45 anni, 17/12/2020, il proprietario del generatore decideva di eseguire i controlli previsti dalla Circolare Ispepl 60/97, ad opera di un consulente esperto libero professionista, per verificare la possibilità di esercire ulteriormente il generatore dopo i 45 anni oppure se sostituirlo prima di tale scadenza. Sul generatore venivano pertanto eseguite in occasione della fermata di agosto 2017,

praticamente tutte le tipologie di controlli: esame visivo, ultrasuoni, esame magnetoscopico, liquidi penetranti, repliche metallografiche, durezza.

4.2.1 Esame visivo

Dall'esame visivo per la valutazione delle condizioni di conservazione dell'apparecchiatura emerge uno stato di usura generalizzato. La superficie esterna del corpo cilindrico superiore presenta uno stato di ammaloramento del materiale di base con corrosione e vaiolature diffuse non solo sulle saldature ma anche sulla lamiera del corpo cilindrico; la sua superficie interna e le saldature risultavano coperte da ossidazione e strato di calcare che sono stati spazzolati con mezzi meccanici per valutare al meglio le condizioni superficiali del metallo svelando zone di pitting diffuso, crateri, corrosioni e vaiolature. Sulle stesse saldature si sono notati difetti quali crateri, vaiolature e in alcune zone mancanza di materiale d'apporto (figura 4). Anche all'interno del corpo cilindrico inferiore sono presenti vaiolature alveolari e zone di pitting diffuso, oltre a crateri che assumono in certi casi dimensioni importanti (figura 5); sulle saldature sono state riscontrate alcune zone caratterizzate dalla mancanza di materiale d'apporto, evidenziate da solcature tra il cordone ed il lembo della virola (figura 6); le lamiere presentano una superficie vaiolata. Sui due collettori principali dell'economizzatore si nota uno sfaldamento della superficie da erosione di condensazione causato da una cattiva coibentazione, dove il materiale base si sfoglia in strati consistenti di calamina; allo stesso modo i tubi scambiatori e le curve del serpentino presentano un avanzato stato di degrado, con vaiolature diffuse. Le tubazioni di collegamento con le valvole automatiche presentano buchi di notevole dimensioni, vaiolature, crateri, erosioni e corrosioni che rendono necessaria la loro sostituzione o eliminazione in caso non siano più necessarie all'esercizio. La camera di combustione è l'unica a trovarsi in buono stato di conservazione.



Figura 4



Figura 5



Figura 6

4.2.2 Controlli spessimetrici

Il controllo con esame ultrasonoro nelle zone accessibili del corpo cilindrico superiore ha evidenziato spessori inferiori a quelli nominali in corrispondenza del tegolo superiore del fasciame. Non si sono riscontrati spessori inferiori a quelli di progetto nelle altre parti del generatore.

4.2.3 Controlli con liquidi penetranti ed esami magnetoscopici

Le saldature sono state controllate sia con liquidi penetranti che con metodo magnetoscopico senza dar luogo a particolari criticità; solo per le saldature sul fasciame del corpo cilindrico superiore non è stata possibile un'adeguata valutazione a causa delle marcate vaiolature presenti.

4.2.4 Esame metallografico per replica

Il controllo mediante repliche metallografiche sulle saldature dei corpi cilindrici non ha evidenziato variazioni degne di nota della microstruttura originale, né evoluzioni cavitazionali da scorrimento viscoso a caldo.

4.2.5 Prove di durezza

Le prove di durezza sul materiale dei corpi cilindrici hanno dato esito positivo e soddisfacente.

4.3 Verifiche di stabilità

Le verifiche di stabilità si sono rese necessarie per quelle membrature i cui spessori risultavano inferiori a quelli di progetto. Per il calcolo è stata utilizzata la norma VSG Rev. 1995 Ed. 1999. Gli spessori minimi di calcolo sono risultati al di sotto di quelli rilevati con i controlli ultrasonori.

4.4 Determinazione della vita residua

Il consulente ha eseguito la determinazione della vita residua di tutte le parti del generatore di vapore mediante il calcolo ciclico a fatica previsto dalla norma AD 2000 Cap. "S1" [4]. Tale verifica ha definito un periodo di vita residua pari a 3 anni a partire da settembre 2017. Questo significa che prima della scadenza dei 45 anni, se il proprietario del generatore deciderà di continuarne l'esercizio, si dovranno ripetere tutti i controlli ai fini dell'espletamento della pratica INAIL di autorizzazione all'ulteriore esercizio. Una severa analisi costi-benefici sarà pertanto fondamentale per decidere la prosecuzione dell'esercizio o la sostituzione del generatore di vapore.

5. Conclusioni

E' noto ormai da tempo che *“l'invecchiamento non è connesso all'età dell'apparecchiatura, bensì alle modifiche che la stessa ha subito nel tempo, in termini di grado di deterioramento e/o di danno subito. Tali fattori comportano una maggiore probabilità che si verifichino guasti nel tempo di vita (di servizio) dell'apparecchiatura stessa, ma comunque non sono necessariamente associati ad esso...”* [5]. Fondamentale risulta dunque la raccolta dei dati relativi alla storia dell'attrezzatura (documenti di costruzione, di verifiche periodiche, di eventuali interventi di riparazione), alle ore di lavoro, ai parametri di esercizio nel tempo, alle analisi dell'acqua di alimento, agli interventi di manutenzione e di controllo subiti nel tempo. La successiva pianificazione ed esecuzione dei controlli permette poi la valutazione dello stato di conservazione e della sua esercibilità. Dal confronto degli esiti dei controlli eseguiti sui due generatori di vapore esaminati risulta evidente come influiscano i parametri di esercizio sulla vita residua delle apparecchiature. Il generatore Macchi del 1975, soggetto a cicli di lavoro più intensi, risulta effettivamente

in condizioni peggiori del generatore delle Officine Seveso di quattro anni più vecchio. La scelta fatta in sede di emanazione della Norma UNI 11706 di ridurre da 45 a 40 anni la vita utile di un generatore di vapore, probabilmente per far coincidere i controlli con la quarta decennale, si dimostra dunque vantaggiosa anche dal punto di vista della sicurezza, così come importante risulta eseguire entro i primi dieci anni di vita una analisi dei possibili meccanismi di danno una volta noto il regime di sollecitazione del generatore. Risulta altresì evidente l'importanza della esecuzione rigorosa delle verifiche periodiche, in particolare della visita interna, per questa tipologia di attrezzature in pressione. Tali verifiche, se eseguite bene, possono infatti dare indicazioni fondamentali sul livello di degrado nel tempo dell'apparecchiatura, come nell'esempio del generatore di vapore dell'Alto Adige, mentre se eseguite in modo superficiale possono dar luogo a sgradite sorprese in occasione dei controlli strumentali più approfonditi necessari per ottenere il prolungamento dell'esercizio, come nel caso del generatore di vapore ubicato in provincia di Milano.

6. Bibliografia

- [1] Circolare n. 60/97 del 14/07/1997. Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro.
- [2] Norma UNI 11706, edizione marzo 2018. UNI Ente Italiano di Normazione.
- [3] Roberto Longo. La competenza dei professionisti nella progettazione degli impianti.
Bollettino di informazione; n° 1/1996; Ordine degli Ingegneri di Catanzaro.
- [4] Codice AD 2000, edizione 10/2014. Beuth Verlag GmbH.
- [5] HSE 2006, Plant ageing, Management of equipment containing hazardous fluids or pressure, Research Report RR509, Health & Safety Executive, London UK.

Attrezzature a pressione a servizio di impianti di depurazione

G. Battista¹, C. Piccolo¹, I. Campitelli¹, D. Salzano², C. Ziccardi³, S. Sabatino³

¹ Inail - Uot Certificazione Verifica e Ricerca di Avellino

² Workin'626 Srl

³ G.O.R.I. SpA

Sommario

Vengono proposte ed illustrate alcune criticità relative alla gestione di un sistema di produzione aria compressa utilizzato come utility per il processo di trattamento di acque reflue urbane. Lo studio, in collaborazione con la GORI SpA - soggetto gestore del Servizio Idrico Integrato dell'Ambito Distrettuale Sarnese-Vesuviano della Campania - ha lo scopo di analizzare l'insieme a pressione posto a servizio di un impianto di trattamento dei reflui urbani e delle problematiche di gestione e manutenzione relative alle condizioni di installazione.

1. Gori SpA

La GORI è una società mista a prevalente capitale pubblico, la cui maggioranza (51%) è detenuta dall'Ente d'Ambito Sarnese-Vesuviano, consorzio obbligatorio dei 76 comuni ricadenti nel distretto Sarnese-Vesuviano.

L'Ente d'Ambito Sarnese-Vesuviano nel 2002 ha individuato in GORI SpA il soggetto gestore del Servizio Idrico Integrato per l'Ambito Distrettuale Sarnese-Vesuviano (già A.T.O. 3 "Sarnese-Vesuviano" della Regione Campania).

Il percorso normativo ha inizio con la Legge 36/94 (L. Galli) che ha avviato la riforma dei servizi idrici in Italia con l'obiettivo di realizzare la gestione integrata dell'intero ciclo dell'acqua, prevedendo che tale gestione fosse affidata ad un unico soggetto.

La materia è stata poi aggiornata nel 2006 con il Testo Unico dell'Ambiente, secondo cui il Servizio Idrico Integrato ("S.I.I.") è costituito "dall'insieme dei servizi pubblici di captazione, adduzione e distribuzione di acqua ad usi civili, di fognatura e di depurazione delle acque reflue".

Con la Legge regionale 14 del 1997 e con la successiva Legge regionale 15 del 2015 il territorio campano è stato suddiviso in 5 Ambiti Distrettuali, tra cui quello Sarnese-Vesuviano. Tale Legge del 2015 ha anche istituito l'Ente Idrico Campano al quale partecipano obbligatoriamente tutti i comuni della Regione.



Figura 1. Presentazione della Gori SpA

2. L'impianto di depurazione di Scafati (Sa)

L'impianto di depurazione in oggetto ricade precisamente nei territori dei comuni di Sant'Antonio Abate (Na) e di Scafati (Sa), a servizio di un'area definita **Sub-Comprensorio n. 1 del Comprensorio del Medio Sarno**.

L'impianto è del tipo a fanghi attivi le cui linee principali di processo sono:

1. **Linea Liquami:** la linea è preposta a trattare tutti i reflui provenienti dai due collettori in ingresso;
2. **Linea Acque di Pioggia:** la linea è preposta a trattare i reflui in arrivo in eccesso rispetto alle possibilità massime di trattamento della linea Liquami;
3. **Linea Fanghi:** preposta a produrre, ricircolare, utilizzare, trattare e smaltire i fanghi estratti dalle varie sezioni di trattamento della linea liquami; i fanghi, opportunamente trattati attraverso digestori primari e secondari, permettono la produzione di biogas che è immagazzinato in un gasometro e successivamente utilizzato per il processo di trattamento.



Foto 1. L'Impianto di depurazione di Sant'Antonio Abate/Scafati

Impianto di depurazione di Sant'Antonio Abate/Scafati			
DATI CARATTERISTICI			
Voce	u.m.	inverno	estate
Popolazione servita	AE	191.285	363.635
Portata media trattata in tempo secco	m ³ /h	1.529	3.141
Portata media trattata in tempo di pioggia	m ³ /h	10.332	10.332

Tabella 1. Dati caratteristici dell'impianto

2.1 Il trattamento delle acque

Nell'ambito del ciclo di trattamento delle acque è previsto l'utilizzo di un impianto di produzione aria compressa per l'apertura e la chiusura delle valvole a ghigliottina ad azionamento pneumatico. L'utilizzo dell'aria compressa risulta indispensabile per garantire il funzionamento delle attrezzature, allo scopo di ridurre il rischio di esposizione degli operatori presenti e impegnati nella gestione dell'impianto nella fase di carico dei fanghi.

3. L'insieme a pressione a servizio dell'impianto di trattamento

3.1 Descrizione dell'insieme

Nell'ambito dell'impianto di depurazione di Scafati (SA) è stata prevista l'installazione di un insieme per la produzione di aria compressa composto da n. 5 sottoinsiemi.

Trattasi infatti di un insieme per aria compressa (FAMIGLIA 29827-52120) composto da n. 5 sottoinsiemi a servizio delle seguenti unità di trattamento:

- Edificio compressori biologia **Gruppo B**
- Edificio filtrazione **Gruppo D**
- Edificio disidratazione **Gruppo N**
- Edificio sollevamento e grigliatura media **Gruppo M**
- Edificio trattamento fanghi freschi **Gruppo F**

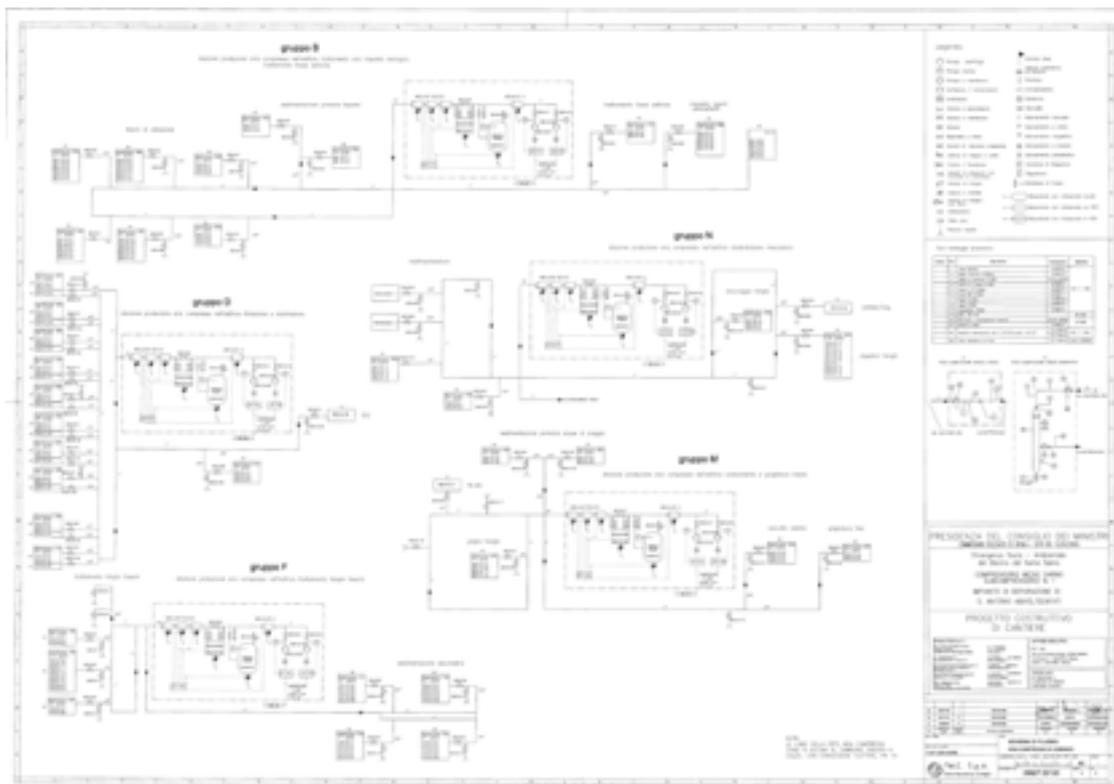


Figura 2. P&I dei 5 sistemi di produzione di aria compressa

Gli insiemi per aria compressa, rappresentati nello schema di processo strumentato (Fig. 2) hanno la funzione di garantire la disponibilità di aria per i servizi e per gli strumenti di controllo/regolazione dell'impianto di depurazione.

Ogni insieme di produzione aria compressa è in grado di erogare, alla propria rete di distribuzione in tubazioni di acciaio zincato, una portata di aria compressa di 246 Nmc/h con una pressione di 8 bar(g).

3.1.1 Caratteristiche dell'insieme

Ogni stazione di produzione (Gruppi B, D, F, M, N) è formata da (Foto 2):

- 2 compressori rotativi a vite, marca PARISE, mod. PVP 20-HT/EC-10, completi di valvole, separatori di olio, cofanatura fonoassorbente, quadro elettrico di comando e controllo ed aventi ciascuno la seguenti caratteristiche:
 - Aria resa a norma UNI 1217: 2,10 mc/min
 - Pressione massima di esercizio: 10,45 bar(g)
- 1 essiccatore aria refrigerazione, marca HIROSS, mod. PGN 040 TIMED, temperatura di rugiada + 3°C
- 1 batteria di filtri, marca PARISE, mod. FA153 –MF/SM/CS
- 1 serbatoio di stoccaggio aria cilindrico verticale, marca SEA SpA, mod. P200V, da 200 lt. completo di valvola di sicurezza
- rete di distribuzione aria
- dispositivi di controllo e regolazione della pressione

3.1.2 Condizioni di esercizio

Le condizioni di progetto e di esercizio di ciascuna delle 5 stazioni di compressione (Gruppi B, D, F, M, N) sono le seguenti:

Pressione di esercizio	8 bar(g)	
Pressione massima ammissibile	14 bar(g)	
PS ₁ (max press. di mandata verso l'impianto)	8 bar	limitata dal regolatore elettronico
PS ₂ (pressione di sicurezza)	14 bar	limitata da VdS installata sul separatore aria/olio
PS ₃ (pressione di sicurezza sui circuiti)	10,45 bar	limitata da VdS installata sul serbatoio di accumulo
TS _{max} (Temperatura massima ammissibile)	45 °C	per compressori
	60 °C	per tubazioni e componenti di linea
TS _{min} (Temperatura minima ammissibile)	0 °C	



Foto 2. Sotto insieme stazione aria compressa

3.1.3 Descrizione generale

Ciascuna stazione è composta da 2 compressori, l'uno di riserva all'altro, 1 serbatoio polmone e 1 essiccatore a refrigerazione per l'essiccamento dell'aria. Il sistema è poi dotato di una serie di filtri per la disoleazione e la depolverazione dell'aria. L'aria in uscita dai compressori e dal serbatoio viene essiccata in un sistema di essiccazione costituito da un essiccatore a refrigerazione e quindi filtrata e disoleata.

In funzionamento normale, i compressori lavorano a rotazione. Tuttavia le logiche intervengono automaticamente, in caso di anomalia al compressore in servizio, mettendo

sotto carico il compressore di riserva, il quale normalmente si trova già in rotazione a vuoto. Lo stesso tipo di intervento avviene in caso di abbassamento della pressione di rete, dovuta ad esempio a punte di consumo.

3.2 Le attività di verifica periodica

3.2.1 Prima Verifica Periodica

Le attività di verifica periodica sono state svolte secondo le indicazioni di cui al d.m. 11 aprile 2011 e in base alla periodicità prevista dall'Allegato VII del d.lgs. 81/08 (*), con particolare riferimento alla tipologia di attrezzatura studiata, immatricolata come **“insieme”** composto da 5 **“sotto-insiemi”**.

Preventivamente ed a cura della Gori SpA si è provveduto in due casi alla sostituzione delle tubazioni di collegamento del sottoinsieme alla rete di aria compressa, in considerazione dello stato di usura delle stesse e delle condizioni di installazione, onde eliminare ogni possibile rischio per gli operatori impegnati nelle attività di gestione e di manutenzione (Foto 3).



Foto 3. Tubazione di collegamento del sottoinsieme alla rete aria compressa

(*) Art. 71 - Comma 4.2.2. La prima delle verifiche periodiche andrà eseguita secondo la periodicità di cui all'allegato VII del D. Lgs. n. 81/2008 a decorrere dalla data di messa in servizio dichiarata dal datore di lavoro.

Comma 4.2.3. I controlli da eseguire in sede di «prima delle verifiche periodiche», in aggiunta a quelli di cui al punto 4.3.1. sono i seguenti: a) Individuazione dell'attrezzatura (o delle attrezzature componenti l'insieme), b) Verifica di corrispondenza delle matricole rilasciate dall'Ispeel o dall'Inail all'atto della dichiarazione di messa in servizio sulle attrezzature (certificate singolarmente o componenti un insieme) rientranti nelle quattro categorie del d.lgs. n. 93 del 25/02/2000 non escluse dalle verifiche periodiche del d.m. 1/12/2004 n. 329; per gli insiemi di limitata complessità nel caso in cui il datore di lavoro ha richiesto in sede di dichiarazione di messa in servizio, esplicitamente di voler considerare l'insieme stesso come unità indivisibile, la verifica di corrispondenza riguarda la matricola unica dell'insieme.

Comma 4.2.4. Per gli insiemi verrà redatto un verbale di prima verifica periodica per ogni attrezzatura immatricolata costituente l'insieme. Occorre anche riportare sul verbale di ogni singola attrezzatura immatricolata il riferimento al numero identificativo dell'insieme di cui fa parte, indicato nella dichiarazione di conformità dell'insieme stesso. Nel caso di insieme immatricolato come un'unica unità indivisibile considerando tutte le attrezzature dell'insieme come «membrature» che non verranno immatricolate e subiranno singolarmente la periodicità di controllo previste dalla categoria dell'insieme verrà redatto un unico verbale complessivo per tutte le attrezzature dell'insieme.

3.2.2 Verifiche periodiche successive

Nel mese di luglio 2018, secondo le periodicità indicate dall'allegato VII del d.lgs. 81/08, è stata effettuata la seconda verifica periodica.

Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.Lgs. 93/2000 art. 3). <i>Recipienti/insiemi contenenti gas compressi, liquefatti e disciolti o vapori diversi dal vapor d'acqua classificati in III e IV categoria e recipienti di vapore d'acqua surriscaldata appartenenti alle categorie dalla I alla IV</i>	Verifiche di funzionamento: TRIENNALE Verifica di integrità: DECENNALE
--	---

In tale occasione, oltre alle attività specifiche di controllo già effettuate in sede di PVP, si è provveduto, per le singole attrezzature componenti l'insieme, alla verifica di integrità mediante analisi spessimetrica, come richiesto dalla normativa in considerazione dell'anno di costruzione di singoli recipienti (2005) e della data delle Dichiarazione di conformità dell'insieme (2008).

Separatore aria/olio Tipo RD1/B10	RE.MAS.	NF00361-80	0/45	0426	A1	Escluso PED Art. 1.3.6
Valvola di sicurezza separatore aria/olio Tipo NS003	AIR TEK	349-498	0/45	0100	B+D	IV
Serbatoio aria compressa Tipo P200 11X	SEA	118XXXXXX	0/45	0060		Rec. Sempl. CEE 87/404
Valvola di sicurezza aria Tipo TA11	PADOVAN VALERIO	15740XXX	0/45	0100	B+D	IV

Separatore Aria/Olio: è un componente dei singoli sottoinsiemi (tutti uguali). Lo stesso è provvisto di Dichiarazione di conformità CE ai sensi della Direttiva CEE/87/404 relativa ai recipienti semplici a pressione. La dichiarazione di conformità è dell'anno 2005.

Serbatoio Aria compressa: è un componente dei singoli sottoinsiemi (tutti uguali). Lo stesso è provvisto di Dichiarazione di conformità CE ai sensi della Direttiva 97/23/CE. La dichiarazione di conformità è dell'anno 2005.



Figura 3. Rapporto indagine spessimetrica

Come evidenziato dal report di verifica (Fig. 3), gli esami spessimetrici effettuati hanno avuto esito positivo, non essendo state evidenziate riduzioni degli spessori rispetto ai valori iniziali forniti dal costruttore.

4. La gestione degli insiemi

Tutti i gruppi di generazione aria compressa funzionano alla stessa maniera e sono controllati da quadri di gestione (Foto 4) interfacciati con i segnali strumentali locali.

Come descritto sopra, quindi, ogni gruppo di produzione è composto da due compressori, uno di riserva attiva all'altro. Ogni compressore ha, sulla propria mandata, un trasmettitore di pressione che, attraverso il quadro di controllo locale, regola la pressione di esercizio della linea. L'aria prodotta viene accumulata in un serbatoio per essere poi inviata in linea passando attraverso un essiccatore che ne riduce il contenuto di umidità. Sia prima che dopo l'essiccatore ci sono degli scaricatori di condensa che, automaticamente a tempo, eliminano la condensa presente all'interno delle tubazioni e del serbatoio di accumulo.

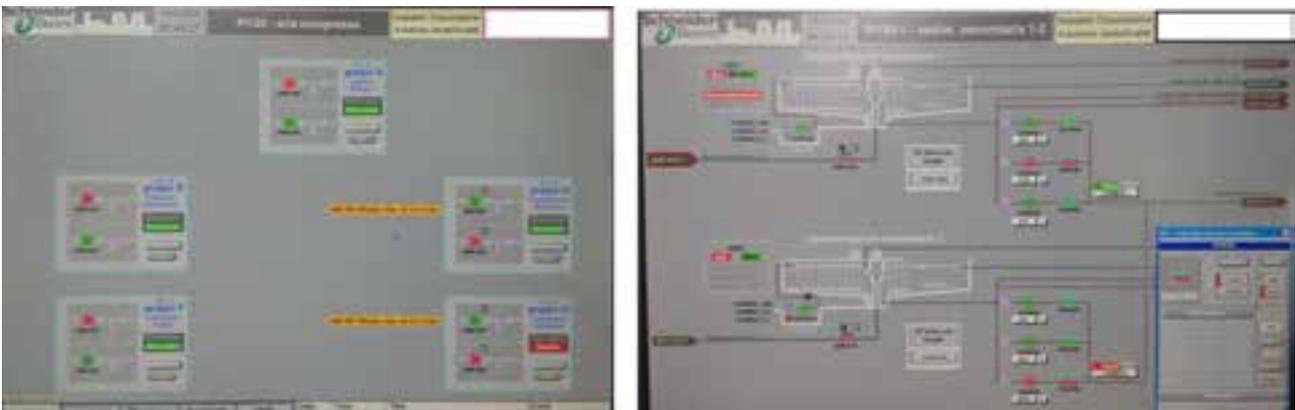


Foto 4. Quadro di controllo TLC Gruppi di generazione

La gestione dei gruppi di generazione aria compressa prevede le seguenti modalità di funzionamento:

- *Funzionamento automatico*

Il sistema gestisce autonomamente la funzionalità del compressore, garantendo il comando di uno o dell'altro in caso di anomalia. Il sistema alterna il funzionamento dei compressori in servizio/riserva ad ogni fermata, in modo da mantenere equilibrato il numero di ore di funzionamento. Il funzionamento automatico non controlla la portata o la pressione del compressore; tali controlli sono effettuati direttamente in loco.

- *Funzionamento semiautomatico*

Tale fase può essere gestita dall'operatore che attiva il comando di inserimento in servizio. Rimane attivo l'intervento dei cumulativi allarmi/anomalie che effettuano il blocco.

- *Funzionamento manuale*

Il funzionamento manuale avviene mediante selettore a video e prevede la sola possibilità di marcia-arresto per ogni motore compressore.

- *Manovra in sito*

Il sistema prevede la gestione in sito in relazione alla specificità delle attività. La Foto 5 raffigura un esempio di installazione di sistemi di apertura/chiusura mediante aria compressa con relativa centralina manuale di gestione in loco.



Foto 5. Esempi di installazione su valvole e centralina manuale di controllo

5. Conclusioni

La descrizione delle procedure amministrative per la gestione delle attrezzature a pressione di un impianto di depurazione ha evidenziato come il regime delle verifiche periodiche a cui sono soggette sia funzione delle certificazioni di fabbricazione e di installazione fornite dal costruttore. La definizione di flussi operativi procedurali nel rispetto degli obblighi normativi di cui al d.m. 329/2004, al d.m. 11 aprile 2011 ed al d.lgs. 81/08 consente pertanto di tracciare un percorso “certo” per l’individuazione di un programma di manutenzione e di verifica delle attrezzature in oggetto, sia come singole attrezzature che come “insiemi”, senza trascurare, come evidenziato, le condizioni al contorno per le attività svolte dagli operatori incaricati della gestione, manutenzione e sorveglianza delle attrezzature stesse.

Una osservazione di chiusura degli argomenti trattati è doverosamente relativa alla questione delle condizioni di rischio che possono coinvolgere i lavoratori esposti nella gestione e manutenzione di una attrezzatura a pressione in un contesto operativo quale un impianto di depurazione.

La corretta manutenzione degli apparecchi a pressione, seppur condotta secondo le indicazioni fornite nel manuale di uso e manutenzione, prescinde dal contesto operativo.

Si riassumono quindi di seguito i principali fattori di rischio analizzati dal gestore nelle diverse fasi di utilizzo degli impianti e individuati nella redazione del DVR.

Condizione di rischio riscontrata	Descrizione	Misura di prevenzione adottata
Rischio biologico: contaminazioni	La presenza di reflui di origine organica non può prescindere alla presenza di rischio biologico cui è esposto il lavoratori	Nel DVR sono riportate le misure di prevenzione e protezione da adottare (Inf/Form, Sorveglianza sanitaria, Dpi specifici)
Rischi Fisici: caduta dall’alto	L’adiacenza delle attrezzature a vasche e pozzetti seppur idoneamente protetti potrebbe esporre i lavoratori a rischio di caduta dall’ alto.	In aggiunta alle misure di prevenzione di cui al punto precedente, è prevista l’installazione di idonee protezioni mediante specifica procedura operativa
Rischi Fisici: rumore	La concomitanza di funzionamento delle attrezzature a pressione con gli impianti a servizio dell’impianto di depurazione è da valutare in relazione alla localizzazione dei singoli sottoinsiemi	Viene effettuato monitoraggio periodico dei livelli di rumore in attuazione di disposti normativi di cui al d.lgs. 81/08

Rischi Fisici: microclima severo - calore	Le temperature elevate nel funzionamento delle attrezzature in particolar modo nel periodo estivo rappresentano un rischio per gli operatori che svolgono le attività di manutenzione sui sottoinsiemi	Nel DVR sono riportate le misure di prevenzione e protezione da adottare (Inf./Form, sorveglianza sanitaria, Dpi specifici). Sono previste specifiche procedure operative per ridurre al minimo i rischi
Rischi trasversali: malore	La tipologia degli impianti in oggetto espone i lavoratori a rischi non trascurabili e molte volte imprevedibili per i quali non è possibile operare con un mono-operatore	Sono definite procedure operative per la definizione ed individuazione delle attività per le quali lo svolgimento delle stesse DEVE essere svolta esclusivamente con DOPPIO OPERATORE

6. Bibliografia

- [1] C. Contardi, M. Gay, A. Ghisotti, G. Robasto, G. Tabasso, "Guida tecnica sui trattamenti delle acque. Tecniche di trattamento dei reflui, sistemi di depurazione e di smaltimento", 2^a ed., Edizioni Franco Angeli
- [2] F. Calza, "L'acqua. Utilizzo, depurazione, recupero", 3^a ed., Tecniche Nuove
- [3] D. Goi, F. Conti, G. Urbini, "Trattamento delle acque reflue: upgrade e collaudo", CISM
- [4] L. Bonomo, "Trattamenti delle acque reflue", McGraw Hill
- [5] G. L. Cirelli, "I trattamenti naturali delle acque reflue urbane", Sistemi Editoriali - Esselibri
- [6] W. Simmler e altri, "Wastewater", in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry

Gestione delle attrezzature e/o insiemi a pressione incorporati nelle apparecchiature a risonanza magnetica con magneti superconduttori

V. Nastasi¹, G. Sferruzza¹, A. Muratore², F. Campanella³, M. Mattozzi³

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail - Uot di Piacenza

³ Inail - Dimeila

Sommario

Nelle apparecchiature a Risonanza Magnetica a magneti superconduttori, l'avvolgimento superconduttivo è "immerso" nel fluido criogenico (elio liquido) mantenuto a temperatura costante prossima allo zero assoluto; tale condizione è necessaria affinché si attivi il fenomeno della superconduzione e si ingeneri in modo permanente un campo magnetico statico di induzione magnetica. Per questa tipologia d'installazione, l'apparecchiatura RM, oltre ad essere un dispositivo medico destinato ad indagini cliniche, è di fatto anche una attrezzatura/insieme a pressione contenente all'interno elio liquido in equilibrio con la sua fase gassosa.

Scopo dell'articolo è affrontare in modo sintetico la corretta gestione delle attrezzature/insiemi a pressione incorporati nelle apparecchiature RM a magneti superconduttori relativamente agli obblighi e agli adempimenti dei Fabbricanti, degli Utilizzatori e degli eventuali Installatori finali delle tubazioni (dette "tubazioni di quench") deputate allo scarico di elio gassoso, nel rispetto della direttiva PED, del d.m. 329/04, del d.lgs. 81/08 e s.m.i., degli standard di sicurezza in risonanza magnetica contenuti nel d.p.r. 542/94 come modificato dalla Legge 160/16, e tenendo conto delle indicazioni operative 2016 del Dipartimento di Medicina Epidemiologica Igiene del Lavoro ed Ambientale dell'Inail, che è autorità competente a carattere ispettivo così come sancito dall'art.7.2 del già richiamato d.p.r. 542/94.

1. Principi fisici della risonanza magnetica

La Risonanza Magnetica (RM) produce immagini di tipo tomografico utilizzando campi magnetici e radiofrequenze. Nel 1946 i fisici americani Felix Bloch ed Edward Purcell, studiando i protoni scoprirono il fenomeno della risonanza e per questa loro scoperta ricevettero nel 1952 il Premio Nobel per la Fisica. Inizialmente il fenomeno della risonanza magnetica nucleare venne utilizzato per studiare la struttura chimica delle sostanze. Nel 1973 Paul Lauterbur osservò per caso con un campo magnetico alterato dall'irregolarità di uno dei magneti e, cercando di comprendere lo strano fenomeno provocato dall'incidente tecnico, scoprì l'importanza dei gradienti applicati ai campi magnetici al fine di ottenere delle immagini. Peter Mansfield perfezionò la tecnica introducendo variazioni più forti in campi magnetici più potenti, ottenendo così immagini molto più dettagliate. Nel 2003 Lauterbur e Mansfield ricevettero il Premio Nobel per la Medicina.

Alla base della formazione delle immagini RM vi sono complessi fenomeni fisici. In questo lavoro - che ha altre finalità - se ne darà solo una breve e semplificata descrizione. I responsabili del segnale che è alla base della formazione delle immagini RM sono i protoni o, più esattamente, i nuclei di idrogeno (H). Tale elemento è:

- facilmente reperibile nell'acqua e nel grasso contenuti nel corpo umano;
- in grado di generare un segnale di risonanza magnetica più facilmente rilevabile, rispetto ad altri elementi chimici.

Fornendo ai protoni energia sotto forma di onde radio di opportuna frequenza, essi entrano in risonanza. La caratteristica fisica che permette l'utilizzo del protone

dell'idrogeno in RM è il suo momento di dipolo magnetico, detto comunemente "SPIN". Lo spin è una grandezza di natura quantistica, intuitivamente facile da comprendere se si pensa al protone come a una calamita, in grado di sentire l'influenza di campi magnetici o di campi a radiofrequenza (Figura 1). Lo spin è:

- una grandezza quantistica, pertanto costretta ad assumere valori discreti e fissi;
- una grandezza vettoriale, costante il modulo e variabile in direzione e verso, associati alla rotazione.

Per la produzione di immagini viene sfruttata la magnetizzazione macroscopica associata alla presenza di innumerevoli microscopici spin.

In assenza di campi magnetici B_0 esterni, le rotazioni e i versi di rotazione degli spin dei nuclei H sono orientati in maniera casuale e quindi le somme vettoriali si annullano; pertanto non vi è una magnetizzazione netta, orientata secondo un determinato asse. Nel momento in cui gli spin si trovano in un campo magnetico statico esterno (B_0), il campo magnetico statico determina una direzione preferenziale lungo la quale i dipoli magnetici sono spinti a orientarsi: la direzione dei dipoli sarà sicuramente quella del campo esterno, il verso potrà essere allineato con il verso del campo magnetico statico esterno (spin up) o potrà essere orientato nel verso opposto "antiparallelo" (spin down). La probabilità di orientarsi in direzione parallela al verso di B_0 è leggermente più alta rispetto a quella antiparallela: questo fa sì che ci siano più spin orientati nella direzione del campo magnetico esterno (convenzionalmente z nel sistema cartesiano). Dal punto di vista macroscopico, perciò, si ha una magnetizzazione in direzione di B_0 , detta magnetizzazione netta (M_z). L'eccesso di spin up (e di conseguenza di M_z):

- aumenta con la densità del numero di protoni presenti,
- aumenta con l'intensità del campo B_0 presente,
- diminuisce con l'aumentare della temperatura (temperature elevate aumentano l'agitazione termica che entra in contrasto con l'effetto di B_0 , poiché favorisce il disallineamento degli spin).

In realtà, non è possibile che particelle immerse in un campo magnetico esterno siano 'immobili' perfettamente allineate in una direzione ben precisa (ovvero in direzione B_0): esse sono costrette a un moto di "PRECESSIONE" che può essere paragonato alle oscillazioni di una trottola (Figura 2). Pertanto il loro moto è composto da una rotazione intorno all'asse z (direzione di B_0), da una velocità angolare e da una frequenza caratteristiche della particella che ruota e del campo che si sta applicando. Tale frequenza di precessione è nota come frequenza di Larmor, ed è caratteristica per ogni particella (tipo di nucleo), noto che sia il campo B_0 che si sta applicando: per es. per i nuclei dell'idrogeno immersi in un campo magnetico esterno B_0 di intensità pari a 1 Tesla (T), la frequenza di Larmor è pari a 42MHz.

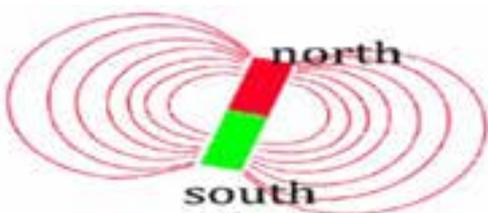


Figura 1. Protone come una calamita

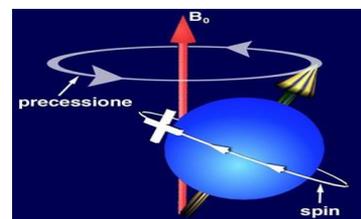


Figura 2. Moti di Precessione e Spin

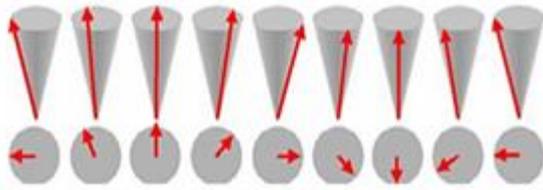


Figura 3. Sfasamento degli spin

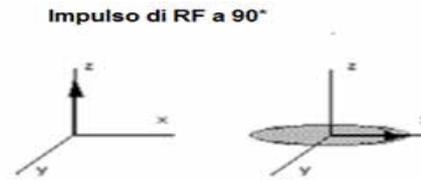


Figura 4. Vettore di magnetizzazione

Il moto di precessione degli spin è statisticamente casuale, quindi gli spin, pur ruotando tutti con la stessa frequenza, sono completamente sfasati fra loro (Figura 3). Non essendo possibile ricavare un segnale da una grandezza che non varia, il segnale utile a costruire l'immagine non potrà essere ricavato dalla componente lungo l'asse z, poiché lungo questo asse il valore di tutti gli spin è costante (uguale per tutti) e non ruota (è componente costante). La componente utile alla costruzione dell'immagine sarà quella variabile, ossia quella che deriva dalla proiezione sul piano xy, che è trasversale e si muove nel tempo. Tale componente riesce a generare un flusso di corrente indotta e di conseguenza un segnale utilizzabile per l'imaging. Somministrando un impulso a radiofrequenza dall'esterno, l'effetto dell'interazione tra la radiofrequenza e gli spin crea una modifica dell'angolo di precessione: si parla quindi di FLIP ANGLE (o TILT). Ciò serve a mettere in fase le rotazioni casuali. Il "flip angle" aumenta con l'energia dell'impulso RF. Un impulso RF a 90° ribalta la magnetizzazione sul piano xy (Figura 4).

Dunque, sollecitando con un impulso di radiofrequenza (RF) atomi immersi in un campo magnetico B_0 si determinano:

- la sincronizzazione dei protoni nella stessa fase di precessione (ruotano non solo alla stessa frequenza ma anche in modo coordinato) generando un vettore di magnetizzazione trasversale M_{xy} che ruota nel piano x-y diverso da zero (Figura 4);
- il passaggio di alcuni protoni dal livello energetico basso (paralleli a B_0) al livello energetico alto (antiparalleli B_0).

Il M_{xy} può essere analizzato come se si trattasse di un magnete rotante. Inserendo una bobina conduttrice all'interno di un campo magnetico rotante, si genera in essa una tensione indotta: ecco il segnale RM la cui intensità è proporzionale a M_{xy} . Cessato l'impulso RF, in un tempo molto breve (detto FID, Free Induction Decay) si ritorna nelle condizioni pre-impulso RF con $M_{xy}=0$ (processo cosiddetto di rilassamento, Figura 5).

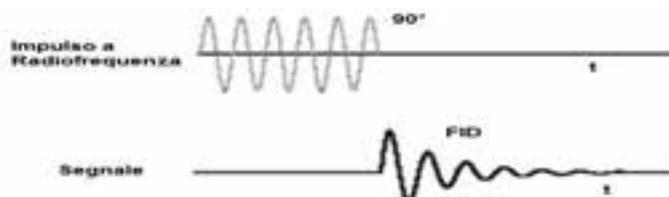


Figura 5. Impulso RF e Segnale RM

La differenza dei tempi di rilassamento può essere utilizzata per esaltare alcuni particolari dell'immagine che si vuole ottenere. Per esempio, grasso e acqua si rilassano più rapidamente, e il segnale per queste strutture è più elevato, quindi la visualizzazione avrà valori più chiari. Il fluido cerebrospinale ha segnale più basso e quindi dà livello di grigio più scuro. I tessuti patologici mostrano differenti concentrazioni di H_2O rispetto a quelli sani: avranno quindi tempi di rilassamento diversi e per questa loro differenza potranno essere visualizzati in termini di contrasto in una immagine RM.

2. Magneti resistivi, permanenti o superconduttori

Il tipo di magnete e l'intensità di campo magnetico B_0 determinano le problematiche relative alla sicurezza, all'installazione e al posizionamento delle apparecchiature. Occorre

innanzitutto considerare la presenza costante del campo magnetico statico: il magnete infatti è sempre acceso e i fattori di rischio sono dunque sempre presenti. Occorre inoltre considerare che il campo magnetico non è confinato all'alloggiamento del paziente all'interno dell'apparecchiatura, ma si estende in tutte le direzioni (campo magnetico disperso): è pertanto necessario porre attenzione agli ambienti circostanti, alle persone che li frequentano e alle attrezzature che vi sono installate. Nei casi in cui il campo statico debordi significativamente all'esterno delle sale esami, si rende necessario realizzare adeguate schermature di contenimento per il campo magnetico attraverso l'utilizzo di lastre di ferro di opportuni spessori. Tuttavia al giorno d'oggi l'utilizzo di sistemi che generano un controcampo, ha consentito di limitare notevolmente il perimetro del campo disperso: nella maggior parte delle moderne installazioni il campo statico entro i 5 gauss è spesso contenuto quasi totalmente all'interno delle sale esami.

Anche l'impiego della Radiofrequenza (RF) comporta la necessità di tenere in opportuna considerazione gli aspetti legati alla sicurezza¹. Infatti la RF è energia che viene ceduta al paziente determinando innalzamento della temperatura e, più raramente, rischio di lesioni termiche.

Per proteggere l'apparecchiatura RM da eventuali interferenze esterne che, durante l'esecuzione degli esami, potrebbero disturbare la frequenza di risonanza di lavoro, attorno al magnete viene realizzata una gabbia di Faraday coincidente con l'intero involucro della sala ospitante l'apparecchiatura: pavimento, soffitto, pareti, spia visiva e porta di accesso.

Gli apparecchi RM possono essere distinti in "chiusi" o "aperti" a seconda della conformazione geometrica delle bobine o dei magneti. Gli apparecchi aperti, di solito a magnete permanente, sono in grado di sviluppare campi magnetici di minore intensità.

È possibile distinguere i sistemi RM anche in base alla modalità con cui viene instaurato il campo magnetico statico B_0 . Esistono infatti:

- magneti permanenti con $B =$ da 0.15 a 0.40 T (campi bassi)
- magneti superconduttori con B da 0,5 a 3 T (oggi si può arrivare a 7 T).

Nelle prime apparecchiature RM il campo era generato da elettrocalamite realizzate con magneti resistivi. Oggi esse non vengono quasi più realizzate, per via degli alti costi esercizio e della bassa performance di campo statico. Tuttavia in tali sistemi era possibile spegnere il magnete al termine degli esami, limitando i rischi relativi alla gestione della sicurezza.

I magneti permanenti sono costituiti da grossi blocchi di lega ferromagnetica, generalmente utilizzati per la realizzazione di macchine di tipo aperto con forma a "sandwich". I poli magnetici (espansioni polari) sono solitamente posti sopra e sotto al lettino: il campo B_0 è dunque ortogonale al lettino, e al paziente. Sebbene i livelli di campo statico in gioco non siano elevati, lo sviluppo verticale del campo può talvolta generare sforamenti nel piano superiore e sottostante; pertanto è richiesta una particolare attenzione nella fase di installazione, e l'eventuale posizionamento di schermi magnetici per il contenimento del campo. In alcuni sistemi a magnete permanente, il campo B_0 può anche essere diretto parallelamente al pavimento.

Al giorno d'oggi le apparecchiature più installate sono le RM a magneti superconduttori, sebbene siano molto più costose sia in fase di acquisto sia in manutenzione: la superconduzione permette infatti di ottenere campi magnetici molto più alti e migliori performance dal punto di vista diagnostico. In tali apparecchiature il campo B_0 è generato inducendo corrente in un avvolgimento realizzato tipicamente in niobio/titanio annegato e sfruttando il fenomeno della superconduzione. Questi materiali, portati a temperatura

¹ d.lgs.156/2016 di attuazione della direttiva 2013/35/UE sulle disposizioni minime di sicurezza e salute relative all'esposizioni dei lavoratori ai rischi derivanti da agenti fisici – campi elettromagnetici che ha modificato il Capo IV del Titolo VIII del d.lgs. 81/08.

prossima allo 0 K, perdono quasi completamente la resistenza alla conduzione di corrente. Per mantenere costante la corrente indotta occorre mantenere costante la bassa temperatura: ad oggi tale condizione è ottenibile solo utilizzo Elio liquido, unico criogeno con temperatura di liquefazione prossima ai -270°C .

I sistemi RM attualmente più diffusi nella routine diagnostica raggiungono campi di 1,5 T, e sempre più frequenti sono le installazioni da 3 T. ma con i magneti superconduttivi è possibile raggiungere valori di campo magnetico anche maggior di 7 T. I vantaggi principali sono: campi intensi e molto omogenei, buona qualità dell'immagine; minori tempi di acquisizione, elaborazione, esecuzione dell'immagine, migliore risoluzione spaziale e possibilità di visualizzare processi a livello molecolare (studi di tipo funzionale).



Figura 6. Apparecchiatura RM in fase di montaggio

3. La direttiva dispositivi medici e la risonanza magnetica

Dopo aver fornito indicazioni di carattere generale sia sui principi fisici sia sui tipi di apparecchiature a RM, trattiamo ora della corretta gestione delle apparecchiature a risonanza magnetica con magneti superconduttori, con particolare riferimento alle attrezzature/insiemi a pressione in esse incorporate.

Le apparecchiature RM utilizzate nelle strutture sanitarie a scopo diagnostico rientrano a pieno titolo nella definizione di dispositivo medico dettata dalla Direttiva comunitaria 93/42/CEE - recepita in Italia dal d.lgs. 24 febbraio 1997, n. 46, emendato col d.lgs. 25 gennaio 2010, n. 37, in recepimento della nuova Direttiva 2007/47/CE - nelle parti che trattano dei dispositivi medici destinati alle indagini cliniche:

“... Un dispositivo medico è considerato un qualunque apparecchio, impianto, software, sostanza o altro prodotto, utilizzato da solo o in combinazione, compreso il software destinato dal fabbricante ad essere impiegato specificamente con finalità diagnostiche o terapeutiche e necessario al corretto funzionamento del dispositivo, destinato dal fabbricante ad essere impiegato dall'uomo ai fini di diagnosi, prevenzione, controllo, terapia o attenuazione di una malattia...”

Nell'ambito del medesimo d.lgs. 46/1997 e s.m.i. è interessante evidenziare alcuni contenuti:

- L'art. 4 (Requisiti essenziali) comma 1, cita *“... I dispositivi devono soddisfare i pertinenti requisiti essenziali prescritti nell'Allegato 1 in considerazione della loro destinazione”*.
- Tali requisiti sono contenuti nell'Allegato 1, punto 1 *“... I dispositivi devono essere progettati e fabbricati in modo che la loro utilizzazione, se avviene alle condizioni e per gli usi previsti, non comprometta né la sicurezza né la salute degli utilizzatori ed eventualmente di terzi...”* e al punto 2 *“... Le soluzioni adottate dal fabbricante per la progettazione e la costruzione dei dispositivi devono attenersi a principi di rispetto della sicurezza, tenendo conto dello stato di progresso tecnologico generalmente riconosciuto ... omissis ... – eliminare o ridurre i rischi nella misura del possibile (integrazione della sicurezza nella progettazione e nella costruzione del dispositivo) ...”*.

- L'art. 5 cita (Libera circolazione, dispositivi a destinazione particolare), al comma 6: *"... Qualora i dispositivi siano disciplinati, per aspetti diversi da quelli del presente decreto, da altre direttive che prevedono l'apposizione della marcatura CE, la medesima fa presumere che i dispositivi soddisfino anche le prescrizioni di queste altre direttive..."*

- L'art. 6 (Rinvio alle norme tecniche), comma 1, cita *"... Si presume conforme ai requisiti essenziali di cui all'art. 4 il dispositivo fabbricato in conformità delle norme tecniche armonizzate comunitarie e delle norme tecniche nazionali che le recepiscono."*

Dagli articoli riportati risulta evidente che qualsiasi dispositivo medico che si voglia installare e utilizzare in Italia, al fine di garantirne la sicurezza per tutti i soggetti coinvolti nel suo utilizzo, deve rispondere:

- a tutte le indicazioni tecniche contenute nelle direttive di riferimento ad oggi esistenti per gli aspetti diversi da quelli disciplinati dal decreto, ma comunque insiti nell'apparecchiatura;

- ai massimi livelli di sicurezza oggi possibili a livello tecnologico in rapporto a quelli che sono i possibili rischi associati all'installazione ed all'utilizzo del dispositivo.

Pertanto, per adempiere a quanto puntualmente previsto dal d.lgs. 46/1997 e s.m.i., il fabbricante deve poter dimostrare di aver effettuato l'analisi dei rischi sul dispositivo in questione, redigendo un documento (fascicolo tecnico) in cui è tenuto a riportare il riferimento delle norme tecniche adottate. Qualora ve ne siano di non applicabili, previa giustificazione del motivo d'inapplicabilità, deve descrivere dettagliatamente le soluzioni adottate, corredate della dimostrazione scientificamente e tecnicamente incontrovertibile che le medesime siano effettivamente le migliori. Deve infine garantire la sicurezza relativa all'utilizzo del dispositivo, attraverso la certificazione di conformità rilasciata da un organismo notificato che avrà valutato la correttezza e la rispondenza ai requisiti essenziali richiesti in materia. Apponendo il marchio CE su ogni dispositivo che produce, il fabbricante, dichiara che quel dispositivo medico è stato realizzato nel rispetto del d.lgs. 46/1997 e s.m.i. assumendosene la responsabilità.

4. I magneti superconduttori quali "impianti a pressione"

Si è detto che nelle apparecchiature RM a magneti superconduttori, l'avvolgimento superconduttivo è "immerso" nel fluido criogenico (elio liquido) a una temperatura prossima allo 0 K e pari a circa -269°C. A questa temperatura viene infatti raggiunta la soglia critica di superconduzione del materiale utilizzato che permette l'instaurarsi del campo statico d'induzione magnetica. Per questa tipologia d'installazione, l'apparecchiatura RM, oltre a essere un dispositivo medico destinato a indagini cliniche, è di fatto anche una attrezzatura/insieme a pressione: in particolare essa ha tra i suoi componenti un recipiente a pressione criogenico (dewar), contenente all'interno elio liquido in equilibrio con la sua fase gassosa e isolato termicamente dall'ambiente esterno attraverso una camicia mantenuta sottovuoto. Il recipiente è di forma toroidale - per consentire l'introduzione del paziente al suo interno ove viene generato il campo magnetico statico - e oltre a dover rispettare particolari condizioni costruttive d'isolamento termico e di resistenza meccanica, è necessariamente dotato di dispositivi di sicurezza che permettono, in caso di aumento della concentrazione della fase vapore all'interno del dewar, di evacuare parte della fase vapore ripristinando la condizione di normale esercizio. Tale evento - detto "quench" - può verificarsi per un riscaldamento del sistema a seguito del quale la temperatura nel dewar aumenta provocando un passaggio massivo di elio dalla fase liquida a quella vapore: dal momento che l'espansione adiabatica dell'elio sviluppa 750 litri di elio gassoso per ogni litro di elio liquido portato in ebollizione, se non opportunamente controllata la pressione nei recipienti può raggiungere valori tali da determinare lo scoppio del disco di rottura.

Durante il normale funzionamento i magneti superconduttori possono sviluppare fino a qualche centinaio di litri di gas criogenico all'ora (BOIL-OFF). Se la pressione supera un determinato valore di soglia, l'elio gassoso viene fatto uscire attraverso una valvola di sovrappressione, detta anche "QUENCH VALVE" o "valvola di boil-off", e viene convogliato (nella quasi totalità delle apparecchiature attualmente in esercizio) all'impianto di ri-liquefazione, situato nel locale tecnico; oppure viene condotto all'esterno sfruttando la linea di evacuazione – detta anche "tubo del quench" - che attraverso un percorso sicuro libera i vapori in un luogo remoto esterno alla struttura sanitaria. Nelle fasi di manutenzione ordinaria, le ditte eseguono un esame periodico della valvola di boil-off che è soggetta a continue sollecitazioni.

Se il sistema si surriscalda ulteriormente superando i livelli massimi consentiti, interviene il funzionamento di un ulteriore dispositivo di sicurezza, il disco a frattura prestabilita (detto anche disco di rottura) che permette di scaricare tutto l'elio all'esterno attraverso il tubo del quench (si noti che in caso di 'quench', nella tubazione possono raggiungersi valori di pressione di 4-5 bar). Con la rottura del disco, il criogeno ancora a -269°C viene a contatto con la temperatura ambiente, passa repentinamente dalla fase liquida a quella vapore, e si ha l'immediata smagnetizzazione del magnete per innalzamento della temperatura.

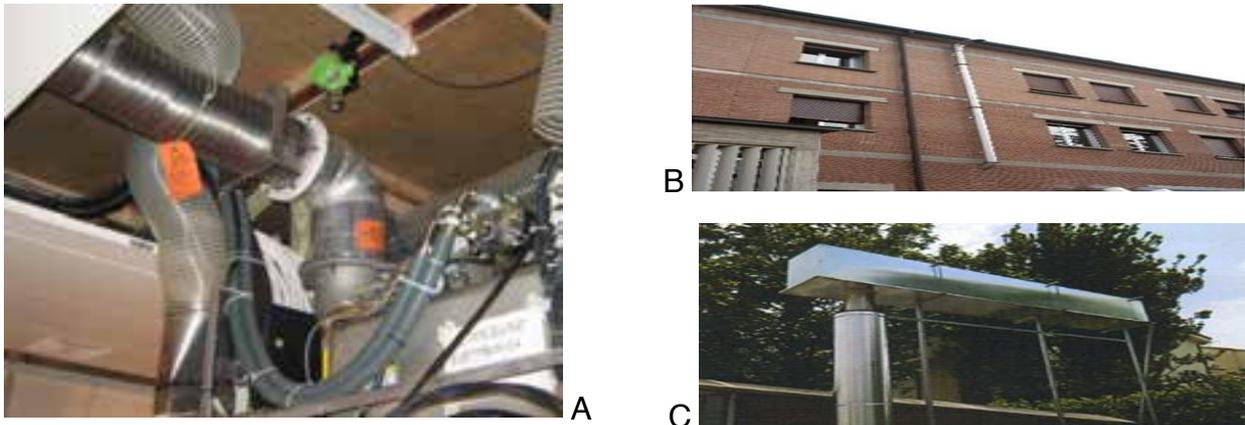


Figura 7. A: collegamento della tubazione di quench con l'apparecchiatura RM. B: terminale della tubazione di quench portato all'esterno alla massima altezza (miglior soluzione), protetto dagli agenti atmosferici e dall'intrusione di volatili; C: diversa tipologia di terminale tubazione di quench con scatolato orizzontale (sistema a diluizione di flusso)

5. Effetti dell'elio sull'uomo: asfissia, congelamento

L'elio è un gas nobile, inerte, e come tale non è direttamente né nocivo né tossico; tuttavia in caso di rilascio dell'elio nella sala magnete in presenza di persone, si possono avere rischi di asfissia se il tenore dell'ossigeno presente dovesse scendere significativamente, e di congelamento se si dovessero liberare quantità di criogeno particolarmente importanti.

5.1 Asfissia. Congelamento.

Si determina l'asfissia se l'elio fuoriesce nella sala magnete in quantità significative: in questo caso il tenore di ossigeno può scendere dal 20.9% (condizione ambientale normale) a meno del 18%, soglia al di sotto della quale si hanno problemi di insufficienza respiratoria che, se prolungati, possono portare all'asfissia (soprattutto quando l' O_2 scende sotto il 14%). Per questo motivo nella sala è presente il sensore ossigeno che si attiva con una segnalazione sonora preallarme quando rileva una concentrazione del 19%

di O_2 . Se la concentrazione di O_2 raggiunge il 18%, oltre all'attivarsi di una seconda segnalazione sonora, aumentano il numero ricambi ora (da 6 / 8 ad almeno 18). Il segnale al 19% permette di avere tempo sufficiente per portare il paziente fuori dalla sala e metterlo in sicurezza. Il sensore ossigeno è un dispositivo di sicurezza che consente l'immediata rilevazione di eventuali fuoriuscite di elio in sala magnetica: è un dispositivo di misura indiretta delle fughe di elio poiché monitora in continuo la concentrazione di O_2 rilevandone l'eventuale abbassamento.

Si determina il congelamento quando l'elio fuoriesce espandendosi e passando dallo stato liquido a quello gassoso: se la fuoriuscita del gas è significativa, vi è rischio di congelamento per tutte le persone presenti in sala. Vi è rischio di congelamento anche per le persone che venissero investite dall'elio che fuoriesce dal terminale esterno della tubazione di quench qualora il suo posizionamento non fosse corretto, ovvero in zona remota non accessibile al pubblico.

Il posizionamento corretto del sensore ossigeno è in prossimità del disco di rottura e al di sopra della prima flangia di raccordo tra l'apparecchiatura RM e la tubazione di quench: in generale infatti tale accoppiamento è il più critico, trattandosi di un accoppiamento imbullonato con all'interno una specifica guarnizione di separazione tra i due elementi che resiste alle bassissime temperature.



Figura 8. Tipologie di sensore ossigeno applicato sulla verticale della tubazione di quench

5.2 Impianto di ventilazione

Nel caso di apparecchiature RM a magneti superconduttori l'impianto di ventilazione delle sale diagnostiche RM rappresenta, oltre che un sistema di aereazione e condizionamento dell'ambiente in condizioni di normale esercizio dell'apparecchiatura, un vero e proprio dispositivo di sicurezza in caso di emergenza per la fuoriuscita di elio in sala diagnosi. In Figura 9 si riporta uno schema di impianto di ventilazione.

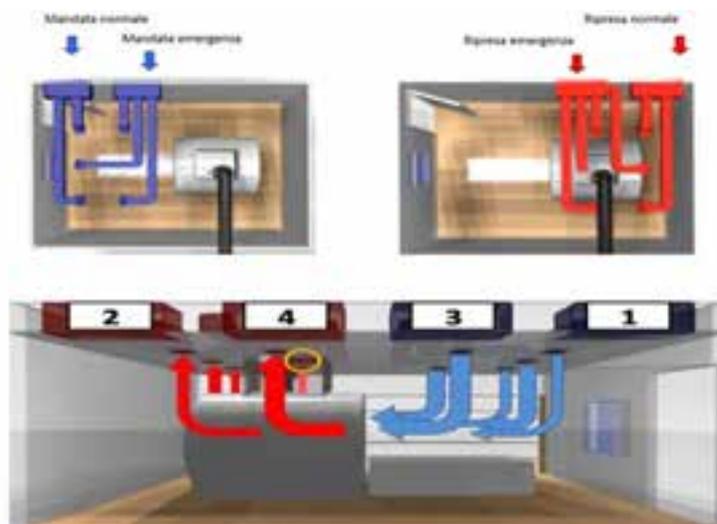


Figura 9. Impianti di ventilazione di emergenza

6. Messa a disposizione sul mercato delle attrezzature e/o insiemi a pressione incorporate nelle RM a superconduttori

Ai sensi dell'art.2 c.1 del d.lgs. 93/2000 e s.m.i.² le attrezzature e gli insiemi a pressione possono essere immessi sul mercato ed eserciti soltanto se soddisfano i requisiti dettati dallo stesso decreto relativamente all'installazione, alla manutenzione adeguata e all'impiego conforme alla loro destinazione.

Prima di affrontare gli aspetti tecnici, riportiamo le seguenti definizioni:

- ai sensi dell'art.1 c.2 lett. p bis) del d.lgs. 93/2000 e smi per "messa a disposizione sul mercato" si intende la fornitura di attrezzature a pressione o di insiemi per la distribuzione, il consumo o l'uso sul mercato della UE;
- per "*fabbricante*" ai sensi dell'art.1 c.2 lett. s) del d.lgs. 93/2000 e smi si intende la persona fisica o giuridica che fabbrica attrezzature a pressione o un insieme, o che fa progettare o fabbricare tale attrezzatura o tale insieme, e li commercializza con il proprio nome e marchio commerciale; per "*importatore*" ai sensi dell'art.1 c.2 lett. s ter) del d.lgs. 93/2000 e smi si intende la persona fisica o giuridica stabilita nell'UE che immette sul mercato dell'Unione attrezzature a pressione o insiemi originari di un Paese terzo.

I fabbricanti di apparecchiature RM a magneti superconduttori, relativamente alla caratteristica di "impianto a pressione" sono tenuti a effettuare una valutazione del rischio specifica e, per ogni tipologia di magneti e di attrezzature utilizzate, definire la categoria di appartenenza e applicare la procedura di accertamento di conformità secondo le indicazioni della direttiva PED. Si ricorda che ai sensi dell'art.1 c.2 lett. f) per 'insieme' si intendono "*varie attrezzature a pressione montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale*". In considerazione di ciò, tenuto conto delle diverse situazioni impiantistiche che variano da struttura a struttura, la tubazione di quench (posizionata a valle della RM) è un'attrezzatura a pressione necessaria al funzionamento in sicurezza del dispositivo medico RM, ma non è detto che faccia parte dell'insieme fornito dal fabbricante. Questo può prevedere che il tubo di quench sia parte integrante del dispositivo medico (e di conseguenza della fornitura), oppure no. Da tale premessa si daranno indicazioni sintetiche per una corretta gestione delle attrezzature e/o insiemi a pressione incorporati nelle RM a superconduttori.

7. Fabbricazione

Tutti gli aspetti relativi alla fabbricazione fino all'immissione sul mercato delle attrezzature e/o insiemi a pressione incorporate nelle RM (recipienti a pressione, valvole di sovrappressione, dischi di rottura, ecc.) sono di pertinenza dei fabbricanti o importatori che devono seguire quanto previsto dal d.lgs. 93/2000 e smi.

Pertanto anche se normalmente il tubo di quench ($P_s < 5$ bar e $DN < 200$ mm)³ non fa parte dell'insieme a pressione, esso comunque ricade nella PED con caratteristiche inferiori alla categoria I (art. 3 c. 3 d.lgs. 93/2000 e smi). Tali tubazioni con caratteristiche progettuali inferiori ai limiti di cui sopra di P_s e DN, non devono recare la marcatura CE, ma devono essere progettate secondo una corretta prassi costruttiva in uso in uno degli stati membri che assicuri la sicurezza di utilizzazione, e devono essere corredate da sufficienti istruzioni d'uso. Secondo le linee guida PED 9/1 "*...Corretta prassi costruttiva significa che l'attrezzatura a pressione è progettata tenendo in considerazione tutti i fattori*

² Direttiva PED - 97/23/CE recepita dal d.lgs. 25 febbraio 2000, n. 93, modificata dalla direttiva 2014/68/UE recepita dal d.lgs. 15 febbraio 2016 n. 26, di seguito nel presente lavoro il testo coordinato viene denominato d.lgs. 93/2000 e s.m.i.

³ P_s : Pressione massima di esercizio; DN: Diametro Nominale

che influenzano la sua sicurezza. Tale attrezzatura è fabbricata, verificata ed installata con lo scopo di garantire la sicurezza durante la sua vita utile, quando usata nelle condizioni previste. “Il fabbricante è responsabile dell'applicazione della corretta prassi costruttiva...”. Quindi se il fabbricante della RM fornisce l'apparecchiatura fino alla flangia di uscita, le istruzioni d'uso dovranno contenere tutte le indicazioni necessarie a realizzare la tubazione di quench (es. perdite di carico massime, P_s , caratteristiche del fluido) per la parte successiva ovvero dal punto di consegna in poi.

Il fabbricante della tubazione di quench dovrà a sua volta tenere conto delle indicazioni fornite dal fabbricante della RM nelle istruzioni d'uso, e progettare l'attrezzatura (tubazione) applicando a sua scelta una norma tecnica che soddisfi i requisiti di sicurezza. Alla fine della costruzione della tubazione, il fabbricante della stessa deve consegnare all'Utilizzatore/Datore di Lavoro dell'apparecchiatura RM quanto previsto dall'art. 3 c. 3 del d.lgs. 93/2000 e s.m.i., con le istruzioni d'uso e i limiti di utilizzo.

8. Dichiarazione e Controllo di messa in servizio

Una volta installata la RM, occorre che l'Utilizzatore/Datore di Lavoro invii alla Uot Inail competente per territorio una “dichiarazione di messa in servizio” ai sensi dell'art. 6 d.m. 329/04 dell'attrezzatura e/o insieme a pressione, allegando la seguente documentazione:

- a) l'elenco delle singole attrezzature, con i rispettivi valori di pressione, temperatura, capacità e fluido di esercizio;
- b) una relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate;
- c) una espressa dichiarazione attestante che l'installazione è stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale d'uso.

Si possono presentare 4 casi:

1) Caso: l'apparecchiatura è un insieme a pressione (Art. 5 c 1 lett. d d.m. 329/04) per cui il competente organismo notificato (ON) ha effettuato, per quanto di propria competenza, le verifiche degli accessori di sicurezza e/o dei dispositivi di controllo, e l'efficienza dei citati accessori o dispositivi risulta dalle documentazioni trasmesse (dall'Utilizzatore/Datore di Lavoro) all'atto della presentazione della dichiarazione di messa in servizio. In questo caso l'Uot Inail competente per territorio non esegue il controllo di messa in servizio sul luogo di installazione ai sensi dell'art. 4 d.m. 329/04, ma esegue solamente un esame documentale della dichiarazione di messa in servizio assegnando una matricola all'insieme in pressione (art. 6 d.m. 329/04). Questo caso si può verificare se l'apparecchiatura RM a superconduttori è stata consegnata dal fabbricante/importatore “chiavi in mano” all'Utilizzatore/Datore di Lavoro.

2) Caso: l'apparecchiatura è un insieme in pressione per il quale, a differenza del caso precedente, l'efficienza degli accessori e/o dei dispositivi di sicurezza non risulta dalle documentazioni trasmesse (dall'Utilizzatore/Datore di Lavoro) all'atto della presentazione della dichiarazione di messa in servizio. In questo caso l'Uot Inail competente per territorio, su richiesta dell'Utilizzatore/Datore di Lavoro, esegue il controllo di messa in servizio sul luogo di installazione ai sensi dell'art. 4 d.m. 329/04. Inoltre prima della suddetta richiesta lo stesso Utilizzatore/Datore di Lavoro deve presentare la dichiarazione di messa in servizio alla Uot Inail competente per territorio che assegna una matricola all'insieme in pressione incorporato nella RM.

3) Caso: siamo in presenza di attrezzature e/o insiemi a pressione incorporati nelle RM e che l'utilizzatore, tramite ditte specializzate, installa ‘assiemandolo’ sul posto. In questo caso l'Utilizzatore/Datore di Lavoro, oltre alla dichiarazione di messa in servizio (art. 6 d.m. 329/04), deve richiedere alla Uot Inail competente per territorio il “controllo di messa in servizio” (art. 4 d.m. 329/04). La Uot Inail effettuerà la verifica sul posto rilasciando un apposito verbale per le attrezzature soggette a tale verifica.

4) Caso: siamo in presenza di “apparecchiature in pressione” costruite prima dell’entrata in vigore della direttiva PED. Se esse sono in possesso di libretto Ispesl di costruzione, si segue quanto previsto dal caso 3) precedente, con la differenza che l’apparecchiatura in pressione non possiede la certificazione CE-PED ma il libretto Ispesl di costruzione.

9. Esercizio

Ai sensi dell’art. 8 d.m. 329/04 “Obbligo delle verifiche periodiche” si evidenzia che:

1. *Gli utilizzatori di attrezzature e insiemi a pressione messi in servizio hanno l’obbligo di sottoporre gli stessi a verifiche periodiche, ovvero di riqualificazione periodica.*
2. *L’attestazione positiva risultante dalle verifiche effettuate consente la prosecuzione dell’esercizio delle attrezzature e degli insiemi verificati.*

In considerazione del fatto che l’elio è un gas del gruppo 2 della PED (fluido non pericoloso), ai sensi dell’art. 11 c.1 del d.m. 329/04 “Esenzioni dalla riqualificazione periodica”: *Sono esclusi dall’obbligo della riqualificazione periodica: a) i recipienti contenenti fluidi del gruppo due, escluso il vapore d’acqua, che non sono soggetti a fenomeni di corrosione interna e esterna o esterna, purché la pressione P_s sia ≤ 12 bar e il prodotto della pressione P_s per il volume V non superi 12.000 bar^*l .*

Pertanto l’Utilizzatore/Datore di Lavoro può richiedere l’esenzione dalla riqualificazione periodica per le parti contenenti elio solo se dichiara che esse non sono soggette a fenomeni di corrosione interna e esterna o esterna. Diversamente, l’attrezzatura e/o insieme a pressione deve essere sottoposto ai sensi del d.lgs. 81/08 e s.m.i. e del d.m. 11/4/2011 a verifiche periodiche su richiesta del Datore di Lavoro. La prima di tali verifiche deve essere eseguita dalla Uot Inail competente per territorio; per le verifiche successive alla prima il Datore di Lavoro si può rivolgere all’Asp/Arpa o ad organismi pubblici o privati autorizzati dal Ministero delle Attività Produttive.

10. Conclusioni

Il presente lavoro nasce dal confronto che l’Inail - Uot di Palermo e il Dip.to Inail di Medicina Epidemiologica Igiene del Lavoro ed Ambientale della Sede Centrale hanno avuto con fabbricanti di RM e consulenti tecnici di Datori di Lavoro che utilizzano RM: si è cercato di rilevare i rischi e dettagliare la gestione in sicurezza dei tomografi RM a superconduttori non solo in quanto dispositivi medici, ma anche come attrezzature/insiemi a pressione, e relativamente agli adempimenti a carico dei Fabbricanti/Importatori, degli Utilizzatori/Datori di Lavoro e degli eventuali Installatori finali, tenendo conto della peculiare vigente legislazione Italiana.

Si evidenzia inoltre che la richiesta nella pratica clinica RM di apparecchiature sempre più performanti – che necessitano di campi statici sempre più alti - sta determinando l’utilizzo di magneti superconduttori con contenuti di criogeno sempre più elevati; pertanto è probabile che tutti i fattori di rischio legati all’impianto a pressione andranno via via aumentando nel tempo.

11. Bibliografia

- [1] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000 n 93 “Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di Attrezzature a Pressione” GU n 91 del 18/04/2000, SO N 62/L.
- [2] Decreto Legislativo 15 febbraio 2016 n 26 “Attuazione della direttiva 2014/68/UE in materia di Attrezzature a Pressione” GU n 53 del 04/03/2016.
- [3] Decreto Ministero Attività Produttive 1/12/2004 n 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature a pressione art. 19 del D.Lgs. 93/2000”.

- [4] A. Reolon, A. Perrone, G. Poggialini. “Gestione della sicurezza di un sito di diagnostica con risonanza magnetica” – Atti XVI convegno nazionale – Associazione Italiana Ingegneria Clinica - aiic - Bari - Anno 2016.
- [5] V. Nastasi. “Sicurezza negli impianti”, Edizione Grafill.
- [6] V. Nastasi. “Manuale Sicurezza Lavoro”, Edizione Grafill, 2017.
- [7] L. Moretti, A. Fiorelli, M.A. D’Avanzo, F. Campanella. “Imaging medico con esposizioni a radiazioni”. Inail – Dip. Medicina, epidemiologica, igiene del lavoro e ambientale, 2018.

Gli apparecchi a pressione nelle centrali idroelettriche

P. Castellano¹, C. Piccolo², G. Gorrino³, G. Aversa², L. Artaz⁴, R. Pecce⁴, C. Demarchi⁴

¹ Inail - Uot di Aosta

² Inail - Uot di Avellino

³ Inail - Uot di Alessandria

⁴ Compagnia Valdostana delle Acque (CVA SpA a s.u.)

Sommario

Le centrali idroelettriche rappresentano una fonte di energia pulita e sostenibile da fonti rinnovabili in armonia con l'ecosistema.

Questa realtà è ben radicata sul territorio valdostano con la presenza della Compagnia Valdostana delle Acque (CVA SpA), Società della Regione Autonoma Valle d'Aosta proprietaria di 30 centrali idroelettriche di 906 MW di potenza nominale complessiva e caratterizzate da una producibilità media annua di circa 2.700 milioni di kWh di energia.

Le centrali idroelettriche, come noto, funzionano con la forza motrice data dal salto di livello dell'acqua.

In queste centrali sono presenti diverse attrezzature a pressione; partendo dal bacino idrografico in quota, di solito artificiale, in prossimità delle dighe si rilevano le prime attrezzature a pressione finalizzate a garantire la sicurezza della diga stessa. A valle, dopo il salto dell'acqua in condotta forzata, sono posizionate una serie di turbine (PELTON, FRANCIS, KAPLAN) collegate all'alternatore per produrre energia elettrica. In quest'ultimo punto sono installate ulteriori attrezzature a pressione per la chiusura della condotta forzata, in caso di guasto o di mancanza di erogazione dell'energia elettrica, a garanzia degli aspetti di sicurezza della centrale stessa.

Lo scopo dello studio, condotto in sinergia con la CVA nell'ambito delle verifiche di legge espletate sulle attrezzature a pressione delle suddette centrali, è quello di evidenziare le tipologie di attrezzature a pressione a servizio degli impianti, con i relativi obblighi dell'utilizzatore, nonché sottolineare le difficoltà operative riscontrate nel corso delle attività di verifica e di manutenzione che, non sempre, sono risultate agevoli in considerazione delle condizioni di installazione delle attrezzature stesse.

1. La Compagnia Valdostana delle Acque (CVA)

Il bacino imbrifero della Valle d'Aosta coincide con il corso della Dora Baltea e dei suoi sedici affluenti principali. Insieme alle precipitazioni della stagione invernale, questa riserva costituisce un fondamentale serbatoio di acqua pura, preziosa per gli usi potabili e irrigui, per la produzione di energia per le lavorazioni artigianali e industriali, per la vita dell'uomo e l'equilibrio dell'ambiente in generale.

Le centrali idroelettriche della CVA (Figura 1) costituite da dighe, bacini artificiali e canali adduttori, sono distribuite capillarmente in tutte le vallate della Regione. Gli impianti di tipo fluente sono quelli di Aymavilles, Bard, Champdepraz, Hône 1 e 2, Montjovet, Quincinetto, Verrès, Issime nei Comuni omonimi e di Quart nel Comune di Nus; e ancora quelli di Chavonne a Villeneuve, Grand Eyvia a Aymavilles, Lillaz a Cogne, Saint-Clair a Châtillon, Sendren a Gressoney-Saint-Jean e Signayes ad Aosta.

Sono invece impianti a bacino quelli di Champagne 1 e 2 a Villeneuve, Châtillon, Pont-Saint-Martin, Covalou ad Antey-Saint-André, Nus, Isollaz a Challand-Saint-Victor, Maën Marmore a Valtournenche e Zuino a Gaby.

Concludono la lista gli impianti a serbatoio dei Comuni di Valtournenche (Maën Cignana e Perrères), di Avise, di Valpelline e di Gressoney-La-Trinité.

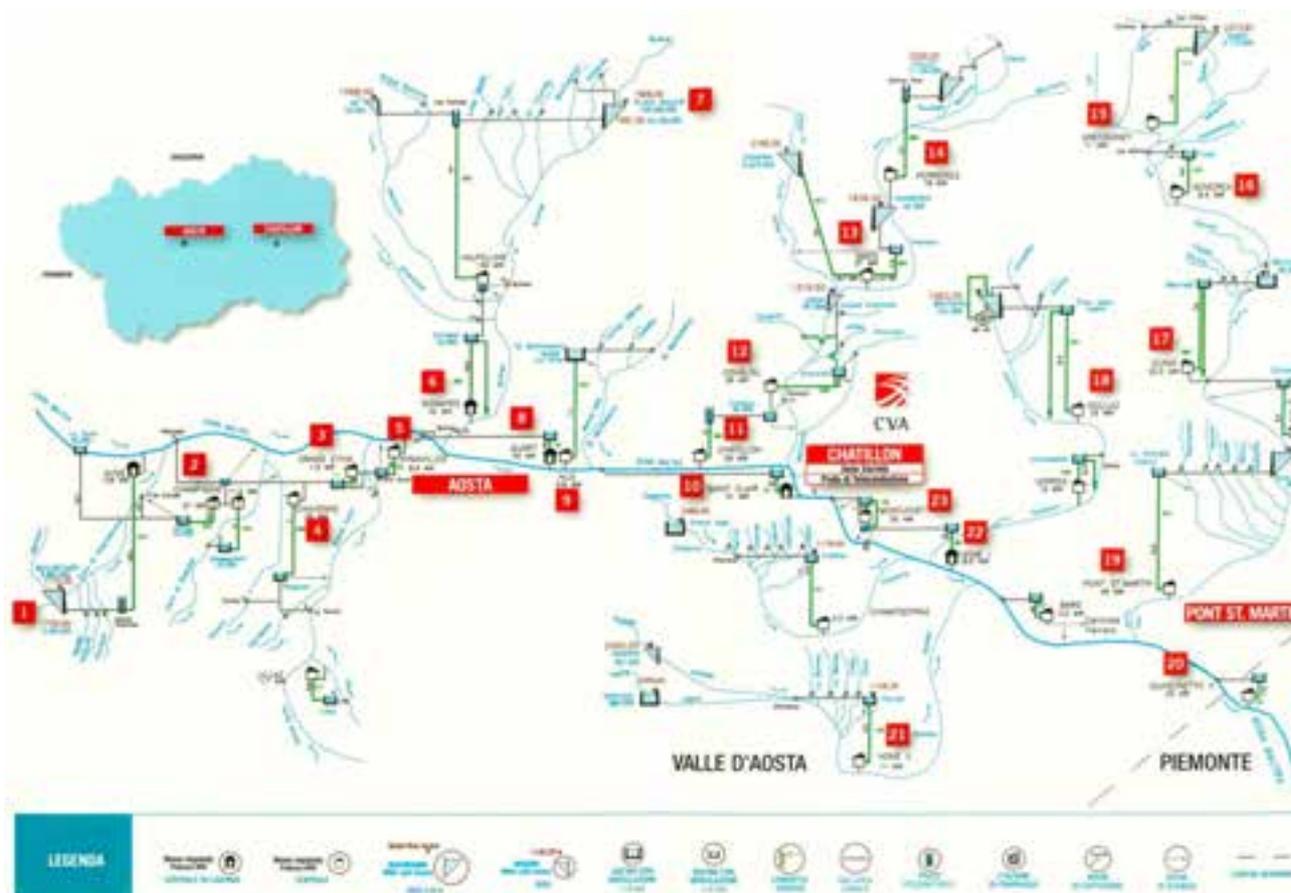


Figura 1. Schema degli impianti della CVA in Valle d'Aosta

2. La diga di Cignana e la centrale idroelettrica di Maen

Le dighe di Cignana, fino al 1983, erano utilizzate anche come serbatoio di accumulo del pompaggio allora esistente tra lo sbarramento di Perrères e le dighe stesse, attraverso il canale derivatore e la vasca di carico del salto Perrères dell'impianto di Maën, con la stazione pompe di Promoron.

La stazione pompe di Promoron esiste ancora, fuori servizio, nel fabbricato posto sopra alla vasca di carico.

La diga principale (Figura 2 e Tabella 1) è una delle prime dighe realizzate in calcestruzzo; il paramento delle due dighe è stato rivestito, nel 1989, con teli in pvc e protetto dal ghiaccio invernale attraverso sistemi che impediscono la formazione del ghiaccio.



Figura 2. La Diga di Cignana

Comune: Valtournenche (AO) – Impianto di appartenenza: Maën Cignana	
Bacino imbrifero sotteso: 13,50 km ² · Capacità utile di invaso: 15.975.000 m ³ Quota max invaso: 2.171 m. slm	
Diga principale	Tipologia della struttura: a gravità in calcestruzzo
H sbarram 58,30 m -Sviluppo al coronamento 401,78 m Spessore base 36 m. Spessore coronamento 5 m	
Diga secondaria	Tipologia della struttura: a gravità in pietrame a secco
H sbarram.24,00 m -Sviluppo al coronamento 106,65 m Spessore base 40 m. Spessore coronamento 3,5 m	

Tabella 1. Dati caratteristici della Diga di Cignana

A valle, le acque provenienti dall'impianto di Cignana confluiscono nella centrale idroelettrica di Maen (Figura 3).



Figura 3. Schema e foto della Centrale di Maen

3. Le attrezzature a pressione a servizio della Diga di Cignana e della Centrale Idroelettrica di Maen

Il profilo idraulico di seguito riportato definisce in maniera evidente la localizzazione delle attrezzature a pressione oggetto del presente studio. Ed ancor più come l'efficienza e la corretta gestione e manutenzione delle stesse sia funzionale ad un corretta gestione dell'impianto di produzione di energia elettrica da parte dell'azienda produttrice.

In Figura 4 si riporta una descrizione delle attrezzature a pressione presenti a monte della Centrale presso la Diga di Cignana e delle attrezzature a pressione presenti a valle nella Centrale di Maen.

Le due tipologie di attrezzature descritte hanno diversa funzionalità operativa nell'ambito delle attività della Centrale Idroelettrica ma sono strettamente funzionali alla stessa ed in particolare modo nelle condizioni di emergenza.

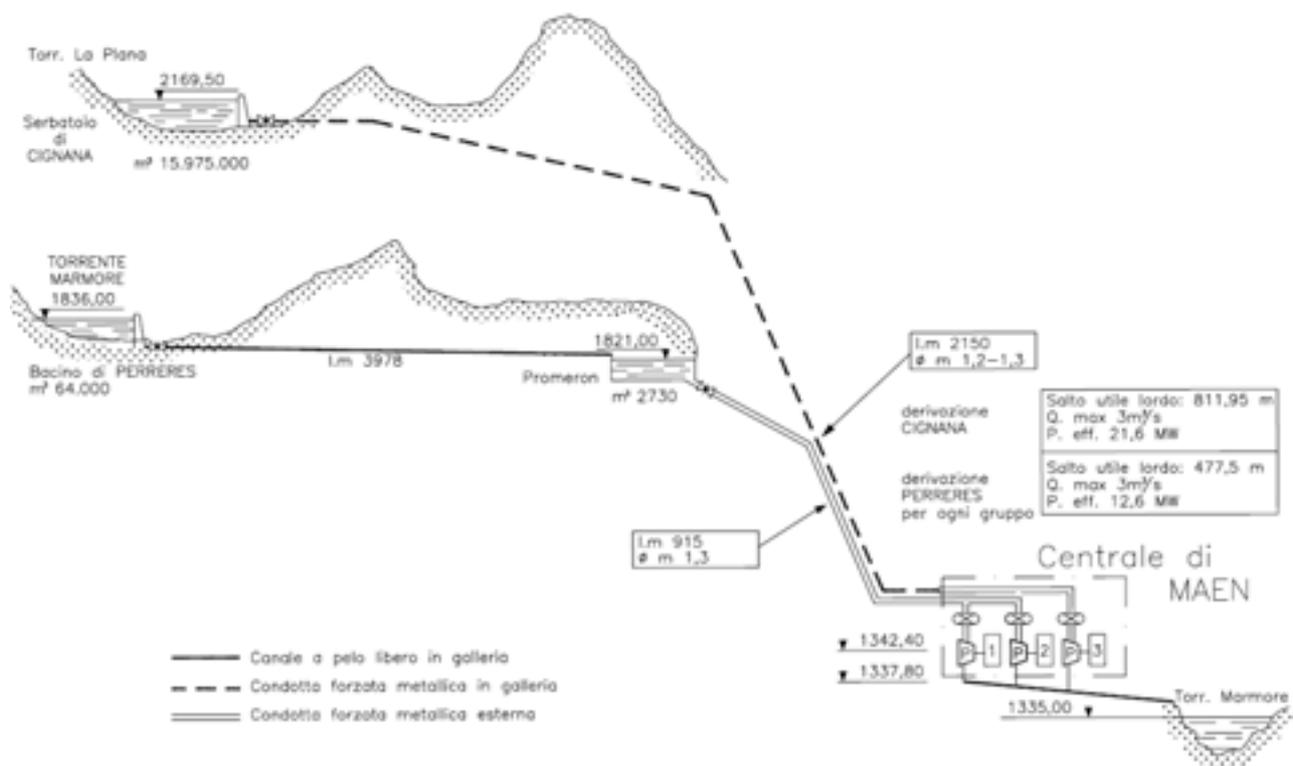


Figura 4. Centrale di Maen: profilo schematico dell'Impianto

3.1 Le attrezzature a monte: verifiche e criticità

Nella zona servizi della Diga di Cignana, al fine di prevenire la formazione di ghiaccio sulla superficie del bacino a contatto con la diga stessa, è presente un impianto che insuffla piccole quantità di aria alla base della diga stessa, la cui risalita provoca una increspatura costante sulla superficie dell'acqua in prossimità del paramento; tale accorgimento è adottato al fine di evitare rotture dei teli impermeabili che coprono il cemento della diga, conseguenti all'abbassamento dell'acqua.

L'impianto è costituito da due compressori, con caratteristiche identiche, all'interno dei quali sono installati i relativi disoleatori, un serbatoio di stoccaggio aria compressa, e un sistema di essiccamento dell'aria.

La tabella seguente sintetizza le caratteristiche principali dei singoli apparecchi:

Apparecchio	Pressione di esercizio	Volume	Temperatura di esercizio
Disoleatore	15 bar	43.1 lt	-10/+80 °C
Serbatoio	11.5 bar	3000 lt	-10/+120 °C
Essicatore	16 bar	120 lt	-10/+80 °C

Lo schema dell'impianto è riportato in Figura 5:

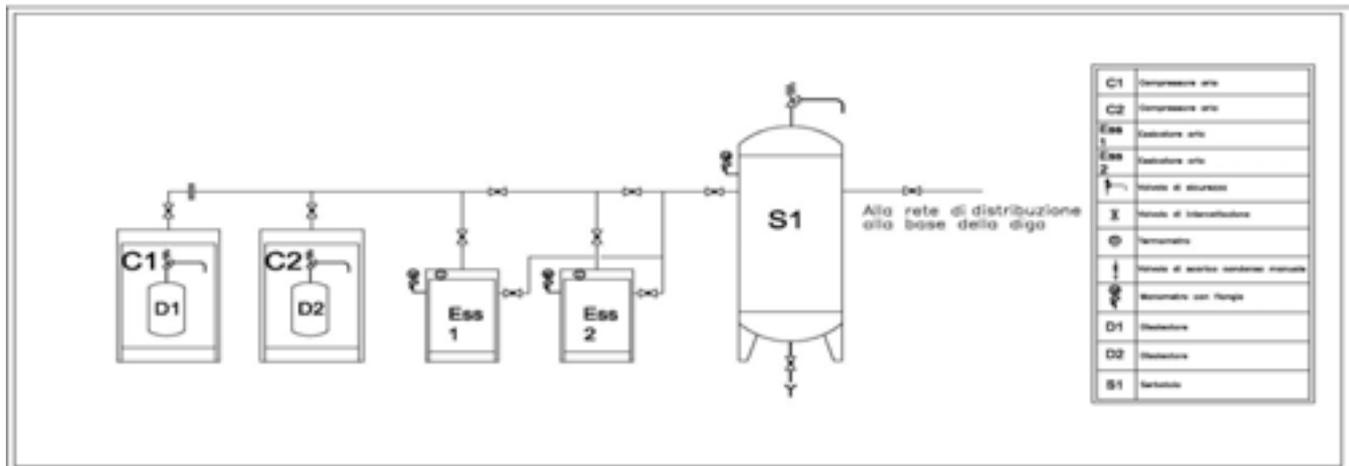


Figura 5. Schema dell'impianto

L'essiccazione dell'aria, realizzata con essiccatori (Figura 6), risulta indispensabile esclusivamente al fine di evitare fenomeni di congelamento della condensa all'interno delle tubazioni di distribuzione.

Tali impianti sono stati oggetto di verifica da parte della Uot di Aosta, in collaborazione con la Uot di Alessandria e la Uot di Avellino, per le attività di verifica di messa in servizio e di denuncia di messa in servizio di cui, rispettivamente, agli artt. 4 e 6 del d.m. 329/2004 [1].



Figura 6. Essicatore aria

3.2 Le attrezzature a valle

Nella galleria di collegamento diretto tra la Diga e la Centrale di Maen è posata la condotta forzata che alimenta a valle i gruppi di produzione di energia elettrica.

Nella galleria, oggetto di recenti interventi, è stato realizzato anche un piano inclinato abilitato al trasporto persone, che consente un comodo trasporto del personale del presidio continuo della diga e dei materiali necessari.

All'interno delle Centrali di Maen sono presenti attrezzature a pressione a servizio di un impianto preposto alla manovra degli organi di parzializzazione ed otturazione della turbina idraulica presente nell'impianto idroelettrico.

L'impianto, schematicamente rappresentato nella Figura 7, è composto da una batteria di recipienti (generalmente da 2 fino a 6) e da un accumulatore contenente olio-azoto separati da una membrana di gomma e posto in servizio con precarica nella fase gassosa.

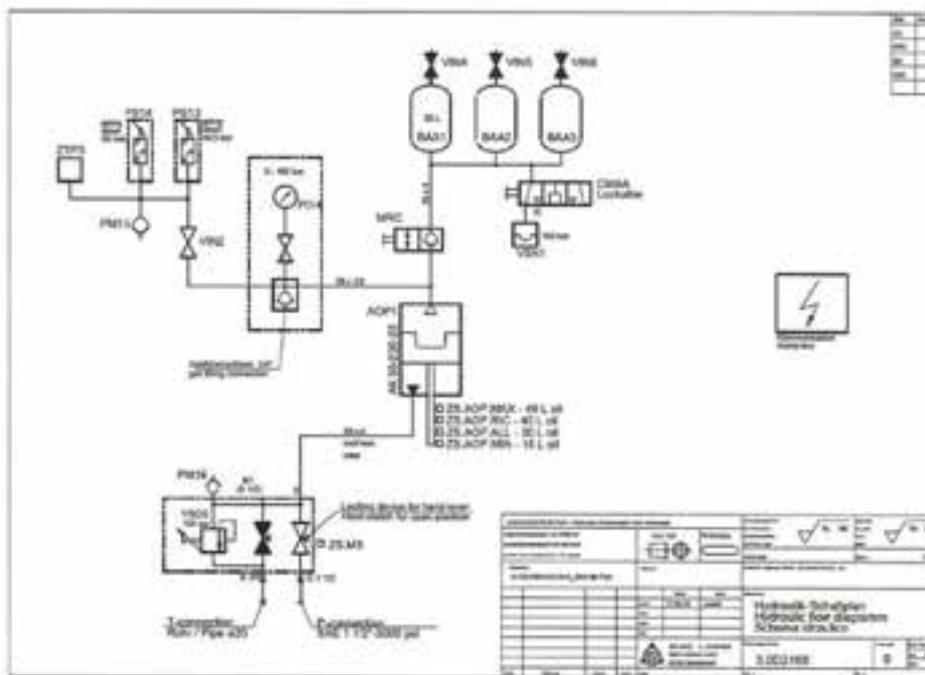


Figura 7. Schema tipo dell'impianto

Per tutte le centrali della CVA SpA oggetto di verifica da parte dell'Inail, in considerazione delle differenti certificazioni a corredo delle singole attrezzature ed in alcuni casi degli insiemi, tenuto conto anche delle documentazioni tecniche agli atti della CVA SpA, la Uot di Aosta, in collaborazione con le Uot di Alessandria e di Avellino, ha proceduto, come da normativa e su istanza della stessa C.V.A. SpA, ad effettuare le attività di verifica di messa in servizio ai sensi dell'art. 4 del d.m. 329/2004 presso numerose Centrali Idroelettriche, e successivamente, alla denuncia di messa in servizio ai sensi dell'art. 6 del d.m. 329/2004.

Gli impianti presenti nelle centrali sono stati progettati per poter funzionare in automazione in modo da realizzare le sequenze di logica di funzionamento, nonché di effettuare anche i controlli per la rilevazione di eventuali anomalie di funzionamento, comandando l'arresto del gruppo generatore.

Il gruppo di generazione e accumulo olio è protetto da eventuali sovrappressioni indotte sia dal lato olio che dal lato gas. Il lato olio è protetto con valvole di blocco che intervengono, ad esempio, nel caso di accensione accidentale di entrambi i gruppi elettropompa.



Figura 8. Impianto “tipo” in centrale idroelettrica

I recipienti lato gas, nelle diverse condizioni riscontrate sul campo, sono protetti da eventuali sovrappressioni, determinate dall’incremento di temperatura, con valvole di sicurezza o con dischi di rottura (nelle foto di Figura 9 si riportano i relativi esempi).



Figura 9. Differenti dispositivi di sicurezza:
Valvola di sicurezza (tarata a 210 bar) e Disco di rottura (tarato a 210 bar)

I singoli recipienti a pressione componenti le attrezzature sopra descritte nella totalità delle attività svolte sono dotati di Dichiarazione di conformità ai sensi della Direttiva 97/23/CE. In Tabella 2 si riporta l’esempio delle tipologie di attrezzature per una centrale composta da n. 4 recipienti (3+1):

Tipologia dell’attrezzatura	NF o matricola	Con marcatura CE	Producibilità/ superficie/ capacità/DN	PS (bas)	TS (bar)	Fluido
1) Recipiente	0001	X	50 litri	220	-50/+80	N2/OLIO
2) Recipiente	0002	X	50 litri	220	-50/+80	N2/OLIO
3) Recipiente	0003	X	50 litri	220	-50/+80	N2/OLIO
4) Recipiente	0004	X	50 litri	220	-50/+80	OLIO

Tabella 2. tipologie di attrezzature per una centrale composta da n. 4 recipienti

In alcuni casi le attrezzature sono certificate come “insieme” secondo la descrizione riportata in Tabella 3, con riferimento all’elenco di cui sopra:

CARATTERISTICHE TECNICHE DELL' INSIEME							
Tipologia	PS (bar)	TS* C		FLUIDO			VOLUME (litri) max
		MIN	MAX	Natura	Stato	Gruppo	
Insieme a pressione	120/160	-10	+80	OLIO/N2	L/G	2	200

Tabella 3. Caratteristiche tecniche di un insieme a pressione

In relazione alle caratteristiche indicate, le attrezzature e/o insiemi sono classificati in **Categoria di Rischio IV**.

Le attrezzature saranno soggette a Verifiche Periodiche in relazione ai disposti normativi di cui all’ allegato VII del d.lgs. 81/08 e s.m.i. [2] e del d.m. 11 aprile 2011 [3] secondo la periodicità ivi riportata:

... *omissis*...

Attrezzature/insiemi contenenti fluidi del gruppo 2 (D.Lgs. 93/2000 art. 3). <i>Recipienti/insiemi contenenti gas compressi, liquefatti e disciolti o vapori diversi dal vapor d'acqua classificati in III e IV categoria e recipienti di vapore d'acqua surriscaldata appartenenti alle categorie dalla I alla IV</i>	Verifiche di funzionamento: triennale Verifica di integrità: decennale
--	---

4. Le condizioni al contorno nella gestione e manutenzione degli impianti

La presenza all’ interno della centrale idroelettrica, di attrezzature a pressione con elevati valori di pressione di esercizio, espone, il personale che opera nell’ambito delle attività di gestione e di manutenzione delle stesse, a condizioni di rischio di diversa natura:

- le interferenze con le altre attrezzature sono dovute alla presenza di organi rotanti in movimento ed in particolare con le turbine, anima centrale dell’impianto, nonché di attrezzature accessorie quali carriponte per la movimentazione delle attrezzature; in ogni caso le parti rotanti come si evince dalle foto allegate sono idoneamente protette e le attrezzature a pressione delocalizzate in aree non esposte a rischi di urti;
- per le attrezzature installate sulla diga di Cignana i rischi maggiori sono dovuti all’altezza del sito tale che gli operatori devono essere idonei alle visite di alta montagna, alla difficoltà di raggiungere il sito accessibile solo con il tunnel che collega la centrale con la diga, in elicottero o con una strada sterrata utilizzabile solo in estate;
- per ovviare alle basse temperature che si raggiungono i componenti sono installati in un idoneo locale al chiuso, le tubazioni corrono lungo l’interno della diga dove al suo interno si crea un microclima tale da non adottare accorgimenti tipo coibentazioni per proteggerle dal freddo;
- l’esposizione al rumore dovuto alla presenza delle turbine in funzionamento risulta sicuramente elemento di interferenza che, in considerazione della tipologia dell’attività prevede l’obbligo, per il personale che accede alla centrale, di idonei Dispositivi di Protezione Individuale (quali, ad esempio, cuffie antirumoree casco di protezione).

Inoltre notevole attenzione è stata posta dalla CVA SpA per affrontare la problematica degli *spazi confinati* in considerazione delle localizzazione di alcune centrali ubicate, in molti casi, a notevoli profondità variabili a seconda della struttura degli impianti.



Figura 10. Vista d'insieme della centrale di Gressoney con attrezzatura a pressione

Nel caso in esame infatti i recenti lavori di rifacimento della galleria di collegamento tra la Diga di Cignana e la Centrale di Maen ha consentito la realizzazione di idonee strutture che consentono l'accesso in sicurezza al personale impegnato nelle attività di verifica e di controllo delle condotte forzate.



Figura 11. Esempi di installazione delle apparecchiature e cunicolo di ispezione

5. Conclusioni

La descrizione del ciclo operativo di un impianto idroelettrico nel suo insieme costituito da un bacino di accumulo (Diga di Cignana) e da una centrale di produzione di energia elettrica (Centrale di Maen) consente di evidenziare quanto sia determinante, per la

corretta funzionalità dell'impianto, l'efficienza, la funzionalità e la manutenzione delle attrezzature a pressione ivi installate

Le attrezzature analizzate, pur nella semplicità operativa, rappresentano un elemento fondamentale per garantire condizioni di utilizzo in sicurezza delle opere in condizioni anomale di esercizio.

Le attrezzature a monte devono garantire la funzionalità dell'impianto idroelettrico in presenza di ghiaccio sul paramento della diga; inoltre date le condizioni ambientali estreme (basse temperature) questa possono essere a loro volta soggette ad anomalie di funzionamento.

A valle, le attrezzature a pressione sono installate per consentire l'apertura di valvole in condizioni di emergenza con valori di pressione abbastanza elevati tali da contrastare la pressione idrostatica determinata dai salti idraulici, elemento fondamentale per il funzionamento delle turbine.

La descrizione, nel presente lavoro, dei principali fattori di rischio di una centrale idroelettrica, evidenziati nell'ambito dell'esperienza di verifiche tecniche condotte dalle Uot di Aosta, di Alessandria e di Avellino nelle centrali della CVA SpA, ha lo scopo di focalizzare l'attenzione anche sugli aspetti di interferenza delle condizioni ambientali e climatiche.

L'analisi del contesto ambientale ed i rischi connessi al fattore climatico (basse temperature, neve e ghiaccio) non possono, infatti, essere trascurate nella definizione dei rischi connessi nella gestione, nel controllo e nella manutenzione di attrezzature a pressione installate in queste centrali, a garanzia degli aspetti di sicurezza non solo per i lavoratori coinvolti, ma anche per l'ambiente e per la popolazione.

6. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 (G.U. S.O. n. 22 del 28/01/2005).

[2] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L)

[3] Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, "Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo" (G.U. Serie Generale n. 98 del 29/4/2011 – S.O. n. 111)

Criticità operative nella gestione delle procedure di carico di serbatoi per lo stoccaggio ed infustaggio di acido formico. Analisi dei fattori di rischio di incidente rilevante per sovrappressione.

R. D'Eliseo¹, D. Cerrone¹, R. Modestino², M. del Gaudio²

¹ Comando provinciale Vigili del Fuoco Avellino

² Inail - Uot di Avellino

Sommario

Nelle aziende che si occupano di stoccaggio e distribuzione di prodotti chimici le operazioni di travaso rappresentano una delle fasi di maggiore criticità. Il presente lavoro descrive una situazione reale riscontrata in uno stabilimento assoggettato alla normativa Seveso d.lgs. 105/2015 in cui vengono stoccati e distribuiti i prodotti utilizzati nell'industria conciaria in particolare l'acido formico. Data la pericolosità della sostanza, la massima attenzione è rivolta al dimensionamento dei sistemi di sicurezza per la corretta gestione dei gas di sfianto e sovra riempimento.

L'acido formico, inoltre, deve essere correttamente manipolato e immagazzinato per evitare contatti anche accidentali con sostanze in grado di generare reazioni incontrollate.

1. Introduzione

1.1 Stabilimenti industriali a rischio di incidente rilevante

La pericolosità di un'industria che svolge attività inerente la produzione, l'immagazzinamento e la vendita di prodotti chimici è determinata dalla sua potenzialità di creare incidenti con conseguenti danni non solo all'interno dell'azienda ma anche all'ambiente circostante con diverse modalità di diffusione.

Dispersioni incontrollate possono interessare le matrici ambientali ed in particolare i liquidi possono inquinare il suolo o le falde acquifere, mentre in caso di reazioni incontrollate possono generarsi nubi tossiche che possono raggiungere anche luoghi molto distanti dal deposito.

La normativa europea che regola le attività a "rischio d'incidente rilevante" nasce proprio all'indomani del grave incidente avvenuto nel 1976 nello stabilimento ICMESA di Seveso (MI) in cui il sistema di controllo di un reattore chimico destinato alla produzione di triclorofenolo, un componente di diversi diserbanti, andò in avaria e la temperatura salì oltre i limiti previsti provocando la fuoriuscita di una nube tossica di Diossina con gravi danni alle persone ed all'ambiente.

Le potenzialità degli scenari incidentali che possono verificarsi in queste aziende sono associate alle proprietà delle sostanze, ai materiali usati e all'energia liberata dalle reazioni chimiche che possono coinvolgere tali sostanze.

Ai sensi dell'art.3 del d.lgs. 105/2015, quando un deposito di prodotti chimici detiene una quantità di sostanze chimiche superiore alle soglie indicate nell'allegato 1 del d.lgs. 105/2015 tale stabilimento viene identificato a "rischio di incidente rilevante".

Gli stabilimenti ricadenti nel campo di applicazione del d.lgs. 105/2015 sono suddivisi in due grandi gruppi, gli stabilimenti di "soglia inferiore" e stabilimenti di "soglia superiore" in funzione dei quantitativi di sostanze pericolose presenti.

Secondo la normativa vigente in materia di sicurezza industriale per "incidente rilevante" si intende *"un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verificano durante l'attività di uno stabilimento [...] che dia*

luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e in cui intervengano una o più sostanze pericolose".

Detto (R), il rischio che si verifichi un evento incidentale, calcolato come il prodotto della probabilità (P) che l'evento si verifichi per la magnitudo (M) del danno atteso, $R=P \times M$, il rischio per tali stabilimenti risulta avere una bassa probabilità di evento incidentale ma una elevata gravità, quindi possono discendere conseguenze disastrose, dovute a sviluppi incontrollati.

1.2 Seveso III, il recepimento in Italia della Direttiva 2012/18/UE

Il 26 giugno 2015, con l'emanazione del decreto legislativo n° 105, l'Italia ha recepito la direttiva 2012/18/UE (cd. Seveso III), relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

La Direttiva è nata all'indomani dell'incidente di Seveso ed ha seguito una evoluzione sintetizzata nella Figura 1:

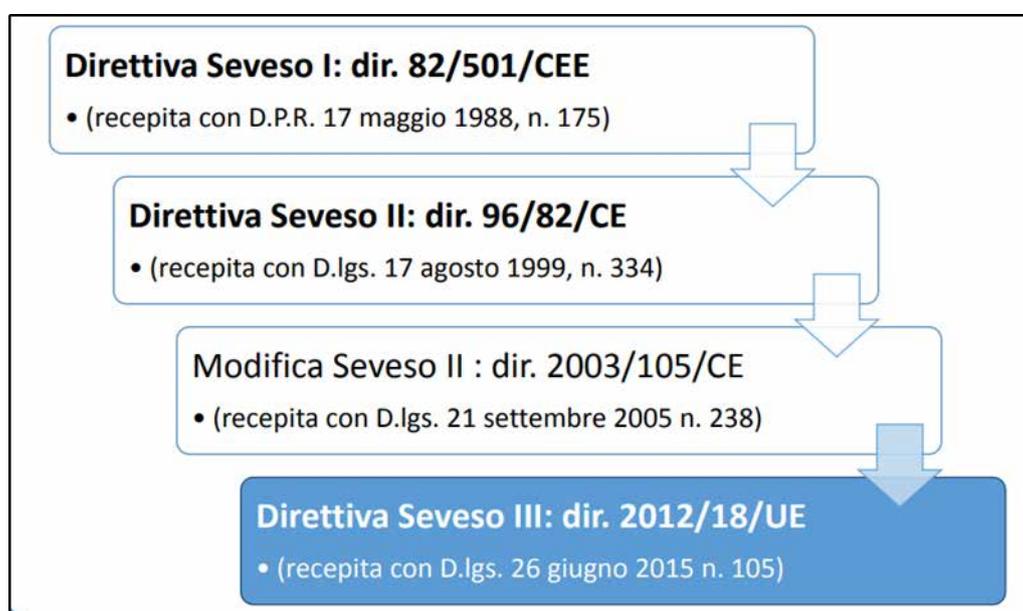


Figura 1. Evoluzione normativa

La Seveso I introdusse una sorta di censimento degli stabilimenti a rischio di incidente rilevanti per la detenzione di sostanze pericolose oltre una certa soglia e un controllo del rischio mediante la valutazione da parte dell'autorità pubblica, del Rapporto di sicurezza che gli stabilimenti devono redigere.

L'innovazione sostanziale della Seveso II, invece riguarda l'introduzione del concetto di effetto domino, cioè il concetto secondo cui la probabilità e le conseguenze di un incidente rilevante possono aumentare in base al luogo, della vicinanza delle sostanze presenti e degli stabilimenti.

L'ultimo aggiornamento della direttiva comunitaria, Seveso III, si è reso necessario per adeguare la disciplina al recente cambiamento del sistema di classificazione delle sostanze chimiche, al fine di armonizzare il sistema di catalogazione delle sostanze chimiche all'interno dell'Unione Europea con il GHS (Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals).

2. Il caso studio

2.1 Lo stabilimento

Lo stabilimento esaminato in questo lavoro risulta collocato nella provincia di Avellino e si occupa della produzione, immagazzinamento e vendita di prodotti chimici per la concia e rifinitura del pellame.

Lo stabilimento rientra nel campo di applicazione del D. lgs 105/2015 per la presenza di sostanze classificate nell'Allegato 1 del decreto come pericolose sia per quanto riguarda il rischio chimico che per i rischi di incendio ed esplosione.

Inoltre, nelle vicinanze dello stabilimento, collocato all'interno di un nucleo industriale, ci sono diversi punti sensibili che rendono lo studio particolarmente interessante per il possibile effetto domino che si può innescare nel caso in cui si verifichi un incidente.

I prodotti presenti all'interno dello stabilimento sono:

- Liquidi tossici
- Liquidi infiammabili
- Liquidi pericolosi per l'ambiente

Si riporta di seguito l'elenco delle principali sostanze presenti in quantità superiore al 2% rispetto al valore soglia indicato dall'Allegato I del D.Lgs. 105/2015.

Nome comune generico	Indicazioni di pericolo
Acido Formico 85%	H302-H331 H314
Aldeide Glutarica 50%	H302-H314 H317-H331 H334-H400
Glutaraldeide sol 50% con poco metanolo	H330-H301 H334-H317 H314-H411
Regulan GT 50 con poco metanolo	H330-H301 H334-H317 H335-H314 H410
Regulan GTW	H226-H314 H311-H330 H301-H334 H317-H350 H341-H371 H412
Eukosolar Bruno Scuro ER Liquido	H226-H319 H336-H411
Ammoniaca 31%	H314-H335 H400
Ipoclorito di sodio 14%	H290-H314 H318-H335 H400
Solfidrato di sodio	H290-H314 H318-H301 H400
Solfuro di sodio	H290-H301 H314-H318 H400

Tabella 1. Sostanze presenti in azienda.

L'attività lavorativa può essere distinta in diverse fasi schematizzate in Figura 2.

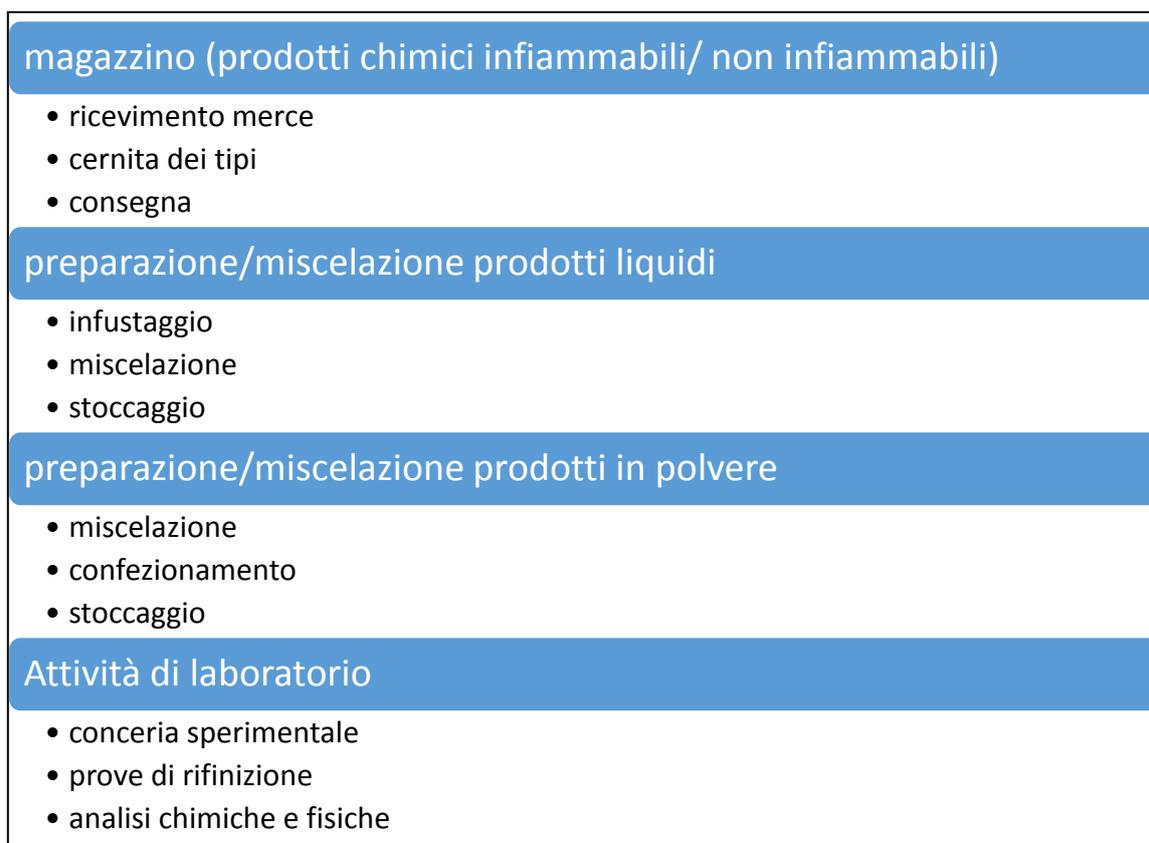


Figura 2. Fasi lavorative

2.2 Movimentazione dell'acido formico

L'acido formico è il termine più semplice della serie degli acidi carbossilici. Puro si presenta come un liquido mobile, incolore, dall'odore acutissimo, penetrante, e che alla pressione atmosferica bolle a 100,6 °C. Lo si può produrre industrialmente decomponendo, con acido solforico concentrato, il formiato di sodio, che a sua volta si ottiene facendo assorbire l'ossido di carbonio dall'idrossido di sodio a 120-150 °C, a una pressione di 6-8 atm.

L'acido formico è miscibile in glicerolo, acetato di etile, metanolo e acqua; è molto solubile in acetone, è un forte agente riducente, nocivo se ingerito, tossico se inalato e provoca gravi ustioni cutanee e gravi lesioni oculari.

Il liquido e i vapori sono infiammabili, pertanto deve essere tenuto lontano da fonti di calore, superfici calde, scintille, fiamme libere o altre fonti di accensione. In caso d'incendio occorre sapere che i vapori sono più pesanti dell'aria e si diffondono radenti al suolo. Forma miscele esplosive con aria a temperature elevate. Se riscaldato o in caso di incendio il prodotto può sviluppare fumi tossici. È vietato utilizzare getti d'acqua per l'estinzione ma solo CO₂, polvere o acqua nebulizzata.

In caso di rilascio non deve essere disperso in ambiente o nelle acque di scarico e gli operatori debbono essere muniti di appositi DPI per la protezione della pelle, degli occhi e delle vie respiratorie.

L'azienda immagazzina acido formico sia come prodotto sfuso che come prodotto imballato.

La movimentazione avviene secondo le fasi seguenti:

- a) Prodotto sfuso:
 1. Ricezione a mezzo di autobotti;

2. Lo stoccaggio in serbatoi
3. Infustaggio del prodotto in fusti e/o cisternette

b) Prodotto imballato:

1. Ricezione a mezzo autorticolato;
2. Scarico con muletti elettrici e o gasolio;
3. Stoccaggio nelle aree di deposito.

La fase oggetto di studio sarà quella riguardante lo stoccaggio del prodotto sfuso in idonei serbatoi. L'impianto è automatizzato sia nelle fasi di carico del prodotto nei serbatoi sia nella fase di scarico e riempimento degli imballi.

2.2 Descrizione degli eventi incidentali

Mediante la Fault Tree Analysis, e il relativo albero degli eventi rappresentato in Figura 3, il rapporto di sicurezza permette di evidenziare - in modo quantitativo - i rapporti esistenti fra gli eventi, a partire dagli eventi scatenanti per arrivare fino a quelli intermedi e di guasto di entità più o meno grave.

In particolare mediante l'applicazione di questa metodologia sono emersi i seguenti top event:

- Top event 1A: perdita significativa di liquido durante operazioni di carico serbatoio;
- Top event 1B: perdita significativa di liquido durante la fase di infustamento;
- Top event 2: danni meccanici al serbatoio per sovrappressione;

Costruito l'albero di guasto, è possibile passare alla soluzione dell'albero, consistente in una sua analisi finalizzata al calcolo della frequenza di accadimento del top event.



Figura 3. Albero degli eventi top event 2

3. Analisi dei fattori di rischio per sovrappressione

3.1 Gestione del “troppo pieno”

Partendo dal presupposto che tutte le unità di deposito contenitori e stoccaggio degli acidi, sia che siano serbatoi fissi o mobili, devono essere progettati e costruiti in accordo alle normative vigenti e comunque alle regole di buona tecnica, in particolare:

- il materiale di costruzione deve essere acciaio al carbonio per acido solforico e acciaio inox per acido formico o altri materiali con sufficiente resistenza all'azione corrosiva delle sostanze acide per il cui contenimento sono stati progettati e costruiti;
- tutte le unità, serbatoi fissi o mobili, devono essere collocate lontano da fonti di calore, sostanze chimicamente incompatibili, sostanze infiammabili

in questo contesto si vuole evidenziare e analizzare i fattori di rischio connessi alla possibile sovrappressione che si può creare nei serbatoi contenenti l'acido formico e i conseguenti danni meccanici al serbatoio (Top event 2).

L'acido formico utilizzato nello stabilimento viene stoccato in un impianto, raffigurato in Figura 4, composto da 4 serbatoi cilindrici verticali in acciaio Inox AISI 316; le caratteristiche principali dei serbatoi e dell'impianto in generale sono schematizzate nella Tabella 2 e in Figura 5.

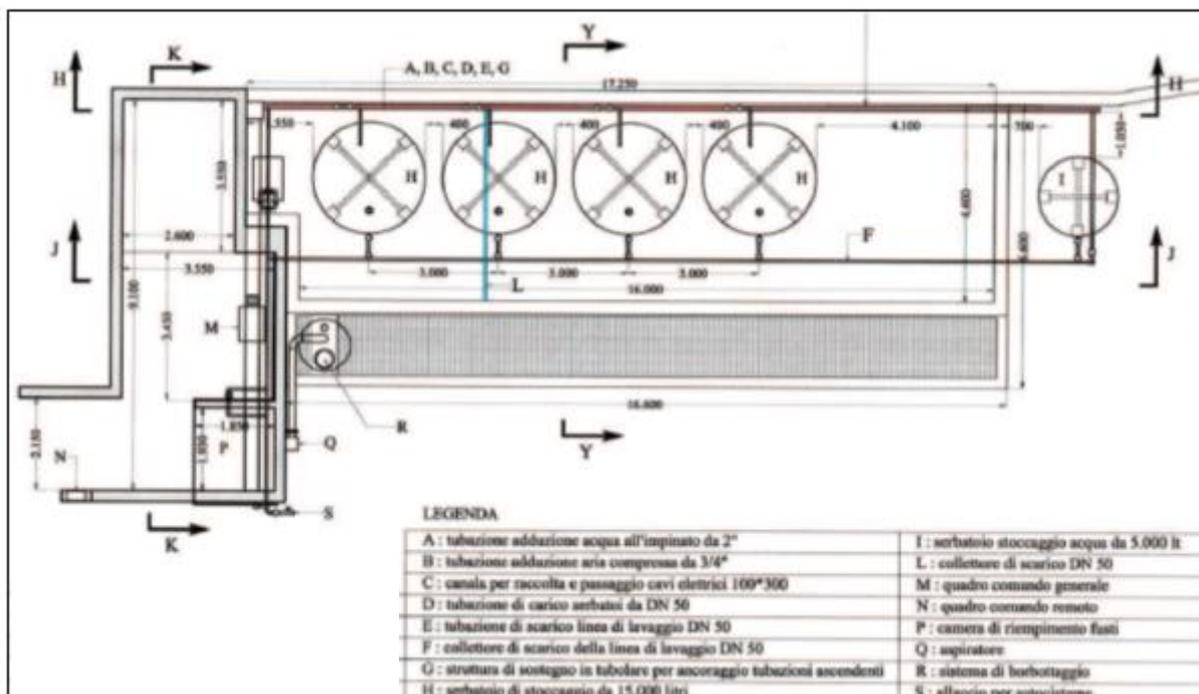


Figura 4. Pianta impianto di stoccaggio

Tipo	Fuori terra
Volume [m ³]	15
Tetto	fisso
PS	≤0.49bar

Tabella 2. Dati del serbatoio

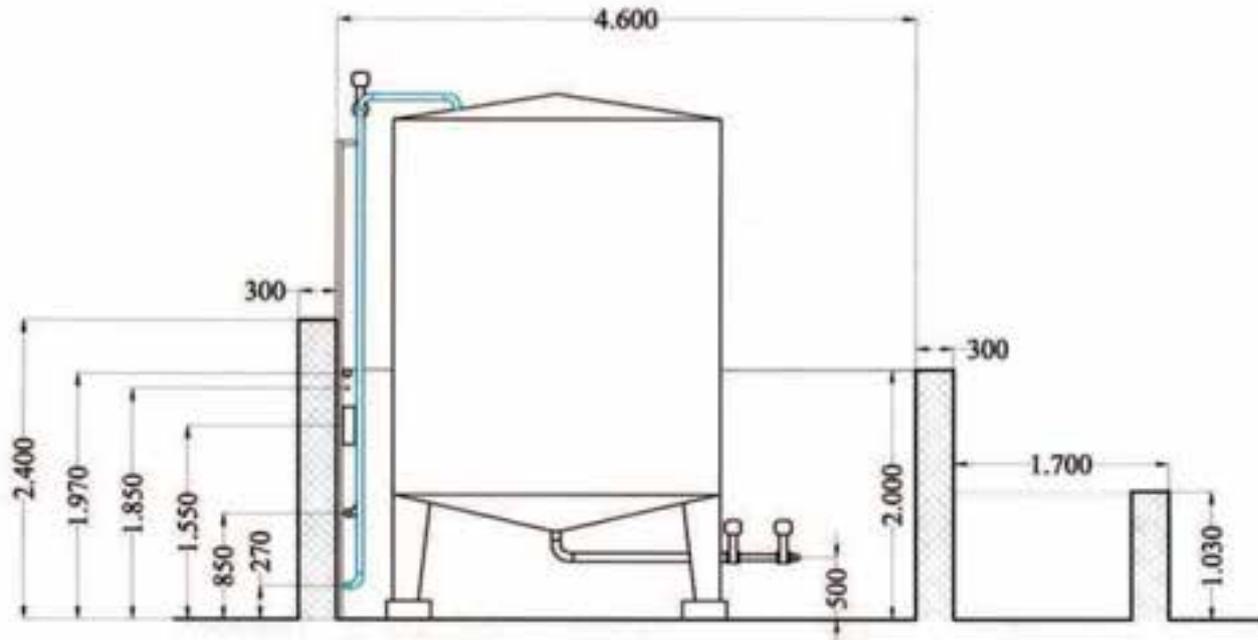


Figura 5. Caratteristiche serbatoio acido formico

I serbatoi sono dotati di tubazioni per la fuoriuscita del liquido in eccesso rispetto al livello massimo consentito (tubazione di troppo pieno).

Questi, possono essere esposti a condizioni pericolose nel momento in cui in fase di riempimento, i sistemi di rilevamento del “troppo pieno”, non entrano in funzione, determinando così una sovrappressione all’interno.

Quindi pur rispettando la corretta installazione e mantenimento dei serbatoi, si è esposti ad un rischio di perdita di liquido durante le operazioni di carico del serbatoio, dovuto ad eventuali danni meccanici che lo stesso può subire a causa della sovrappressione determinata dal “troppo pieno”.

Questo aumento di pressione può essere facilmente controllato mediante il corretto funzionamento della valvola di respirazione.

La conseguenza invece di un eventuale blocco della valvola in posizione chiusa, è la generazione di una sovrappressione all’interno del serbatoio tale da provocare danni meccanici in corrispondenza della saldatura tetto-mantello, parte strutturalmente più debole di tutto il serbatoio con conseguente fuoriuscita del liquido.

Sono stati previsti, inoltre, sistemi di raffreddamento per evitare problemi di sovrappressione legati ad eventuali aumenti di temperatura.

3.2 Piano di stoccaggio

Un ulteriore aspetto da non trascurare sono le precauzioni impiantistiche da adottare al fine di evitare scarichi incontrollati di eventuali rilasci da serbatoi e tubazioni.

L’elaborazione di un piano di stoccaggio di sostanze pericolose è un processo molto complesso, in quanto richiede il soddisfacimento di diversi requisiti di sicurezza, distinti in requisiti generali per tutte le classi di stoccaggio e requisiti specifici e riguardano aspetti generali, protezione antincendio, protezione delle acque, sicurezza sul lavoro; numerose sono pertanto le disposizioni giuridiche vigenti e le relative prescrizioni legali da applicare.

A riguardo lo stabilimento in esame ha previsto la distinzione di diverse aree di stoccaggio in base ai diversi prodotti utilizzati, in particolare è stato realizzato un apposito reparto di stoccaggio e infustaggio dell’acido formico.

Sono state adottate speciali precauzioni per la manipolazione e lo stoccaggio, in relazione alla codifica di pericolosità prevista per il prodotto.

I serbatoi sono dotati di idonea vasca di contenimento per gestire eventuali sversamenti accidentali dei prodotti. L'impianto è automatizzato sia nella fase di carico che scarico. I vapori prodotti vengono convogliati in un impianto di abbattimento per poi essere immessi in atmosfera. I locali sono dotati di un impianto idrico antincendio e di dispositivi di sicurezza per la manipolazione e movimentazione dei prodotti.

4. Conclusioni

Negli stabilimenti in cui vengono manipolati e stoccati prodotti chimici tossici è possibile ridurre ma mai eliminare il rischio di dispersioni in ambiente. In presenza di quantità rilevanti tali attività sono individuate come attività a rischio di incidente rilevante e assoggettate alla al D.lgs. 105/2015 che prevede l'adozione obbligatoria di un sistema di gestione della sicurezza. Il decreto prevede quindi una elevata attenzione da parte del gestore alla riduzione dei rischi per la protezione dei lavoratori e dell'ambiente e della popolazione. Le fasi di carico scarico ed imballo dei prodotti chimici rappresentano uno dei punti critici. In questa fase è elevato il rischio di dispersioni di prodotto con possibili effetti tossici ed in alcuni casi addirittura di rischio incendio ed esplosione.

L'esame del rischio legato alla sovrappressione dei serbatoi di acido formico conferma che in questo settore è di fondamentale importanza, ai fini del raggiungimento degli obiettivi della sicurezza, effettuare controlli sistematici e prevedere programmi di manutenzione e ispezione periodica degli impianti e attrezzature oltre ad un preciso rispetto della normativa vigente per la corretta realizzazione delle aree di stoccaggio.

I serbatoi utilizzati per lo stoccaggio dell'acido formico non sono sottoposti ad una pressione massima ammissibile PS superiore a 0,5 bar, in quanto operano a pressione atmosferica; pertanto per la progettazione, fabbricazione e valutazione di conformità di tali attrezzature non è necessario applicare la Direttiva 2014/68/UE (PED).

5. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. GU Serie Generale n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38.

[2] Manuale di progettazione per strutture in acciaio inossidabile. Euro Inox e The Steel Construction Institute 2006.

[3] Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152 Norme in materie ambientali, GU 14/04/2006 consolidato Marzo 2018.

La sicurezza del cilindro monolucido in acciaio nelle cartiere: procedura per la valutazione della resistenza a fatica

A. Piccinocchi¹, F. Simoncini¹, M. Beghini², C. Santus²

¹ Toscotec SpA

² DICl - Università di Pisa

Sommario

Il cilindro monolucido è il cuore della macchina della linea di produzione per la carta *tissue* e per altre carte speciali. Si tratta di un recipiente in pressione di grandi dimensioni (fino a 6700 mm di diametro e 6000 mm di larghezza) che effettua l'asciugatura del foglio prima che questo venga arrotolato su bobine di elevato diametro.

Storicamente i monolucidi erano realizzati tramite grandi fusioni in ghisa. Negli anni si sono registrati numerosi incidenti o danneggiamenti che hanno portato, in molti casi, a conseguenze disastrose a causa della deflagrazione che segue il cedimento del cilindro. A partire dagli anni 2000 sono stati introdotti i primi cilindri in acciaio e questo ha reso necessario effettuare una revisione delle procedure di dimensionamento e fabbricazione con una particolare attenzione agli aspetti legati alla sicurezza del componente. Da un lato la duttilità dell'acciaio conferisce al cilindro una sicurezza intrinseca molto più elevata di quella garantita dalla ghisa; di contro, il processo di fabbricazione, che comprende operazioni di saldatura, è potenzialmente foriero di difetti diversi da quelli prodotti nella fusione. Risulta pertanto necessario adottare specifici criteri per l'accertamento della qualità dei materiali e dei processi in modo da garantire l'assenza di difetti che potrebbero portare a problemi strutturali nel tempo. Il presente articolo si propone di fornire indicazioni sulle *best practice* da applicare per il dimensionamento dei cilindri in acciaio e per la definizione di procedure di controllo da effettuare durante la vita operativa, al fine di minimizzare il rischio di un cedimento catastrofico sia in condizioni di normale esercizio sia nell'ipotesi di sollecitazioni non completamente prevedibili in fase di progetto.

1. Introduzione

Il presente lavoro si inserisce in un progetto di approfondimento e di ricerca svolto in collaborazione con il laboratorio di prove meccaniche del Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (DICl) dell'Università di Pisa.

Il cilindro monolucido è un recipiente in pressione alimentato con vapore d'acqua saturo usato come fluido termovettore per trasportare l'energia necessaria all'asciugamento della carta. La pressione del vapore all'interno può raggiungere il valore di 10 bar (r). Oltre ad essere pressurizzato, il cilindro ruota con una velocità periferica elevata (fino a 2000-2200 m/min, corrispondenti, a seconda del diametro, ad una frequenza di rotazione di 2-3 Hz) e sollecitato dal carico di uno o due rulli, o presse (Fig. 1.1), che sono premuti contro la superficie. I rulli esercitano pressioni lineari uniformi (con valori massimi di 150 kN/m) con la funzione di trasferire il foglio sulla superficie del cilindro e contribuire all'asciugatura della carta tramite un'azione di tipo meccanico.

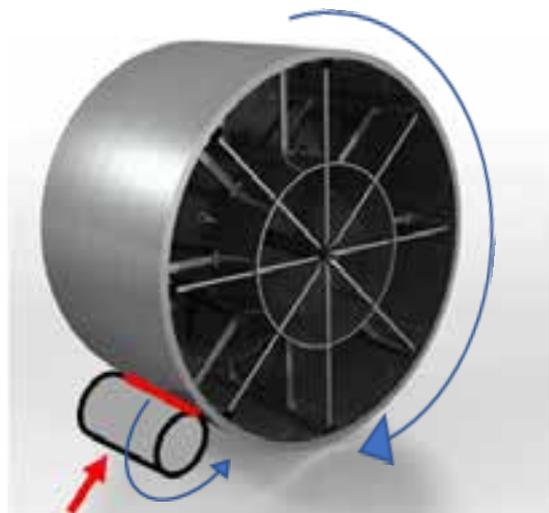


Fig. 1.1 Pressa e cilindro

Il componente risulta pertanto sollecitato, oltre che da carichi che possono essere considerati statici, anche da carichi ciclici che potrebbero causare l'innescio o la propagazione per fatica di eventuali difetti. È inoltre necessario considerare che i cilindri hanno vita operativa molto lunga, dato che la sostituzione di un monolucido è un investimento importante che prevede anche complesse operazioni di installazione. Nel normale esercizio si possono pertanto superare 10^9 cicli di sollecitazione.

Il monolucido appartiene alla categoria dei dispositivi speciali essendo anche un recipiente in pressione. Per tale ragione, la progettazione non può prescindere dal rispetto delle norme vigenti. In questa trattazione si fa riferimento al codice ASME [1] per le procedure di dimensionamento che garantiscono la resistenza strutturale. A causa delle particolari condizioni operative, l'analisi di affidabilità del componente deve essere supportata da un'attenta analisi di tutti gli aspetti che possono produrre fenomeni di degrado nel tempo e che sono legati alla tecnologia costruttiva e a possibili deviazioni dalle condizioni operative considerate in sede di progetto.

In maggiore dettaglio, gli aspetti da considerare sono i seguenti:

- qualità dei materiali usati per la costruzione del monolucido,
- qualità dei processi tecnologici di fabbricazione e dei conseguenti criteri di accettazione dei difetti che possono essere introdotti durante la fabbricazione,
- definizione dei controlli non distruttivi (CND) e considerazione dei difetti non rilevabili (aspetto fortemente dipendente dai criteri di accettabilità e dai CND disponibili),
- evoluzione dei difetti (accettati o ipotizzati) in relazione ai carichi affaticanti con un approccio basato sulla meccanica della frattura,
- influenza sull'evoluzione dei difetti dei carichi a basso numero di cicli e dei possibili sovraccarichi accidentali di processo,
- esame del componente in relazione alla possibilità di manifestare un meccanismo di cedimento non catastrofico del tipo *leak before break* in caso di propagazione dei difetti [2],
- programmazione razionale di controlli nell'arco di vita del cilindro al fine di garantirne periodicamente l'integrità.

Il presente articolo è prevalentemente focalizzato sugli aspetti relativi al comportamento dei difetti accettabili e sull'analisi della loro evoluzione dal punto di vista della meccanica della frattura. Sono riportati i risultati di prove di caratterizzazione degli acciai impiegati nella fabbricazione effettuate in corrispondenza del materiale base, delle zone fuse del cordone di saldatura e delle zone termicamente alterate. Le prove sono state eseguite al fine di caratterizzare il materiale nelle zone di massima sollecitazione rispetto al fenomeno della propagazione di difetti per fatica introdotti dalle procedure di fabbricazione e tollerati in base ai criteri stabiliti.

2. Approccio basato sulla teoria della meccanica della frattura

L'analisi seguente utilizza la teoria della meccanica della frattura lineare elastica per condurre la verifica strutturale del monolucido. Di seguito sono valutati i principali parametri che potrebbero portare a rottura fragile.

2.1 Rottura fragile

L'approccio utilizzato per analizzare lo stato tensionale all'apice dei difetti è descritto dalla teoria della meccanica della frattura lineare elastica [3] e fa riferimento al calcolo del *fattore di intensificazione delle tensioni*:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \text{ [MPa}\sqrt{\text{m}}] \quad (2.1)$$

- K_I : fattore di intensificazione delle tensioni [MPa $\sqrt{\text{m}}$],
- β : fattore adimensionale che dipende dalla geometria elemento-difetto (ricavato da letteratura tecnica e tabellato),
- σ : tensione nominale (che si avrebbe in assenza di difetto) [MPa],
- a : dimensione caratteristica del difetto [m].

La tensione nominale σ è la componente nella direzione perpendicolare al piano del difetto, ovvero la tensione che tende ad aprire il difetto (rottura in modo I) in modo che propaghi sul suo piano aumentando la lunghezza a . È importante notare che si ha intensificazione delle tensioni solo in presenza di una sollecitazione positiva (di trazione). Ai fini dello studio, cautelativamente i difetti sono sempre ipotizzati appartenenti al piano ortogonale alla direzione delle massime tensioni principali.

Per la verifica di stabilità, si considera la condizione di massimo carico e si calcola il fattore di intensificazione delle tensioni K_I per la cricca ipotizzata. Tale valore è quindi confrontato con il K_{IC} , ovvero con il valore critico superato il quale si prevede la propagazione instabile del difetto e la conseguente rottura catastrofica del componente. Il K_{IC} , una proprietà del materiale che ne definisce la tenacità a frattura, viene determinato mediante prove standard definite dalla norma ASTM E399 [4].

2.2 Crescita del difetto per fatica

In presenza di un carico ciclico è possibile che un iniziale difetto piano possa crescere stabilmente nel tempo fino a diventare eventualmente critico, in base al criterio definito nel paragrafo precedente. La meccanica della frattura permette la modellazione anche di questo fenomeno tramite la variazione del fattore di intensificazione delle tensioni nel ciclo:

$$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

- ΔK : variazione del fattore di intensificazione delle tensioni [MPa $\sqrt{\text{m}}$] nel ciclo di carico,
- $\Delta \sigma$: variazione della tensione nominale in corrispondenza del difetto [MPa].

Nella variazione della tensione $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ deve essere posto $\sigma_{min} = 0$ se $\sigma_{min} < 0$. L'avanzamento del difetto comporta un aumento del fattore di intensificazione delle tensioni K_I . Il difetto può quindi crescere e raggiungere, nella vita operativa, la condizione critica ($K_I = K_{IC}$). La tipica legge di evoluzione di una cricca in condizioni di fatica è mostrata in Fig. 2.1. Sull'asse delle ordinate è riportato l'avanzamento per ciclo della cricca (da/dN) e sulle ascisse la variazione del fattore di intensificazione delle tensioni ΔK . Nel diagramma si possono distinguere tre zone: la zona I, che parte da valori di ΔK molto bassi fino alla soglia della variazione del fattore di intensificazione delle tensioni (ΔK_{th}),

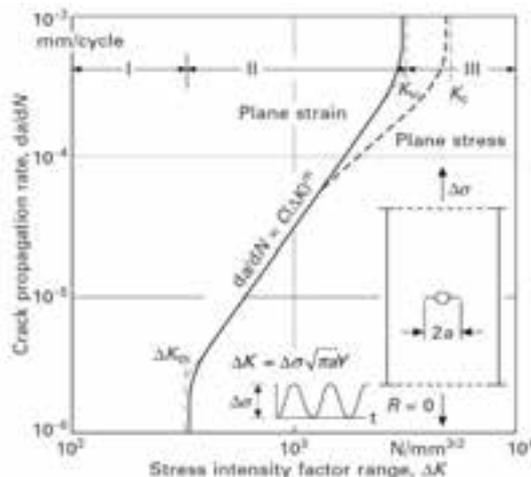


Fig. 2.1 Avanzamento del difetto sottoposto a carico ciclico

nella quale le sollecitazioni non producono avanzamento del difetto; nella parte centrale della zona II la propagazione è descritta dalla legge di Paris [3], che prevede una relazione lineare tra il logaritmo di da/dN e il logaritmo di ΔK ; infine la zona III che comprende la fase in cui il difetto ha dimensioni tali da generare un fattore di intensificazione delle tensioni K_I che si avvicina a K_{Ic} .

3. Comportamento a rottura del cilindro di ghisa

Il valore di K_{Ic} per una ghisa di comune impiego nella fabbricazione dei monolucidi è nell'ordine di $K_{Ic-ghisa} = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ [3]. Considerato che secondo le normative più comuni la tensione massima ammissibile di lavoro nella ghisa è pari a $\sigma_{\text{max}} = 52 \text{ MPa}$ (TAPPI Journal [5]), è possibile calcolare la dimensione di riferimento del difetto (superficiale) in corrispondenza della quale si raggiunge il valore di K_{Ic} :

$$a_{\text{max}} = \left(\frac{K_{Ic}}{\beta \sigma_{\text{max}}} \right)^2 \frac{1}{\pi} = 21 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Lo spessore dei monolucidi in ghisa in prossimità del fondo gola è abitualmente maggiore di tale valore, pertanto i cilindri in ghisa possono essere soggetti a rottura fragile catastrofica prima che la cricca attraversi lo spessore, per cui prima che si manifesti un segnale rilevabile dall'esterno. In effetti numerose sono state nel recente passato le conferme di questo comportamento, con esplosioni catastrofiche che hanno prodotto gravi danni.

4. Comportamento dell'acciaio

4.1 Condizioni operative di processo

Nelle fasi di progettazione, realizzazione ed esercizio:

- sono effettuati controlli e verifiche sulla qualità dei materiali dei semilavorati e sulle lavorazioni (con particolare riguardo alle saldature),
- sono valutate le caratteristiche di resistenza dei materiali che compongono il cilindro anche mediante prove specifiche,
- sono calcolate le sollecitazioni a cui è sottoposto il componente, generalmente tramite simulazioni FE tridimensionali.

Sulla base di questi aspetti il componente è progettato in modo che non presenti rotture nel corso dell'intera vita e, in particolare, che eventuali difetti presunti non crescano per carichi affaticanti.

4.1.1 Controllo della qualità in fabbricazione

Qualità delle lamiere

La qualità delle lamiere di acciaio è di fondamentale importanza nella costruzione del manufatto. Dato l'elevato spessore da cui parte il ciclo produttivo (anche oltre 100 mm), la qualità della laminazione e l'assenza di difetti sono un requisito indispensabile. Le lamiere vengono scansionate con gli UT (Ultrasonic Test) prima dell'operazione di calandratura con una procedura di controllo specifica al fine di garantire l'assenza di delaminazioni ed inclusioni macroscopiche nel loro spessore. Eventuali difetti posti sul piano di laminazione presentano una criticità minore rispetto a difetti posti su piani perpendicolari. Per questo è ragionevole adottare criteri di accettabilità dei difetti diversi rispetto a quelli usati, per esempio, per l'accettazione di difetti introdotti dalle saldature, che possono invece essere posti su piani normali alle direzioni di massima sollecitazione.

Qualità delle saldature

Le saldature impiegate nel processo produttivo realizzano i collegamenti strutturali tra i diversi semilavorati. I difetti di saldatura sono i più frequenti difetti iniziali da cui il processo di crescita per fatica si origina. I possibili difetti presenti nei giunti di saldatura sono di due tipi: difetti planari o a carattere allungato (cricche, incollature, incomplete fusioni, inclusioni di scoria allungate) e difetti volumetrici o a carattere tondeggiate (soffiature). Nel modello analitico della meccanica della frattura, i difetti di cui bisogna tenere di conto sono quelli planari.

Per ogni saldatura vengono effettuati i CND che coprono il 100% del volume delle zone saldate. Attualmente le tecniche di indagine tramite i raggi X sono state sostituite da scansioni agli ultrasuoni UT [6]. Con le tecniche di analisi UT: TOFD (Time Of Flight Diffraction) e PA (Phased Array), è possibile individuare la presenza di eventuali imperfezioni, localizzarle e stimarne l'estensione. L'utilizzo combinato delle due tecniche permette di ottenere l'ispezione per l'intera profondità della saldatura come richiesto dalle normative.

Il rispetto delle norme in vigore (per esempio ASME VIII Div.1 [1]) è condizione necessaria per la conformità del componente e per la sua messa in servizio. Il paragrafo 12-3 delle ASME (Acceptance-rejection standards) fornisce le indicazioni relative alla modalità di trattamento dei difetti segnalati dallo strumento di controllo UT. Dato che la norma prevede l'inaccettabilità dei difetti piani, indipendentemente dalla loro dimensione, il loro rilievo impone un intervento di riparazione della saldatura. È comunque sempre il livello di taratura e la sensibilità dello strumento che stabilisce la dimensione minima del difetto rilevabile. Si assume, cautelativamente, che all'interno del componente possano rimanere difetti di dimensione massima fino a 2 mm in senso radiale, poiché la sensibilità della taratura effettuata permette di rilevare con certezza i difetti di dimensione maggiore.

4.1.2 Caratterizzazione del materiale

Per verificare che nel componente non si creino le condizioni per una crescita stabile per fatica di una macro-cricca, è necessario verificare che sia rispettata la relazione $\Delta K < \Delta K_{th}$. ΔK dipende dallo stato tensionale e dalla geometria del componente e del difetto, mentre ΔK_{th} dipende dal materiale e dal rapporto di carico (K_{min}/K_{max}). In letteratura è possibile reperire valori di ΔK_{th} relativi al materiale base. I difetti di interesse sono però prevalentemente introdotti dalle saldature, pertanto si è reso necessario caratterizzare sperimentalmente il comportamento di un giunto saldato prodotto e trattato seguendo le medesime procedure usate per la costruzione del monolucido. Questo ha comportato l'impostazione di una campagna di caratterizzazione ad hoc. La procedura di prova seguita per la determinazione del ΔK_{th} è descritta dalla norma ASME E647 [7]. Le prove sono state progettate e svolte nel laboratorio di prove meccaniche del dipartimento DICI dell'Università di Pisa.

Il giunto saldato è composto da zone distinte con caratteristiche metallografiche e meccaniche diverse. Si è reso pertanto necessario caratterizzare tre zone trattandole come materiali differenti:

- il materiale base delle lamiere in acciaio (BM: Base Metal)
- il materiale d'apporto nel cordone di saldatura (WM: Welded Metal)
- il materiale della zona termicamente alterata all'interfaccia tra il cordone e il materiale base (HAZ: Heat - Affected Zone)

Per il dimensionamento dei provini, in base all'articolo di Park e Lee "Effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate" [8], è stato calcolato lo spessore, affinché fosse rispettata la stessa condizione presente nel monolucido di stato piano di deformazione all'apice della cricca:

$$B_{\min} > 2,5 \left(\frac{\Delta K_{\max}}{\sigma_{ys}} \right) 1000 = 19,8 \text{ mm} \quad (4.1)$$

in cui B_{\min} è lo spessore minimo richiesto per garantire lo stato di deformazione piano (plane strain) nel provino [mm], ΔK_{\max} è la variazione massima del coefficiente di intensificazione delle tensioni, applicato durante la prova e σ_{ys} è la tensione di snervamento del materiale. Sulla base di tale risultato, è stato definito lo spessore $B = 20 \text{ mm}$.

Per favorire l'avanzamento della cricca sul piano medio del provino, è stata utilizzata la tecnica dell'intaglio laterale (side groove), ovvero l'indebolimento della sezione di crescita. A tale scopo è stato effettuato un intaglio di raggio $R = 1 \text{ mm}$, per cui, per garantire lo spessore della sezione resistente pari a 20 mm , il side groove è stato applicato a provini di spessore di 22 mm (Fig. 4.1). Essendo le zone saldate e termicamente alterate disomogenee, senza il side groove si avrebbe avuto un rischio maggiore di crescita non planare della cricca, oppure prodotta su un piano inclinato rispetto a quello di avanzamento desiderato.

Si riporta di seguito in Fig. 4.2 la serie di punti sperimentali ottenuti da una prova effettuata sul materiale base e sovrapposta la curva di progetto cautelativa ottenuta:



Fig. 4.1 Provino con side groove

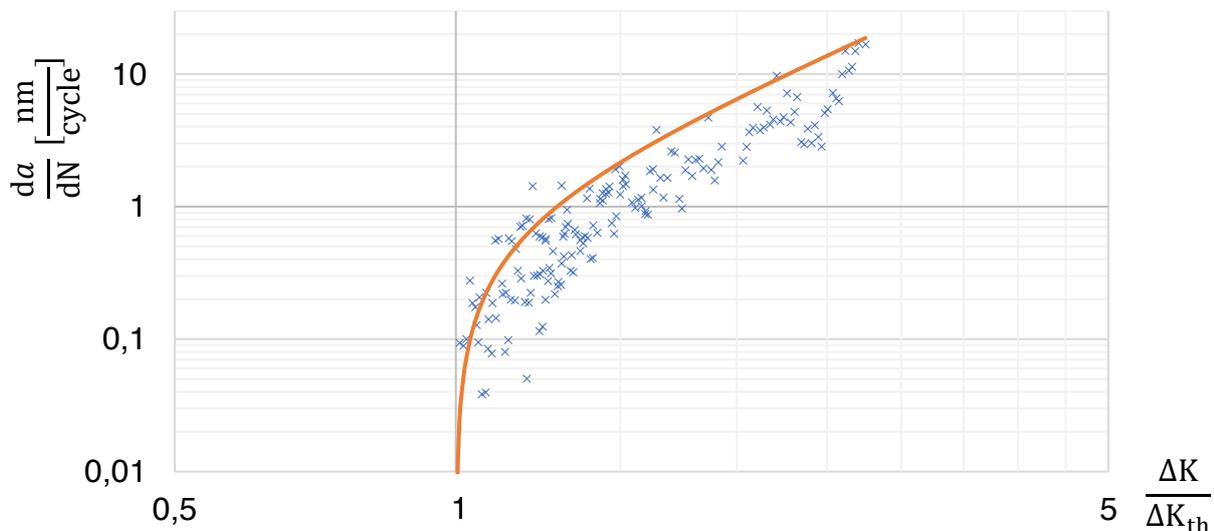


Fig. 4.2 Curva di progetto e prova effettuata sul materiale base

4.1.3 Verifica del componente

Si riassumono di seguito i parametri analizzati che influenzano direttamente la verifica a fatica del componente. La formula (2.2) relativa alla variazione del fattore di intensificazione delle tensioni è stata corretta con il modello di Newman e Raju [9], che tiene di conto della variazione di tensione nella direzione dello spessore della lamiera. Nelle condizioni operative del cilindro oggetto dell'analisi si stima:

$$\Delta K = 3,35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (4.2)$$

considerando le peggiori condizioni dei termini che influiscono su tale valore, tra cui:

- $\Delta\sigma_{\theta\theta}$: carico alternato massimo in corrispondenza della superficie esterna del cilindro nella sezione di mezzeria,

- $a = 2 \text{ mm}$: valore massimo del difetto accettato dalle specifiche. Cautelativamente è stato analizzato il caso di difetto superficiale.

Questo valore verifica la relazione:

$$\Delta K < \Delta K_{th} \quad (4.3)$$

dove è stato preso dalle prove sperimentali il valore di ΔK_{th} minore tra i tre differenti materiali.

Le considerazioni sui controlli della qualità del componente effettuati durante la fabbricazione e i valori relativi alla caratterizzazione dei materiali ottenuti tramite le prove sperimentali ci permettono di affermare che non è prevista la crescita per fatica dei difetti accettati nel componente nelle condizioni operative standard.

4.2 Condizioni operative impreviste e teoria del Leak Before Break

Per la natura stessa dell'impianto cartario e per l'imprevedibilità di eventi casuali e di natura umana che possono verificarsi nelle cartiere in cui viene installato il cilindro, non si possono escludere eventi per cui lo stato tensionale del cilindro possa essere più intenso di quanto previsto in sede di progetto. Esempi di usi impropri del monolucido possono essere: l'utilizzo della pressa con un carico eccessivo (by-pass o mancanza sicurezze), la sovrappressurizzazione del cilindro a causa di anomalie dell'impianto vapore, errati cicli di riscaldamento o di raffreddamento.

Generalmente i sovraccarichi statici hanno un effetto benefico sulla crescita dei difetti perché inducono una plasticizzazione in prossimità delle zone di intensificazione delle tensioni che in genere danno origine a fenomeni di ritardo nella successiva crescita per fatica. In caso di sovraccarichi affaticanti potrebbero invece crearsi condizioni per cui si verifichi la crescita delle fessure più piccole di quelle tollerate e dunque presenti. Il numero di cicli effettuati nelle condizioni accidentali è sicuramente molto basso e non tale da indurre un avanzamento che porti fino alla rottura. Tuttavia si può ipotizzare che il minimo avanzamento indotto faccia sì che, quando il componente torna a operare nelle condizioni operative, il valore di ΔK raggiunto possa superare il ΔK_{th} per cui la cricca potrebbe continuare a crescere anche nelle condizioni operative. Cautelativamente si assume che la cricca iniziale abbia raggiunto dimensioni tali da essere sopra la soglia di crescita anche in condizioni operative.

In questo paragrafo si descrive la metodologia *Leak Before Break*, indicata nella norma BS 7910 [2], sviluppata per la verifica di sicurezza dei monolucidi anche in condizioni di uso improprio in modo che sia esclusa, in ogni caso, la rottura catastrofica del componente senza fenomeni di avvertimento. L'obiettivo è quello di verificare che un'eventuale difetto passante attraverso la parete del monolucido e in fase di crescita possa mantenersi di dimensioni inferiori a quelle critiche, per un tempo sufficiente a permettere agli operatori di accorgersi della sua presenza tramite lo sbuffo di vapore. In tal modo è possibile escludere cedimenti catastrofici che, in passato, hanno determinato gravi danni a persone e impianti.

4.2.1 Geometria del difetto iniziale

A seguito di eventi accidentali imprevedibili, si assume la presenza di una cricca superficiale, con geometria iniziale semiellittica (condizione ipotetica più gravosa) schematizzata in Fig. 4.3.

Le dimensioni caratteristiche iniziali derivano dalle considerazioni in merito alle dimensioni minime che permettono al difetto di propagare con le condizioni di carico

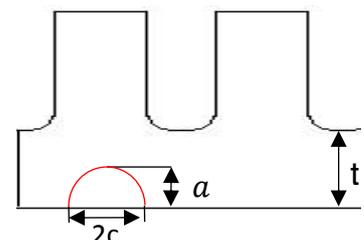


Fig. 4.3 Cricca iniziale

operative (dimensione in direzione radiale: $a = 4,5$ mm; dimensione in direzione longitudinale $c = 5$ mm).

4.2.2 Crescita della cricca

Applicando i modelli di Newman e Raju [9] è stata simulata la crescita, in funzione della variazione di ΔK su tutto il fronte, della cricca. In Fig. 4.4 è riportata l'evoluzione del fronte della cricca semi-ellittica: in blu la geometria della cricca iniziale, in rosso la cricca quando questa attraversa completamente lo spessore ($a = 30$ mm in questo caso) e raggiunge il

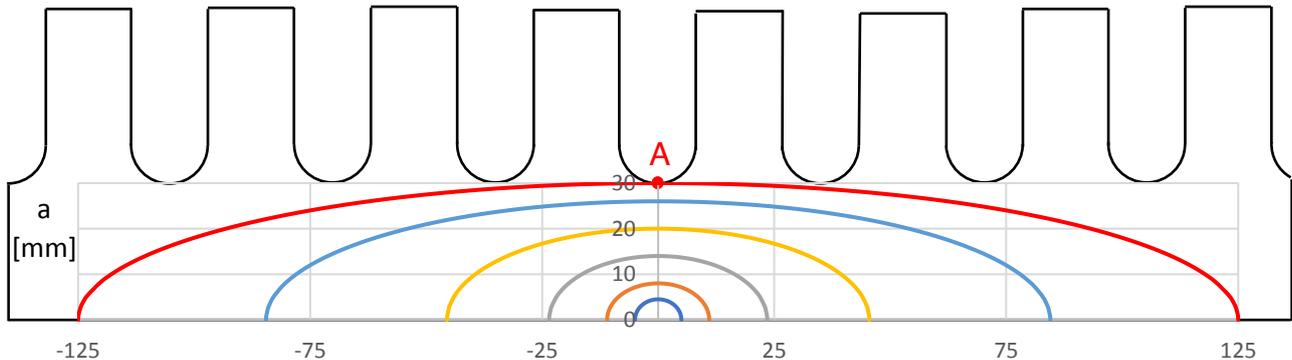


Fig. 4.4 Propagazione della fessura

fondo della gola nel punto A ($a = 30$ mm e $c = 125$ mm).

Nella direzione di a la dimensione della cricca è stata fatta avanzare con passo costante, mentre nella direzione di c la dimensione è stata aumentata di un valore sempre maggiore a quello in direzione a , imponendo che ad ogni iterazione il ΔK sul fronte, ai due apici della cricca, rimanesse costante in modo cautelativo. In effetti usando la legge di crescita in ogni punto del fronte di Klesnil e Lukas [10]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (4.4)$$

la cricca è prevista avanzare meno rapidamente in direzione della superficie. Con tale modello, quando la cricca attraversa lo spessore, la larghezza prevista è $c = 61$ mm (< 125 mm).

4.2.3 Geometria del difetto finale

Secondo il modello di evoluzione più cautelativo, quando il difetto attraversa lo spessore ($a = 30$ mm), si può assumere una cricca passante di semi larghezza pari a $c = 125$ mm. Usando sempre il modello analitico precedente, si calcola il valore di K_{I-max} all'apice di tale cricca:

$$K_{I-max} = 78,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (4.5)$$

che è comunque minore del valore $K_{Ic} = 130 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ caratteristico del materiale [11]. Si può dunque assumere che nell'istante in cui avviene la condizione di *leak* (perdita di vapore) non si ha rottura catastrofica del componente. Il K_{Ic} caratteristico del materiale è indicativo, poiché sperimentalmente non è possibile valutare questo parametro, se non utilizzando un provino di spessore elevato, oltre al fatto che non rappresenta completamente la modalità di rottura del componente nelle condizioni operative. Dall'articolo [11] e dalle prove sperimentali condotte per valutare la legge di Paris, si evince che al raggiungimento del K_{Ic} utilizzato corrisponde in realtà una plasticizzazione locale della sezione.

Anche in condizioni di *leak*, la cricca potrebbe continuare a propagare nella direzione longitudinale aumentando la sua larghezza c e incrementando conseguentemente la portata di perdita di vapore. Assumendo la velocità di propagazione della cricca come nel

modello descritto nell'articolo di Klesnil e Lukas [10], si calcola il tempo necessario affinché si raggiungano le dimensioni critiche pari a:

$$c_{\max} = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{\max}} \right)^2 \frac{1}{\pi} = 282 \text{ mm} \quad (4.6)$$

in cui si è considerata σ_{\max} la tensione media nello spessore delle lamiere. In queste condizioni la cricca impiegherebbe circa 1 mese a raggiungere le dimensioni critiche. Considerando che il calcolo è stato affrontato basandosi su assunzioni fortemente cautelative, si ritiene che il tempo stimato sia in linea teorica sufficientemente elevato perché l'operatore si possa accorgere della presenza del difetto e possa identificare il malfunzionamento dell'impianto.

5. Conclusioni

Il cilindro monolucido per cartiere è un componente meccanico estremamente sollecitato, non solo dalla pressione interna ma anche con carichi affaticanti. Nel lavoro sono stati descritti gli aspetti da considerare per garantire l'assenza di cedimenti catastrofici: utilizzando lamiere di acciaio con giunzioni saldate opportunamente ispezionate per la costruzione del cilindro e mantenendo le sollecitazioni nei limiti di progetto, non è prevista la possibilità che eventuali difetti di fabbricazione possano portare il cilindro a rottura. Inoltre, anche in presenza di eventi non prevedibili in fase di progetto, è stato verificato che si verifica la condizione di *leak before break* che permette di evidenziare chiari segni di malfunzionamento prima del raggiungimento delle condizioni catastrofiche. La modalità di rottura rende pertanto intrinsecamente sicuro il monolucido di acciaio correttamente progettato e realizzato. L'incertezza dovuta all'imprevedibilità degli eventi è tuttavia alla base di proposte per procedure di controllo durante la vita, che hanno il compito di confermare e garantire l'integrità del monolucido e la sua idoneità al servizio nel tempo.

6. Bibliografia

- [1] ASME “Boiler and Pressure Vessel Code VIII Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1” 2013.
- [2] BSI Standards Publication “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures” 2015.
- [3] R. Juvinall and K. Marshek, *Fundamentals of Machine Component Design* 2011.
- [4] ASTM “E399 - Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials” *Configurations*, vol. 90, no. Reapproved, pp. 1–31, 1997.
- [5] Tappi “Tappi Journal”
- [6] ASME “Boiler and Pressure Vessel Code V Nondestructive Examination” 2007.
- [7] ASTM, *E647 - Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, no. July 2005.
- [8] H.-B. Park and B.-W. Lee “Effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 197, no. 1–2, pp. 197–203, 2000.
- [9] J. C. Newman and I. S. Raju “Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional body subjected to tension and bending loads” .
- [10] M. Klesnil and P. Lukáš “Influence of strength and stress history on growth and stabilisation of fatigue cracks” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 4, no. 1, pp. 77–92, Mar. 1972.
- [11] V. Mehta “Evaluation of the Fracture Parameters for SA - 516 Grade 70 Material” vol. 13, no. 3, pp. 38–45, 2016.

Valutazione dell'integrità strutturale in esercizio dei cilindri monolucidi da cartiera

E. Becherini¹, S. Milani¹, M. Mencacci¹, N. Bravi², A. Dalmonte², E. Franchi²

¹ Ener Consulting Srl

² Inail - Uot di Lucca

Sommario

L'articolo si propone di valutare l'integrità strutturale in esercizio in caso di cricca dei cilindri monolucidi, chiamati anche Yankee Dryer, apparecchi in pressione di fondamentale importanza nell'industria cartaria *tissue* (carta igienica, fazzoletti, rotoli da cucina, etc.).

Infatti queste attrezzature hanno subito, nel corso degli anni, cedimenti di varia natura, alcuni dei quali con conseguenze catastrofiche, come documentato dalla pubblicazione SAFAP 2014 - N. Bravi e E. Franchi [1].

Il focus dell'articolo non è quindi quello di una verifica in progetto, ma di un'analisi in esercizio, tenendo in particolar conto gli effetti affaticanti e quindi quelli dovuti ad una cricca innescata con metodi Fitness for service (FFS), basati su concetti di meccanica della frattura.

1. Introduzione e scopo

Poiché l'apparecchio è soggetto a numerose tipologie di carichi, lo studio ha tenuto conto di tutte le azioni agenti, tranne i carichi eccezionali quali, ad esempio, gli effetti tellurici. Vista l'importanza sul territorio nazionale ed internazionale sia degli apparecchi costruiti in ghisa che in acciaio al carbonio, si è eseguito un'analisi comparativa. Lo studio è stato realizzato mediante l'ausilio di tecniche FEM avanzate. Per una correttezza dell'analisi e quindi una comparazione in termini di studi futuri, abbiamo scelto normative internazionali riconosciute a livello mondiale quali la BS 7910: 2015, ASTM, etc (si veda bibliografia). Riferendosi alla storicità degli incidenti più gravi avvenuti in Italia, abbiamo tenuto conto di una fessura nel mantello del cilindro: in realtà le rotture per genesi e propagazione di cricche può avvenire, come già riscontrato in passato, anche in altre parti del monolucido quali la bulloneria di giunzione testate-mantello, le testate, etc. che, per brevità, sono state omesse. Per maggiori delucidazioni sul funzionamento dei cilindri monolucidi nel contesto cartario e sulle genesi di altri tipi di rotture in esercizio si rimanda all'articolo *N.Bravi, E.Franchi. "Monolucido – "Yankee Dryer. L'esercizio in sicurezza" [1]* dal quale si è evinto anche la Figura 1 di un tipico cilindro monolucido in ghisa:

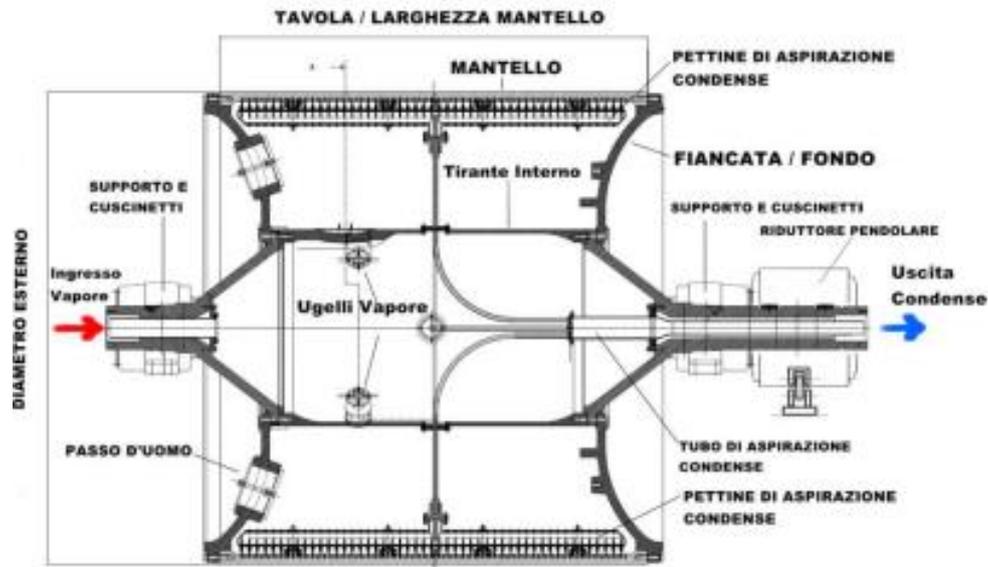


Figura 1. Tipico monolucido in ghisa lamellare

Si fa notare che, poiché molti cilindri in commercio sono coperti da brevetto, per motivi di correttezza e riservatezza, abbiamo ommesso disegni o particolari costruttivi delle varie aziende costruttrici, dando evidenza quindi delle sole analisi eseguite e dei soli risultati: le figure generiche degli yankee riportate sono state riprese da testi scientifici commercialmente acquistabili o comunque ricavabili dal web gratuitamente.

2. Nomenclatura

Per una puntuale comprensione dei successivi paragrafi si riporta la nomenclatura che verrà di seguito utilizzata:

MFLE	Meccanica della Frattura Lineare Elastica
K_I	Fattore di intensificazione delle sollecitazioni
K_r	Rapporto tra il fattore di intensificazione delle sollecitazioni e tenacità a frattura del materiale
k	Coefficiente di stato sollecitazione
V_{bi}	Spostamento in direzione normale alle superfici di frattura dei nodi B_i
L_r	Rapporto tra "reference stress" e tensione limite di collasso plastico
FAD	Failure Assessment Diagram
FAL	Failure Assessment Line
G	Tasso di rilascio di energia
R	Resistenza a frattura del materiale
da	Incremento dimensione cricca
ΔK	Variazione fattore intensificazione sollecitazioni durante ciclaggio
ΔK_{TH}	"Threshold Value" - Valore limite di soglia
a_{crit}	Dimensione critica cricca
Y	Coefficiente correttivo

3. Definizione del problema

Ai due cilindri studiati (in acciaio ed in ghisa), sono state applicate le tipiche condizioni al contorno di esercizio massime ammissibili, ossia carichi centrifughi, pressione interna, peso proprio, Nip loads e sollecitazioni indotte da gradienti termici, come usualmente viene svolto in fase di design. Questi ultimi sono dovuti alla temperatura interna del vapore pari a 184 °C ed al flusso di gas combusti sul mantello, provenienti dalle cappe, che creano una temperatura di parete dei mantelli, sotto carta, stimabile in 110 ° C.

La pressione interna del mantello è ovviamente pari a quella del vapore saturo ad una temperatura di 184°C, ossia 10 bar.

Si evidenzia uno schema dei carichi meccanici nella Figura 2 su una sezione del cilindro.

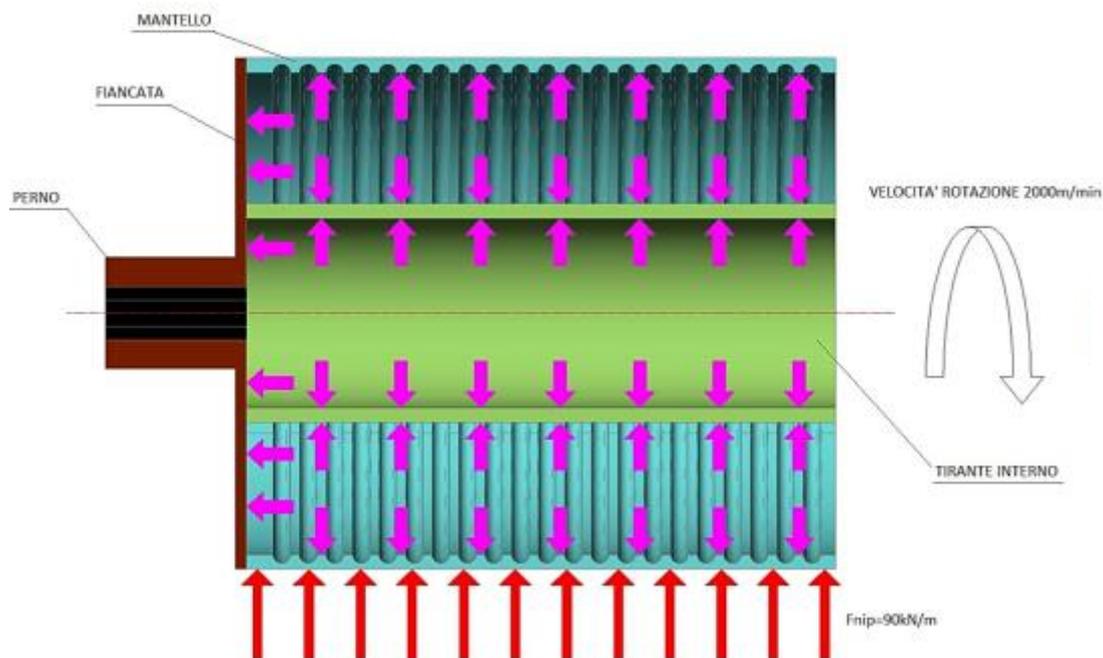


Figura 2. Nomenclatura dei componenti e definizione carichi

Le analisi strutturali sono state condotte tramite modelli FEM 3D dettagliati.

Le proprietà meccaniche dei materiali, assunta una temperatura di verifica pari a 184°C, vengono elencate in Tabella 1.

Materiale	Modulo Elastico [GPa]		Rapporto di Poisson ν [-]	Tensione limite di proporzionalità σ_y [MPa]		Tensione di rottura σ_u [MPa]	Tenacità a frattura $[MPa \sqrt{m}]$ K_{Ic}
	E_{RT}	E_{ET}		20°C	184°C		
	20°C	184°C					
Ghisa lamellare EN-GJL-200	88	84	0.26	170	148	200	13
Acciaio al carbonio SA 516 Gr.70	202	193	0.3	262	227	483	131

Tabella 1. Proprietà meccaniche materiali per le due tipologie di cilindri comparati

Al fine di valutare il comportamento del monolucido, in funzione del materiale impiegato, si è supposto la presenza di una cricca semi-ellittica, tipicamente tra le più diffuse, in

corrispondenza della giunzione fasciame - testata (come documentato dalla pubblicazione SAFAP 2014 - N.Bravi e E.Franchi [1]).

La geometria della cricca studiata viene mostrata in Figura 3 ed è simile ad un caso riscontrato tramite NDT su di un cilindro in ghisa in esercizio.

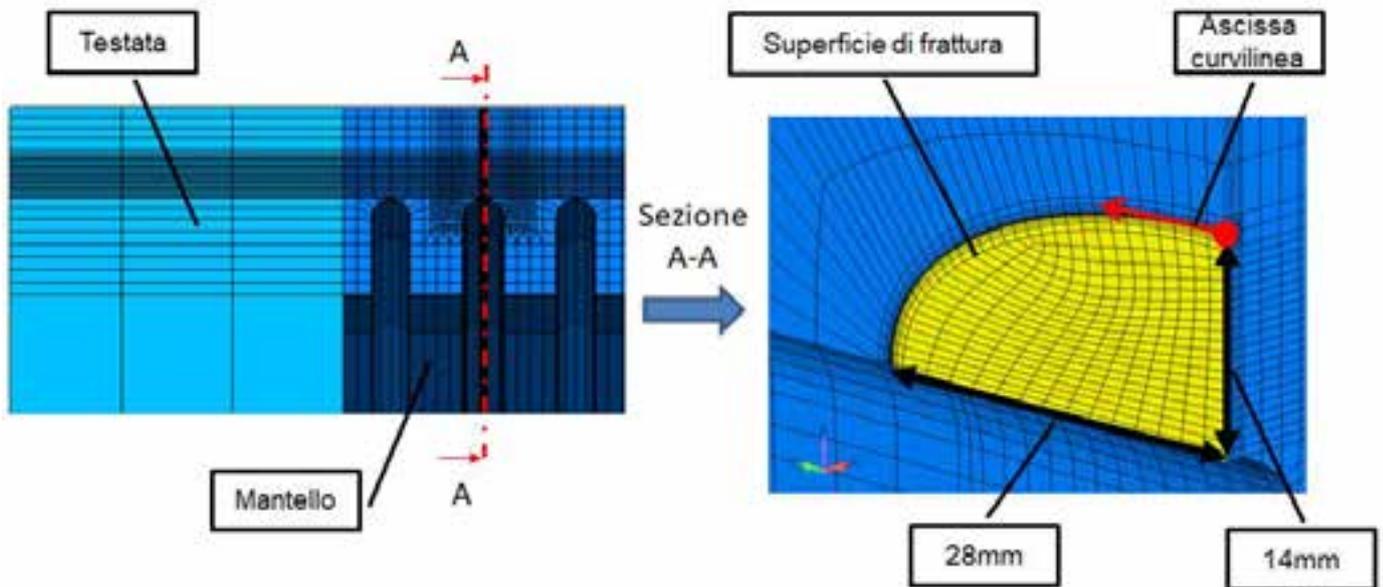


Figura 3. Cricca semi-ellittica

4. Valutazione integrità strutturale - Failure Assessment Diagram

4.1. Concetti Base

La valutazione dell'integrità strutturale è stata eseguita in accordo alla norma BS 7910:2015 "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures". Come da norma abbiamo definito il cosiddetto diagramma FAD (Failure Assessment Diagram), che riporta sull'asse delle ordinate il rapporto "Kr" tra il fattore di intensificazione delle sollecitazioni, calcolato in corrispondenza della cricca, ed il valore di tenacità a frattura del materiale, mentre in ascissa, il rapporto "Lr" tra la sollecitazione primaria ed il valore limite che genera il collasso plastico: in altre parole il diagramma rappresenta un metodo per valutare contemporaneamente sia collasso per frattura fragile che il cedimento, in presenza di cricca, dovuto ad una riduzione della sezione netta resistente.

Si riportano inoltre le linee, per ghisa e acciaio, che discriminano le regioni in cui il cedimento avverrà prevalentemente per frattura fragile da quella in cui sarà generato per collasso plastico.

Definendo i precedenti rapporti in più punti, lungo il fronte di fessura della cricca, è possibile determinare quello critico del componente in esame, il quale dovrà situarsi al di sotto della FAL (in nero per l'acciaio al carbonio, in rosso per la ghisa grigia lamellare). Entrambe le curve sono state determinate in accordo alla Opzione 1 della norma BS 7910:2015, di cui si riportano le funzioni in Tabella 2.

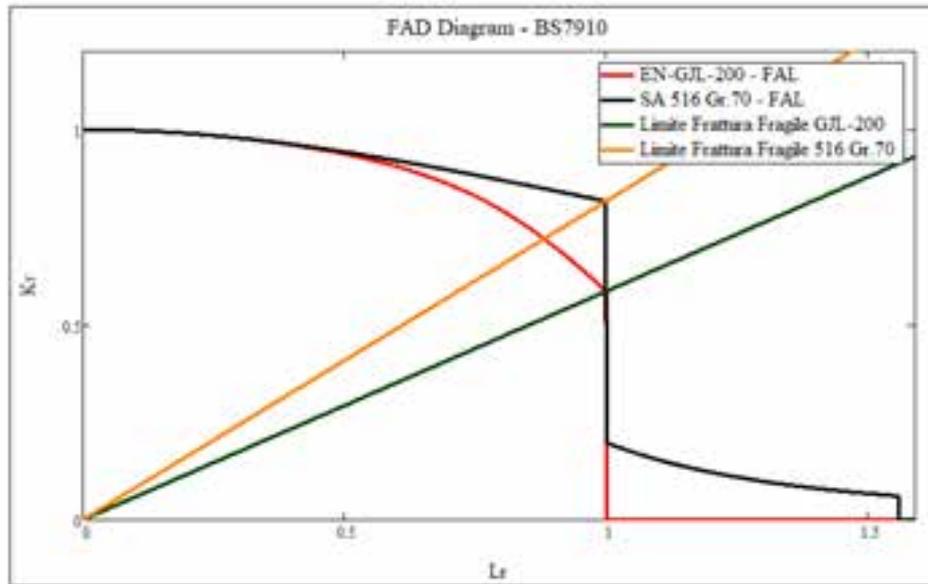


Figura 4. FAD (Failure Assessment Diagram)

La differenza fondamentale tra le due curve è data dal fatto che gli acciai a basso tenore di carbonio presentano nel classico digramma $\sigma - \epsilon$ un plateau di snervamento - modello di Lüders Strain – che non si ha invece nella ghisa (ed in generale nei materiali fragili). Il termine $L_{r,max}$, rappresenta il valore limite al di sopra del quale si otterrà la genesi di un collasso plastico, e può essere determinato tramite la seguente relazione per l'acciaio a carbonio (basata sul concetto di flow stress):

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2\sigma_Y} \quad (1)$$

mentre per la ghisa si può ritenere, come proposto da diversi autori (Rif.[7]):

$$L_{r,max} = 1 \quad (2)$$

in quanto risulta un materiale particolarmente fragile.

Materiale	Failure Assessment Line	Rapporto di carico L_r
EN GJL 200	$f(L_r) = \left(1 + \frac{1}{2}L_r^2\right)^{-12} [0.3 + 0.7\exp(-\mu L_r^6)]$	$L_r \leq 1$
SA 516 Gr.70	$f(L_r) = \left(1 + \frac{1}{2}L_r^2\right)^{-12}$	$L_r < 1$
	$f(L_r) = \left(\lambda + \frac{1}{2\lambda}\right)^{-12}$	$L_r = 1$
	$f(L_r) = f(1)L_r^{(N-1)/(2N)}$	$1 < L_r < L_{r,max}$

Tabella 2. Andamento $K_r(L_r)$ – Opzione 1 BS7910

4.2. Valutazione fattore intensificazione delle sollecitazioni - K_I

Il fattore di intensificazione delle sollecitazioni K_I è stato determinato tramite analisi FEM. Come da prassi nella meccanica della frattura lineare elastica, in corrispondenza dell'apice della fessura, sono stati utilizzati elementi "Wedge" del 2° ordine, nei quali si è provveduto a spostare il nodo intermedio ad una distanza pari a $L/4$ (Figura 5).

Questa semplice modifica permette di rappresentare in maniera più accurata la singolarità del tipo $\frac{1}{\sqrt{r}}$, in accordo alle formule di Westergaard.

Si rimanda a [3], [4] e [5] per le relative dimostrazioni matematiche.

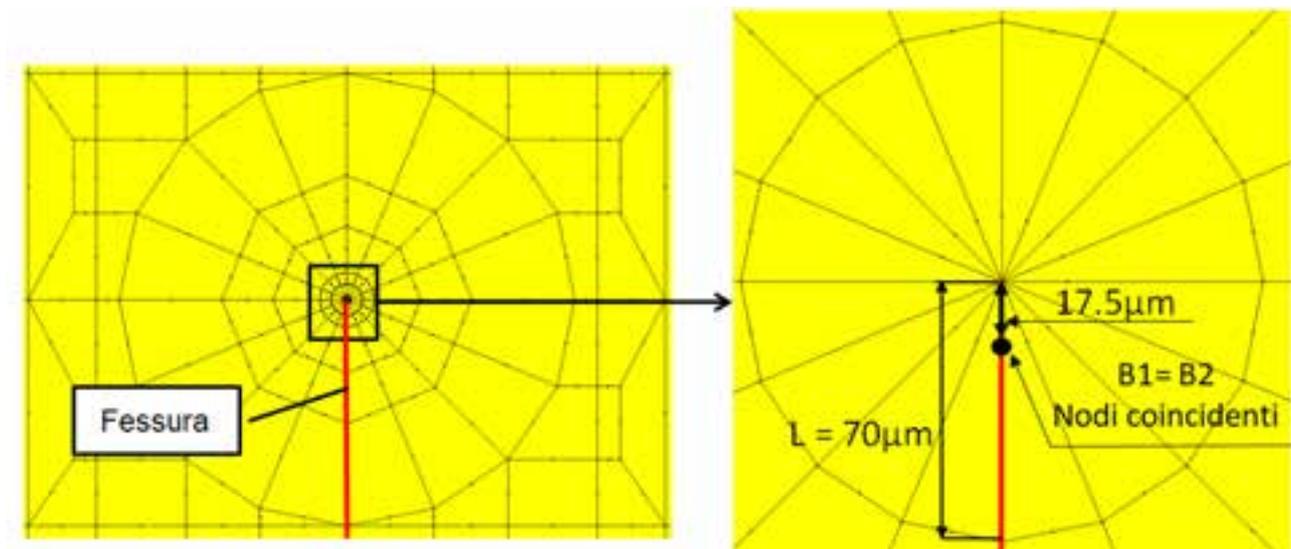


Figura 5. Dettaglio Mesh

Per la determinazione del parametro K_I , sono state sviluppate diverse tecniche, basate sia su parametri energetici (integrale J) che sugli spostamenti nodali come la tecnica "Quarter Point Displacement Technique".

Il valore K_I da noi valutato si basa su quest'ultimo approccio, ed è stato calcolato tramite la seguente relazione:

$$K_I = \frac{G}{(k+1)} \sqrt{\frac{2\pi}{l/4}} (v_{B2} - v_{B1}) \quad (3)$$

4.3. Valutazione sollecitazioni primarie – "Reference Stress"

Le sollecitazioni primarie, sia nel caso studiato di cilindro in ghisa lamellare, sia nel caso dell'acciaio, necessarie per la valutazione della condizione di collasso plastico del componente, sono state ricavate in più punti lungo il fronte di fessura, così da poterne combinare gli effetti con la modalità di cedimento per frattura fragile e determinare il punto critico dell'intero componente (per la richiesta brevità dell'articolo, la valutazione teorica di questi parametri si può desumere dalla BS 7910:2015 o API 579).

4.4. Risultati analisi FEM

I risultati della analisi agli elementi finiti, condotta in campo lineare elastico MFLE, sono riportati nel presente paragrafo.

In Figura 6 viene riportato il campo degli spostamenti, dal quale si evince come il “NIP Load”, tenda a flettere il mantello in maniera non trascurabile generando, durante la rotazione, sollecitazioni affaticanti di entità non trascurabile.

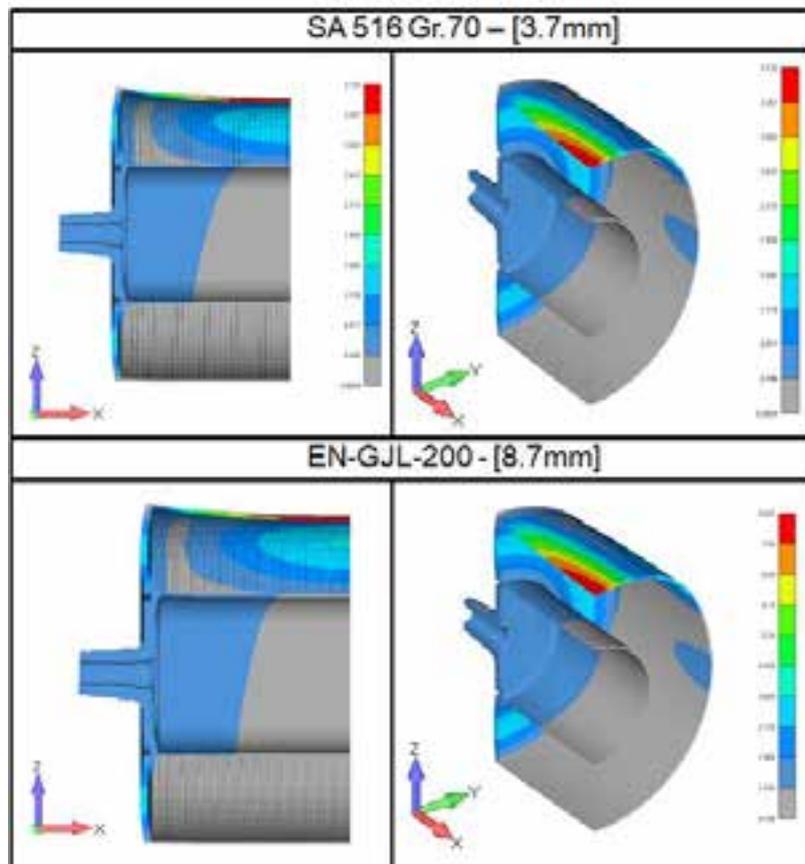


Figura 6. Spostamenti risultanti [mm] – Monolucido in Carbon Steel e Ghisa lamellare

In Figura 7 viene altresì mostrata la distribuzione delle sollecitazioni all’apice della fessura per entrambi i cilindri.

E’ interessante osservare come, sul fronte della cricca, e come ci dovevamo aspettare dalla teoria della Meccanica della Frattura lineare elastica, le sollecitazioni tendano ad infinito: tuttavia queste assumono un valore inferiore alla tensione limite di proporzionalità, già ad una distanza pari a 0.3 mm.

L’estensione ridotta della zona plasticizzata rappresenta una delle ipotesi di base della MFLE: ciò permette di considerare validi i risultati che seguono.

Per completezza, si riporta in Figura 8 la distribuzione delle sollecitazioni equivalenti, mentre in Figura 9 viene mostrata la distribuzione del fattore di intensificazione delle sollecitazioni K_I , entrambe definite lungo il fronte della fessura.

I risultati, in termini di sollecitazioni e di K_I , risultano pressoché identici nei due casi, a causa dell’isostaticità del sistema.

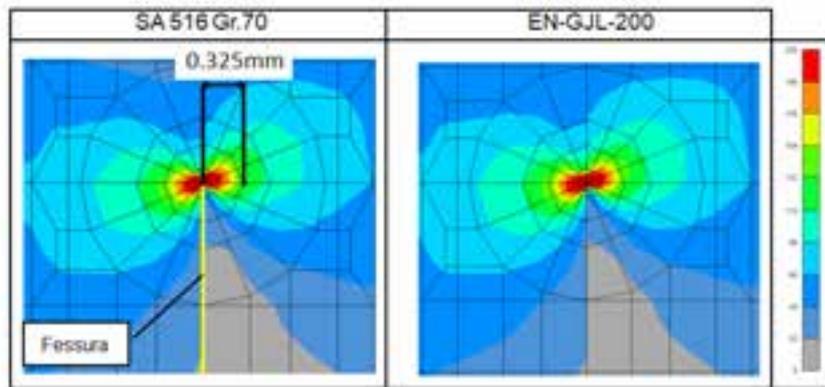


Figura 7. Distribuzione sollecitazioni all'apice della fessura

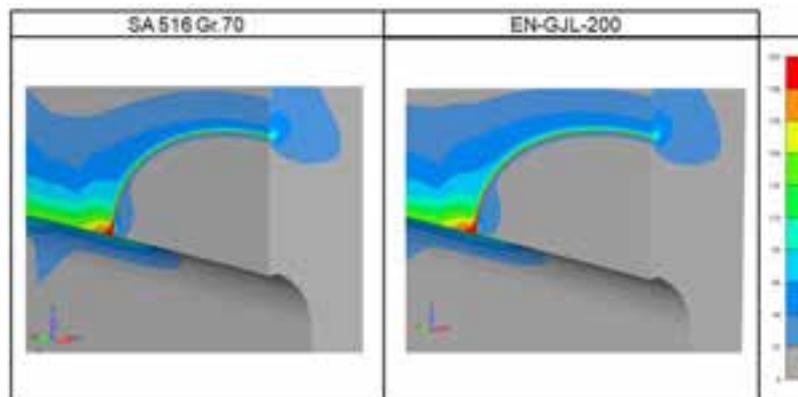


Figura 8. Distribuzione sollecitazione lungo il fronte della fessura

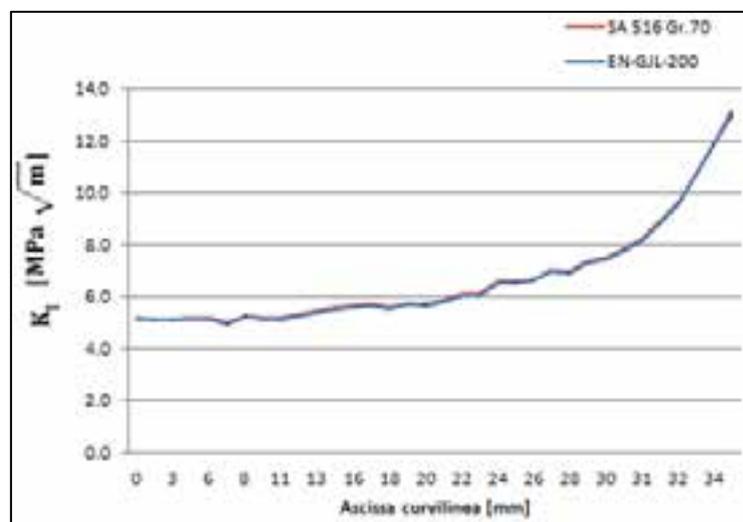


Figura 9. Distribuzione K_I lungo il bordo della fessura

4.5. Discussione dei risultati

Sulla base dei risultati riportati in Figura 10 si può constatare come, in corrispondenza del semi-asse maggiore della fessura, si ottenga una combinazione di sollecitazioni primarie ed un fattore K_I , che il componente in ghisa non è in grado di sopportare con conseguente collasso del mantello. In particolare, il cedimento del monolucido in ghisa avverrà prevalentemente per frattura fragile, in quanto la curva relativa al fronte di fessura (di seguito in colore grigio) si sovrappone alla corrispondente FAL, nella regione posta al di sopra della curva limite di frattura fragile.

Nel caso del componente in acciaio invece si ottiene una condizione di accettabilità: abbiamo infatti un Safety Factor sullo studio eseguito di circa 10%. Si osservi inoltre che, per questo elemento, la modalità di collasso prevalente è rappresentata dal cedimento plastico, in quanto abbondantemente al di sotto della relativa curva limite di frattura fragile.

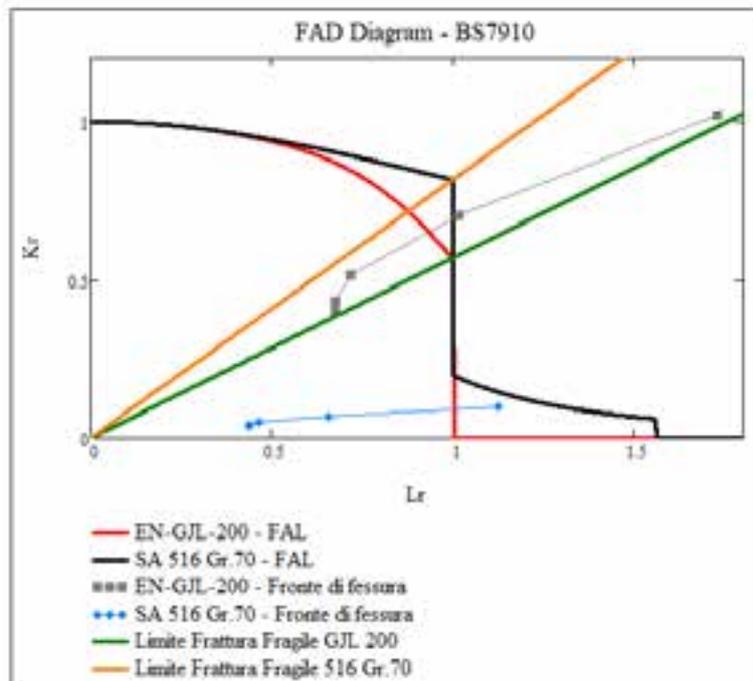


Figura 10. Diagramma FAD – Risultati

Nelle precedenti considerazioni non abbiamo ancora tenuto conto del funzionamento ciclico a cui i monolucidi sono sottoposti, che determinano comunque un accrescimento sub-critico della fessura.

5. Propagazione della frattura

Abbiamo precedentemente osservato come, nel caso del mantello in ghisa, la verifica non risulti soddisfatta, determinando una successiva propagazione della fessura.

Tale fenomeno, può tuttavia avvenire in maniera stabile ($da/dn = \text{costante}$) o instabile.

Affinché la propagazione avvenga in maniera instabile e con rottura fragile del componente, devono essere rispettate le seguenti condizioni:

$$\begin{cases} G \geq R & (\text{Analogo a } K_I \geq K_{IC}) \\ \frac{dG}{da} \geq \frac{dR}{da} & \text{Propagazione instabile} \end{cases} \quad (4)$$

La prima relazione fornisce la condizione affinché la propagazione della cricca possa avvenire, mentre la seconda indica la condizione affinché avvenga in maniera instabile.

I materiali fragili (come la ghisa), presentano un valore di “ R ” pressoché costante, e quindi la condizione di propagazione instabile viene raggiunta in un tempo minore.

Nel caso di materiali incrudenti invece, “ R ” assume un andamento crescente, e pertanto il cedimento per propagazione instabile verrà raggiunto in un momento successivo.

Finora non abbiamo considerato il fenomeno della flessione rotante il quale, combinato con il “NIP Load”, determina sollecitazioni alternate nel mantello.

Si suppone adesso che i carichi agenti nei due monolucidi siano tali da generare valori di K_I inferiori a quelli critici per i due materiali.

La presenza di sollecitazioni alternate determina, nel caso in cui ΔK risulti maggiore del valore limite di soglia ΔK_{TH} , un accrescimento sub-critico delle dimensioni della cricca durante la vita operativa. L'incremento della dimensione della cricca per ciclo, può essere ricavato, in maniera approssimata, tramite la relazione di Paris-Erdogan (Rif.[6]):

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (5)$$

Dove "A" ed "m", sono costanti caratteristiche dei materiali.

Per l'acciaio, la norma indica un valore "m" pari a 3 e fornisce la seguente relazione per il calcolo di "A" alla temperatura di esercizio Rif.[6]):

$$A = 5.21 \cdot 10^{-13} \left(\frac{E_{RT}}{E_{ET}} \right)^3 \quad (6)$$

I valori per la ghisa grigia sono stati invece ricavati da Rif.[9].

Materiali	A	m
EN-GJL-200	$2.6 \cdot 10^{-12}$	7.4
SA 516 Gr.70	$6.0 \cdot 10^{-13}$	3

Tabella 3. Costanti legge di Paris

Riportando in Figura 11, per ghisa ed acciaio, l'intervallo lineare del diagramma sigmoideale, che rappresenta il tratto in cui l'accrescimento sub-critico della cricca avviene in maniera stabile, possiamo notare come la ghisa presenti, a parità di ΔK , una velocità di propagazione, intesa come incremento di dimensione della fessura per ciclo, nettamente maggiore, il che determina il raggiungimento della dimensione critica della fessura in un minor numero di cicli. Si osservi infine come tale dimensione critica venga definita sulla base della seguente relazione, dalla quale si evince come, a parità di tensione nominale " σ ", e di geometria della fessura e modalità di applicazione del carico, considerate tramite il coefficiente "Y", assuma valori nettamente inferiori nel caso del mantello in ghisa:

$$a_{crit} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma Y} \right)^2 \quad (7)$$

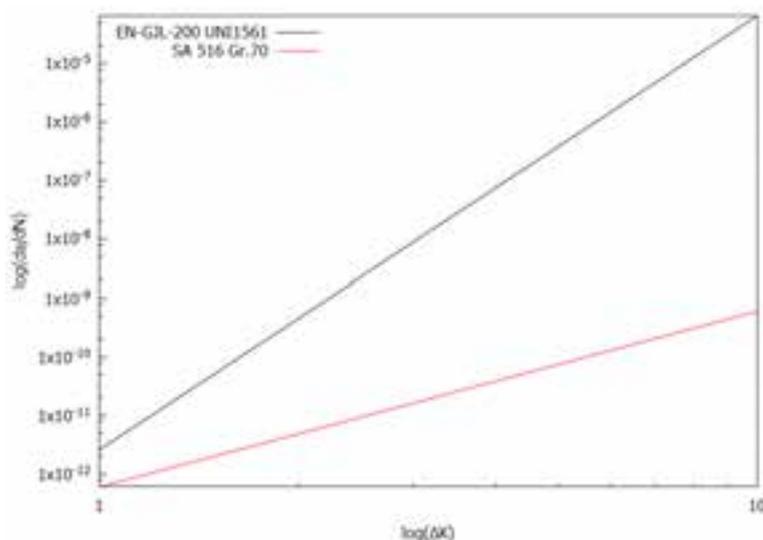


Figura 11. Tratto propagazione stabile del diagramma sigmoideale

6. Conclusioni

Il lavoro svolto, indipendente e di terza parte con riferimenti normativi certi, ha dato evidenza delle criticità di tipo strutturale riscontrabili nei cilindri monolucidi nei quali sia presente un difetto sul mantello. Quanto svolto è stato, a nostro avviso, solo un primo passo in avanti, poiché andrebbe esteso ad altre tipologie di componenti del monolucido ove spesso si rilevano dei difetti in campo e vuol essere quindi, solo uno stimolo per proseguire la ricerca in tal senso.

Si è in particolare osservato, come del resto intuibile ma mai verificato con criteri di Meccanica della Frattura, come i cilindri in ghisa lamellare siano particolarmente sensibili alla presenza di difetti e come ciò possa comportare un rischio maggiore, per l'utilizzatore, rispetto a quelli in acciaio con effetti anche catastrofici.

Altresì, come ci aspettavamo, anche nei cilindri monolucidi in acciaio, pur risentendo in maniera notevolmente minore della presenza di tali difetti, in funzionamento ciclico, è possibile determinare un accrescimento sub—critico della fessura con conseguente riduzione della sezione netta resistente e successivo cedimento per fatica: del resto, come già evidenziato, la resistenza a fatica del cilindro in acciaio è indubbiamente più alta rispetto a quella dei cilindri in ghisa.

Per quanto sopra detto, probabilmente sarebbe quindi opportuno differenziare la periodicità dei controlli tra i due tipi di cilindri, ossia restringere il campo temporale di controllo dei monolucidi in ghisa lamellare.

7. Bibliografia

- [1] N.Bravi, E.Franchi. Monolucido – Yankee Dryer. L'esercizio in sicurezza. Atti SAFAP, 2014. Roma, Novembre 2014
- [2] ASTM E 399 - Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, U.S.A., 1990
- [3] Roshdy S.Barsoum. On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. International Journal for numerical Method in engineering, 1976, Vol:10, pp. 25-37
- [4] S.Valente, A. Carpinteri. Meccanica dei materiali e della frattura. Pitagora Editrice. Bologna, 1992, pp. 143-202
- [5] T.L. Anderson. Fracture Mechanics. CRC Press, USA, 2016, pp.581-623
- [6] BS7910:2013+A1:2015 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures
- [7] U.Zerbst, M.Schödel, S. Webster, R. Ainsworth. Fitness for Service Fracture Assessment of structures Containing Cracks. Elsevier Ltd, 2007
- [8] EN 1561:1997 – Grey Cast Iron
- [9] P.M. Hughes. A Crack Growth Based approach to the fatigue assessment of cast Iron Components. UMI Publishing, USA, 1998

Conduzione dei generatori di vapore in presenza continua del conduttore, con l'ausilio di sistemi informatici mobili di controllo a distanza

F. Boella¹, R. Acerboni¹, A. De Palma¹, P. Morucchio¹, E. Pichini², G.A. Zuccarello³

¹ Inail - Uot di Venezia Mestre

² Inail - Dit

³ Inail - Uot di Bologna

Sommario

Il presente lavoro approfondisce le modalità di conduzione dei generatori di vapore in presenza continua del conduttore, con l'ausilio di sistemi informatici per il controllo a distanza in mobilità all'interno del sito, delle condizioni di sicurezza, di misura e di regolazione automatica delle grandezze e delle condizioni d'impianto.

La conduzione di un generatore di vapore richiede la presenza di una figura tecnica in possesso di requisiti specifici, stabiliti dalla normativa in materia. L'abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore è finalizzata a garantire la sicurezza dell'utilizzo dell'attrezzatura e a garantire la sicurezza nei luoghi di lavoro dove tali attrezzature sono installate ed utilizzate.

L'eventuale gestione continua a distanza in mobilità del generatore di vapore impone attente valutazioni dell'ambiente di lavoro sia per la sicurezza dei lavoratori sia per l'affidabilità e la sicurezza del sistema di controllo, l'adozione di prescrizioni operative sulla sicurezza del luogo di lavoro, la garanzia di tempi di risposta adeguati al necessario livello di sicurezza e l'incompatibilità dello svolgimento di alcune mansioni da parte del conduttore. Nella trattazione saranno affrontati gli aspetti salienti di tali problematiche.

1. Introduzione

Obiettivo principale del presente articolo è quello di dare indicazioni utili alla valutazione dei rischi necessaria quando si preveda un sistema di controllo a distanza per la conduzione di un generatore di vapore, al fine di garantire un grado di sicurezza equivalente dell'esercizio. Si precisa che con l'entrata in vigore della direttiva europea PED i generatori di vapore devono rispettare i requisiti minimi di sicurezza previsti dall'allegato I al fine di ottenere la certificazione CE; la direttiva impone di sottoporre l'attrezzatura/insieme a valutazione dei rischi già in fase di progettazione e costruzione, coinvolgendo di conseguenza anche le fasi di messa in servizio, esercizio e conduzione regolate dalle norme nazionali in vigore.

2. Riferimenti normativi

La normativa specifica relativa ai generatori di vapore si inserisce nel più ampio quadro normativo che disciplina la sicurezza e la salute nei luoghi di lavoro con il Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".

Il decreto affronta, tra gli altri, i rischi derivanti dall'utilizzo di attrezzature di lavoro (titolo III). Le attrezzature:

- devono possedere tutti i necessari requisiti di sicurezza, marcatura CE o i requisiti previsti all'allegato V (art. 70) ed il fabbricante ne è responsabile (art. 23);
- devono essere installate secondo le indicazioni del fabbricante, e l'installatore ne è responsabile (art. 24); devono essere utilizzate in conformità alle istruzioni d'uso del fabbricante (art. 71);

- devono essere valutate per i rischi che eventualmente comportano quando vengono installate in un ambiente di lavoro e messe a disposizione dei lavoratori (art. 71);
- devono essere utilizzate sulla base delle misure di prevenzione e protezione adottate dalla valutazione dei rischi e su indicazione del preposto (art. 19);
- devono essere sottoposte a verifiche periodiche di funzionamento sulla base del tipo di generatore come stabilito dall'allegato VII (art. 71);
- devono essere sottoposte a verifiche periodiche di integrità sulla base del tipo di generatore come stabilito dall'allegato VII (art. 71).

Originariamente la sicurezza dell'utilizzo dei generatori di vapore è stata disciplinata dal Regio Decreto 12 maggio 1927 n. 824, "Approvazione del regolamento per la esecuzione del R.D.L. 9 luglio 1926, numero 1331, che costituisce l'Associazione nazionale per il controllo della combustione" (Pubblicato nella Gazz. Uff. 4 luglio 1927, n. 152). Tale provvedimento legislativo regola le norme per la prevenzione contro gli infortuni, introducendo i requisiti del conduttore che sono stati stabiliti nel titolo I, capo II, artt. 27 e seguenti.

Il Regio Decreto è stato seguito negli anni da più decreti attuativi, tra i quali il Decreto ministeriale 22 aprile 1935, "Norme integrative del regolamento approvato con R.D. 12 maggio 1927, sugli apparecchi a pressione" (Pubblicato nella Gazz. Uff. 18 maggio 1935, n. 117) che disciplina al Titolo IV i locali per i generatori di vapore.

2.1. L'abilitazione alla conduzione

L'abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore è inserita all' Articolo 73-bis- d.lgs. 81/08, art. 20, comma m), in particolare:

1. All'Allegato A annesso al decreto-legge 25 giugno 2008, n. 112, convertito, con modificazioni, dalla legge 6 agosto 2008, n. 133, è soppressa la voce n. 294, relativa alla legge 16 giugno 1927, n. 1132 e riprendono vigore le disposizioni del regio decreto-legge 9 luglio 1926, n. 1331, convertito, con modificazioni, dalla legge 16 giugno 1927, n. 1132, nel testo vigente alla data del 24 giugno 2008.

2. Con decreto del Ministro del lavoro e delle politiche sociali sono disciplinati i gradi dei certificati di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore, i requisiti per l'ammissione agli esami, le modalità di svolgimento delle prove e di rilascio e rinnovo dei certificati. Con il medesimo decreto è, altresì, determinata l'equipollenza dei certificati e dei titoli rilasciati in base alla normativa vigente.

3. Fino all'emanazione del predetto decreto, resta ferma l'applicazione delle disposizioni di cui al decreto del Ministro del lavoro e della previdenza sociale 1 marzo 1974, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale 16 aprile 1974, n. 99, così come modificato dal decreto del Ministro del lavoro e della previdenza sociale 7 febbraio 1979, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale 15 marzo 1979, n. 74.";

Il percorso formativo del conduttore di generatore di vapore dovrà rispettare i due regolamenti che consentono al personale, a seguito del superamento degli esami finali, di conseguire il certificato di abilitazione.

2.2. Messa in servizio e verifiche

Pur non essendovi un'abrogazione esplicita del Regio decreto del 1927 e quindi dei relativi decreti attuativi successivi, nel 2000 è stato emanato il Decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93, "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione" (Pubblicato

nella Gazz. Uff. 18 aprile 2000, n. 91, S.O). Nel 2016 con la nuova direttiva 2014/68/UE PED è stato emanato l'attuale d.lgs.26/2016, che apporta significative modifiche.

Il decreto legislativo n. 93/2000 è stato seguito dal Decreto ministeriale 1 dicembre 2004 n. 329, "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del d.lgs. 25 febbraio 2000, n. 93" (Pubblicato nella Gazz. Uff. 28 gennaio 2005, n. 22, S.O), di attuazione del d.lgs. 93/2000

Il d.m. 11 Aprile 2011 invece disciplina le modalità di effettuazione delle verifiche periodiche cui sono sottoposte le attrezzature di lavoro (vedi Allegato VII del d.lgs 81/2008 "Testo unico sulla sicurezza nei luoghi di lavoro") nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti pubblici o privati per l'effettuazione delle suddette verifiche.

2.3. Attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco

I generatori di vapore costituiscono attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco secondo il Decreto del Presidente della Repubblica del 1° agosto 2011, n. 151, entrato in vigore il 7 ottobre 2011 quando la potenzialità dell' impianto per la produzione di calore alimentati a combustibile solido, liquido o gassoso ha potenzialità superiore a 116 kW ovvero 100.000 Kcal- Attività N.74 . In particolare il regolamento prevede la categorizzazione delle attività a seconda che la potenzialità sia inferiore a 350 KW compresa tra 350 KW e 700KW oppure superiore a 700 KW.¹

3. Generatori di vecchia generazione e generatori costruiti secondo la direttiva PED

I generatori immessi nel mercato prima dell'avvento della PED sono progettati e calcolati secondo le raccolte per la verifica di stabilità VSG dell'ANCC (norme per la costruzione dei generatori) pubblicate in attuazione del d.m. 21/11/72, di varia edizione ma sempre con le medesime filosofie costruttive, davano prescrizioni sui coefficienti di sicurezza, sui metodi di calcolo e possibilità costruttive ben definite.

Con l'entrata in vigore della Direttiva 97/23/CE ora Direttiva 2014/68/UE - PED le attrezzature in pressione e gli insiemi possono essere immessi sul mercato solo se conformi ai requisiti essenziali di cui all'allegato I dello stesso decreto. I generatori di vapore sono definiti come (art. 2, punto a) insiemi per la produzione di acqua surriscaldata ad una temperatura superiore i 110 °C o vapore, contenenti almeno una attrezzatura a pressione a focolare o altro tipo di riscaldamento, con rischio di surriscaldamento. I generatori che soddisfano le disposizioni del decreto dovranno recare la marcatura CE e saranno stati sottoposti alla valutazione di conformità a norma richiesta dall'art.14.

3.1 Manuale d'uso e manutenzione

L'allegato I della direttiva prevede al punto 3.4 che il fabbricante al momento della commercializzazione fornisca l'attrezzatura di istruzioni su montaggio, assemblaggio, messa in servizio, impiego, manutenzione e ispezioni da parte dell'utilizzatore.

Dove occorra, il foglio illustrativo deve inoltre richiamare l'attenzione sui pericoli di un uso scorretto, in base al punto 1.3, e sulle caratteristiche particolari della progettazione, in base al punto 2.2.3.

¹ Se il generatore di vapore non supera i 350 Kw, può essere autorizzato ai fini della prevenzione incendi con il "procedimento automatizzato" previsto ai sensi del Decreto del Presidente della Repubblica 7 settembre 2010, n. 160, "Regolamento per la semplificazione ed il riordino della disciplina sullo Sportello Unico per le attività produttive, ai sensi dell'articolo 38, comma 3, del decreto-legge 25 giugno 2008, n. 112, convertito, con modificazioni, dalla legge 6 agosto 2008, n. 133." e dalla Circolare del Ministero dell'Interno 24 marzo 2011.

3.2 Registro di sorveglianza

Nella conduzione del generatore deve essere conservato un registro nel quale annotare i controlli chimico –fisici delle acque di alimentazione integrate con il rilievo dei parametri di esercizio del GV, di funzionamento degli impianti di trattamento, dei dosaggi degli eventuali condizionanti e della eventuale strumentazione continua.

4. Conduzione dei generatori di vapore

4.1 Responsabilità del datore di lavoro

Il datore di lavoro che mette in servizio un generatore di vapore è tenuto ad adempiere agli obblighi di cui al titolo III, capo I (artt. 70-71) del d.lgs. n. 81/2008, oltre che alla normativa specifica per i generatori di vapore (prevenzione incendi, controlli periodici, verifiche, ...). Quando il datore di lavoro mette a disposizione del conduttore un generatore di vapore deve tra le altre cose:

- effettuare una valutazione dei rischi per verificare che l'attrezzatura non costituisca un rischio aggiuntivo per l'ambiente;
- effettuare una specifica valutazione dei rischi per la mansione di conduttore ed eventualmente identificare quali attività possono essere svolte in connessione con la sorveglianza del generatore, qualora l'attrezzatura consenta una gestione in remoto del controllo;
 - formare il conduttore di generatore di vapore sulla base di quanto previsto dalla specifica normativa (d.m. 1 marzo 1974 – modificato dal d.m. 7 febbraio 1979) ed inoltre sulle misure di prevenzione e protezione adottate al fine di ridurre al minimo i rischi ambientali connessi all'ambiente di lavoro in cui viene installato e messo in esercizio il generatore;
- formare ed addestrare il conduttore sul sistema informatico di conduzione in remoto del generatore (qualora tale sistema sia presente ed incorporato nel generatore come elemento gestionale eventualmente da remoto);

La buona prassi vuole che, per opportuna chiarezza il datore di lavoro, all'atto dell'affidamento del compito di sorveglianza del generatore al conduttore debitamente formato preveda la formalizzazione di un incarico scritto in cui vengono dettagliati

- i compiti e gli obblighi del conduttore;
- le procedure adottate, ulteriori rispetto a quelle già presenti nel libretto d'uso e di manutenzione del generatore da parte del fabbricante, per ridurre i rischi in condizioni normali, anomale e di emergenza;
- le attività che, sulla base della valutazione dei rischi, il conduttore può svolgere in concomitanza con l'attività di sorveglianza² del generatore in caso di conduzione in remoto;
- la previsione della tenuta del registro dei controlli ³e delle manutenzioni.

² Per quanto riguarda la sorveglianza si veda la norma tecnica UNI TS 11325-3:2018 che definisce le modalità di sorveglianza delle attrezzature a pressione, a focolare con rischio di surriscaldamento, destinate alla produzione di vapore d'acqua e/o di acqua surriscaldata a temperatura > 110 °C, con pressione massima ammissibile (PS) > 0,5 bar rientranti nel campo di applicazione del D.M. n° 329/2004

³ Le caratteristiche dell'acqua di alimentazione e di caldaia devono soddisfare le caratteristiche definite nel manuale d'uso/operativo oppure la norma UNI EN 12952-12 per le caldaie a tubi d'acqua, UNI EN12953-10 per le caldaie a tubi da fumo, oppure UNI 7550.

4.2 Responsabilità del conduttore

Il ruolo del conduttore di generatori di vapore ha avuto particolare rilevanza normativa a partire dal Regio decreto del 1927 n. 824.

L'attenzione specifica a tale figura professionale ha condotto la normazione a strutturare un percorso formativo specifico finalizzato a conferire al soggetto particolari conoscenze e capacità.

Lo scopo dell'impianto normativo relativo ai requisiti ed alla formazione tecnica del conduttore di generatori di vapore sta nell'assicurare una figura professionale a presidio del generatore di vapore tale da garantire la sicurezza dell'attrezzatura in tutte le condizioni di esercizio, dall'esercizio normale, alla manutenzione, alle condizioni anomale, fino a quelle di emergenza.

Il conduttore ha infatti:

- specifiche e ben definite competenze professionali, acquisite con la formazione tecnica prevista;
- sovrintende al funzionamento del generatore;
- garantisce l'attuazione delle direttive ricevute per la conduzione in sicurezza del generatore (dal fabbricante e dal datore di lavoro);
- controlla la corretta applicazione delle procedure di sicurezza previste per il generatore;
- esercita un funzionale potere di iniziativa, valutando eventuali interventi per la gestione in sicurezza del generatore sempre secondo quanto previsto dalle procedure.

In quanto preposto, il conduttore di generatori di vapore ha tutte le responsabilità stabilite dagli articoli 19 e 20 (obblighi del preposto e dei lavoratori) del d.lgs. n. 81/2008 a garanzia dell'attuazione efficace ed operativa delle norme di sicurezza che è chiamato ad applicare e per le quali ha ricevuto dal datore di lavoro una specifica formazione ed addestramento.

5. Descrizione del sistema e delle caratteristiche adottabili

Le modalità di conduzione dei generatori di vapore in presenza continua del conduttore, con l'ausilio di sistemi informatici di controllo a distanza, sono possibili grazie ad un sistema complesso di apparecchiature di sicurezza. Fanno parte di tale sistema due distinte apparecchiature alimentate separatamente e munite di distinte protezioni elettriche definite: "Sistema di misura e controllo PLC (Programmable Logic System) e/o DCS (Distributed Control System) e "Sistema di sicurezza BMS - Building Management System". Le condizioni di sicurezza, di misura e di regolazione automatica delle grandezze e delle condizioni d'impianto sono controllate attraverso una gestione informatizzata, locale e/o da terminale/i in remoto, fissi e/o mobili quali PC, Tablet PC, Smartphone.

5.1 Controllo, regolazione e supervisione

Per attuare le funzioni di controllo, regolazione e supervisione sono necessari sensori di sicurezza e trasmettitori delle varie grandezze del processo attraverso rete locale (LAN – Local Area Network) realizzata con cavo dedicato in rame e/o fibra ottica (FO), oppure mista con cavo in rame e/o fibra ottica e onde elettromagnetiche radio, Wi-Fi, access point WiFi e ripetitori, altrimenti definiti range extender. Attualmente le tecnologie wireless a disposizione sono di tipo: powerline, ottica, radiofrequenze, microonde, cellulare e satellitare.

Le informazioni di stati e grandezze trasmesse in forma analogica e/o digitale informatizzata, per mezzo delle apparecchiature di sistema, debbono risultare tra loro compatibili: ovvero essere in grado di trasferire integralmente l'informazione senza perdita della condizione di "verità" e "precisione".

5.2 Compatibilità dei sistemi di controllo a distanza

Le modalità di trasmissione e i protocolli di comunicazione tra apparecchiature del sistema, adottati per trasferire le varie informazioni necessarie - dati ingegneristici, condizioni di allarme, stati di valvole, motori, serrande, valori delle grandezze monitorate e immagini del processo - debbono essere tra loro compatibili: in termini di tipologia di segnale (4-20 mA, 0-20 mA, 1-5 V, 0-5 V); in termini di linguaggio (protocollo); in termini di programma di supervisione. Di conseguenza il programma dovrà venire installato contestualmente sui terminali fissi e sui terminali mobili.

5.3 Dispositivi di blocco e sistemi di riprogrammazione e sicurezza

Il sistema di sicurezza (BMS) preposto alla sorveglianza dell'impianto (caldaia o altro macchinario) deve essere corredato di appositi dispositivi di blocco passivi (valvole), il cui intervento venga assicurato nella condizione di mancanza del fluido ausiliario.

Per il rilievo dei limiti è ammesso l'impiego di sensori di tipo attivo, denominati dispositivi di limitazione o limitatori (alimentati con energia diversa da quella di processo), preposti alla generazione di un comando di arresto del combustibile e di allarme acustico-luminoso nel caso si superino i valori limite del parametro sotto controllo. E' fatto obbligo di arresto automatico del flusso di combustibile o della fonte di calore al generatore, nei casi di raggiungimento dei limiti stabiliti sul programma applicativo di sicurezza e per tutte le grandezze e/o stati che possono comportare pericoli per le persone e per le attrezzature.

La condizione di "blocco" dovrà essere risolta solo attraverso riarmo manuale una volta eliminata la causa del malfunzionamento. La messa in sicurezza del processo (blocco caldaia, forno, post-combustore), dovrà essere attuata solo da organi abilitati e destinati a tale funzione.

La riprogrammazione, in caso di perdita e/o cancellazione del programma applicativo, è ammessa solo se trattasi di copia collaudata e autocertificata dal costruttore.

La riprogrammazione può essere automatica se effettuata con mezzi idonei testati allo scopo in precedenza.

5.4 Manovre non concesse dal terminale mobile

Per garantire il controllo del generatore dal solo sistema centrale e quindi in un'ottica di garanzia della sicurezza, alcune operazioni non potranno essere effettuate dai dispositivi mobili (Tablet PC e/o Smartphone).

In particolare non saranno ammessi:

- operazioni di ricaricamento del programma di sicurezza, modifiche alle condizioni di limite delle grandezze appartenenti al programma di sicurezza, forzatura di condizioni di stato di organi quali valvole di blocco o valvole manuali.
- avviamento da "freddo".
- riavvio, dopo l'avvenuto arresto e blocco per raggiunti limiti di grandezza, incluso il comando di emergenza.

6. Valutazione dei rischi e pianificazione dell'ambiente di lavoro

L'installazione di un generatore deve avvenire conformemente a quanto previsto dal fabbricante e dalla normativa vigente secondo le procedure richieste dal d.m. 329/2004.

In concomitanza con l'installazione del generatore, il datore di lavoro dovrà effettuare una valutazione del rischio che consideri i rischi presenti nell'ambiente in cui il generatore verrà installato (elettrico, esplosione, incendio, inciampo, ergonomia, strutturazione, illuminazione, ...) e i rischi connessi con il generatore stesso nelle varie fasi di utilizzo.

Gli ambienti in cui il generatore viene installato devono avere particolari requisiti stabiliti nell'allegato IV al d.lgs. n. 81/2008 e previsti specificatamente per i generatori di vapore dal d.m. 22 aprile 1935 al titolo IV.

Nel caso specifico di conduzione con l'ausilio di sistemi informatici di controllo a distanza in mobilità all'interno del sito, gli ambienti di lavoro entro i quali potrà muoversi il conduttore dovranno essere definiti, al fine di rispettare i limiti imposti dalla copertura del segnale nell'ambiente definito WAN (wide area network), considerato che il conduttore pur avendo la possibilità di muoversi all'interno del sito produttivo, non potrà uscire dalle aree di copertura. E' necessario infatti garantire, in tempo reale, il trasferimento integrale delle informazioni di gestione e comando del generatore, senza perdita della condizione di verità e precisione. All'interno delle predette aree sarà per esempio necessario dislocare, nel percorso concesso al conduttore, eventuali comandi di emergenza hardware.

6.1 Incompatibilità delle mansioni del conduttore

A titolo di esempio si evidenziano di seguito alcune mansioni che risultano incompatibili con il livello di attenzione richiesto al conduttore e con la necessità di un eventuale intervento in tempo reale sul generatore di vapore.

Lavori in quota: l'operatore non deve essere impiegato per lavori in quota.

Luoghi angusti: l'operatore non deve essere impiegato all'interno di luoghi ristretti e con difficoltà di accesso.

Operazioni di movimentazione e sollevamento: l'operatore non deve essere impiegato per la manovra o l'uso di gru di sollevamento o di macchine per il sollevamento.

Si possono ipotizzare inoltre esclusioni di mansioni che comportino lo svolgimento di attività in ambienti che, per loro natura, potrebbero rappresentare un impedimento o una distrazione per la realizzazione dei compiti primari del conduttore, ad esempio:

Luoghi interrati: l'operatore non deve essere impiegato all'interno di fosse, serbatoi interrati.

Luoghi rumorosi: l'operatore non deve operare in luoghi rumorosi o in posti con l'obbligo di uso delle protezioni fonoassorbenti.

Cabine o ambienti con pareti prevalentemente metalliche: l'operatore non deve essere impiegato all'interno di cabine metalliche o ambienti con struttura prevalentemente metallica.

Ascensori: l'operatore non deve usare ascensori o montacarichi.

Possono esservi inoltre ambienti di lavoro ove venga richiesto un livello di attenzione dell'operatore nei confronti di macchinari o lavorazioni, tale da rendere incompatibile l'incarico di conduttore, come ad esempio il transito di macchine operatrici o mezzi di trasporto.

Appare chiaro quindi come la valutazione dei rischi e la pianificazione dell'ambiente di lavoro debba essere fatta con estrema attenzione e che la gestione continua a distanza del generatore di vapore comporta l'incompatibilità allo svolgimento di alcune mansioni da parte del conduttore, che dovranno essere valutate attentamente dal datore di lavoro.

Un discorso a parte merita l'aspetto legato alla formazione (obbligatoria) dei conduttori e l'iter per l'abilitazione dei vari livelli, non potendo prescindere dagli aspetti legati all'introduzione di queste tecnologie, già presenti e proposte sul mercato.

7. Protezioni contro le intrusioni informatiche

I terminali fissi e mobili debbono contenere protezioni con chiave software contro le intrusioni di almeno due livelli.

Per le comunicazioni via etere si adotteranno protocolli di comunicazione prescritti da "Wi Fi Alliance" e standardizzati 802.11 a/b/g/n e protetti almeno con protocollo WPA2 (Wireless

Access Protocol versione 2 garantendo velocità fino a 6,8 Gbps), Radius, in combinazione con WPN (Virtual Private Network), e soggetti ad aggiornamento periodico registrato.

8. Conclusioni

L'utilizzo del sistema descritto richiede attente valutazioni dell'ambiente di lavoro sia per la sicurezza dei lavoratori sia per la sicurezza del sistema di controllo, a fronte della possibilità di impiegare il conduttore del generatore di lavoro anche in altre mansioni, sfruttando l'operatività in mobilità.

La pianificazione del posto di lavoro inteso come delimitazione delle mansioni e delle aree operative nelle quali il conduttore è chiamato a lavorare è fondamentale. La progettazione del lay-out aziendale sarà di tipo multidisciplinare in quanto dovrà interessare esperti in materia di sicurezza sul posto di lavoro, tecnici di reti aziendali e di sicurezza informatica, tecnici esperti incaricati dal costruttore del generatore di vapore, il datore di lavoro, le entità che operano nel settore della formazione, e la figura del conduttore.

Tutte queste figure dovranno confrontarsi affinché siano individuati, valutati e ridotti i rischi:

- specifici per i lavoratori;
- dei sistemi di sicurezza e controllo del generatore di vapore;
- informatici legati alla trasmissione dei segnali e dovuti a possibili attacchi informatici che possono compromettere la corretta gestione dei parametri del generatore.

La rapida evoluzione della tecnologia di trasmissione, lo sviluppo di sistemi wireless affidabili e veloci e di protocolli wireless potenti ed efficienti, ci permettono oggi di sfruttare diversi vantaggi rispetto alle reti cablate. La conduzione di un generatore di vapore con un sistema di controllo remoto a distanza rappresenta quindi una vera sfida tecnologica che potrebbe interessare le aziende più lungimiranti, pur nel rispetto delle limitazioni imposte dalle norme nazionali e dalle direttive europee.

Esperienze di applicazione del capitolo R.3.F della raccolta R relativo ai generatori di calore modulari

F. Badolato¹, R. Longo¹, M. Oss²

¹ Inail - Uot di Catanzaro

² Inail - Uot di Bolzano

Sommario

Nell'articolo vengono affrontati alcuni casi pratici di applicazione del capitolo R.3.F della Raccolta R, edizione 2009, e delle indicazioni tecniche redatte dall'Inail, allegate alla nota Inail n. 60202 20/05/2015.0003445. I casi esaminati sono relativi sia all'approvazione di prototipi di generatore di calore modulare sia alle loro verifiche di messa in servizio.

In particolare verranno rappresentati alcuni errori commessi dagli installatori degli impianti che potrebbero vanificare le indicazioni di sicurezza fornite dalla Raccolta R e dalla suddetta nota.

1. I generatori modulari

L'innovazione tecnologica, le problematiche ambientali (riduzione dei consumi, aumento dei rendimenti, e conseguente riduzione delle emissioni in atmosfera) e, non ultima, la tendenza a centralizzare la produzione di calore, unitamente alla contabilizzazione del calore ed all'installazione di valvole termostatiche, in edifici con più alloggi (plurifamiliari), hanno favorito la diffusione dei cosiddetti generatori modulari.

Questi generatori hanno la peculiarità, grazie anche alla gestione elettronica dell'esercizio, di ottimizzare i rendimenti in funzione della potenza e/o delle temperature di mandata richieste (negli impianti funzionanti a bassa temperatura al miglioramento del rendimento contribuisce anche la condensazione del vapore contenuto nei fumi, aspetto considerato nella quasi totalità dei generatori modulari attualmente prodotti).

Il rendimento di un generatore di calore è dato dal rapporto tra il flusso termico effettivamente trasferito al fluido (potenzialità utile) ed il flusso termico totale liberato dalla combustione nella caldaia (potenzialità al focolare). Il flusso termico trasferito al fluido dovrà, evidentemente, essere sufficiente per coprire il totale fabbisogno termico dell'edificio nelle condizioni di massimo carico al lordo di tutte le inevitabili perdite (rendimenti di distribuzione, termoregolazione ed emissione).

Si osserva che, per un generatore tradizionale, il rendimento assume valori elevati (intorno al 90%) solo in condizioni di funzionamento a regime del generatore (tendenzialmente al massimo del carico). Il rendimento medio, in un generatore tradizionale, nella stagione di riscaldamento risulta, in genere, notevolmente inferiore a causa di numerosi fattori, tra i quali, particolare importanza riveste il carico medio cui è sottoposto.

Durante il funzionamento normale, la variabilità dei carichi rispetto al valore massimo progettuale, che può dipendere da fattori climatici (temperature esterne superiori alle minime di progetto), dalla presenza di carichi interni negli ambienti da riscaldare, da riduzione della richiesta da parte dell'utenza (fattore di presenza), insieme ad un'eventuale sovra-dimensionamento del generatore, fanno sì che questi operi spesso a carico ridotto e quindi anche con ridotti valori medi di rendimento.

Nei generatori modulari normalmente sono installati, in ogni singolo modulo, bruciatori a premiscelazione che, ottimizzando il rapporto aria/gas in ogni condizione di funzionamento, consentono di avere elevati rendimenti anche a carichi sensibilmente inferiori rispetto al massimo. Inoltre, poiché ogni singolo modulo rappresenta una parte dell'intero generatore, valori ridotti di carico per un solo elemento, corrispondono ad una

frazione ancora più piccola della potenzialità totale; pertanto nel caso ad esempio di un generatore costituito da quattro moduli, il funzionamento di un singolo modulo al 20% del proprio carico (con rendimento ancora apprezzabile), equivale al funzionamento dell'intero generatore al 5% della sua potenza totale.

Ciò vuol dire che la potenza può essere "modulata" su un intervallo molto più ampio, mantenendo comunque rendimenti elevati. Inoltre la gestione elettronica presente a bordo dei generatori modulari, può distribuire, tra i vari moduli, la potenza richiesta in un determinato momento, in modo da ottimizzare il rendimento dell'intero generatore.

Con tali generatori quindi, si riducono notevolmente le perdite per funzionamento intermittente, o a carico ridotto, e si incrementa conseguentemente il rendimento medio stagionale.

Dunque le miglione in termini di risparmio energetico e le ridotte emissioni inquinanti, oltre ad aspetti pratici quali la rapidità e la semplicità dell'installazione, gli ingombri ridotti e non ultima, anche la possibilità (entro certi limiti) di aumentarne successivamente la potenza installata, hanno fatto crescere, negli ultimi anni, in misura considerevole l'interesse dei produttori di generatori di calore verso questa tecnologia e, conseguentemente, ne è aumentata la produzione e la circolazione sul mercato.

Si è reso pertanto necessario adeguare la Raccolta R, che nella edizione del 1982 non comprendeva questa tecnologia, con l'aggiunta, nella nuova edizione del 2009, di un capitolo specifico.

2. Il capitolo R.3.F (edizione 1999) della Raccolta R

Dalle definizioni del capitolo R.3.F. un elemento termico è costituito da uno scambiatore di calore e da un bruciatore o porzione; uno o più elementi termici, funzionalmente dipendenti, costituiscono un modulo termico; uno o più moduli termici, funzionanti singolarmente o contemporaneamente in un unico circuito idraulico, costituiscono un unico generatore di calore modulare (figura 1) qualora vengano osservate le indicazioni dello stesso capitolo R.3.F. Diversamente si ricade nella tipologia degli impianti con generatori di calore in batteria.

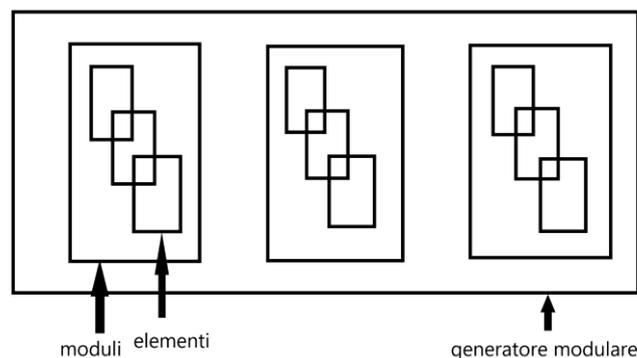


Figura 1

Poter considerare il generatore come modulare anziché come installazione di generatori collegati in batteria consente una semplificazione impiantistica, rispetto a quanto previsto ai capitoli R.3.A. e R.3.B.

Il fabbricante dei moduli può:

- assemblare i singoli moduli costituenti il generatore modulare collegandoli idraulicamente ed elettricamente in fabbrica e fornire quindi il generatore modulare completo di ogni accessorio sotto un unico mantello,

oppure

- fornire singoli moduli termici, completi di documentazione tecnica, che verranno assemblati dall'installatore al fine di ottenere un generatore modulare così come progettato dal fabbricante. Nella documentazione tecnica devono essere chiaramente individuati i limiti di variabilità della famiglia rappresentativa del generatore modulare e devono essere forniti i disegni schematici riepilogativi (comprensivi di numero del disegno, eventuale revisione e data di emissione) con indicati tutti i componenti sia elettrici che meccanici, le relative dimensioni ed i collegamenti atti a garantire il buon funzionamento e la sicurezza.

Il fabbricante sottopone il prototipo alla Uot – Inail competente per territorio che ne valuta la rispondenza al cap. R.3.F.

3. Le indicazioni tecniche per la verifica dei generatori modulari

Con la nota n. 60202 del 20/05/2015 il Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'Inail ha emanato delle indicazioni tecniche ed amministrative utili per l'approvazione dei prototipi di generatori modulari, attività che l'Inail svolge in regime di esclusività. Tali indicazioni si sono rese necessarie dal momento che la competenza dell'approvazione dei prototipi è diventata di competenza territoriale, rispetto alla situazione precedente che vedeva come esclusivista della funzione il Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'Inail stesso. Nelle indicazioni tecniche vengono ribadite e chiarite le caratteristiche principali dei generatori modulari relativamente a:

- installazione e caratteristiche dei dispositivi di sicurezza, protezione e controllo;
- predisposizione, a seguito di analisi dei rischi, delle opportune misure di sicurezza per garantire che in tutte le condizioni di funzionamento, anche anomale prevedibili, i parametri di funzionamento dei singoli moduli non superino i valori previsti nel progetto;
- specificazioni sul contenuto della relazione tecnica;
- collegamento del circuito d'acqua dei singoli moduli termici al sistema di espansione ed ai dispositivi di sicurezza, regolazione, protezione e controllo;
- assemblaggio del generatore ed intercettazione dei moduli;
- dispositivo di post circolazione per lo smaltimento del calore residuo.

Per l'aspetto amministrativo invece il fabbricante che intende ottenere l'approvazione del prototipo deve fare richiesta in marca da bollo da 16,00 euro alla Unità Operativa Territoriale - Inail competente per territorio, secondo il modello di domanda predisposto, allegando la seguente documentazione:

- disegni esecutivi;
- relazione tecnica;
- manuale d'uso, montaggio e manutenzione relativo al generatore modulare nel suo complesso e ai singoli moduli facenti parte del generatore modulare con indicazione anche dei componenti di ricambio, le necessarie indicazioni per un corretto assemblaggio idraulico, elettrico e meccanico dei componenti forniti dal fabbricante nel caso di generatore non facente parte di un unico mantello e le necessarie indicazioni per l'eventuale intercettazione in sicurezza dei singoli moduli;
- schema elettrico di collegamento con le caratteristiche elettriche di impiego;
- copia delle certificazioni dei singoli moduli relative alle direttive 2009/142/CE e 92/42/CEE;
- copia delle certificazioni relative ai dispositivi di sicurezza e protezione non facenti parte dei singoli moduli. Dalle certificazioni si devono evincere i dati riportati nella nota INAIL/DCC prot. 1539 dell'11/03/2011 [5];

- programma delle prove da eseguire.

Esaminata la documentazione il tecnico della Uot si reca presso il fabbricante al fine di riscontrare la corrispondenza del prototipo a quanto previsto nella documentazione fornita ed effettua le prove secondo il piano di prove. A seguito di esito favorevole rilascia un attestato di approvazione del prototipo, secondo il modello predisposto dal Dit, che ha validità di cinque anni.

4. Problematiche riscontrate durante le verifiche

In occasione di varie verifiche di omologazione di impianti di riscaldamento alimentati da generatori modulari e di tre approvazioni di modelli di generatori modulari, sono state evidenziate alcune problematiche nell'applicazione delle regole tecniche sopra descritte che meritano un approfondimento.

4.1 L'installazione dei dispositivi di sicurezza, protezione e controllo

Un primo problema è legato all'applicazione del paragrafo 2.2 del capitolo R.3.F. della Raccolta R quando fissa una distanza non superiore ad un metro per l'installazione dei dispositivi di sicurezza, protezione e controllo, qualora non installati all'interno del mantello di rivestimento. La Circolare IspeSI n. 102/99 [4], che per la prima volta introduce i generatori modulari nella Raccolta R Edizione 1982, riporta un esempio di schema (figura 2) in cui la distanza di un metro entro cui installare i sopra detti dispositivi parte dal bordo del mantello dell'ultimo modulo termico.

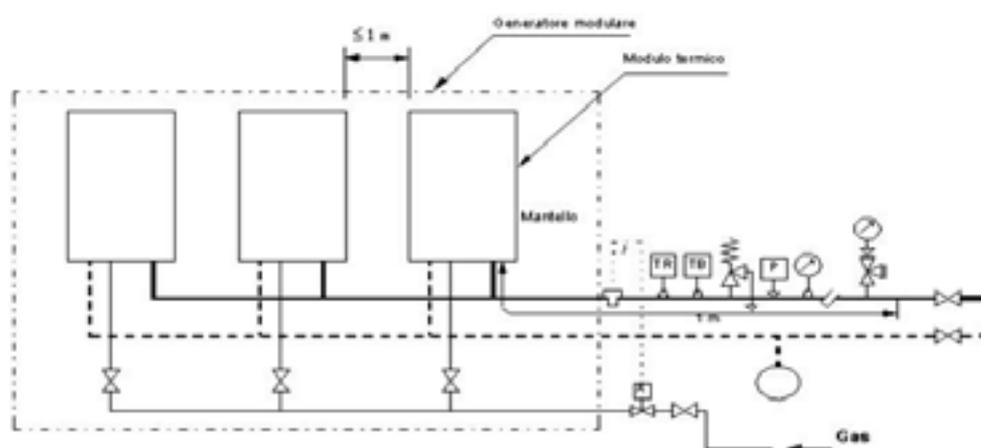


Figura 2

Tale esempio di schema non viene riproposto nell'ultima edizione del 2009 probabilmente perché, come si vede dalla figura 3, per alcune tipologie di generatori modulari non sarebbe proprio possibile il rispetto della distanza, essendo lungo circa 1 metro il solo raccordo del singolo elemento con il collettore comune di mandata.

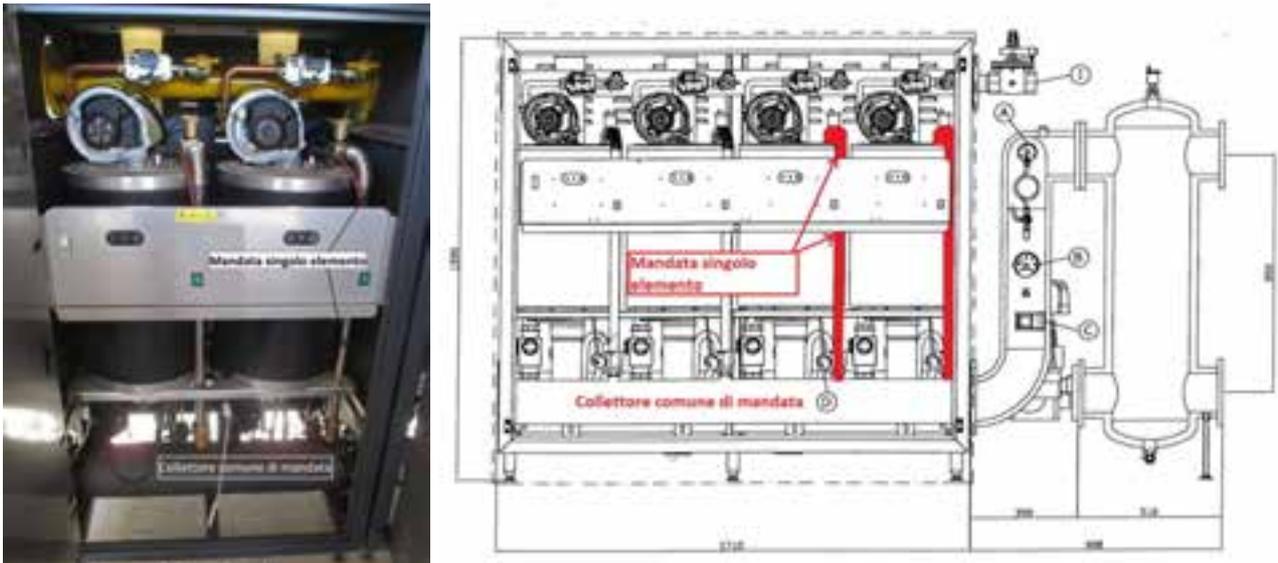


Figura 3

Senza contare che, nello spirito della modularità del funzionamento, non è detto che l'ultimo modulo funzioni sempre per cui anche fisicamente non avrebbe senso calcolare la distanza di un metro così come nello schema di figura 2. La distanza di un metro va pertanto conteggiata letteralmente "...immediatamente a valle dell'ultimo modulo, entro una distanza, all'esterno del mantello, non superiore a 1 metro..." [1], dove per mantello si dovrebbe intendere quello dell'intero generatore modulare come negli esempi di figura 4, 5 ed in particolare di figura 6 in cui è riportato il caso di moduli forniti completi di armadio per installazione all'esterno e dove è possibile installare i dispositivi di cui ai cap. R.3.A. e R.3.B solo al di fuori dell'armadio stesso.

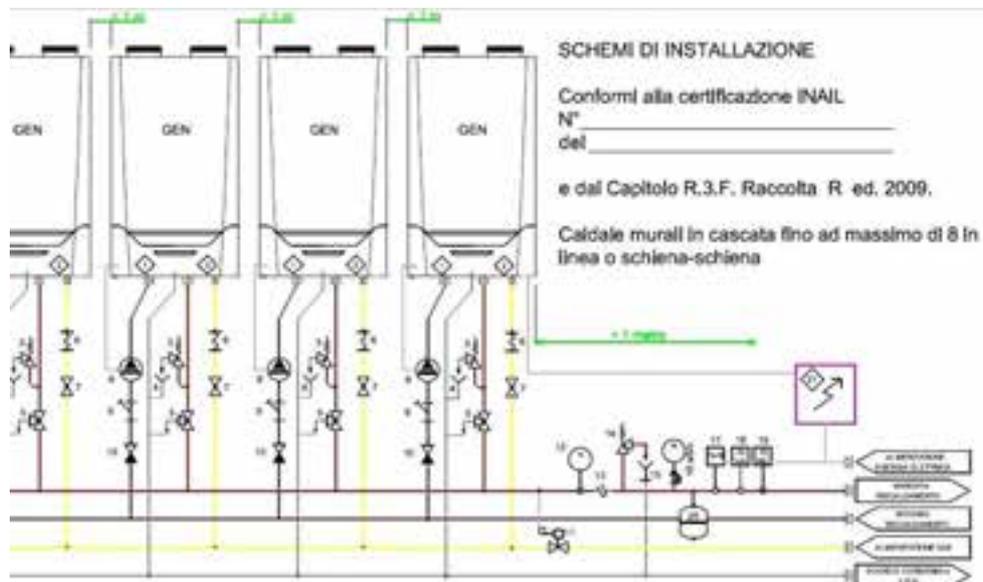


Figura 4

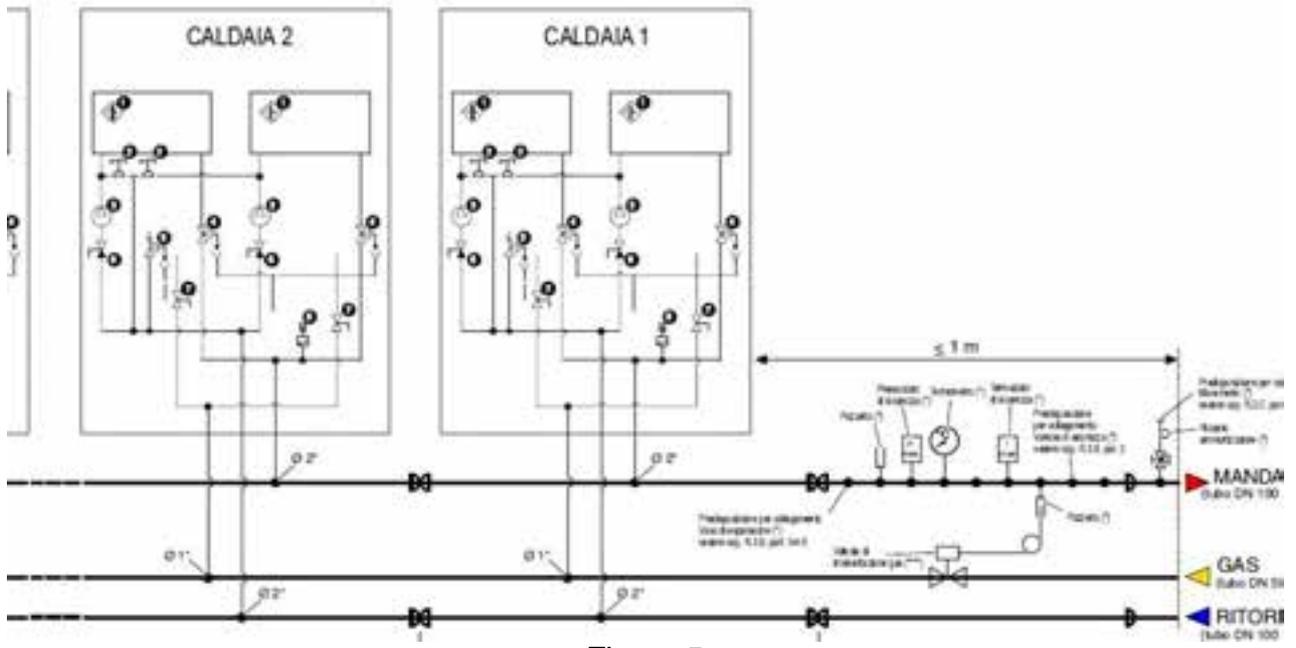


Figura 5



Figura 6

4.2 La verifica del prototipo

In occasione delle verifiche di approvazione del prototipo può capitare che il fabbricante richieda di eseguire la verifica installando un solo modulo di ciascun tipo di quelli che costituiscono l'intero generatore modulare (figura 7). Tale richiesta non è conforme al paragrafo 6 delle *Indicazioni tecniche per la verifica dei generatori modulari* [2] il quale richiede espressamente che il richiedente debba “mettere a disposizione il generatore modulare completo per ciascun prototipo o comunque la configurazione rappresentativa del generatore completo”. Per evitare spiacevoli sorprese in sede di sopralluogo è pertanto necessario verificare che il fabbricante invii all'Uot preposta alla verifica il programma di prova previsto dallo stesso paragrafo 6.



Figura 7

4.3 Il manuale d'uso

Tra i documenti che il fabbricante deve presentare all'Inail per l'approvazione del prototipo c'è anche il manuale d'uso, montaggio e manutenzione. Questo documento deve essere esaminato dal verificatore con molta attenzione in quanto alcune volte viene redatto con approssimazione dal fabbricante, nel senso che il fabbricante dà per scontate alcune cose che non sempre gli installatori conoscono relativamente al generatore modulare che dovranno installare. E' pertanto necessario verificare che nel manuale siano descritte con precisione tutte le operazioni per l'installazione e l'elenco completo di tutte le parti che costituiscono il kit di montaggio, conformemente al capitolo 5 delle *Indicazioni tecniche per la verifica dei generatori modulari* [2]. E' capitato talvolta di trovare generatori modulari non installati correttamente proprio per la poca chiarezza e l'estrema sinteticità del manuale di installazione. In alcuni casi si sono trovati nei manuali schemi elettrici non aggiornati all'evoluzione tecnologica delle schede dei singoli moduli con conseguente incomprendibilità degli stessi da parte dell'installatore. Poiché in genere ogni singola tipologia di modulo ha un suo manuale, si raccomanda in sede di verifica di approvazione del prototipo di controllare la coerenza tra il manuale del singolo modulo e quello del kit di installazione dell'intero generatore modulare.

4.4 Assemblaggio del generatore ed intercettazione dei moduli

Un'altra problematica riguarda l'installazione dei generatori modulari, allorché non fossero forniti dal fabbricante già assemblati. In questi casi, come detto al paragrafo precedente, il fabbricante deve fornire disegni esecutivi con indicazioni dei componenti elettrici e meccanici, delle varie dimensioni e dei collegamenti tra gli stessi. Innanzitutto va osservato che non sempre questi disegni risultano precisi ed esaurienti nelle indicazioni in essi fornite e pertanto spesso l'installatore, anche per proprie convenienze o necessità (installazione in spazi ridotti, ad esempio), tenderebbe ad installare collettori di dimensioni ridotte o, più spesso, a montare le intercettazioni sotto un singolo modulo secondo una propria valutazione. Quest'ultimo errore viene in parte motivato (non certo giustificato) dal fatto che le eventuali intercettazioni dei singoli moduli vengono, da parte dei vari fabbricanti, proposte (ed accettate dall'Inail in fase di omologazione del prototipo) a volte con valvole a tre vie sulle mandate dei singoli moduli e con valvole a due vie sui ritorni, altre volte, al contrario, con le tre vie sul ritorno e le due vie sulla mandata (indipendentemente da eventuali altri accorgimenti proposti e/o dal posizionamento del sistema di espansione dell'acqua del modulo). Tale diverse soluzioni con le quali alternativamente un installatore si trova ad avere a che fare, induce lo stesso a pensare, erroneamente, che una volta rispettate la dimensione ed il materiale dei tronchetti di collegamento dei singoli elementi (mandate e ritorni ai e dai collettori comuni), sia possibile installare indifferentemente le valvole a tre vie sulle mandate o sui ritorni.

Sarebbe pertanto auspicabile indirizzare i fabbricanti verso un'unica determinata soluzione possibile qualora si voglia rendere intercettabile un modulo (o un elemento).

Considerando che i dispositivi di sicurezza protezione e controllo ed il sistema di espansione, di cui ai cap. R.3.A. ed R.3.B., devono essere installati sulla mandata (p.to 2.2 cap. R.3.F.), e che non devono essere presenti intercettazioni tra il modulo e gli stessi (p.to 3.1 cap. R.3.F.), la possibilità di installare una valvola di intercettazione a tre vie (p.to 3.2 cap. R.3.F.) dovrebbe essere indicata esplicitamente sulla mandata del singolo modulo/elemento.

Vale la pena inoltre ricordare a proposito che i disposti di cui alla circolare Ispesl 102/99 [4] (controllo della circolazione o espansione e sicurezza contro la sovrappressione a monte dell'intercettazione a seconda del contenuto d'acqua degli elementi) non dovrebbero essere più considerati, essendo stata la circolare stessa abrogata dalla nota Inail n. 60202 20/05/2015.0003445.

5. Conclusioni

L'esperienza operativa, che ci ha permesso di evidenziare le problematiche riportate nel precedente capitolo, permette di confermare pienamente i giusti richiami della Nota Inail n. 72000 26/01/2018.0000774 [3]. L'obiettivo primario delle verifiche affidate all'Inail è quello della prevenzione di incidenti e solo uno sforzo comune di precisione ed attenzione nello svolgimento dei propri compiti da parte di fabbricanti, installatori e verificatori può permettere di raggiungere questo obiettivo di alto valore sociale, ma anche di tutela dell'economia delle imprese del settore e dei cittadini utilizzatori di questa tipologia di impianti.

6. Bibliografia

- [1] Raccolta R, Edizione 2009. Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro. Pag. 28.
- [2] Indicazioni tecniche per la verifica dei generatori modulari di cui al cap. R.3.F della Raccolta R, Edizione 2009. Allegato 2 alla nota n. 60202 20/05/2015.0003445. Inail Direzione Centrale Ricerca – Dit
- [3] Nota n. 72000 26/01/2018.0000774. Inail Direzione Centrale Ricerca - Dit.
- [4] Circolare n. 102/99 del 13/12/1999. Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro.
- [5] Nota prot. 0001539 del 11/03/2011. Inail Dipartimento Certificazione e Conformità di Prodotti ed Impianti.

Analisi di gestione del funzionamento di un serbatoio criogenico contenente CO₂ liquida con temperatura di targa -40/+50 °C ai fini del non superamento dei limiti di temperatura fissati in costruzione

G. Gorrino, V. Prete, A. Urso

Inail - Uot di Alessandria

Sommario

Oggetto della presente memoria è lo studio dei fattori di rischio presenti in un serbatoio criogenico contenente anidride carbonica liquida, costruito in accordo alla direttiva 2014/68/UE, con pressione di targa 22 bar e temperatura di targa -40/+50 °C.

Il comportamento fisico dell'anidride carbonica segue il relativo diagramma di stato da cui si può evincere che, se la pressione all'interno del serbatoio scende al di sotto dei 9,8 bar, la temperatura, scende al di sotto del limite di -40 °C fissato dal costruttore per tale attrezzatura.

Partendo da tali premesse, si è effettuato uno studio dei fattori di rischio al fine di gestire, in ottemperanza alla Raccolta E, varie circolari Ispesl e ai disposti normativi del d.m. 329/2004, del d.m. 11/04/2011, per utilizzare in sicurezza il serbatoio entro i limiti di temperatura previsti dal costruttore, tenendo conto delle caratteristiche meccaniche del materiale costituente il serbatoio stesso.

L'approfondimento dei possibili rischi ha preso in esame le varie fasi di utilizzo del serbatoio, dal funzionamento in esercizio all'utilizzo in condizioni non standard, quali: perdita di pressione, svuotamento e ripressurizzazione.

Lo studio ha, in ultimo, lo scopo di sensibilizzare i gestori sulle tematiche riscontrabili e sulle conseguenti procedure da attuare ai fini della sicurezza.

1. Introduzione

Nell'analisi effettuata si è preso in considerazione un serbatoio costruito in accordo alla Direttiva 2014/68/UE con le seguenti caratteristiche: pressione di progetto 22 bar, temperatura di progetto -40/+50 °C.

Dai dati costruttivi sopracitati e visto il comportamento dell'anidride carbonica si è dovuto incrementare delle procedure per l'utilizzo dell'attrezzatura a pressione in sicurezza al fine di evitare il superamento dei limiti di temperatura fissati dal costruttore. La procedura prende in esame vari casi: l'eccessivo prelievo; perdite da flange, tubazioni, valvole e dismissione del serbatoio con relativa diminuzione di pressione all'interno per lo svuotamento prima del trasporto.

Al fine di utilizzare in sicurezza questi tipi di attrezzature a pressione si dovranno applicare sistemi tecnici quali: dispositivi di allarme di minima pressione correlati alla temperatura; valvole di blocco per un prelievo eccessivo per impedire che la pressione scenda al di sotto del valore limite di 9,8 bar e, di conseguenza, la temperatura scenda al di sotto di -40 °C.

Tale sistema dovrà, oltre che intervenire tempestivamente per interrompere il prelievo di anidride carbonica dal serbatoio, allertare un operatore che provveda alla regolazione dell'immissione e del prelievo di anidride carbonica.

Partendo da tali premesse, dopo aver richiamato le caratteristiche dell'anidride carbonica, si daranno indicazioni utili a redigere procedure corrette per la gestione e l'utilizzo del serbatoio; nelle disposizioni della Raccolta E Fascicolo E.4 punto E.4.A.3, si teneva già conto delle problematiche dell'anidride carbonica, ma veniva solo richiesto un pressostato

di minima per non fare scendere la pressione sotto il punto triplo con conseguente formazione di anidride carbonica allo stato solido "ghiaccio secco".

Fermo restando l'applicazione delle circolari n. 53 del 23/12/2003 e n. 9 del 2004.

2. Caratteristiche fisiche dell'anidride carbonica

L'anidride carbonica è un composto la cui formula molecolare è CO_2 e le cui proporzioni in peso sono pari al 27,3% di carbonio e 72,7% di ossigeno. La molecola di anidride carbonica è lineare; ognuno dei due atomi di ossigeno è legato tramite un doppio legame covalente all'atomo di carbonio, la molecola risulta essere globalmente apolare. L'atomo di carbonio nella molecola di diossido di carbonio ha numero di ossidazione +4, si trova quindi al suo massimo stato di ossidazione possibile, di conseguenza, non è infiammabile e dal punto di vista chimico è relativamente inerte.

Il peso specifico è pari a 1,5 volte quello dell'aria quindi tende a stratificare sul fondo degli ambienti chiusi e non ventilati.

L'anidride carbonica può essere liquefatta sottoponendola ad alte pressioni e temperatura inferiore ai 31 °C.

Temperatura	Pressione di vapore
21,1 °C	5,778 bar
0 °C	3,385 bar
-16,7 °C	2,082 bar
-28,9 °C	1,379 bar
-56,6 °C	4,16 bar
-78,5 °C	0 bar
Temperatura di sublimazione (1 bar)	-78,5°C
Temperatura critica	31,1 °C
Pressione critica	7,381 bar
Punto triplo	-46,6 °C a 5,18 bar

Tabella 1. Costanti fisiche dell'anidride carbonica

L'anidride carbonica può esistere simultaneamente come liquido, solido e gas ad una temperatura pari a -56,6° C e una pressione di 4,16 bar, a cui corrisponde il suo punto triplo.

A temperature e pressioni inferiori a quelle del punto triplo, l'anidride carbonica può esistere sia allo stato solido che gassoso in funzione delle condizioni fisiche in cui si trova. L'anidride carbonica è solida alla temperatura di -78,5°C e alla pressione atmosferica sublima senza passare per la fase liquida. L'anidride carbonica allo stato solido è comunemente chiamata "ghiaccio secco". Per pressioni inferiori a quella atmosferica, si hanno temperature di sublimazione più basse.

In sintesi, il comportamento fisico della CO_2 segue il diagramma di stato, per cui:

- a condizioni atmosferiche (1 bar e 20 °C) si presenta allo stato gassoso;
- tra -56,6 e +31,1 °C e pressioni maggiori di 5,2 bar si presenta allo stato liquido;
- a temperature inferiori ai -56,6 °C si presenta allo stato solido.

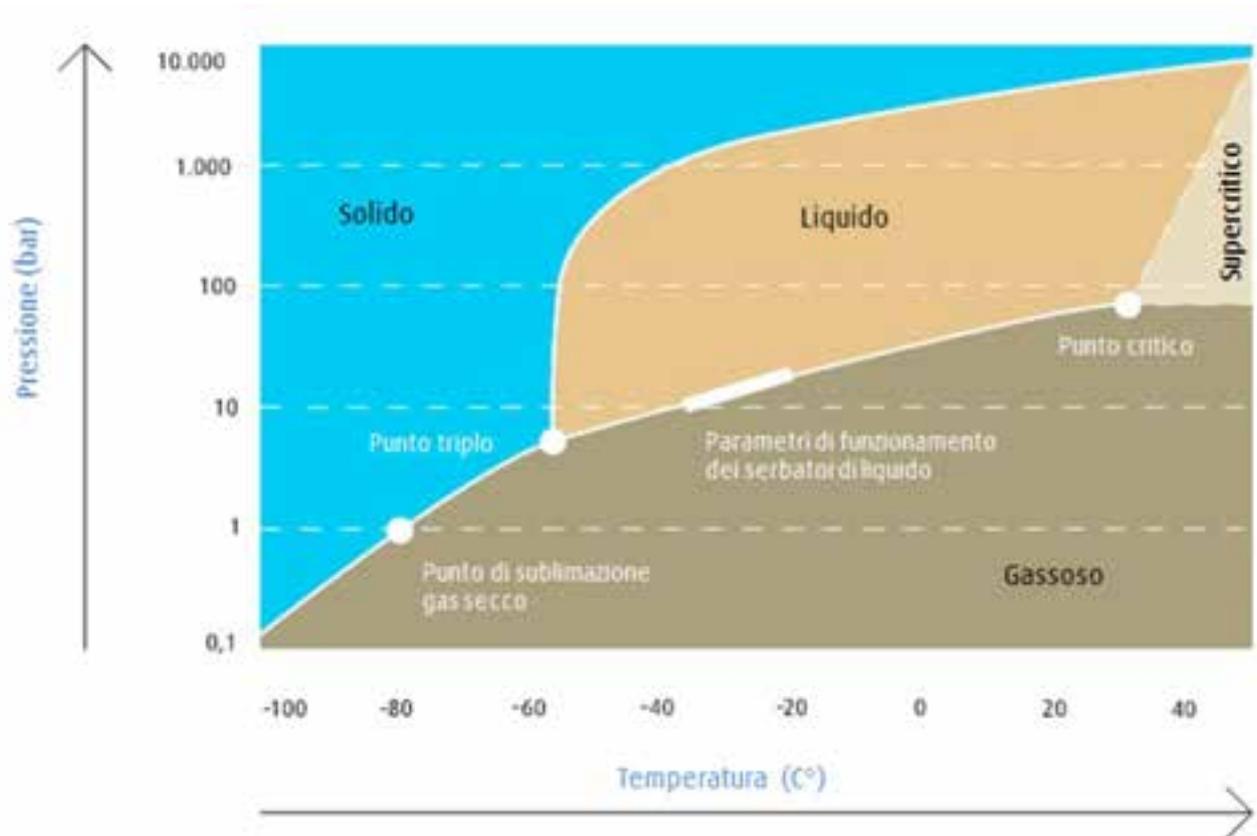


Grafico 1. Diagramma di stato anidride carbonica

3. Comportamento dell'anidride carbonica all'interno del serbatoio

All'interno del serbatoio l'anidride carbonica diminuisce la propria temperatura al diminuire della pressione; la diminuzione della pressione all'interno dell'attrezzatura può essere dovuta sia ad un rapido prelievo di grandi volumi da parte dell'utilizzatore sia all'apertura di valvole di sfogo, o in caso di guasto del vaporizzatore ecc.

A temperatura sopra il punto triplo e sotto i 31,1 °C l'anidride carbonica può essere in equilibrio tra lo stato liquido e lo stato gassoso se è contenuta in un serbatoio chiuso.

Il passaggio da liquido a ghiaccio secco comincia alla pressione di 4,16 bar alla quale corrisponde una temperatura di -56,6 °C; queste coordinate, come già evidenziato, coincidono con il punto triplo del diagramma di stato.

Al di sotto di tali limiti di pressione e temperatura il liquido si trasforma in solido (ghiaccio secco).

Ripressurizzando il serbatoio per portare la temperatura al di sopra del punto triplo avviene una trasformazione da solido a liquido e successivamente a gas.

Questa trasformazione però non avviene istantaneamente ma è un processo che può durare giorni o settimane.

I serbatoi destinati a tale utilizzo risultano solitamente costruiti con acciaio al carbonio basso legato, con duttilità elevata ed una elevata resistenza alla trazione; una diminuzione della temperatura dell'anidride carbonica può portare il materiale costituente il serbatoio a raggiungere la sua temperatura di transizione per cui le caratteristiche meccaniche diminuiscono facendo scendere la duttilità fino a renderlo fragile. Ulteriori diminuzioni della temperatura possono portare alla rottura catastrofica del contenitore in quanto i materiali fragili non sono in grado di distendersi a basse temperature.

Per non superare i limiti riportati nella dichiarazione di conformità presa in esame, all'interno del recipiente la pressione non può essere caratterizzata da valori inferiori a 9,8

bar in quanto se la pressione all'interno del serbatoio scendesse al di sotto di tale valore la temperatura scenderebbe oltre il limite di -40 °C fissato dal fabbricante.

In Figura 1, si riporta un esempio di dichiarazione di conformità di un serbatoio.

Declaration of Conformity

In accordance with the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU

Manufacturer:

Name and number of the Notified body:
 Equipment Type: 63,370 L_A Carbon dioxide Vertical Euro Tank
 Fluid contained: L CO₂
 Approved Drawing No and Revision: Rev. : 0
 Design examination date and report no: 18.08.2016 /

Equipment Serial No: 2016-217
 Year of manufacture: 2016
 Category: IV
 Module: G
 Standards: EN 13445-3 / EN 13458-2

Characteristic design properties of the equipment / Proof test data of the equipment

	Inner Vessel	Outer Jacket	Tank Piping and Accessories Final Test
Max Allow Working Pressure [bar]:	22,0	-	22,0
Design Pressure [bar]:	24,76	-1	40,0
Design Temperature min / max [°C]:	-40 / +50	-20 / +50	-40 / +50
Volume [liters]:	63370	32495	-
Proof test pressure [bar]:	34,5	2	27,2 acc.to EN 13458-2 Art. 6.5.4
Pressure Straight Test Pressure [bar]:	-	-	-
Proof test medium:	Water	N ₂ (Gas)	N ₂ (Gas)
Proof test date:	14.11.2016	03.12.2016	24.12.2016

This equipment consist of inner vessel, outer jacket, piping, accessories

We hereby certify under our sole responsibility that the pressure equipment described herein, has been designed, manufactured and tested in accordance with all the relevant provisions and specified conformance modules of the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU.

Name and Surname:
 Position:
 Company:
 Date and Place: 06.01.2017

Figura 1. Dichiarazione di conformità

4. Fattori di rischio

4.1 Effetti della bassa temperatura sui materiali

L'anidride carbonica a bassa temperatura (- 78,5 °C, ghiaccio secco) produce sugli acciai al carbonio un fenomeno di incremento di fragilità, infatti, la loro tenacità cambia in maniera netta intorno ad un certo valore di temperatura che prende il nome di temperatura di transizione e dipende dagli elementi di lega costituenti il materiale e dal trattamento a caldo a cui lo stesso è sottoposto.

Gli acciai al carbonio utilizzati per la costruzione di serbatoi criogenici, se sottoposti a basse temperature, possono diventare fragili e qualora vengano sottoposti a sforzi o forti sollecitazioni, cedere in modo catastrofico.

Tale problematica è comunque affrontata nella norma UNI EN 1252-2 "Recipienti criogenici; Materiali; Requisiti di tenacità per le temperature comprese tra i - 80 °C e - 20 °C".

I sistemi di trasferimento dell'anidride carbonica, compresi i tubi flessibili devono essere costruiti con materiali compatibili sia con l'anidride carbonica in fase liquida sia con le corrispondenti condizioni di temperatura e pressione così come rilevabili dal diagramma di stato.

4.2 Effetti della ripressurizzazione del serbatoio

La depressurizzazione di un serbatoio non produce grossi effetti sullo stesso, in quanto al diminuire della pressione e, conseguentemente, della temperatura diminuiscono le sollecitazioni indotte sul serbatoio, contrariamente a quanto sopra esposto durante la ripressurizzazione, si ha una maggiore sollecitazione sulle pareti del contenitore dovuta alla pressione interna.

I rischi della ripressurizzazione sono dovuti alla bassa temperatura dell'anidride carbonica raggiunta nella fase di depressurizzazione in quanto, quando si aumenta nuovamente la pressione all'interno del serbatoio, la temperatura dell'anidride carbonica impiega un tempo estremamente più lungo, per raggiungere i valori precedenti, rispetto a quello necessario per l'innalzamento della pressione.

L'aumento della pressione sulla parete, già infragilita dalla temperatura, crea una sollecitazione che può portare alla rottura distruttiva del serbatoio, in quanto la temperatura non ha più un andamento correlato con la pressione (ad un innalzamento di pressione non corrisponde un aumento equivalente di temperatura).

La tabella 2 riporta la relazione tra pressione, temperatura e sollecitazione sulle pareti del contenitore.

Pressione interna (bar)	Temperatura di equilibrio anidride carbonica (°C)	Sollecitazione di parete interna (Mpa)
24,1	-11	---
22	-15	225,6
20,7	-16	212,2
17,2	-22	176,8
13,8	-29	141,4
10,3	-37	106,1
6,9	-47	71,8
4,1	-56	56,1
0	-78,9	0

Tabella 2. Correlazione tra pressione e temperatura tra CO₂ e sollecitazione di parete



Figura 2. Esempi di installazione di serbatoi criogenici e strumentazione

5. Procedura per un corretto utilizzo del serbatoio

Il serbatoio in esame, avente una temperatura di progetto pari a $-40/ + 50$ °C, dovrà essere dotato di varie procedure di sicurezza per una gestione entro limiti fissati dal costruttore.

Si deve tener conto della possibilità di un prelievo eccessivo, possibili perdite di prodotto da flange, guarnizioni, tubazioni, valvole e dell'eventualità di spostamento/disattivazione dell'attrezzatura in questione (in quest'ultimo caso occorre realizzare lo svuotamento in sicurezza della stessa).

Le procedure devono contenere almeno i seguenti punti:

- analisi dei rischi;
- metodologia di verifica dell'incremento di fragilità con la diminuzione della temperatura,
- sistema di ripressurizzazione;
- sistemi tecnici volti ad evitare le problematiche sopra esposte;
- formazione rivolta al personale addetto.

5.1 Analisi dei rischi

L'analisi dei rischi dovrà essere effettuata da un tecnico abilitato tenendo conto della tipologia dell'impianto, dell'attività svolta dall'utilizzatore, dei rischi connessi con il funzionamento dei sistemi di riscaldamento del fluido criogenico, dell'eventuale sorveglianza dell'impianto, dei rischi connessi con i sistemi di interruzione del fluido criogenico in caso di necessità e/o emergenza, delle grandezze critiche da controllare con particolare riferimento alle caratteristiche dei materiali impiegati e ai parametri di

costruzione delle attrezzature, comunque coerentemente con quanto disposto dalle circolari Ispesl e D.L.gs. 81/08.

5.2 Metodologia di verifica dell'incremento di fragilità con la diminuzione delle temperature.

La metodologia deve identificare le operazioni per garantire i limiti di utilizzo, la verifica di resistenza all'infragilimento dell'attrezzatura a pressione secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 1252-2 o utilizzando un metodo di calcolo equivalente.

5.3 Sistema di ripressurizzazione

Il procedimento deve individuare il susseguirsi di operazioni da eseguirsi al fine di garantire la sicurezza del serbatoio affinché non avvenga il fenomeno dell'infragilimento del materiale dovuto alle basse temperature raggiunte dall'anidride carbonica.

5.4 Sistemi tecnici

Il serbatoio dovrà essere dotato di tutti gli accorgimenti tecnici volti ad evitare il verificarsi delle problematiche sopra esposte; detti accorgimenti potranno essere costituiti da un pressostato che blocchi il prelievo di anidride carbonica al di sotto dei 9,8 bar, corrispondenti ai -40 °C e di un sistema di allarme che avverta tempestivamente il personale formato per il tempestivo intervento.

5.5 Formazione al personale

La formazione che è obbligatoria, deve essere estesa a tutto il personale: da quello che utilizza l'attrezzatura, a quello che si occupa del rifornimento, la manutenzione e al personale che effettua la dismissione del serbatoio.

In Figura 3 viene riportato un tipico schema d'impianto di un serbatoio criogenico.

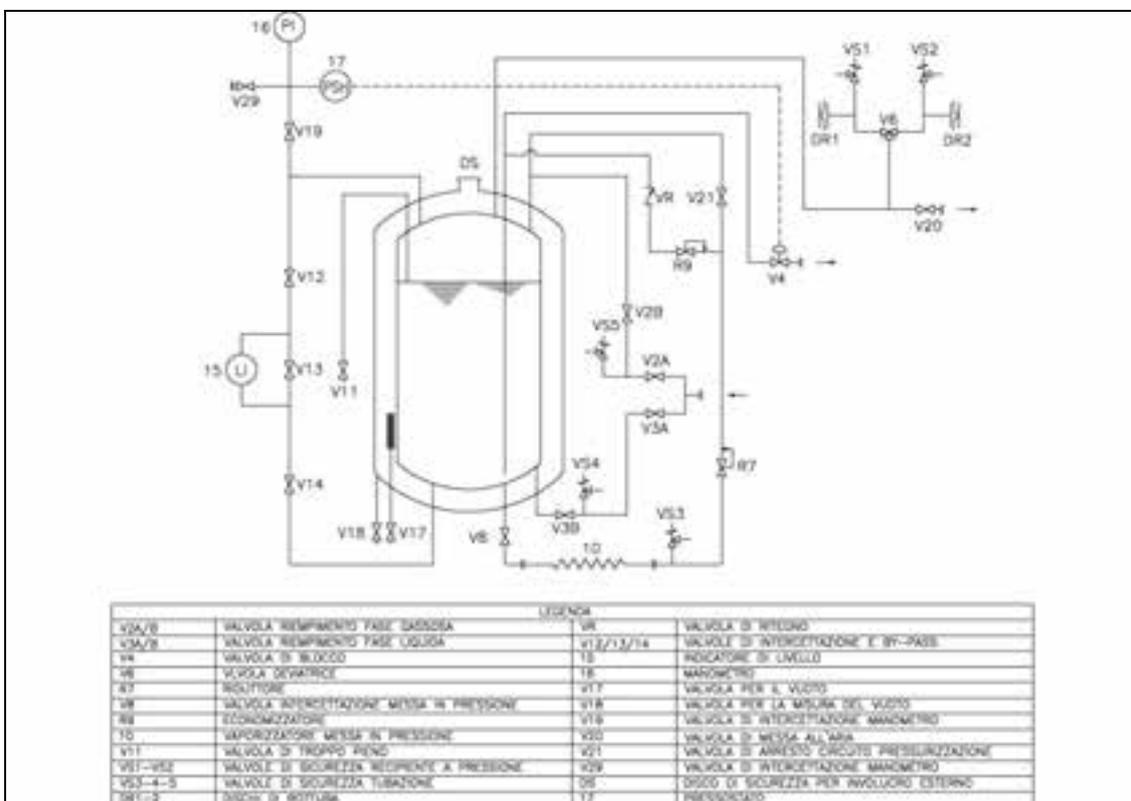


Figura 3. Schema d'impianto

6. Conclusioni

Lo studio svolto ha voluto focalizzare l'attenzione di progettisti, costruttori e utilizzatori sulle delicate scelte costruttive tali da non limitarne la flessibilità di utilizzo e non per ultimi ai verificatori preposti sia alla verifica di messa in servizio sia ai soggetti preposti a verifica periodica evidenziando le problematiche che sono scaturite da tale attrezzatura.

Qualora si dispongano di serbatoi con tali caratteristiche produttive, gli stessi possono seguire le indicazioni e gli accorgimenti previsti al punto 5 del presente lavoro per evitare di portare il serbatoio al di sotto dei limiti di temperatura fissati dal costruttore.

7. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 (G.U. S.O. n. 22 del 28/01/2005).

[2] Circolare Ispesl n. 9/2004 del 19/07/2004

[3] Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, “Disciplina delle modalità' di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo” (G.U. Serie Generale n. 98 del 29/4/2011 – S.O. n. 111).

[4] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106, Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo e correttivo: Gazzetta Ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L).

[5] d.lgs. 25.02.2000 n. 93 e s.m.i. – Attuazione della Direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione

[6] Specificazioni tecniche applicative del d.m. 21 maggio 1974 - «Raccolta E».

[7] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione

Gestione moderna e integrata delle attività di RBI nel campo dell'Asset Integrity

A. Mura, F. Gambato, F. Verzotto

Antea Srl

Sommario

La crescente complessità delle operazioni e degli impianti petroliferi, chimici e petrolchimici insieme alla crescente consapevolezza dell'opinione pubblica per garantire livelli più elevati di sicurezza, ha spinto i progettisti e gli operatori a trovare soluzioni innovative per garantire operazioni sicure ed economicamente valide.

Attualmente, per le pratiche di valutazione del rischio negli impianti, una delle più comuni metodologie di valutazione è il Risk Based Inspection (RBI).

L'RBI è utilizzato per identificare le attrezzature critiche in cui le ispezioni forniranno il massimo beneficio nel minimizzare il rischio complessivo, riducendo significativamente anche gli sforzi di ispezione e manutenzione non utili.

Le metodologie RBI offrono benefici ottimali se vengono integrati nelle altre attività di Asset Integrity degli impianti, soprattutto se ci si basa su metodologie quantitative per garantire maggiore oggettività e ripetibilità (ad esempio l'approccio API 581).

Per minimizzare il costo di attività ausiliarie, come il recupero dei dati, si deve progettare un sistema di gestione integrato per tutti gli item degli impianti.

Inoltre, per fare sì che vengano inseriti dati aggiornati e corretti, evitando stime e approssimazioni, risulta importante l'utilizzo di moderne tecnologie e funzionalità (digital twin, laser scanning, e altro).

Un approccio globale per la gestione dell'analisi RBI è offerto dal software Palladio, sviluppato da Antea S.r.l.

La filosofia è quella di gestire le diverse aree dell'Asset Integrity in maniera unificata e di mettere a disposizione tutte le visualizzazioni e le informazioni derivanti dalle moderne tecnologie, al fine di avere a disposizione informazioni sempre più dettagliate per formulare analisi RBI.

1. Introduzione alle procedure RBI

L'RBI è un processo di valutazione del rischio industriale delle attrezzature di impianto e successiva definizione di un piano ispettivo adeguato che riduca il rischio globale.

La metodologia va tarata in base alla dimensione dell'impianto, agli obiettivi ed alle disponibilità di risorse.

Il rischio è definito come il prodotto tra la probabilità che avvenga un rilascio del fluido contenuto nelle attrezzature e la conseguenza che potrebbe causare il rilascio di tale fluido (formula seguente).

$$Risk = PF * CF \quad (1)$$

Generalmente il risultato è visualizzato nella matrice di rischio (vedi Fig.1), nella quale vengono rappresentati la probabilità e la conseguenza. Per ciascun componente analizzato, i valori di probabilità e conseguenza corrisponderanno alle coordinate di ingresso nella matrice che identificherà la criticità dell'attrezzatura.

La probabilità è direttamente connessa ai meccanismi di danneggiamento ai quali il componente è soggetto. La tipologia e l'entità di questi ultimi dipende dal materiale di costruzione dell'attrezzatura, dai dettagli costruttivi e dai processi di produzione, dal fluido

contenuto e dalle sue condizioni (temperatura, pressione, stato fisico, flusso e altro), dalle condizioni dell'ambiente esterno e dall'effettiva consapevolezza dello stato di integrità dell'attrezzatura. Quest'ultima è data dall'attività ispettiva.

Infatti, un piano ispettivo efficace rende possibile la riduzione o il mantenimento della probabilità che avvenga l'evento di danneggiamento.

Gli obiettivi della formulazione del piano ispettivo suggerito dalle metodologie RBI sono infatti l'identificazione delle seguenti variabili:

- Come fare l'ispezione (tipo di controlli non distruttivi);
- Quando effettuare l'ispezione (data di ispezione);
- Dove effettuare l'ispezione (identificando aree e copertura).

Queste dovranno essere individuate cercando di ridurre il rischio sotto il limite voluto, evitando le ispezioni non utili che causerebbero anche uno spreco di risorse.

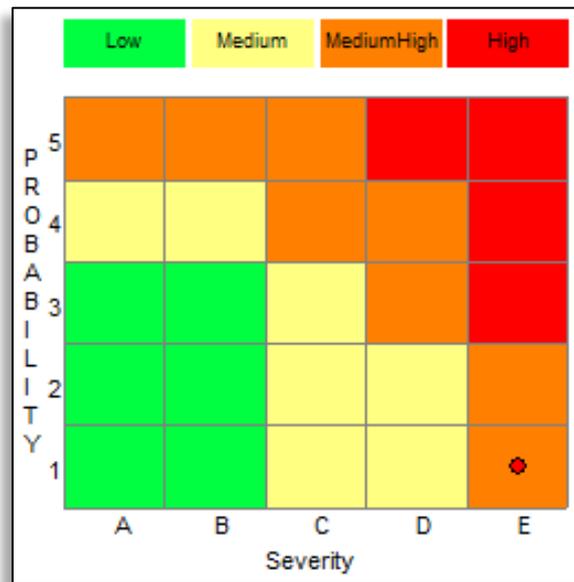


Figura 1. Esempio di matrice di Rischio (©API 581)

2. I diversi approcci (qualitativo, semi-quantitativo, quantitativo)

Non esiste un unico modo per fare RBI, ma esistono diverse modalità e diversi livelli di dettaglio. Come già introdotto, la scelta del migliore approccio dipende da una serie di fattori, come ad esempio la tipologia e la dimensione dell'impianto da analizzare, gli obiettivi dell'analisi, il budget e le risorse a disposizione.

Generalmente si possono individuare tre approcci: l'approccio qualitativo, l'approccio semi-quantitativo e l'approccio quantitativo.

2.1 Approccio Qualitativo

L'approccio qualitativo consiste in un'analisi di rischio di massima che in genere non coinvolge l'uso di formule e contempla un basso livello di dettaglio.

In linea di massima non vengono considerate nel dettaglio le attrezzature e spesso si fa riferimento a circuiti di danneggiamento similare (corrosion loop). Si tratta di metodologie le cui analisi sono rapide ma che forniscono risultati qualitativi (ad esempio: basso, medio o alto rischio).

2.2 Approccio Semi-Quantitativo

Sicuramente l'approccio semi-quantitativo fornisce un approccio più dettagliato e aspira a fornire una maggiore oggettività dell'analisi contemplando anche l'utilizzo di formule.

In realtà i confini dell'approccio semi-quantitativo non sono ben definiti e potrebbe comprendere livelli di dettaglio e complessità molto variabili. Si potrebbe infatti ricadere in questo approccio inserendo delle parti di calcolo alla valutazione qualitativa, o delle metodologie di stima ("shortcut") sul calcolo dei parametri della valutazione quantitativa.

2.3 Approccio Quantitativo

L'approccio quantitativo offre maggiore affidabilità e ripetibilità delle analisi RBI, diminuendo le possibilità di stima soggettiva dei parametri. Tutti i meccanismi di danno sono calcolati attraverso procedure algoritmiche e i parametri sono calcolati attraverso formule.

Il livello di dettaglio è molto elevato e teoricamente si dovrebbero contemplare analisi RBI differenti per ciascuna delle parti di un'attrezzatura che abbia delle caratteristiche e delle condizioni diverse.

Di contro, il lato negativo è che in genere si tratta di procedure di analisi molto complesse e laboriose, che richiedono quindi maggior tempo di indagine.

I risultati che fornisce sono dei risultati quantitativi misurabili: la probabilità di failure, la conseguenza d'area o la conseguenza finanziaria, il rischio.

Esistono varie norme e linee guida che forniscono diverse tipologie di approccio, ma al giorno d'oggi la norma approvata su larga scala risulta essere la norma API 581, che fornisce un approccio completamente quantitativo. Un difetto della metodologia proposta è il considerare meccanismi di danno comuni nel settore della raffinazione, ma il trascurare per contro quelli degli impianti di upstream, soprattutto per quanto riguarda le parti off-shore.

3. Importanza del reassessment e di un Asset Integrity Tool

Per risultare efficaci, i processi di valutazione del rischio - in funzione della definizione di un piano ispettivo che punti alla diminuzione del rischio totale - devono essere inseriti in una gestione globale dello stato di integrità delle attrezzature.

La prima analisi RBI su impianti esistenti è necessariamente fatta nella fase di produzione e quindi dovrebbero essere disponibili già le evidenze della presenza di meccanismi di danno. Ciò è vero parzialmente: in molti casi infatti, le ispezioni previste storicamente non si sono rivelate adatte ad individuare i meccanismi di danno più probabili nelle condizioni di esercizio specifiche. Gli approcci ispettivi classici basati sulla frequenza ("frequency based approach"), in molti casi prevedevano in gran parte tecniche ispettive come l'indagine visiva e le spessimetrie classiche ad ultrasuoni. Queste tipologie di controlli non distruttivi, ad esempio, poco servono all'individuazione di alcuni meccanismi di danno interni come lo stress corrosion cracking.

In questa situazione, come indicato anche nella Fig. 2, va comunque fatta un'indagine preliminare sulla storia ispettiva delle attrezzature su cui effettuare l'analisi RBI, in modo da recuperare le evidenze dei danneggiamenti e valutare se il sistema di monitoraggio dei meccanismi più critici è adeguato.

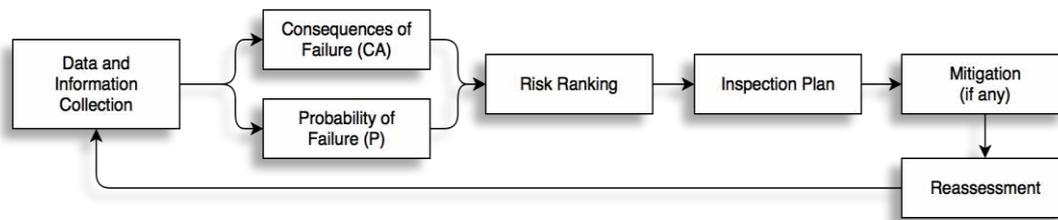


Figura 2. Processo di RBI (©API 580)

Questa operazione di ricerca e analisi negli archivi dei reparti di ispezioni e controlli, unita alla ricerca di dati e documentazione tecnica, potrebbe richiedere un grande investimento di tempo negli archivi e nei locali d'impianto dove la documentazione è depositata.

Tale ricerca va necessariamente ad influire sul costo totale dell'attività.

Se invece tutta la storia ispettiva e la documentazione di tipo tecnico è disponibile su strumenti software di Asset Integrity Management, il tempo da investire per l'attività di ricerca e analisi documentale e dei dati storici si ridurrebbe drasticamente.

Oggi si tende ad effettuare le analisi RBI già dalla fase di progettazione o di costruzione degli impianti. In questi casi, ovviamente, non si hanno a disposizione ispezioni e controlli precedenti, ma si ha l'opportunità di prevedere i controlli più efficaci in base ai dettagli costruttivi, di progetto e di processo.

In questo caso il recupero della documentazione tecnica dovrebbe essere più agevole e si ha l'opportunità di impostare al meglio un database di Asset Integrity.

Ad ogni modo, sia che si tratti di un impianto nuovo e sia che si tratti di un impianto esistente, una condizione che dovrebbe sempre essere presa in considerazione - anche se effettivamente spesso viene trascurata - è la sinergia tra le attività di ispezione e controllo e quella di RBI.

Come raccomandato (vedi Fig. 2), il processo di RBI deve essere un processo ciclico, che parte dalla valutazione del rischio attuale e futuro potenziale, passa per la formulazione di un piano ispettivo appropriato e termina con l'esecuzione delle attività ispettive previste, per poi ripartire dalla rivalutazione del rischio e procedere con le altre fasi.

Via via che i cicli si concludono negli anni, si riesce ad acquisire una sempre maggiore consapevolezza dello stato e dei rischi delle attrezzature.

Il lato positivo di questo aspetto è che, se la prima analisi RBI viene eseguita in maniera approfondita e vengono utilizzati gli strumenti di archiviazione adeguati, le analisi di "reassessment" diventano di gran lunga meno onerose e più efficaci.

Per questo motivo Antea ha previsto di inserire nel software di gestione dell'attività ispettiva, denominato Palladio, il modulo Palladio RBI per l'esecuzione integrata delle analisi RBI e la loro archiviazione.

4. Le fasi di un'analisi RBI supportate da software

Facendo riferimento ancora alla Fig. 2 si possono individuare ed estendere diverse fasi del processo di analisi RBI. Lo scopo di questo capitolo è quello di analizzare le diverse fasi, cercando l'ottimizzazione del processo e presentando i vantaggi nell'utilizzo di strumenti software.

- Raccolta dati. Come già accennato, la prima fase dovrebbe iniziare con la raccolta dati e documenti. Tale fase dovrebbe essere il più ordinata possibile per rendere agevole e veloce la consultazione nelle fasi successive dell'analisi, per la verifica successiva ed eventualmente per il reassessment. L'uso di software di Asset Integrity in questa fase risulta ovvia ed è già stata trattata.

- Analisi dei dati e identificazione dei processi e delle attrezzature. Avendo a disposizione dati e documenti, la prima fase di analisi dovrebbe consistere nello studio dei manuali d'impianto, delle condizioni operative, nell'identificazione di fluidi e materiali di costruzione e altro ancora. I documenti di riferimento sono i manuali operativi, le planimetrie i PFD (Process Flow Diagram), i MFD (Mass Flow Diagram) e i MSD (Material Selection Diagram), la lista e analisi dei fluidi e materiali, e altri documenti di carattere generale. Risulta evidente che se la documentazione è stata archiviata correttamente e condivisa, essa sarà reperibile a tutti gli attori dell'analisi.

- Identificazione dei "corrosion loop". In base alle condizioni di processo (temperatura, pressione, flusso), al fluido (composizione e stato) ed ai materiali di costruzione, sarà possibile creare i circuiti di corrosione o circuiti a danno similare.

I PFD sono i diagrammi più adatti per la prima identificazione dei circuiti, ma successivamente deve essere fatta una operazione di sviluppo nei P&ID, per consentire il raggruppamento di tutte le attrezzature nel circuito appropriato.

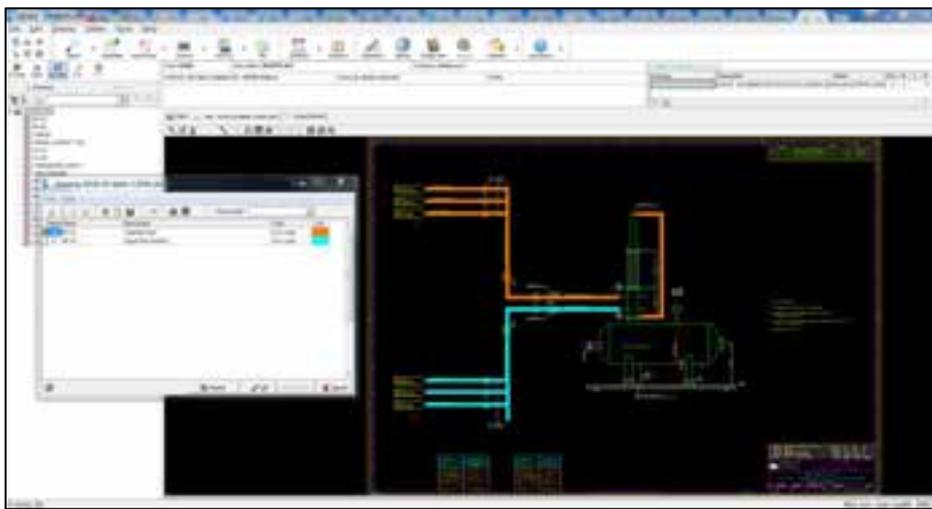


Figura 3. Corrosion Loop su software Palladio

Anche questa fase può essere supportata da software. Eseguire l'evidenziazione dei circuiti direttamente sui P&ID interattivi in primo luogo assicura la rintracciabilità e la consultazione anche nel futuro, ed in secondo luogo rende automatico il raggruppamento delle attrezzature (apparecchi e linee) attraverso la selezione grafica.

Storicamente tale attività è stata effettuata su documentazione cartacea spesso non reperibile, deteriorabile e non assoggettabile a revisione nei reassessment.

- Analisi dei "corrosion loop". Per ciascun circuito di corrosione, sarà possibile identificare qualitativamente i meccanismi di danno più probabili ed eseguire un'analisi qualitativa di circuito in modo da identificare una prima criticità ad un livello superiore.

Anche tale procedura di RBI di screening può essere inserita nel software, così da avere registrata anche questa fase del processo.

- Analisi quantitativa delle attrezzature. Proprio sull'analisi quantitativa delle attrezzature o componenti di attrezzature si ottengono i maggiori benefici utilizzando una piattaforma software adeguata. Gli algoritmi automatizzabili permettono di eseguire input e output di dati di analisi in maniera massiva e di eseguire calcoli ripetuti su molte attrezzature in sequenza. Spesso eseguire calcoli quantitativi manualmente risulta infatti non sostenibile dal punto di vista economico.

La procedura della norma API 581 prevede il calcolo della probabilità e della conseguenza per identificare il rischio attuale.

Inoltre viene calcolata la proiezione del rischio futuro (ad una data futura identificata come "Plan Date") per vedere l'escalation del rischio determinato dall'aumento della probabilità di failure che a sua volta determina dall'aumento dei meccanismi di danno dipendenti dal tempo (definiti "trendable").

Vengono fatte due simulazioni nel futuro: una non prevedendo ispezioni nel futuro (futuro senza ispezioni) ed una valutando ispezioni future.

- Individuazione del piano ispettivo appropriato. Anche le proiezioni del rischio nel futuro risulterebbero molto complicate se effettuate senza un appropriato strumento software.

La procedura identificata dalla norma API 581 prevede infatti l'individuazione della data futura in cui il rischio non è accettabile, e questa data sarà la data proposta per l'attività ispettiva.

Inoltre è possibile prevedere quale efficacia ispettiva utilizzare per ciascun meccanismo di danno, al fine di restare sotto il limite del rischio accettabile alla plan date.

Grazie a queste informazioni è possibile identificare quando fare l'ispezione (data di target), come e dove ispezionare, individuando quali sono le tecniche ispettive adeguate ed il coverage (informazioni suggerite dall'efficacia ispettiva).

L'individuazione del piano ispettivo è ottimizzata secondo il flowchart di Figura 4.

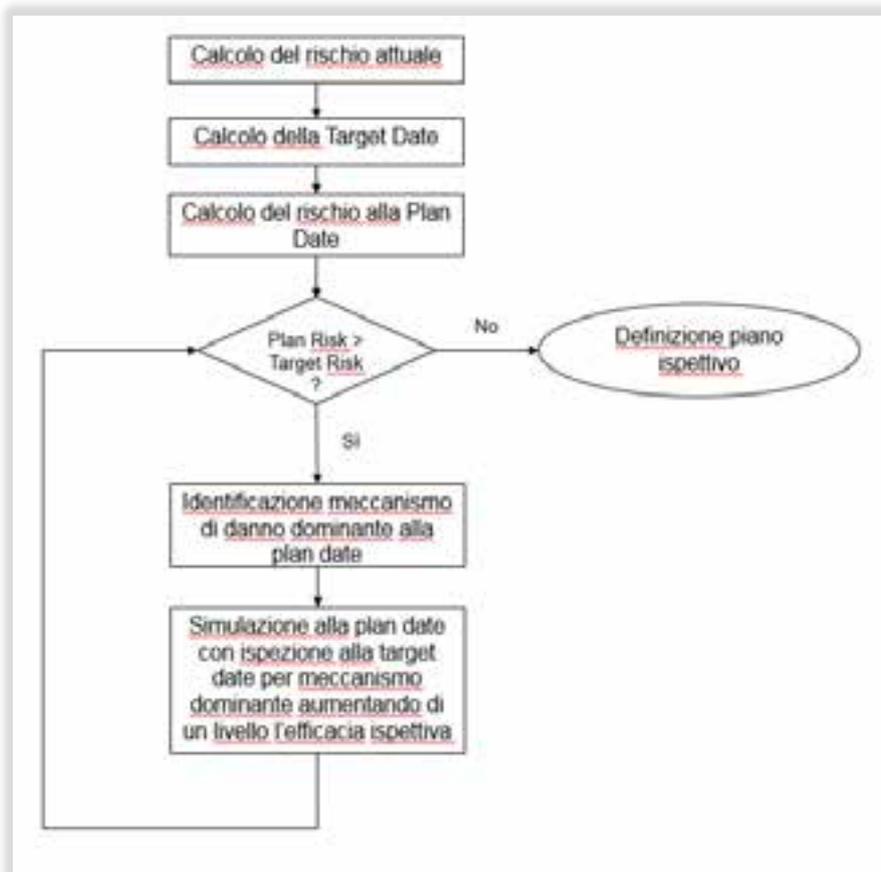


Figura 4. Flowchart di identificazione del piano ispettivo

Una volta identificata una data futura in cui fare l'ispezione, bisognerà infatti identificare che tipologia di ispezione fare.

Proprio in questa fase risulta necessario un calcolo iterativo che vada via via a simulare l'andamento del rischio prevedendo diverse tipologie di indagini ispettive, per identificare il piano ideale che permetta di ridurre il rischio ai livelli voluti ed evitando però di sovradimensionare l'attività.

L'algoritmo prevede innanzitutto il calcolo del rischio alla plan date senza prevedere nessuna attività ispettiva in futuro. Se tale proiezione del rischio è inferiore al rischio di target, non è previsto alcun suggerimento sull'attività ispettiva. Se invece il rischio è maggiore del target, bisognerà individuare il meccanismo di danno dominante ed assegnare l'ispezione con efficacia ispettiva minima, valutando la nuova situazione. Se ancora il rischio non scende a valori accettabili, bisognerà valutare ancora quale risulta essere il meccanismo di danno dominante. Se è lo stesso su cui si è agito, bisognerà aumentare di un livello l'efficacia ispettiva, mentre se è un altro meccanismo bisognerà partire dalla sua efficacia minima.

Tale processo iterativo proseguirà finché il rischio non è riportato sotto la soglia del target. Questa situazione permetterà di individuare il piano ispettivo ottimale per un'attrezzatura.

5. Approccio ibrido (qualitativo-quantitativo)

Nei casi in cui il numero delle attrezzature risulti molto grande, o quando il budget a disposizione non consente di effettuare un'analisi RBI di tipo quantitativo su tutte le attrezzature d'impianto, una possibilità è l'utilizzo di una metodologia ibrida in grado di sfruttare la velocità di esecuzione dell'analisi qualitativa in maniera massiva su tutte le attrezzature, ma che preveda un'indagine quantitativa approfondita per le attrezzature che sono risultate più critiche.

La metodologia proposta, definita "ibrida", è sintetizzata nel flowchart di Figura 5.

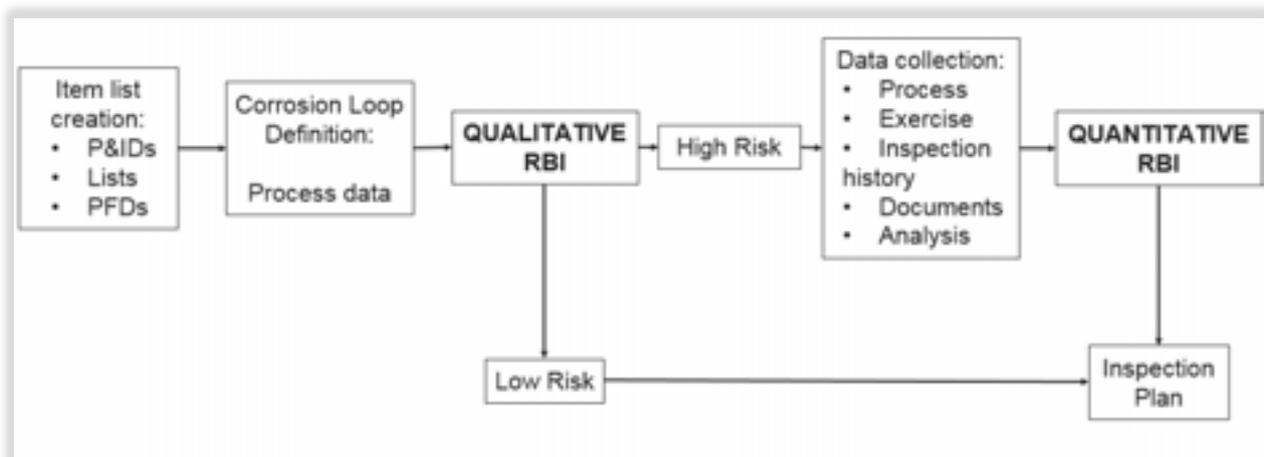


Figura 5. Approccio ibrido (qualitativo e quantitativo)

In questo caso si inizierà con una fase di raccolta dati più blanda, al fine di avere le informazioni di massima dell'impianto e delle attrezzature che si andranno ad analizzare. Indispensabili in questa fase sono i PFD, i MSD e le descrizioni del processo.

Si procederà quindi all'identificazione dei circuiti di corrosione, sui quali verrà eseguita l'analisi RBI di tipo qualitativo. Per quanto riguarda gli apparecchi, sono possibili diverse alternative: suddivisi in componenti possono rientrare nei corrosion loop delle linee; oppure possono essere trattati singolarmente con un'analisi qualitativa specifica; altrimenti potrebbero essere tutti sottoposti ad un'analisi di tipo quantitativo.

L'obiettivo della fase di analisi qualitativa è quello di fare uno screening tra le attrezzature più critiche, degne quindi di maggiore attenzione, e quelle meno critiche, per le quali si potrà procedere all'identificazione di un piano ispettivo di minima.

Per attrezzature che sono state identificate come a maggior criticità dall'analisi qualitativa, si procederà ad una raccolta dati più intensa, che corrisponde a quella descritta in precedenza. Ovviamente tale fase è ridotta in quanto la ricerca non dovrà essere fatta per

la totalità delle attrezzature. Queste verranno processate dall'analisi quantitativa e verrà identificato il piano ispettivo come previsto dalla metodologia.
Attrezzature più critiche e meno critiche convoglieranno in un piano ispettivo unico.

6. Conclusioni

Le moderne metodologie di gestione dell'attività ispettiva, unite alle diverse metodologie di Risk Based Inspection, richiedono una sinergia tra loro e con le molteplici attività svolte in un impianto produttivo.

Per ottimizzare i lavori e, in generale assicurare che l'Asset Integrity sia gestito al meglio, è necessario utilizzare i moderni strumenti tecnologici che sono oggi a nostra disposizione. L'approccio proposto prevede l'utilizzo di un software per la gestione e l'analisi dell'attività ispettiva e manutentiva unito ad un tool personalizzabile per eseguire analisi RBI.

Le metodologie possono essere diverse in base alle necessità, ma si possono individuare delle linee guida comuni.

Bibliografia

- [1] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 581, Risk-based Inspection Methodology, Edizione 3, Aprile 2016
- [2] Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-G101, Risk Based Inspection of offshore topsides static mechanical equipment, Ottobre 2010
- [3] CEN/TC 319/WG 12 - Risk based inspection framework (RBIF) - Documento in inchiesta pubblica
- [4] American Petroleum Institute, API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service, Edizione 3, Giugno 2016

Giunti critici su apparecchi a pressione

P. Addonizio¹, M. Madonna¹, G. Russo², P. Fontana³, R.A. Falco³, D. Russo⁴

¹ Inail - Uot di Napoli

² Vigili del Fuoco

³ Italcost Napoli

⁴ Consulente Ispezioni/Corrosioni

Sommario

I serbatoi sferici sono particolari strutture utilizzate nel settore petrolchimico per lo stoccaggio sotto pressione di idrocarburi liquidi (GPL). Detti serbatoi sono supportati su colonne cilindriche cave, accoppiate al mantello tramite saldatura tra sezioni geometriche particolari. Le colonne, infatti, vengono saldate lungo la tangente sulla lamiera sferica, ad altezza equatoriale, previa opportuna sagomatura per il combaciare delle superfici. Tale procedura costruttiva rappresenta un fattore di criticità soprattutto nella fase di giunzione. La saldatura, infatti, viene effettuata dall'esterno lungo tutto il profilo di accoppiamento sfera/supporto cilindrico, e deve impegnare tutto lo spessore del tubo del profilo stesso. La reale rispondenza a tale esigenza strutturale diventa oggetto di specifica ispezione in fase di costruzione e collaudo e in occasione delle verifiche e dei controlli periodici, quando cioè si è chiamati a valutare lo stato di integrità dell'intero serbatoio.

In questo studio, si vogliono indagare le modalità di accesso alla visione delle suddette saldature dal lato interno tubo, al fine di valutarne l'esistenza/integrità. Inoltre, si vogliono vagliare metodi di ispezione per determinare lo stato delle suddette saldature dall'interno della sfera, in concomitanza della verifica decennale, in osservanza alle procedure di prevenzione degli incidenti rilevanti. Per lo stesso scopo, si prenderanno in esame anche una tipologia di controllo non distruttivo per valutare fenomeni di corrosione che possono interessare le connessioni filettate su piping con $D \leq 2''$. Il numero di filetti operativi e la qualità dell'accoppiamento possono essere ispezionati anche con apparecchiatura in esercizio.

1. Introduzione

Le attrezzature a pressione, per la loro peculiarità, sono soggette a verifica di integrità con cadenza decennale. Essa consiste nell'accertamento dello stato di conservazione delle varie membrature, delle parti interne ed esterne accessibili ed ispezionabili, mediante esame visivo e strumentale (spessimetria e prove non distruttive). Le verifiche vengono eseguite da personale qualificato incaricato dal committente ed effettuate sulle parti critiche delle apparecchiature [1].

Il Responsabile dell'Impianto provvede a pianificare controlli in esercizio nell'intervallo tra due visite decennali. Essi consistono nel verificare, ad intervalli regolari, ispezioni visive e, se possibile, controlli strumentali.

2. Saldature secondarie

In un programma ispettivo per serbatoi sferici, sia nella fase di verifiche interne in occasione delle fermate che durante l'esercizio, l'attenzione è focalizzata principalmente sui giunti (saldature), poiché essi rappresentano la continuità fisica delle lamiere che compongono il serbatoio. Le indagini hanno l'obiettivo di individuare eventuali difetti o danni che si possono realizzare nel tempo e connessi a fattori esterni (liquidi stoccati, impurità, etc.).

A tale scopo ed in occasione delle fermate, vengono programmati controlli superficiali (liquidi penetranti a contrasto di colore o fluorescenti) e/o volumetrici (radiografici, UT).

Le saldature normalmente considerate sono quelle che riguardano la composizione dell'apparecchio e le sue connessioni ma vanno prese in esame anche altre saldature, cosiddette secondarie ed oggetto di questo studio, che accoppiano il recipiente vero e proprio ai suoi supporti, ovvero le colonne di sostegno del serbatoio ad esso direttamente saldate. Come si evince dalla Fig.1, i supporti sono cilindri cavi che vengono saldati ai fasciami di lamiera che compongono il serbatoio sferico prima che gli stessi vengano saldati tra loro.



Figura 1. Particolari costruttivi dei serbatoi sferici

Si è focalizzata l'attenzione su questo tipo di giunto che ha una geometria costruttiva particolare. Infatti, la saldatura è del tipo ad angolo che, in ragione degli spessori, è senza cianfrino o smussato a 45°. Questa particolarità costruttiva richiede la massima attenzione nella realizzazione della saldatura per evitare problematiche connesse ad una eventuale non completa penetrazione durante la prima passata. Questa eventualità è dovuta alla difficoltà ad operare in spazi esigui lungo la parte bassa della mezzeria inferiore del recipiente.

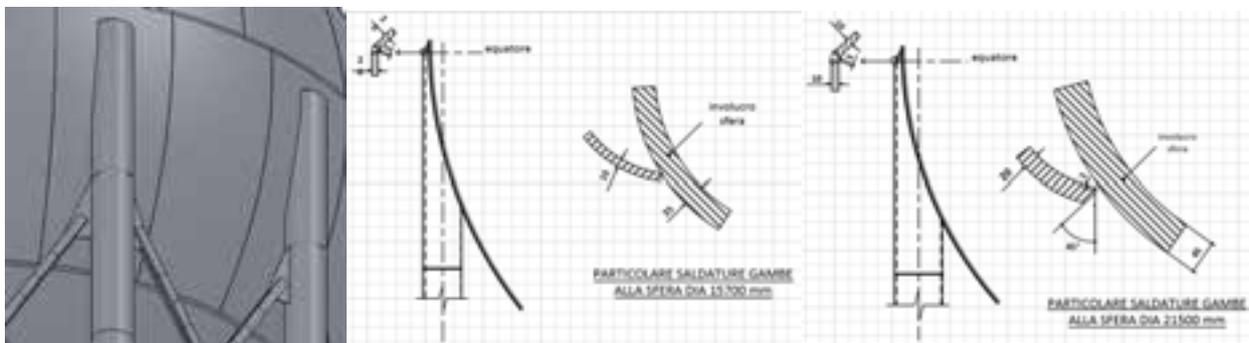


Figura 2. Particolare tipologico delle saldature di sostegno alla sfera (senza e con cianfrino, in ragione degli spessori in gioco)

2.1 Soluzioni ispettive

I controlli ispettivi del giunto in fase costruttiva sono quelli visivi, con liquidi penetranti e magnetoscopici; la geometria del giunto non consente rilievi attraverso gammagrafie od ultrasuoni. Le verifiche periodiche, però, in occasione delle fermate, possono non ricalcare quelli della fase costruttiva.

Lo stato conoscitivo sulla qualità dei giunti, che può essere effettuato su base statistica inizialmente sul 50% dei supporti, potrebbe essere ottenuto secondo le seguenti modalità:

- dall'esterno: a) taglio di un varco, giusto nella mezzeria della parte di tubo sagomato per combaciare con la sfera, b) ispezione interna del giunto, c) eventuale lavori, d) innesto e saldatura del tratto tagliato sul tubo;

- dall'interno mediante controllo ad ultrasuoni difettoscopico dell'ovale di lamiera del fasciame interessato alla saldatura con il tubo/supporto.

Questo tipo di ispezione nelle verifiche successive a quella di installazione e costruzione, rendono l'indagine più affidabile in quanto consentono di vedere ed analizzare lo stato delle suddette saldature anche dal lato della sfera. Pur essendo saldature secondarie, esse contribuiscono alla stabilità dell'apparecchiatura stessa e quindi all'affidabilità e alla sicurezza dell'impianto nel suo complesso.

3. Giunti filettati

Il d.m. 13.10.1994 [2] consente l'installazione di connessioni filettate sugli apparecchi a pressione sino ad un diametro di 2". In molti casi la connessione è costituita da un manicotto chiuso con un tappo. L'obiettivo della metodica ispettiva è quello di valutare lo stato dell'accoppiamento, ovvero:

- compatibilità di filettature
- numero di filetti impegnati
- condizione dei filetti ai fini della corrosione
- integrità del manicotto/tappo.

Normalmente queste verifiche sono possibili solo in occasione del fuori esercizio del recipiente, attraverso il disaccoppiamento del giunto.

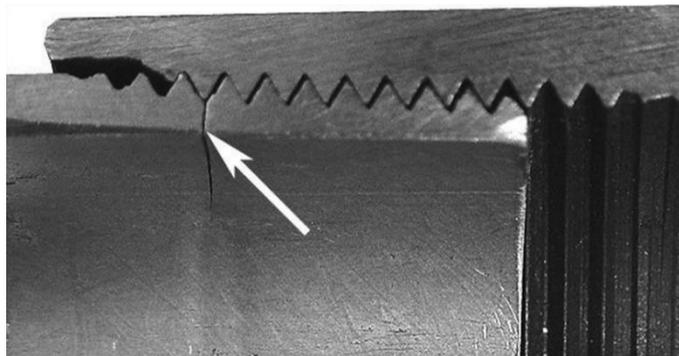


Figura 3. Esempio di possibile danno alla filettatura

3.1 Prove non distruttive su giunti filettati: controllo radiografico a raggi X

Una metodologia alternativa, già sperimentata con successo su batterie di serbatoi orizzontali di GPL in una raffineria, ha consentito di ottenere le risposte ai dubbi suindicati. Tutte le connessioni sono state radiografate, ed il risultato ha consentito di pianificare gli interventi correttivi con le giuste priorità.

I metodi radiologici (X e gamma) sono i più comunemente utilizzati per la rilevazione dei difetti interni poiché presentano il vantaggio di produrre un'immagine oggettiva, spesso ad alta risoluzione dell'interno dell'oggetto in esame.

Questo tipo di indagine, presuppone che venga effettuata da personale specializzato (professionalmente esposto¹) per eliminare i rischi legati alle radiazioni ionizzanti.

Si riportano di seguito le immagini radiografiche di accoppiamenti filettati rilevati su elementi di campo (i primi 2) e su campioni predisposti ad hoc (i successivi 5). Le immagini radiografiche in campo sono state rilevate su impianti contenenti prodotti potenzialmente pericolosi per le alte pressioni di esercizio:

¹ Art.82 e 96 del D.lgs. 230/95 come modificato dal D.lgs. 241/00 e dei relativi allegati III e IV

1. Esame radiografico (Fig. 4) eseguito su una valvola in esercizio che presentava una perdita di gas dalla filettatura del gancio di supporto. L'immagine radiografica evidenzia un allentamento tra i filetti di accoppiamento, attraverso i quali è fuoriuscito gas. Inoltre, a destra dell'immagine, si evince un vuoto da materiale, dovuto presumibilmente a difetto di fusione.



Figura 4. Valvola in esercizio con perdita di gas dalla filettatura del gancio di supporto e vuoto per difetto di fusione

2. Esame radiografico (Fig. 5) di inserto filettato con strumentazione su tubazione di gas. L'immagine radiografica mostra i due giunti filettati relativi al manicotto di collegamento. Essa evidenzia il corretto numero e la buona qualità dei filetti impegnati. Da notare anche la qualità dell'immagine nel mostrare elementi interni relativi allo strumento e la continuità di tutti gli spessori delle parti collegate.

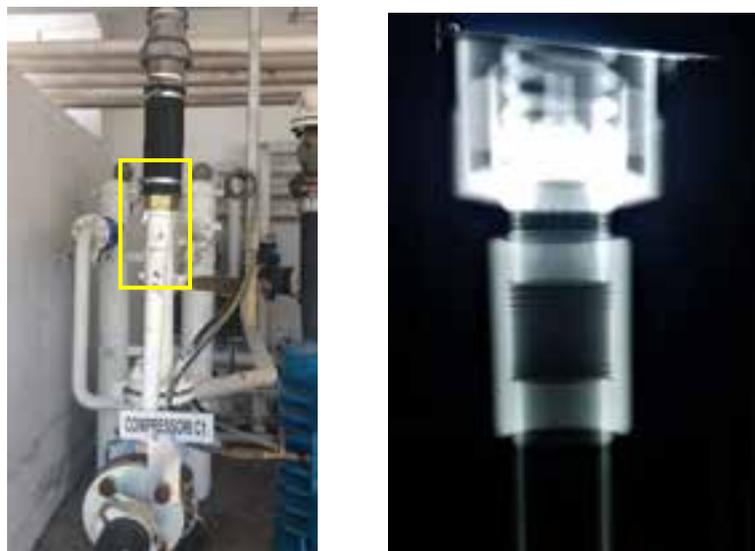


Figura 5. Inserto filettato con strumentazione su tubazione di gas

Inoltre, si riportano le immagini radiografiche ottenute su cinque elementi scelti in quanto dimostrativi delle varie tipologie di connessioni filettate, sono relative agli elementi riportati nella figura 6.



Figura 6. Campioni di riferimento di varie tipologie di accoppiamenti filettati.

L'immagine radiografica dell'assemblaggio filettato del 1° campione (tubo-gomito-tubo da 1½"), ripresa prima della pulizia del tubo, evidenzia un assottigliamento dello stesso in prossimità del giunto filettato e la conseguente formazione di strati di ossido squamati.

L'immagine radiografica (Fig. 8) è incentrata sulla filettatura lato tubo assottigliato, dopo asportazione degli ossidi. Sono evidenziati i filetti impegnati nell'accoppiamento, peraltro molto netti: non mostrano laschi e sono di numero insufficiente (risultano di un filetto inferiore alla norma).

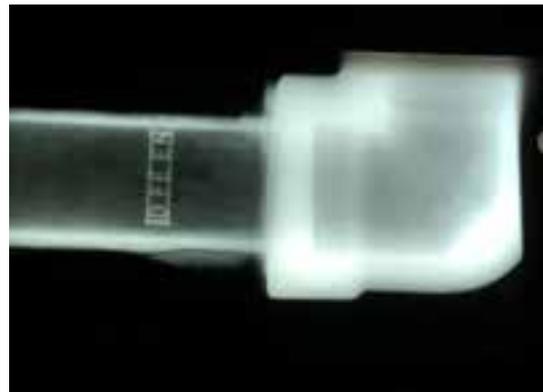


Figura 7. Campione 1: assemblaggio filettato tubo-gomito-tubo da 1½"



Figura 8. Campione 1: immagine radiografica della filettatura dopo pulizia

Nell'immagine radiografica del 2° campione (*gomito-tubo da ¾"*) è ben visibile la filettatura impegnata tra gomito e tubo. Il tubo utilizzato per l'accoppiamento risulta molto sottile di origine.



Figura 9. Campione 2: assemblaggio filettato *gomito-tubo* da $\frac{3}{4}$ "

Nell'immagine radiografica dell'assemblaggio di Fig.10 (*tubo-manicotto-tubo* da $\frac{1}{2}$ ") relativa al campione 3, i filetti impegnati, in numero corretto, evidenziano un leggero lasco, probabilmente colmato dalla guarnitura poiché non dava luogo a perdite.

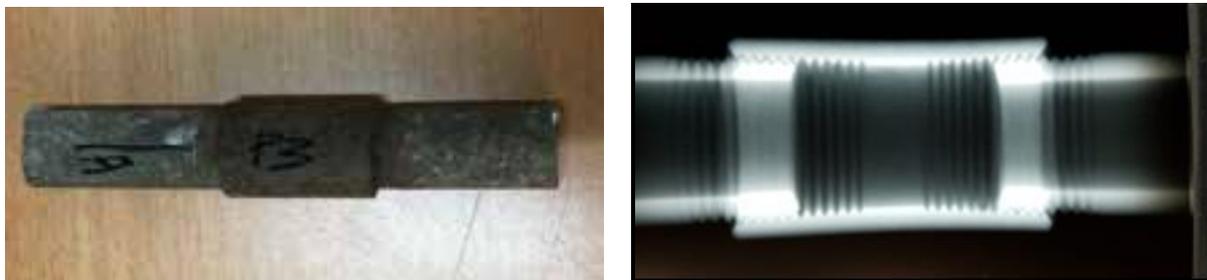


Figura 10. Campione 3: assemblaggio *tubo-manicotto-tubo* da $\frac{1}{2}$ "

L'immagine radiografica, relativa all'accoppiamento *mezzo manicotto-nipple-tee* da $\frac{1}{2}$ " (Fig.11), campione 4, evidenzia i due giunti, l'uno saldato e l'altro filettato. La saldatura non è fusa alla base (evidenziata), mentre l'accoppiamento filettato è ben chiaro e corretto.



Figura 11. Campione 4: assemblaggio flangia con *mezzo manicotto-nipple-tee* da $\frac{1}{2}$ "

Infine, l'assemblaggio di Fig.12 (*nipple-manicotto* da $\frac{3}{4}$ "), campione 5, è stato scelto per evidenziare radiograficamente un accoppiamento tra filettature di differente tipologia (conica del manicotto e cilindrica del *nipple*). L'immagine, infatti, mostra che solo due filetti sono impegnati nel giunto e che gli stessi non sono combacianti.

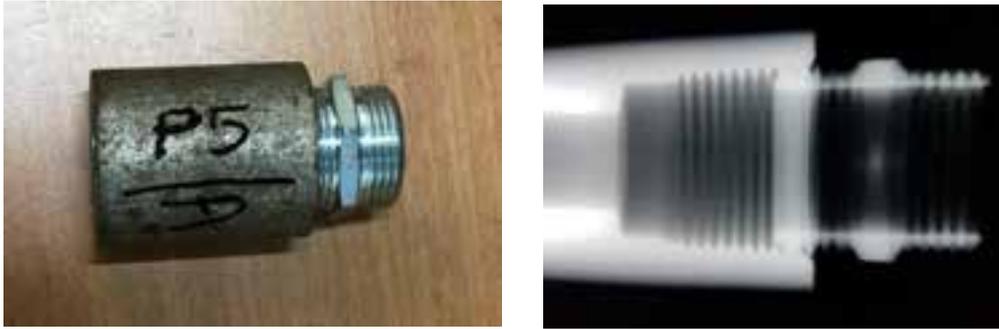


Figura 12. Campione 5: assemblaggio *nipple-manicotto* da $\frac{3}{4}$ "

4. Conclusioni

Dalle analisi effettuate nel presente lavoro emerge l'importanza di ispezionare un impianto e/o un'apparecchiatura in tutte le sue parti, in quanto l'affidabilità dell'insieme è garantita dall'integrità di tutti i componenti che la compongono. In particolare, l'attenzione è stata posta sulle saldature secondarie come quelle che collegano i supporti dei serbatoi sferici alle lamiere degli stessi, mettendo in evidenza la necessità di un metodo di controllo delle saldature, nelle ispezioni periodiche, alternativo a quelli comunemente utilizzati in fase di costruzione per verificarne lo stato di integrità. Altrettanta attenzione è stata posta ai giunti filettati, altro particolare critico ai fini della sicurezza, per cui si rende necessario un metodo di controllo di tipo non distruttivo che consenta, anche in esercizio, di verificare lo stato di integrità dei filetti e della bontà dell'accoppiamento stesso. Dalle indagini radiografiche condotte su diverse tipologie di accoppiamenti filettati si evince che l'esame radiografico risulta essere efficace a tale scopo fornendo immagini nitide dello stato degli stessi.

5. Bibliografia

- [1] d.m. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
- [2] d.m. 13.10.1994 - Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg.

Gestione in sicurezza dei depositi di fitofarmaci rientranti nel d.lgs. 105/15

F. Di Rocco¹, V. Nastasi², A. Iseppi³, D. Di Fonzo², M. Carcereri³, A. Muratore⁴

¹ Inail - Uot di Verona

² Inail - Uot di Palermo

³ Arpa Veneto - Verona

⁴ Inail - Uot di Piacenza

Sommario

Su tutto il territorio nazionale sono ubicate numerose attività di deposito destinate all'immagazzinamento ed alla movimentazione di fitofarmaci per l'agricoltura (insetticidi, erbicidi e fungicidi), un buon numero rientrano nel campo di applicazione del d.lgs. 105/2015 (Direttiva Seveso 2012/18/UE.) per tipo e/o quantità di sostanze pericolose presenti.

I prodotti chimici sono già confezionati ed imballati, senza necessità di alcuna operazione o manipolazione che richieda l'esposizione del personale a sostanze pericolose, ma durante le operazioni ordinarie si possono verificare danneggiamenti delle confezioni o inneschi di incendio che possono comportare dei rischi di incidenti rilevanti (rilascio di prodotti tossici in atmosfera, esplosioni, ecc.).

Nell'ambito delle verifiche sui SGS sono state affrontate diverse verifiche in sequenza di depositi di fitofarmaci, questo ha facilitato il confronto di soluzioni diverse a problemi uguali analizzando i relativi vantaggi e svantaggi che le soluzioni hanno determinato nelle aziende, così come verrà evidenziato nei casi studio del presente lavoro.

1. Introduzione

La presenza nel nostro territorio nazionale di diverse attività di deposito di fitofarmaci per l'agricoltura rientranti nel campo di applicazione del d.lgs. 105/2015 (Direttiva Seveso III, 2012/18/UE) nel tempo ha portato ad attenzionare la sicurezza in modo più completo considerando anche i rischi di incidenti rilevanti.

L'introduzione della Seveso III ha modificato notevolmente l'approccio della detenzione dei fitofarmaci, infatti, a seguito dell'applicazione del d.lgs. 105/2015, la riclassificazione dei fitofarmaci (secondo il nuovo CLP) ha modificato le soglie di stoccaggio così da fare passare alcune aziende da soglia superiore a soglia inferiore.

Le frasi di rischio presenti sui prodotti sono un monito chiaro sulle conseguenze che la cattiva gestione di tali potrebbe determinare, ad esempio il trasporto verso centri abitati di prodotti tossici per le persone attraverso i fumi di un incendio (H300, H310, H330 di Cat. 1 e 2, o Cat. 3 inalatoria), oppure il versamento su terreno coltivato di prodotti tossici (H400, H410 oppure H411) pertanto occorre prevedere la presenza di una serie di misure generali di tutela oramai imprescindibili e nel contempo la presenza di un sistema gestionale.

Per quanto sopra detto deve essere riposta molta cura sia nelle attività ordinarie che in quelle emergenziali, nelle infrastrutture e negli impianti.

Alla luce delle esperienze maturate da diverse verifiche, a seguire, si confronteranno realtà e soluzioni differenti, indicando sinteticamente con 1 e 2 l'azienda 1 e l'azienda 2; si utilizzeranno le esperienze acquisite da queste per suggerire le soluzioni auspicabili anche in funzione delle esperienze operative di ciascuna.

2. Depositi di agrofarmaci – casi studio

Come accennato nell'introduzione, per quanto generalmente non ci siano contatti con prodotti aperti ordinariamente, gli incidenti che coinvolgono prodotti pericolosi possono arrecare danni estesi a cose, persone e ambiente, per questo i depositi devono essere concepiti in modo tale da minimizzare la possibilità che un incidente interno determini danni all'esterno dell'edificio.

Per quanto infatti da un lato i corsi obbligatori e facoltativi, le esercitazioni e tutte quelle periodiche attività che vengono svolte dal personale servono a mantenere alta l'attenzione e la reattività del personale, dall'altro sono sempre possibili scenari incidentali di difficile previsione, per questo da un lato l'analisi dell'esperienza operativa è necessaria per migliorare la consapevolezza dei possibili scenari incidentali e soprattutto delle possibili cause, dall'altro una struttura ben congeniata con ottimali sistemi d'emergenza può comunque intervenire eliminando gli effetti dell'incidente una volta manifestatosi.

Per una valutazione completa dei depositi è opportuno valutare quindi:

- I. Stabilimento
- II. Sistemi d'emergenza
- III. Attività ordinarie
- IV. Attività straordinarie

2.1. Stabilimenti di agrofarmaci

I casi studio proposti hanno diversi volumi d'affari e diverse strutture, in figura 1 e tabella 1 l'azienda 1, planimetria e divisione locale, mentre in figura 2 tabella 2 la 2.



Figura 1. Azienda 1 - Planimetria

Blocco	Aree	Posti pallets	mq	Descrizione
1	A	70	270	Deposito di prodotti vari (no agrofarmaci) come mobili
	B	200	295	Deposito di agrofarmaci E1-E2-H1-H2-P5c-P8
	C	1200	895	
2	D	800	720	Deposito di agrofarmaci E1: H400 o H410 e E2: H411 altri prodotti ad eccezione dei prodotti a base di zolfo
	E	400	300	Deposito di sementi di mais ed altri cereali ed anche di agrofarmaci E1-E2
	F	500	720	Area dedicata al picking
	G	480	480	Area dedicata ai pallet da spedire
		3650	3680	

Tabella 1. Azienda 1 - Descrizione e divisione delle aree

Lo stabilimento dell'azienda 1 (fig.1) si articola in 2 blocchi:

- 1 è quello originario, tutti i muri tra le aree sono tagliafuoco
 A non comunicante con le altre aree
 B e C comunicanti con porta tagliafuoco
- 2 è quello più recente, tutte le pareti sono REI 180
 D ed E comunicanti con porta taglia fuoco
 F e G comunicanti con porta taglia fuoco

Aree	Posti pallets	Quantità (tons)	mq	Descrizione
1	2000	1400	1500	Depositi di agrofarmaci E1-E2-H1-H2-P5c-P8
2	1400	900		
3	900	600	980	Deposito di agrofarmaci, fra cui anche quelli E1-E2-H1-H2-P5c-P8
4	900	600		
5	800	500	1000	Deposito di agrofarmaci, generalmente tipi E1-E2-H1-H2-P5c-P8
6	1200	800	1500	Deposito di agrofarmaci E1-E2
7	1800	1300		
9	700	500	600	Deposito di agrofarmaci E1-E2 Prodotti chimici e aerosol <infiammabili> (P3a), gas infiammabili di categoria 1 o 2 o liquidi infiammabili di categoria 1, max 65 t .
tot	9700	6600	5580	

Tabella 2. Azienda 2 - Descrizione e divisione delle aree

2.2. Sistemi d'emergenza

Entrambe le aziende sono dotate di sistema di spegnimento d'incendio tramite estintori portatili e carrellati ma soprattutto con schiuma espansa in caso di incendio generalizzato su una area del deposito.

Il sistema di generazione della schiuma è generalmente costituito da:

- Una vasca d'acqua interrata (i gestori sanno di dover movimentare le pompe in caso di temperature sotto lo zero per evitare la solidificazione dell'acqua)
- Una pompa d'aspirazione
- Un serbatoio e premescolatore (figura 3)
- Sistema versatori (figura 4)



Figura 3. Impianto schiumogeno



Figura 4. Versatore

A valle di quanto accennato il contenimento della schiuma è stato realizzato in modi differenti dalle aziende:

1. Delle paratoie (figura 5) si alzano da terra e contengono la schiuma (o il prodotto versato) internamente al deposito così che non entri nel sistema fognario urbano, in ogni caso si sezionano tutti i collegamenti alla rete fognaria



Figura 5. Azienda 1 - Contenimento di versamenti e schiuma - paratie a scomparsa

2. L'inclinazione del pavimento interno (figura 6) che facilita il deflusso della schiuma o del versamento e lo raccoglie in un bacino di contenimento interno



Figura 6. Azienda 2 - Contenimento di versamenti e schiuma – inclinazione pavimento

Si è notato che entrambe le aziende:

- Non avevano avanzato la richiesta di verifica o denuncia di messa in servizio all'Inail per il serbatoio schiumogeno,
- Non avevano eseguito una prova reale di funzionamento di spegnimento a schiuma perché la maggior parte degli imballi, una volta attivato l'impianto risente negativamente della presenza della schiuma

Riguardo il primo punto, eliminare qualsiasi controllo su un serbatoio in pressione che rappresenta il fulcro dell'impianto antincendio non può essere ammesso: il gestore/utilizzatore essendo il responsabile della politica generale di sicurezza per la suddetta attrezzatura a pressione, ed il destinatario di quanto previsto all'art. 71, comma 8 del D. lgs. 81/08, ha l'onere, di valutare il permanere delle condizioni di prevenzione e sicurezza relative al corretto utilizzo dell'impianto stesso, inoltre è tenuto, visto l'allegato 3 punto B comma iii) della direttiva Seveso III, a valutare il buon funzionamento e lo stato di invecchiamento delle attrezzature installate; nello specifico trattasi di attrezzatura fondamentale ai fini del funzionamento del sistema di estinzione dell'incendio.

Riguardo al secondo punto, è stato chiesto alle aziende di realizzare uno stacco flangiato sulla tubazione di mandata, con valvola di chiusura a valle dello stesso (in posizione normalmente aperta), al quale connettere un versatore portatile per verificare l'effettiva produzione di schiuma

Il deposito dei DPI è invece molto diversificato nelle due aziende:

1. All'interno di un armadietto (figura 7) nell'area F del blocco 2, quindi la posizione potrebbe sembrare particolarmente decentrata ma, in effetti, le attività di picking si effettuano soprattutto in quell'area, per cui è più probabile che i DPI vengano utilizzati per un versamento in quell'area

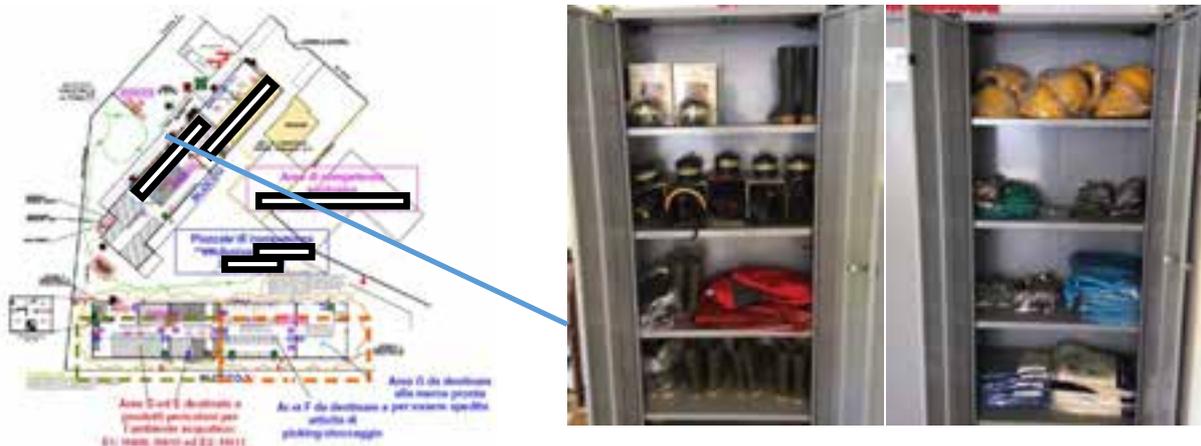


Figura 7. Azienda 1 - Posizionamento DPI

2. All'interno di un armadietto (figura 8) in una sala esterna al magazzino, appena fuori l'ingresso dall'esterno in area 4, la posizione risulta centrata.



Figura 8. Azienda 2 - Posizionamento DPI

2.3. Attività ordinarie

Assodato che entrambe le aziende tengano molto alla formazione costante dei loro dipendenti, magazzinieri e autisti, e che per questo dedichino risorse preziose, il loro approccio nelle attività ordinaria di magazzino è molto diverso:

1. Avendo la necessità di impilare bancali anche per terra o su altri bancali si ha

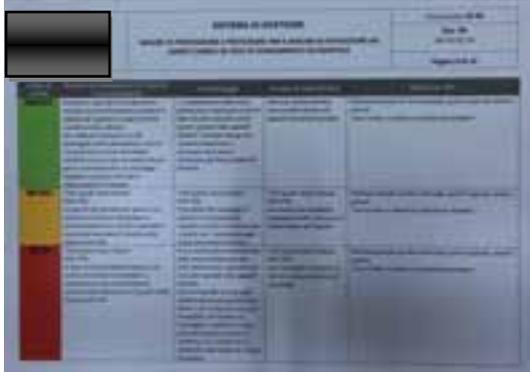


Figura 9. Azienda 1 – Tabellone informazioni posizionamento bancali

- i. Ingresso automezzo
- ii. Verifica integrità dei bancali sull'automezzo
- iii. Scarico bancali integri
- iv. Verifica delle frasi di rischio sul tabellone (figura 9) per il posizionamento
- v. Impilamento su altri bancali (fino a 3,5 metri di altezza) o su scaffalatura

2. Essendo strutturato un forte sistema gestionale è possibile la sequenza



- i. Ingresso automezzo
- ii. Verifica integrità dei bancali sull'automezzo
- iii. Scarico bancali
- iv. Posizionamento bancali integri dove permesso dal sistema gestionale (figura 10) mentre se non integri scaricati nell'area appositamente dedicata
- v. Impilamento su scaffalatura
- vi. Comunicazione al fornitore della non conformità

Figura 10. Azienda 2 – Muletto con tablet collegato al server per assegnazione della posizione dei bancali

Come già accennato contatto e inalazione di prodotti tossici vengono trattati da procedure emergenziali ed evitati attraverso sistemi di sicurezza e gestionali.

L'esperienza operativa ha evidenziato diversi piccoli incidenti sintetizzati nel grafico 1.

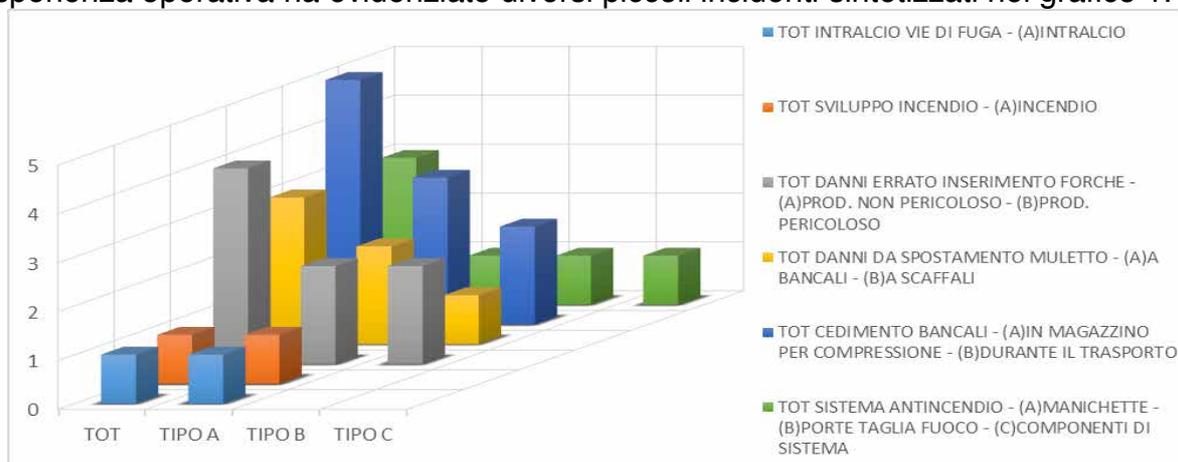


Grafico 1. Esperienza operativa complessiva

2.4. Attività straordinarie

- Durante la simulazione di incidente generalizzato entrambe le aziende si sono comportate in modo adeguato, è risultata più rapida ed efficace l'azienda 1, la differenza tra le due sta nella divisione dei ruoli:
 1. Ogni dipendente viene formato per fare ogni cosa, il responsabile dell'emergenza decide i ruoli poco prima di impartire gli ordini
 2. Ogni dipendente ha ruoli fissi
- Riguardo il sezionamento del capannone dalla rete fognaria
 1. L'incaricato seziona tutti gli accessi del deposito alla rete fognaria
 2. L'incaricato seziona solo gli accessi del deposito interessati

3. Indicazioni da dare in funzione dell'esperienza

Visionato quanto sopra esposto gli scriventi hanno estratto le buone idee e buone prassi da entrambe da usare come suggerimenti per aziende del settore.

3.1. Stabilimenti di agrofarmaci

- ✓ Per il rischio da sisma è necessario che lo stabilimento sia antisismico e così anche gli scaffali per l'impilaggio dei prodotti.
- ✓ La compartimentazione delle aree di stoccaggio (ogni area di compartimentazione non più di 1000/1500 mq) dovrebbe essere con pareti REI 180/240 (figura 11).
- ✓ In presenza di Aerosol e di Liquidi Infiammabili, si prevede uno stoccaggio separato in aree distinte, anche adiacenti ma fra loro compartimentate REI 240, frazionando ulteriormente i compartimenti; il comparto dei prodotti Aerosol dovrebbe essere ubicato in un angolo del deposito in modo da poter contare su almeno due pareti attestanti verso spazio a cielo libero per ricavare su entrambe le superficie permanenti una aerazione naturale (aperture in alto ed in basso delle due pareti).
- ✓ Per il rischio di vandalismo o furto a fine di lucro o altro è necessario che la zona di sosta dei mezzi debba essere quanto meno videosorvegliata, meglio se allarmata.
- ✓ Un'area a sé stante dovrebbe essere dedicata al picking per evitare di intralciare zone di passaggio o peggio di fuga.

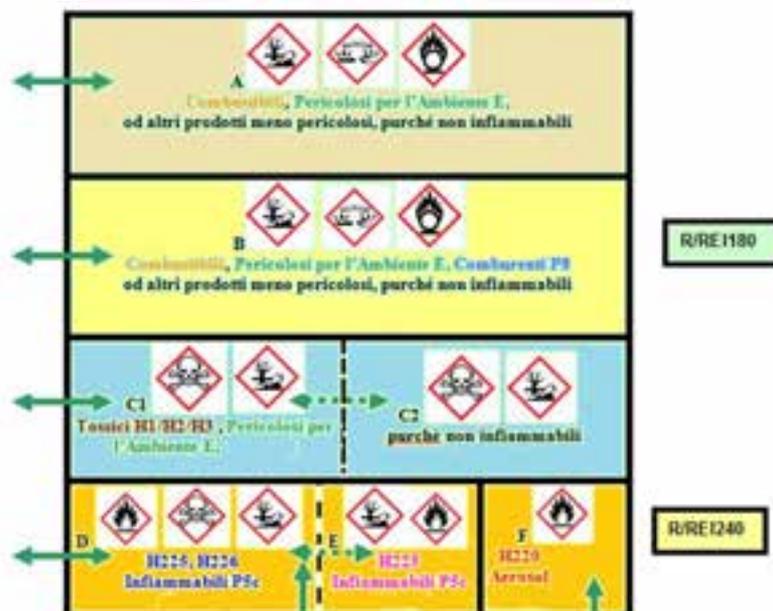


Figura 11. Compartimentazioni

3.2. Sistemi d'emergenza

- ✓ Le linee di distribuzione della schiuma dovrebbero essere separate per ogni area di

deposito, dotate di una valvola elettropneumatica di attuazione, comandata in dal sistema di rilevazione di incendi allarmato da 2 rilevatori di fumo prossimi tra loro.

- ✓ Sia i sensori che le elettrovalvole che l'impianto di stoccaggio e generazione della schiuma devono essere periodicamente controllati e mantenuti.
- ✓ Deve essere possibile verificare la schiumatura periodicamente
- ✓ Oltre agli impianti fissi antincendio ogni area di deposito deve essere attrezzata con estintori manuali e carrellati equidistanti e a breve distanza tra loro.
- ✓ Le uscite d'emergenza dovrebbero essere equi distribuite
- ✓ Il deposito DPI deve essere centrato rispetto al magazzino, l'esperienza operativa evidenzia danneggiamenti e versamenti in prossimità della scaffalatura.

3.3. Attività ordinarie

- ✓ Un forte sistema gestionale (come quello dell'azienda 2) risulta vantaggioso nella conoscenza del magazzino e nel suo riempimento per diversi motivi:
 - La possibilità del magazziniere di avere informazioni su un prodotto semplicemente sparando la pistola a infrarossi sul codice a barre
 - L'assegnazione della posizione di un bancale con la procedura immediata prima descritta e l'impossibilità di inserire una posizione differente rispetto all'assegnata
 - La facilità di redigere un'esperienza operativa o contestare dei prodotti al fornitore
- ✓ I bancali non integri dovrebbero essere lasciati sul tir in ingresso al deposito o depositati in area dedicata creando una non conformità per il fornitore.
- ✓ L'intero deposito dovrebbe essere attrezzato con degli scaffali per evitare eccessivi carichi sui bancali inferiori che si avrebbe con il classico impilamento, e minimizzare le probabilità di urto tra muletto e bancali.

3.4. Attività straordinarie

- ✓ Tutti i dipendenti dovrebbero saper ricoprire più ruoli in caso d'emergenza.
- ✓ In caso d'emergenza è preferibile sezionare tutti gli accessi alla rete fognaria

4. Conclusione

La politica dell'azienda 1 responsabilizza di più gli operatori gravandoli di maggiori conoscenze e decisioni, sono più accorti normalmente ma meno lucidi sotto stress.

La politica dell'azienda 2 affronta a monte i problemi con software dedicati, gli operatori sono normalmente meno accorti ma in fase di stress devono solo agire e non pensare.

La prova d'emergenza ha evidenziato l'azienda 1 come più rapida ma meno efficace. Alcune soluzioni prese dalle aziende sono state rivalutate alla luce dell'esperienza operativa, versamenti, piccoli incendi e danneggiamenti in generale avvengono durante carico e scarico dagli scaffali, non nel picking come alcuni pensano, ciò comporta una revisione dell'impianto d'emergenza e della posizione dei DPI.

5. Bibliografia

[1] d.lgs 26/6/2015, n 105 – “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose”

[2] d.m. 329/04 – “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93”

[3] d.lgs. 81/08 – “Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro”

[4] Nastasi, V., (2017) – “Manuale Sicurezza Lavoro”, Editore Editoria Tecnica-Grafill

Analisi di casi di esplosioni anomale in impianti antincendio a pressione con bombole di gas estinguente inerte. Criticità nella progettazione e nella manutenzione

C. Piccolo¹, D. Del Gaizo¹, R. Di Leo¹, G. Selvestrini¹, M.M. La Veglia²

¹ Inail - Uot di Avellino

² Direzione Regionale Vigili del Fuoco Campania

Sommario

Vengono illustrati diversi eventi di malfunzionamento di impianti di spegnimento ad estinguente gassoso, accaduti in Italia.

Nello caso studio viene approfondito l'accadimento verificatosi in un archivio storico, in cui si ebbero gli effetti di una vera e propria esplosione, avvenuta senza che vi fosse un incendio, o la presenza di materiale infiammabile.

Con riferimento anche alla normativa attuale UNI EN 15004-1, per questo caso studio vengono analizzati i requisiti e le raccomandazioni per la progettazione, l'installazione, il collaudo e la manutenzione al fine di evidenziare la sicurezza globale di sistemi antincendio a gas estinguenti in edifici, impianti o altre strutture.

Si evidenzia pertanto, un pericolo sussistente in tali impianti, pur trattandosi di bombole di gas né infiammabile né tossico, ma di gas come azoto o argon normalmente presenti nell'atmosfera che respiriamo.

Vengono descritti infine gli apprestamenti tecnici successivamente adottati in questo specifico caso e i criteri progettuali utili per prevenire incidenti simili.



Figura 1. Effetti di una esplosione coinvolgente gas inerte

1. Introduzione

Lo studio si propone di analizzare i rischi connessi agli incrementi di pressione durante la scarica dell'estinguente all'interno di un volume protetto da un sistema di spegnimento a gas inerti. Tale evenienza si riscontra in varie tipologie di sistemi antincendio.

I riferimenti normativi sono:

- UNI EN 15004 (capitolo 7.4.1) per sistemi a gas inerti (azoto, argon e miscele) e halocarbon (HFC 227ea, HFC 125 e HFC23);
- NFPA 12 (capitolo 5.6) per sistemi a CO₂;
- UNI ISO 15779 (capitolo 7.2.4) per sistemi ad aerosol condensato.

2. Gli eventi

La sovrappressione generata da un impianto di spegnimento a gas inerte è un evento tutt'altro che raro. Ad esso si affiancano eventi derivati da sovrappressioni all'interno delle bombole stesse. Si tratta di accadimenti abbastanza "inattesi", e pertanto essi creano conseguenze disastrose per i lavoratori e gli occupanti, soprattutto pensando che tali incidenti sono causati da un impianto destinato a proteggere il luogo di lavoro.

L'analisi comparata di decine di casi citati nei report specializzati o nelle cronache quotidiane ha permesso di ricercare cause e fenomeni comuni.

Per uniformità di linguaggio si parlerà propriamente di "esplosione", intendendo come tale il rilascio di energia meccanica derivante dall'espansione rapida di un gas in un ambiente chiuso. In questa tipologia di evento, l'esplosione non prende origine da meccanismi di deflagrazione di gas o vapori di liquidi infiammabili, ma determina effetti analoghi.

Verrà invece utilizzato il termine "scoppio" per il collasso strutturale di un recipiente di gas compresso a seguito dell'abnorme aumento di pressione del gas stesso. Anche in questo caso il gas contenuto non è necessariamente un gas infiammabile.



Figura 2. Pacco bombole di un impianto di spegnimento nella sua configurazione "normale"

Si riportano le note di cronaca relative a casi accaduti in Italia negli ultimi anni. Per essi si elencano solo le date, i luoghi e gli elementi essenziali, omettendo nominativi di Aziende o persone coinvolte.

09/05/2017 GENOVA. Forte esplosione all'interno di una ditta che si occupa servizi antincendio navali. A scoppiare è stata una bombola di gas inerte, che ha colpito uno degli addetti dell'azienda. L'uomo, subito soccorso dai medici del 118, ha riportato diverse ferite, ma non è in pericolo di vita.

21/06/2017 TRIESTE. I vigili del fuoco sono intervenuti a causa di un'esplosione in un magazzino di ricambi in un'area attigua alla stazione ferroviaria centrale di Trieste, per uno scoppio avvenuto all'interno del locale in questione. Giunta sul posto, la squadra dei VVF ha potuto constatare che la causa scatenante era da addurre ad una grossa bombola di gas inerte collassata per cause ancora da accertare. Non si sono registrate persone ferite.

04/08/2013 TORINO (TO). Al Museo di Scienze Naturali scoppia una bombola di gas del sistema antincendio, un mix di azoto, argon e anidride carbonica che ha danneggiato il piano terreno e le sale tecniche del seminterrato.

11/07/2013 CHIUPPANO (VI). In una azienda tessile una bombola di azoto e argon per uso antincendio schizza come un proiettile, sfonda due pareti, percorre 25 metri seminando terrore e si schianta contro un muro di cemento armato. Poteva essere una tragedia, invece il destino è stato benevolo e alla fine si sono contati tre feriti lievi.

Giorno Imprecisato, 2013, FAENZA. Due operai della ditta costruttrice, impegnati nella realizzazione dell'impianto antincendio in un ufficio pubblico, sono rimasti feriti in seguito allo scoppio di una bombola contenente una miscela di azoto e argon. Uno dei due operai versa in prognosi riservata.

04/05/2013, POGLIANO MILANESE (MI). Per un malfunzionamento un sistema antincendio con azoto è esploso distruggendo una parete interna del capannone, il tetto e mandando in frantumi alcuni vetri. Travolti dallo spostamento d'aria anche i due operai e il manager aziendale.

27/08/2011, OSPEDALETTO (MI). Presso una Ditta che produce caldaie e impianti idraulici, una bombola di azoto per uso antincendio scoppia e travolge due operai: uno è colpito alla gamba; l'altro riceve botte in tutto il corpo che gli provocano fratture multiple.

26/03/2010, POGLIANO MILANESE (MI). Una bombola di gas inerte per uso antincendio è scoppiata colpendo un operaio al torace. L'esplosione ha scoperchiato il tetto del fabbricato e la bombola da cento chili di peso ha centrato una cascina a 200 metri di distanza.

11/04/2008, SESTRI PONENTE (GE). Una bombola di gas argon utilizzata per lo spegnimento degli incendi in ambienti chiusi, è scoppiata all'interno del perimetro di una Ditta di componenti elettronici. Sul posto i vigili del fuoco hanno accertato che nei pressi del deposito di varie bombole di "Argonfire" stavano lavorando alcuni elettricisti intenti a un allacciamento.

06/01/2004, VARESE (VA). Un boato ha squarciato la tranquillità della sede della Regione a Varese. L'esplosione, che non ha provocato danni alle cose, né il ferimento di nessun dipendente in quel momento all'interno dello stabile, è stato causato dallo scoppio di una

bombola di gas inerte per uso antincendio.



Figura 3. Effetti di una esplosione originata da impianto di spegnimento con gas inerte



Figura 4. Effetti di una esplosione originata da impianto di spegnimento con gas inerte

3. Il caso studio

L'approfondimento riguarda quanto avvenuto a Napoli in un archivio storico cartaceo di una primaria Azienda di Servizi a livello nazionale. Gli effetti sembravano quelli di un'esplosione, ma quanto accaduto fu causato proprio dalla scarica dell'impianto di spegnimento. Si trattava di un edificio su due piani, di circa 500 mq in pianta. Il volume lordo misurato dello spazio destinato ad archivio è pari a 600 mc.

L'archivio stesso era protetto da un impianto di spegnimento ad estinguente gassoso IG-01 (Argon). Esso era stato dimensionato nel rispetto delle norme UNI all'epoca vigenti (UNI 14520 e 10877), ovvero imponendo un congruo coefficiente di sovradimensionamento, e ciò indipendentemente dalla presenza di una considerevole volumetria in effetti occupata dagli armadi contenitori, e dal loro contenuto cartaceo, nell'ambiente.

Il sistema era costituito da una batterie di 25 bombole estruse per alta pressione, da lt. 140 con, complete di valvola di scarica rapida con manometro, comando a solenoide e pneumatico, per le bombole pilota, manichetta flessibile di scarica con valvola di non ritorno e serpentine pneumatiche per il collegamento delle bombole pilotate. Le bombole erano caricate con argon a pressione di lavoro di 300 bar e 20 °C.

Nel corso della notte due rivelatori del sistema di rivelazione incendio, appartenenti a due zone diverse dell'archivio sito al piano terra del fabbricato andavano contemporaneamente in allarme. L'agente estinguente mandava in saturazione l'ambiente e provocava lo sfondamento del portone di ingresso e il danneggiamento di alcuni controsoffitti: in pratica gli effetti di una vera e propria esplosione senza che vi fosse incendio o materiale infiammabile presente. Per una pura combinazione, nell'evento non veniva coinvolto l'addetto alla sorveglianza intervenuto ai primi segnali di (falso) allarme e il boato era udito anche dagli abitanti delle zone circostanti lo stabilimento, i quali allertavano i Vigili del Fuoco.

La ricostruzione dell'evento, di seguito riportata, fu effettuata da uno degli autori del presente lavoro sulla scorta di analisi tecnica e documentale.



Figura 5. Particolare degli ugelli di scarica del gas estinguente

Durante le ore notturne, due rivelatori del sistema di rivelazione incendio, appartenenti a due zone diverse dell'archivio sito al piano terra del fabbricato andarono contemporaneamente in allarme.

Secondo la corretta procedura automatica programmata nel sistema, tale contemporanea anomalia comportava l'azionamento dell'impianto di spegnimento automatico e la scarica delle bombole di gas inerte argon nell'ambiente stesso. Inoltre, nella fattispecie, nell'ambiente stesso, riempito di mobilio contenente il materiale cartaceo tipico di un archivio, si creava una sovrappressione che scardinava una delle porte di accesso.

Esistevano due ambienti distinti con due sistemi di comando scarica separati, ma per essi era però definita una unica zona ai fini della rivelazione incendi. In altri termini la programmazione del sistema (tarato sulla previsione di un ambiente unico) prevedeva che l'attivazione di due rivelatori in qualsiasi dei due ambienti avrebbe provocato la scarica in entrambi gli ambienti.

La scarica dell'agente estinguente provocò anche un parziale crollo di alcuni controsoffitti. Venne analizzato l'ambiente nel suo complesso, e si comprese quali delle inadempienze progettuali e realizzative fosse in nesso casuale con l'esplosione verificatasi.

La vera causa dell'esplosione fu la totale assenza di serrande di sovrappressione.



Figura 6. Il caso studio. Gli effetti dell'esplosione coinvolgente gas inerte.



Figura 7. Il caso studio. Gli effetti dell'esplosione coinvolgente gas inerte.

4. La normativa degli impianti di spegnimento a gas estinguente

L'efficacia di un impianto di spegnimento a gas, dipende essenzialmente dal mantenimento della concentrazione di agente estinguente all'interno del locale protetto in seguito alla scarica, lungo un periodo (secondo la normativa UNI EN 15004) di durata minima pari a 10 minuti. E' necessario pertanto una riduzione degli scambi della miscela aria-estinguente attraverso le superfici che separano il volume protetto dall'ambiente circostante. Bisogna dunque minimizzare le aperture nelle superfici che delimitano il volume e che permettono lo scambio di gas con l'ambiente esterno.

D'altra parte la riduzione delle aree di sfogo favorisce, all'interno del volume protetto, un aumento sconsiderato della pressione che si genera durante la scarica di agente estinguente.

Quindi, come nel caso illustrato, tale aumento potrebbe eccedere i limiti di resistenza strutturale di una o più superfici ad essa soggette, causando danni anche gravi all'edificio. Risulta quindi essenziale determinare il periodo probabile durante il quale sarà mantenuta la concentrazione di spegnimento all'interno del volume protetto. Tale periodo è noto come "tempo di permanenza", determinato o mediante la prova con ventilatore sulla porta dettagliatamente specificata nell'appendice E della norma citata, o una prova di scarica completa basata sui seguenti criteri:

- a) all'inizio del tempo di permanenza la concentrazione in tutto il volume deve essere pari alla concentrazione di progetto;
- b) alla fine del tempo di permanenza, la concentrazione dell'agente estinguente al 10%, 50% e 90% dell'altezza del volume deve essere non minore dell'85% della concentrazione di progetto;
- c) il tempo di permanenza non deve essere minore di 10 min.

Nella norma viene evidenziato come una sufficiente integrità strutturale del locale protetto, sia un requisito imprescindibile. Allo stesso modo la norma riporta che i calcoli sulla pressurizzazione e sui relativi dispositivi di sfogo devono costituire parte integrante della documentazione tecnica di lavoro.

Si evidenzia in questa sede come la norma non contenga criteri di calcolo utili ai fini della valutazione degli incrementi di pressione e della progettazione dei necessari dispositivi di sfogo.

5. Le serrande di sovrappressione

La mitigazione degli effetti della sovrappressione può essere realizzata a seconda dei casi, con un miglioramento della tenuta del locale nel caso in cui i tempi di permanenza previsti scendano sotto il valore minimo raccomandato (UNI EN 15004-Appendice E) oppure con un adeguamento del sistema di serrande calibrate nel caso in cui eventuali modifiche effettuate sul locale protetto facciano prevedere escursioni di pressione non ammissibili.

L'attenzione alle caratteristiche di tenuta del locale, unita alla conoscenza dei fenomeni di sovrappressione, rappresentano aspetti fondamentali di cui sia i progettisti che gli addetti alla manutenzione dei sistemi di spegnimento a gas devono tenere conto.

Questo approccio è necessario sia ai fini di garantire l'efficacia dell'impianto di spegnimento, sia nell'ottica della sicurezza per persone ed immobili.

Nel manuale di istruzione dell'impianto del caso studio esaminato, veniva evidenziato che "L'eventuale sovrappressione che può determinarsi dopo la scarica dell'estinguente viene infatti attenuata con l'utilizzo di una o più serrande di sovrappressione, in accordo con le Norme UNI 14520 ed ISO 14520 determinate dal calcolo computerizzato".

Si tratta di un dispositivo a funzionamento meccanico molto semplice, la cui assenza ha evidentemente messo in crisi un impianto tecnologicamente avanzato come quello descritto. La serranda limita di fatto la sovrappressione all'interno del locale protetto durante la scarica

di gas estinguente. E' composta da un telaio dove sono montate alcune alette con contrappeso. Durante la scarica di gas le alette si aprono e lasciano defluire all'esterno il gas in eccesso. Alla fine della scarica le alette tornano nella posizione di chiusura e ripristinano la tenuta del locale.

Le serrande sono dotate di molle pre-tarate, che consentono quindi l'evacuazione della sovrappressione in eccesso, trattenendo invece la pressione calcolata, per garantire la saturazione ambientale per almeno 10 minuti dopo la scarica.



Figura 8. Particolare di serranda di sovrappressione installata su una porta di esodo



Figura 9. Particolare di serranda di sovrappressione installata su una finestra

6. Considerazioni in materia di sicurezza e di formazione del personale

Nel caso studio analizzato fu necessaria, oltre all'adeguamento impiantistico, una revisione dell'intero Sistema di Gestione della Emergenza. Fu infatti riscontrato che gli addetti alla guardiania non avevano ricevuto una completa informazione circa gli impianti esistenti ed i relativi criteri di funzionamento, nonché un addestramento non pienamente adeguato, determinando una capacità non adatta a fronteggiare questa particolare situazione di emergenza.

In relazione pertanto a quanto esposto, nella valutazione del rischio e nella successiva informazione e formazione al personale è necessario prendere in considerazione qualunque eventuale pericolo generato dalla scarica di agenti estinguenti gassosi.

La scarica di un sistema può causare rumore sufficientemente alto da essere motivo di allarme, ma generalmente insufficiente da causare una lesione traumatica.

Una scarica ad alta velocità dagli ugelli potrebbe invece essere sufficiente a spostare oggetti consistenti direttamente sulla traiettoria e potrebbe causare una turbolenza generale nei volumi sufficiente a spostare carta e oggetti leggeri non fissati.

Il contatto diretto con agenti estinguenti liquefatti, scaricati da un sistema, ha forte effetto raffreddante sugli oggetti e potrebbe causare ustioni da congelamento sulla pelle.

Infatti la raccomandazione indicata dai produttori di gas estinguente è che si debba evitare l'esposizione non necessaria a tutti gli agenti estinguenti in parola.

Il tempo massimo di esposizione assunto dalle precauzioni di sicurezza nel presente documento è di 5 minuti.

Tempi di esposizione maggiori possono comportare effetti fisiologici o tossicologici.

Tali rischi vanno evidenziati nel percorso di formazione per addetti alla gestione delle emergenze e antincendio. Nell'ambito dell'illustrazione dei sistemi di spegnimento dovranno essere indicati i principi di funzionamento degli impianti, le modalità per la loro gestione e per poter operare e condurre gli stessi in modo adeguato, al fine di definire univoche procedure nel piano di emergenza interno.

7. Conclusioni

Il mantenimento della concentrazione di gas estinguente all'interno di un locale è fondamentale per l'efficacia di un sistema di spegnimento antincendio.

La normativa UNI EN 15004 da una parte indica un *hold time* di durata minima di 10 minuti, dall'altra non contiene criteri di calcolo utili ai fini della valutazione degli incrementi di pressione e della progettazione dei necessari dispositivi di sfiato.

Malgrado la norma europea di riferimento, non fornisca criteri di calcolo, i progettisti di impianti possono fare riferimento ai documenti tecnici emessi da enti accreditati che hanno approfondito questo aspetto, prime fra tutte FIA (Fire Industry Association, UK) e VdS (Vertrauen durch Sicherheit, Germania).

Dai casi analizzati nel presente studio si è visto come la sovrappressione degli impianti a gas estinguenti, ancorché inerti, possa costituire un rischio anche in presenza di un impianto progettato e realizzato secondo i canoni.

Inoltre risulta essere fondamentale formare in maniera adeguata gli addetti alla sicurezza sui luoghi di lavoro e del personale tecnico incaricato della manutenzione degli impianti.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'ing. Gianluca Indovino per la fondamentale collaborazione nella ricerca di immagini ed esempi di casi studio.

Bibliografia

- [1] Norma UNI EN 15004-1 - Installazioni fisse antincendio - Sistemi a estinguenti gassosi - Parte 1: Progettazione, installazione e manutenzione- ed. 2008
- [2] Norma UNI 11280 - Controllo iniziale e manutenzione dei sistemi di estinzione incendi ad estinguenti gassosi - ed. 2012
- [3] Fire Industry Association - Guidance on the pressure relief and post discharge venting of enclosures protected by gaseous fire fighting systems- ed. 2012
- [4] Norma NFPA 12 - Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems – ed. 2011
- [5] Norma UNI ISO 15779 - Installazioni fisse antincendio - Sistemi estinguenti ad aerosol condensato - Requisiti e metodi di prova per componenti e progettazione, installazione e manutenzione dei sistemi - Requisiti generali – ed. 2012

La Valutazione del Rischio ATEX conseguente all'utilizzo dell'etanolo nel ciclo di produzione dell'acido ialuronico. L'esperienza operativa della Altergon Srl di Morra De Sanctis (AV)

M. Pagliuca¹, C. Tola¹, R. Luciano², M. del Gaudio²

¹ Altergon Italia Srl Morra De Sanctis

² Inail - Uot di Avellino

Sommario

Altergon Italia è una casa farmaceutica controllata dal Gruppo Svizzero Altergon S.A. di Lugano che opera in Italia dal 2000, con stabilimenti e laboratori di R&D e di Controllo Qualità ubicati in alta Irpinia nell'area industriale di Morra de Sanctis (AV). E' specializzata nella produzione di farmaci nella forma di cerotti medicati e patch transdermici – Drug in Adhesive, formulazione e produzione di cerotti medicati Hydrogel, produzione biotecnologica di Acido Ialuronico Ultra Puro e per Uso Topico, Produzione di Medical Device.

L'Azienda opera su impianti ispezionati e autorizzati dalle principali Agenzie Farmaceutiche Governative: A.I.F.A. (Italia), USA F.D.A., Agenzia Russa, Saudi Arabia FDA ed altre, le quali regolarmente verificano l'applicazione in produzione dei rigidi criteri qualitativi dettati dalle Norme di Buona Fabbricazione (GMP). E' dotata anche, su base volontaria, di un sistema di gestione integrato Qualità, Ambiente e Sicurezza certificato da Ente terzo secondo le ISO 9001:2015, ISO 13485: 2012, ISO 14001:2015 e OHSAS 18001:2007.

Il ciclo produttivo dell'acido ialuronico biotecnologico prevede la riattivazione di una strain cellulare liofilizzata (linea cellulare batterica selezionata) da cui, per successive fasi di biofermentazione e purificazione e filtrazione, viene ottenuto il prodotto finito. Una delle fasi di lavorazione prevede l'utilizzo di etanolo e pertanto è necessario adottare le misure di prevenzione previste per gli ambienti in cui si possono creare atmosfere esplosive. Si intende per «atmosfera esplosiva» una miscela con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell'insieme della miscela incombusta. Il presente lavoro illustrerà brevemente il ciclo produttivo, illustrando la valutazione dei rischi effettuata dall'Azienda, le misure di prevenzione adottate ed i criteri che le hanno ispirate. Saranno inoltre descritte le attività di formazione ed informazione organizzate dall'azienda per i lavoratori che operano negli ambienti a rischio di esplosione.



Figura 1. Stabilimento Altergon Srl Morra De Sanctis (AV)

1. La normativa ATEX

La sicurezza nei luoghi di lavoro con pericolo di esplosione è regolamentata, a livello europeo, dalla direttiva 1999/92CE "ATEX Lavoro" (ATEX-ATmosphères EXplosibles).

La direttiva è stata recepita in Italia tramite il d.lgs. 233/03 e successivamente dal d.lgs. 9 aprile 2008 n.81 (titolo XI).

Alla precedente è correlata la Direttiva 2014/34/UE "ATEX Prodotti" recepita in Italia dal Decreto Legislativo 19 maggio 2016, n. 85.

La direttiva 1999/92/CE è relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive definite come: "miscele con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga all'insieme della miscela incombusta".

La direttiva 2014/34/UE è relativa alla regolamentazione di apparecchiature destinate all'impiego in zone a rischio di esplosione; la direttiva si rivolge ai costruttori di attrezzature destinate all'impiego in aree con atmosfere potenzialmente esplosive e si manifesta con l'obbligo di certificazione di questi prodotti; la direttiva 94/9/CE risulta da questa abrogata con effetto decorrente dal 20 aprile 2016;

Secondo quanto indicato nel titolo XI del d.lgs. 81/08 se dalla valutazione dei rischi, il datore di lavoro ravvisa l'esistenza del rischio di formazione di atmosfere esplosive dovrà tutelare i lavoratori, in particolare bisognerà prevenire l'accensione dell'atmosfera e attenuare gli effetti di una eventuale esplosione.

In particolare bisognerà tener conto:

- a) della probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
- b) della probabilità che le fonti di accensione, comprese le scariche elettrostatiche, siano presenti e divengano attive
- c) delle caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processi e loro possibili interazioni;
- d) dell'entità degli effetti prevedibili.

Secondo quanto indicato all'allegato XLIX le aree a rischio di esplosione sono ripartite in zone in base alla frequenza e alla durata della presenza di atmosfere esplosive e in base a tale classificazione vengono individuati i provvedimenti da adottare indicati nell'allegato L.

Le zone sono classificate in:

Zona 0 Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia.

Zona 1 Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva, consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapori o nebbia, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

Zona 2 Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.

Zona 20 Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.

Zona 21 Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

Zona 22 Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.

I lavoratori debbono essere sufficientemente formati e tutte le attività svolte nelle aree a rischio debbono essere autorizzate in forma scritta da un soggetto individuato dal datore di lavoro.

Tra le misure di prevenzione debbono essere previsti:

- ✓ Sistemi di allontanamento o deviazione di eventuali fughe o rimozione di polveri.
- ✓ Misure di protezione in grado di prevenire gli effetti di atmosfere esplosive che contengano più tipi di sostanze prevedendo gli effetti peggiori.
- ✓ Misure di eliminazione delle cariche elettrostatiche comprese quelle prodotte dal vestiario utilizzato.
- ✓ Utilizzo di impianti, attrezzature, sistemi di protezione e tutti i loro dispositivi di collegamento sono posti in servizio soltanto se dal documento sulla protezione contro le esplosioni risulta che possono essere utilizzati senza rischio in un'atmosfera esplosiva.
- ✓ Utilizzo di misure per ridurre gli effetti sanitari in caso di esplosione.
- ✓ Utilizzo di dispositivi ottici ed acustici per avvertire i lavoratori prima del superamento delle condizioni di sicurezza.

In tutte le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive sono impiegati apparecchi e sistemi di protezione conformi alle categorie di cui al decreto del Presidente della Repubblica 23 marzo 1998, n. 126.

In particolare, in tali aree sono impiegate le seguenti categorie di apparecchi, purché adatti, a seconda dei casi, a gas, vapori o nebbie e/o polveri:

- nella zona 0 o nella zona 20, apparecchi di categoria 1;
- nella zona 1 o nella zona 21, apparecchi di categoria 1 o di categoria 2;
- nella zona 2 o nella zona 22, apparecchi di categoria 1, 2 o 3.

Nell'assolvere gli obblighi stabiliti dall'articolo 290 il datore di lavoro provvede a elaborare e a tenere aggiornato un documento, denominato: «documento sulla protezione contro le esplosioni».

Il documento in particolare, deve precisare:

- a) che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- b) che saranno prese misure adeguate per raggiungere gli obiettivi del presente Titolo;
- c) quali sono i luoghi che sono stati classificati nelle zone di cui all'Allegato XLIX;
- d) quali sono i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime di cui all'Allegato L.
- e) che i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, sono concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- f) che, ai sensi del Titolo III, sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego sicuro di attrezzature di lavoro.

Il documento di cui al comma 1 deve essere compilato prima dell'inizio del lavoro ed essere riveduto qualora i luoghi di lavoro, le attrezzature o l'organizzazione del lavoro abbiano subito modifiche, ampliamenti o trasformazioni rilevanti.

Il documento di cui al comma 1 è parte integrante del documento di valutazione dei rischi di cui all'articolo 17, comma 1.

Nell'ambito degli obblighi di cui agli articoli 36 e 37, il datore di lavoro provvede affinché i lavoratori esposti al rischio di esplosione e i loro rappresentanti vengano informati e formati in relazione al risultato della valutazione dei rischi, con particolare riguardo:

- a) alle misure adottate in applicazione del presente titolo;
- b) alla classificazione delle zone;
- c) alle modalità operative necessarie a minimizzare la presenza e l'efficacia delle sorgenti di accensione;
- d) ai rischi connessi alla presenza di sistemi di protezione dell'impianto;
- e) ai rischi connessi alla manipolazione ed al travaso di liquidi infiammabili e/o polveri combustibili;
- f) al significato della segnaletica di sicurezza e degli allarmi ottico/acustici;
- g) agli eventuali rischi connessi alla presenza di sistemi di prevenzione delle atmosfere esplosive, con particolare riferimento all'asfissia;

h) all'uso corretto di adeguati dispositivi di protezione individuale e alle relative indicazioni e controindicazioni all'uso.

2. La produzione di acido ialuronico

L'acido ialuronico è un componente importante dei tessuti connettivi dell'uomo che, grazie ad esso, possono essere elastici e mantenere la forma. Con l'invecchiamento la sua concentrazione nei tessuti tende a diminuire rendendo necessaria una integrazione. I principali trattamenti con acido ialuronico sono di tipo ortopedico, chirurgico, estetico, dermatologico e riguardano anche interventi su: articolazioni, occhio, derma, intravescicale, polmoni, nonché in tutti quei casi in cui è necessario favorire la crescita dei tessuti (biorigenerazione). Secondo una nuova analisi pubblicata da Transparency Market Research, il mercato mondiale dell'acido ialuronico dai 5,32 miliardi del 2012 nel 2019 raggiungerà i 9,85 miliardi di dollari, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 9,2%.

L'acido ialuronico può essere prodotto per estrazione da tessuti di origine vegetale o animale o per via biotecnologica. Nello stabilimento Altergon di Morra de Sanctis di Avellino, oggetto dello studio, l'acido ialuronico viene prodotto esclusivamente per via biotecnologica fermentativa, a partire da una strain batterica liofilizzata conservata a -80 °C, che viene revitalizzata fornendo acqua purificata, zuccheri, micronutrienti ed ossigeno, agitando il composto e favorendo una serie di fermentazioni a temperatura controllata (32-37°C). Successivamente vengono allontanate le biomasse ed inizia una fase di purificazione del prodotto, il quale viene recuperato nel brodo di fermentazione, per successive filtrazioni e precipitazioni, fino alla essiccazione finale del prodotto. L'intero processo può durare fra 7 e 9 giorni, di cui circa 1 giorno per fermentare (upstream) e circa 6/7 giorni per purificare (downstream).

Nello stabilimento di Morra De Sanctis è realizzato un moderno impianto di fermentazione e purificazione, ad elevato potenziale tecnologico, tra i più moderni nel mondo (il più recente autorizzato in Europa) basato su tecnologie brevettate in house, con brevetto mondiale, dedicato alla produzione biotech di Acido Ialuronico Ultra Puro iniettabile, per uso farmaceutico, medicale e dermocosmetico. L'impianto è suddiviso in due linee distinte. Nella prima viene sintetizzato il prodotto ultra puro, per uso iniettabile farmaceutico (linea 1). Nella seconda linea, di più recente realizzazione e oggetto della presente trattazione, si produce Acido Ialuronico per uso parenterale e topico (medical devices MD), attraverso la depolimerizzazione e purificazione di semilavorati prodotti presso altra linea 1. In ambo le linee viene prodotto per precipitazione alcolica acido ialuronico nella forma di sale sodico.



Figura 2. Sali di sodio ialuronato



Figura 3. Reparto di produzione Acido Ialuronico

La produzione della linea 2, detta anche reparto MD, si articola nelle seguenti fasi:



Il rischio ATEX è presente nell'area esterna di stoccaggio Etanolo e dentro il reparto nella fase di precipitazione/essiccamento, per effetto dell'utilizzo di grossi quantitativi di etanolo al 96% allo scopo di cristallizzare il prodotto che, sedimentando, si separa dalle acque madri.

In seguito alla sedimentazione del prodotto, le acque madri, consistenti in una soluzione idroalcolica di grado medio 70% circa, vengono separate e rilanciate in un serbatoio di accumulo esterno, per poter essere successivamente inviate presso impianti esterni in cui viene recuperato l'etanolo grezzo, per usi industriali.

Al fine di deidratare la molecola, si succedono due lavaggi con etanolo al 96%, intervallati da una nuova sedimentazione e conseguente produzione di soluzioni alcoliche di risulta. Lo slurry, presente in una soluzione di etanolo, viene trasferito mediante spinta di azoto al serbatoio precipitatore e, mediante sequenza automatizzata, al filtro-essiccatore.

Al termine di una fase di filtrazione in pressione di azoto e conseguente fase di vuoto spinto, si ottiene il bulk finale di sodio ialuronato. Questo viene recuperato attraverso una scatola a guanti (glove box) posizionata sul filtro essiccatore stesso e successivamente inviato al confezionamento.

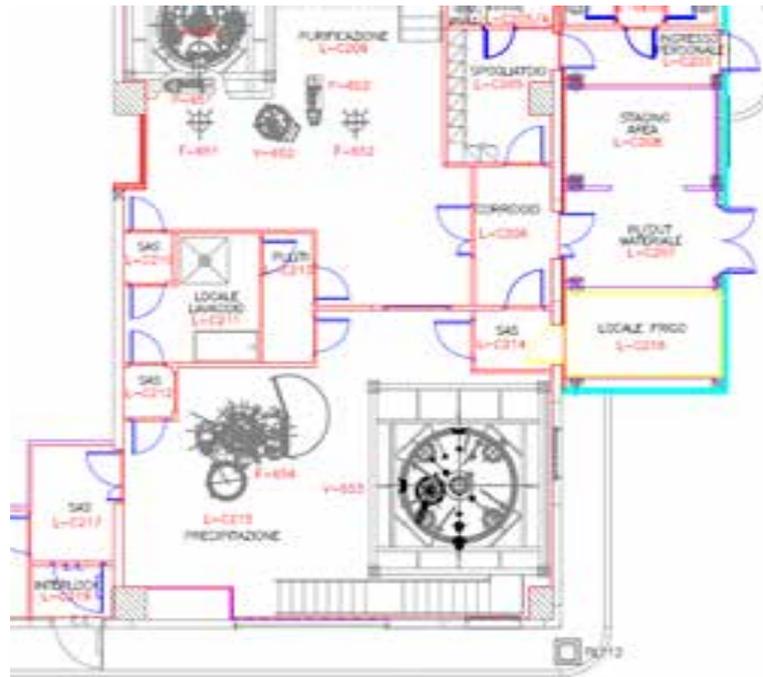


Figura 4. Linea 2 di produzione dell'acido ialuronico

3. Valutazione del rischio esplosione

Il rischio viene definito come combinazione dei fattori “probabilità” e “dimensioni del danno atteso”, ma per il rischio esplosioni è difficile quantificare l'entità del danno che, dipende da molteplici fattori quali la posizione dell'operatore, distanza, struttura si preferisce conservativamente assumere il rischio massimo in linea con quanto previsto dalle Linee Guida CE per l'attuazione della direttiva 1999/92/ CE del 23/08/2003.

La valutazione ai sensi del Titolo XI del d.lgs. 81/08 si basa sulla valutazione della probabilità che si verifichi una esplosione e che questa coinvolga l'operatore, attraverso la stima di :

- Probabilità che sia presente una atmosfera esplosiva P_{ATEX} .
- Probabilità che siano presenti sorgenti di innesco attive ed efficaci P_{IGN} .
- Probabilità di esplosione in un luogo pericoloso P_{EXP} .
- Probabilità che il lavoratore sia presente in un'aria con atmosfera esplosiva P_{LAV} .

La valutazione del rischio che l'operatore sia coinvolto in una esplosione è il risultato della combinazione delle suddette probabilità attraverso un sistema di matrici. A valle della valutazione del rischio si determinano le misure che l'azienda deve applicare ai sensi del Decreto.

Secondo quanto previsto dal d.lgs. 81/08 le misure adottate possono essere classificate in provvedimenti organizzativi e misure di protezione contro le esplosioni.

Misure organizzative

Informazione formazione ed addestramento: tutto il personale è stato adeguatamente formato sui rischi associati alla detenzione, manipolazione e movimentazione delle sostanze pericolose e sono messe a loro disposizione le relative Schede di Sicurezza.

Il personale impiegato nel ciclo di produzione dell'acido ialuronico ai fini della specializzazione normalmente segue un periodo di training mai inferiore a tre anni.

L'Azienda assicura l'adeguata formazione delle risorse, in particolare di quelle operanti in zone ATEX, mediante sessioni di training curate da specialisti comprendenti aspetti quali :

1. inquadramento legislativo e norme tecniche
2. gli obblighi a carico del datore di lavoro
3. la dinamica delle esplosioni

4. la catalogazione ATEX delle apparecchiature ed i modi di protezione
5. la valutazione del rischio di esposizione ad atmosfere potenzialmente esplosive
6. la manutenzione degli impianti in aree classificate

La formazione prevede delle verifiche di apprendimento e viene ripetuta periodicamente.

Misure di protezione contro le esplosioni e l'incendio.

In tutti i locali soggetti a possibili fuoriuscite di gas e/o formazione di atmosfere esplosive sono installati rilevatori di ossigeno O₂ e livello di esplosività LEL. I rilevatori sono dotati di allarmi visivi ed acustici settati con livelli di preallarme più bassi del valore limite prevista dalla normativa vigente. L'attivazione dell'allarme interrompe sempre in automatico il flusso del prodotto infiammabile.

Al fine di evitare il prodursi di inneschi gli impianti elettrici sono realizzati secondo quanto indicato dalle norme CEI, sono provvisti di collegamenti agli impianti di messa a terra e sono protetti dalle scariche atmosferiche.

Nelle zone classificate 1 e 2 è ammesso l'utilizzo di attrezzi come cacciaviti, chiavi ecc. in grado di provocare solo scintille singole data la bassa probabilità di di essere efficaci nell'innescare e di bassa probabilità di presenza di atmosfera esplosiva.

Tutti i sistemi di adduzione sono a circuito chiuso ed i serbatoi sono polmonati con azoto.

Sulla pavimentazione dei locali a rischio d'esplosione è stato posato un rivestimento con chip ricoperti di materiale conduttivo che assicura un effetto antistatico.

In particolare nel settore esaminato l'accesso al reparto è consentito al solo personale autorizzato in possesso di apposito badge identificativo, mediante sistema automatico centralizzato di controllo accessi;

È assicurata una ventilazione mediante apposite unità di trattamento aria che garantiscono 7000 m³/h, corrispondenti a 10 ricambi/h tutta l'aria è filtrata con filtri assoluti.

Il reparto Linea 2 è ubicato al piano terra dell'Edificio C, rientrando nell'Attività 10.2.C del Regolamento di prevenzione incendi (d.p.r. 151/2011): "Stabilimenti ed impianti ove si producono e/o impiegano liquidi infiammabili e/o combustibili con punto di infiammabilità fino a 125 °C, con quantitativi globali in ciclo e/o in deposito > 1 mc."

Sono installati sistemi di protezione antincendio attiva e passiva, comprendenti:

- adeguata compartimentazione REI;
- impianti rete idranti UNI 70 e UNI 45;
- estintori tipo CO₂, a polvere e schiuma;
- impianto di rivelazione incendi dislocato su tutta la superficie del fabbricato;
- impianto d'allarme d'incendio
- sistema di pulsanti di emergenza: allarme, sgancio elettrico ed intercettazione solventi
- sistemi rivelatori solventi all'interno dell'area di produzione collegati a sistema di allarme, pompe di aspirazione e valvole di intercettazione solventi
- ventilazione naturale dei locali mediante aperture distribuite uniformemente lungo le pareti perimetrali
- sistema di contenimento "a vasca" di eventuali sversamenti di liquido infiammabile
- interruttore di sgancio degli impianti elettrici e degli impianti elettrici di sicurezza
- tubazioni di trasporto liquidi infiammabili idoneamente contraddistinte dalle altre
- illuminazione di sicurezza lungo le vie di esodo e nell'area di produzione
- sistema di idranti in grado di erogare anche schiuma

Le vie di esodo e le uscite di emergenza sono chiaramente identificate come da planimetria redatta secondo i criteri definiti dalla ISO 23601:2009;

La valutazione ha comportato una serie di scelte progettuali e la necessità di installare dispositivi di monitoraggio continuo dell'ambiente per misurare i livelli di rischio di esplosione. Anche la gestione delle emergenze ha dovuto tener conto di questa evenienza. In particolare l'azienda ha curato la formazione del personale che opera in ambienti a rischio esplosione servendosi di esperti esterni e ripetendo ciclicamente gli eventi formativi, ed ha cura di ripetere periodicamente tutti gli addestramenti e la formazione necessari, con opportune verifiche. Gli operatori sono pertanto consapevoli del rischio presente e sono pronti ad adottare le procedure previste in caso di emergenza. Tutti i dispositivi di controllo sono comunque tarati per segnalare eventuali rischi d'esplosione prima che i livelli di concentrazione siano da ritenere pericolosi. L'azienda ha inoltre previsto impianti elettrici e di illuminazione in grado di prevenire il generarsi di inneschi, mentre le attrezzature ad alimentazione elettrica, tra cui le pompe ed i mescolatori, sono tutte dotate di certificazione per l'utilizzo in aree a rischio di esplosione. In una industria farmaceutica, di norma vengono garantiti elevati livelli qualitativi per la produzione, e questa esperienza ha permesso di evidenziare come il rispetto della normativa vigente permetta di mantenere elevati anche gli standard di sicurezza. Fondamentale risulta la formazione al personale che l'azienda ha selezionato per le elevate capacità scientifiche, ma che necessariamente deve approfondire le tematiche della sicurezza per poter prevenire gli incidenti o ridurre al minimo gli effetti di eventi imprevedibili.

5. Bibliografia

- [1] Direttiva 94/9/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 marzo 1994;
- [2] Direttiva 2014/34/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 marzo 2014;
- [3] Direttiva 1999/92/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 dicembre 1999;
- [4] D.P.R. 23 marzo 1998, n. 126 G.U. n. 101 del 04/05/1998 - Regolamento recante norme per l'attuazione della Direttiva 94/9/CE;
- [5] D.lgs. n. 233 del 12/06/2003 G.U. n. 198 del 26/08/2003 - Attuazione della Direttiva 1999/92/CE;
- [6] D.lgs. n. 81 del 09/04/2008 – Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro;
- [7] Linee guida ATEX. Linee guida per l'applicazione della direttiva 94/9/CE del Consiglio del 23 marzo 1994 – 4°Edizione Settembre 2012;
- [8] Guida di buona pratica non vincolante per l'implementazione della Direttiva 1999/92/CE, del gennaio 2003;
- [9] Guida pratica per la preparazione di un documento per la protezione contro le esplosioni - ISSA 2006;
- [10] Equipaggiamento elettrico delle macchine, TuttoNormel, Edizione TNEValutazione rischio ATEX Lavoro Certifico Srl –ITIRev. 00 2018;
- [11] C. Converso et. Al. Analisi dei rischi di esercizio ed adeguamento alla direttiva ATEX.

Criticità nel sistema di sicurezza a servizio di un serbatoio di GPL

C. De Toro¹, E. Spagnuolo¹, M. Mauro², M. M. La Veglia³, P. Pireneo⁴

¹ Inail - Uot di Avellino

² Engineering Organization Safety Scrl

³ Direzione Regionale VVFF Campania

⁴ Ordine Ingegneri Napoli

1. Introduzione

Lo studio tratta l'analisi dei guasti che possono verificarsi sul sistema di controllo della pressione presente su un serbatoio di GPL di grandi dimensioni, costituito da una coppia di valvole di sicurezza (PSV) e un cassetto porta-valvole per le attività di manutenzione e controllo.

2. Descrizione e funzionalità dell'attrezzatura

Viene esaminato il complesso "PSV + cassetto di disimpegno". Tale componentistica è resa obbligatoria per i serbatoi di GPL di capacità geometrica maggiore di 13 mc, così come prescritto dal Decreto del Ministero degli Interni 13.10.1994. Il cassetto di disimpegno è un accessorio che permette di sostituire le valvole di sicurezza a protezione del serbatoio, in occasione della verifica/collaudato annuale, senza dover svuotare il serbatoio stesso e mantenendo la valvola rimanente in servizio. La funzione è assolta manovrando manualmente un "perno" laterale che permette la chiusura del canale d'efflusso di una delle due valvole di sicurezza per volta (Fig.1).

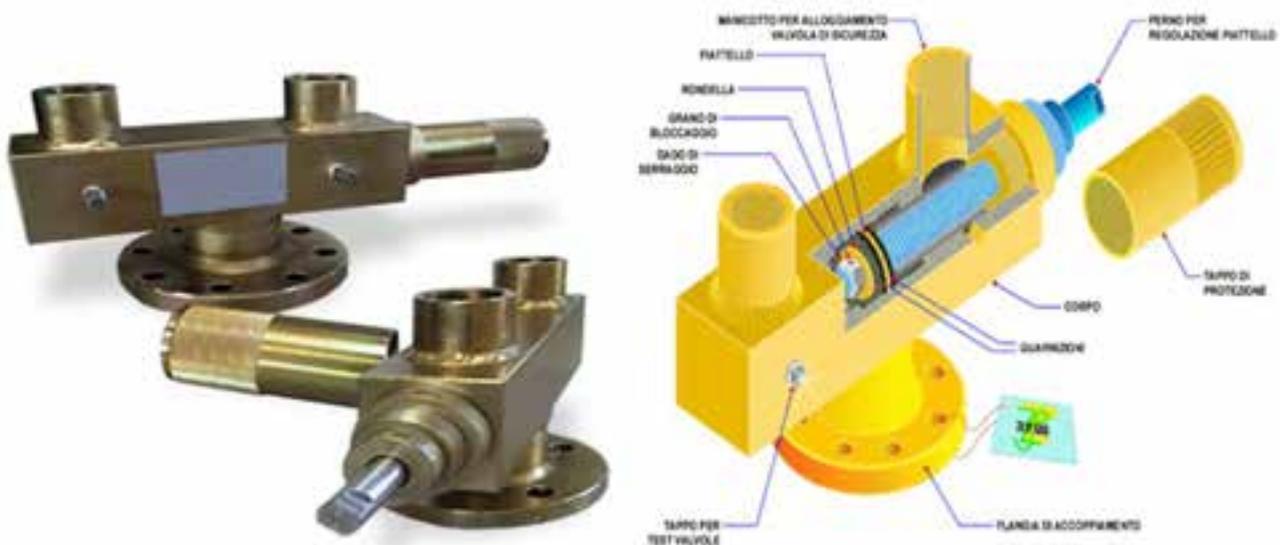


Figura 1



Figura 2. Esempio di installazione di serbatoi

Le installazioni di serbatoi di stoccaggio di GPL (Fig. 2), oltre a essere corredate dagli apprestamenti previsti per gli apparecchi a pressione soggetti alla direttiva PED (Pressure Equipment Directive), devono soddisfare quanto previsto dal citato d.m. del 13/10/1994 (di seguito regola tecnica di prevenzione incendi).

In particolare, tale regola tecnica prescrive l'applicazione delle seguenti apparecchiature ai punti:

- **punto 5.5.1** - I serbatoi devono essere provvisti di valvole di sicurezza, in conformità alle norme sugli apparecchi a pressione;
- **punto 5.5.2** - Sui serbatoi devono essere installate le seguenti attrezzature ausiliarie:
 - a) una valvola di sicurezza di riserva;
 - b) un dispositivo idoneo ad escludere, a scopo manutenzione, le singole valvole di sicurezza dall'esercizio; comunque in grado di assicurare la portata di efflusso prevista dalle vigenti norme;
 - c) uno scarico delle valvole di sicurezza diretto verso l'alto, tale da non costituire pericolo per gli operatori e ad altezza minima di 2 mt dalla generatrice superiore del serbatoio;
 - d) un segnalatore indipendente di allarme per il massimo livello, udibile in posti presidiati e collegato ad un dispositivo di blocco del riempimento (chiusura valvola di carico e disattivazione compressore);
 - ...omissis;
 - h) un segnalatore di allarme per alta pressione, udibile nei posti presidiati.

Il cassetto di disimpegno sicuramente soddisfa quanto richiesto ai punti a) e b).

3. Analisi storica

L'analisi storica, che ha preceduto lo studio, è stata effettuata usando le banche dati informatizzate, di seguito elencate:

- SONATA (Summary Of Notable Accidents in Technical Activities) del gruppo ENI;
- FACTS sviluppata ed aggiornata dal TNO olandese;
- TNO/FRIENDS 2001 "Explore chemical accidents";
- MHIDAS "UK-Health and Safety Executive" (UK-HSE), edizione Febbraio 2005 (aggiornamento al 31.01.2005).

I risultati dell'analisi sono stati riassunti nel seguente diagramma:

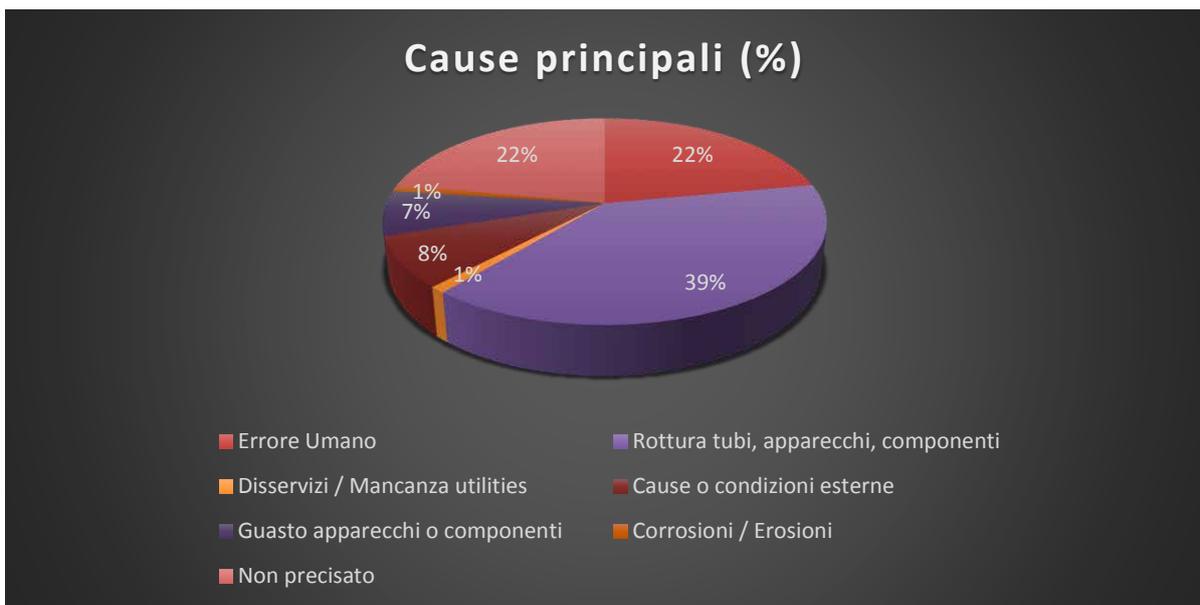


Figura 3

Come si può facilmente dedurre dal diagramma, la maggiore incidenza (39%) di eventi incidentali riscontrati in serbatoi di stoccaggio per GPL è riconducibile alla rottura di apparecchi e componenti.

4. Stima della frequenza attesa dell'evento

La stima si effettua in base alle convenzioni dell'affidabilità.

Per esempio, la frequenza è data da:

- 1) prodotto tra rateo di guasto (λ) e tempo di missione (t);
- 2) prodotto tra probabilità (p) e numero di occasioni (occ)

A ogni causa o evento elementare corrisponde un rateo di guasto.

Il valore della frequenza di accadimento si può stimare tramite diverse tecniche:

- FTA (Fault Tree Analysis);
- FMEA (Failure Mode & Effect Analysis);
- FMECA (Failure Mode & Effect and Consequence Analysis);
- ETA (Event Tree Analysis) ovvero con il diagramma logico degli eventi.

Di tali tecniche, quella che più si presta a schematizzare il caso di studio è l'FTA, l'analisi mediante l'albero dei guasti. I dati da inserire nell'albero di guasto vanno calcolati e/o identificati in funzione del tipo di componenti costituenti il sistema, i cui ratei di missione, ovvero di guasto, possono essere desunti da banche dati di affidabilità.

I componenti del sistema si possono distinguere in:

- a) Componenti il cui guasto si autoevidenzia (regolatori, controllori, elementi sempre in funzione il cui guasto comporta subito un'a variazione dei parametri);
- b) Componenti in attesa (sistemi che intervengono su domanda o in stand-by);
- c) Componenti riparabili (che non devono essere sostituiti con altri nuovi).

Nel caso in esame i componenti sono del tipo b) in attesa. Infatti, la probabilità (p) che un oggetto avente un rateo di guasto λ [occ/h] sia rotto o guasto al tempo t [h] è pari a:

$$p = 1 - e^{-\lambda t}$$

Nel nostro caso abbiamo un componente:

- in attesa;
- multicomponente (doppia valvola);
- a sicurezza ridondante.

Il procedimento di costruzione degli alberi di guasto, che è stato utilizzato, rappresenta un processo di analisi a ritroso per cui, iniziando dal TOP (evento indesiderato), si procede ad analizzare la causa della deviazione che lo determina, la quale a sua volta viene analizzata come deviazione per risalire a tutte le cause che a essa possono concorrere, tenendo conto ogni volta del mancato intervento delle protezioni (automatiche o manuali) previste.

Da qui si è quindi proceduto ad introdurre le probabilità degli eventi iniziatori di cui sono disponibili (in letteratura) o determinabili (dalle caratteristiche peculiari dell'impianto e dall'esperienza di gestione dello stesso) i parametri affidabilistici (tasso di guasto, tempo medio di ripristino, etc.).

Per gli scopi dello studio si analizzano separatamente due casi riferiti a due condizioni definite "critiche" che comportano l'attuazione del sistema PSV:

- a) "Rilascio di GPL in fase gas da PSV per sovrappressione";
- b) "Rilascio di GPL da PSV per sovrariempimento".

4.1 Rilascio di GPL in fase gas da PSV per sovrappressione

La sovrappressione nei serbatoi di stoccaggio di GPL può essere originata:

- a) dalle operazioni di riempimento del serbatoio, se le stesse sono eseguite senza linea di equilibrio;
- b) a causa di esposizione del serbatoio ad irraggiamento termico.

Per quanto al punto a), si rileva che le portate di riempimento attese sono in genere estremamente basse e correlate alla superficie di contatto liquido/vapore. Ne consegue che, anche in assenza di linea di equilibrio, le pressioni che si verrebbero a instaurare nel serbatoio in fase di riempimento, per mancata condensazione dei vapori, non raggiungerebbero comunque il set di scatto delle PSV.

Per quanto poi al punto b), trattandosi di serbatoi del tipo ricoperti di terra e/o coibentati, lo scatto delle PSV è da ritenersi non credibile (frequenza di accadimento $< 1,0E-6$ occ/anno).

4.2 Rilascio di GPL da PSV per sovrariempimento

Il caso esaminato è relativo all'overfilling di un serbatoio, per scarica delle autobotti (ATB), ferrocisterne (FC) oppure per travasi interni.

L'assetto operativo prevede che l'aspirazione sia effettuata con il compressore che aspira i gas dal serbatoio di ricezione e li comprime in quello di estrazione creando la necessaria differenza di pressione che consente il travaso del liquido. Ne consegue che l'eventuale sovrariempimento del serbatoio ricevente non causa, di per sé, una sovrappressione nello stesso in quanto il liquido tenderà a traboccare lungo la tubazione in fase gas raggiungendo il compressore.

Pertanto il sovrariempimento del serbatoio potrebbe portare alla rottura catastrofica del compressore, situazione che non viene analizzata in questa sede.

In merito a quanto sopra, l'eventuale insorgere del TOP EVENT in studio potrebbe avvenire solo a seguito del mancato intervento della protezione per l'overfilling del serbatoio (arresto automatico e manuale delle operazioni), contemporaneamente al mancato intervento dell'operatore (errore umano):

- mancato intervento sulle svariate segnalazioni di allarme,
- mancato presidio dell'operazione,
- errato allineamento del serbatoio ricevente.

Questi errori sono comunque tutti riconducibili a un mancato rispetto di procedure operative. Le considerazioni espresse sono state inserite nell'albero dei guasti:

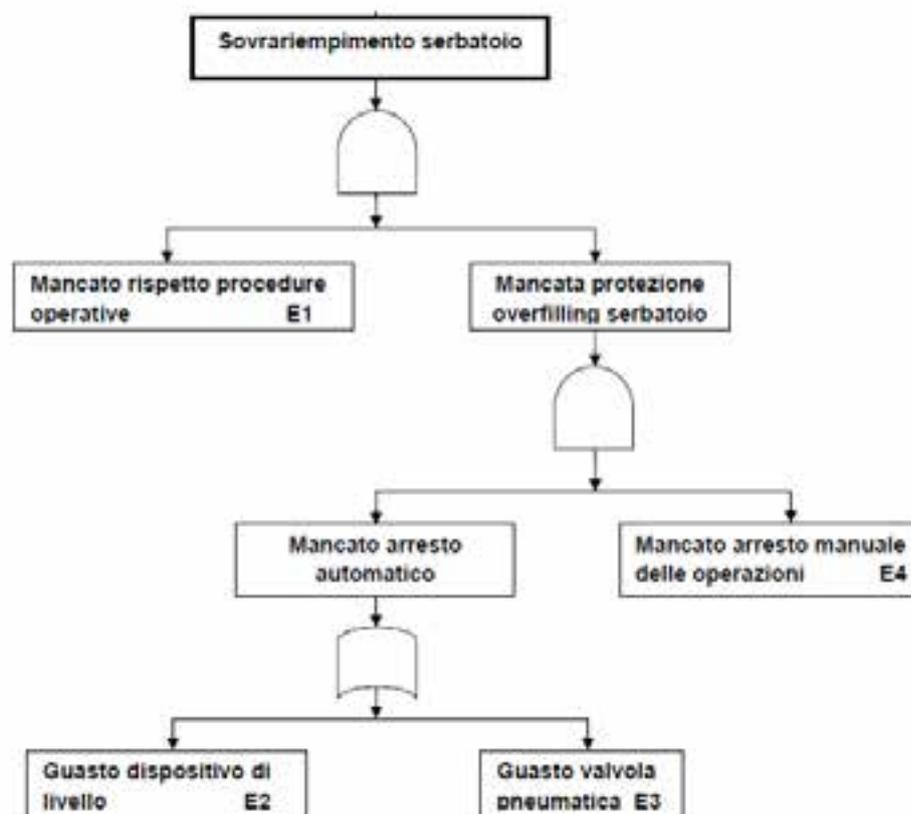


Figura 4. Albero dei guasti

- E2 è pari al guasto del misuratore continuo di livello e del blocco di alto livello visto che entrambi comandano in automatico la chiusura delle valvole di fondo serbatoio quindi pari a $5,2E-6$ occ/anno;
- E3 è pari a $3,0E-4$ occ/anno;
- E4 e E1 sono eventi correlati all'errore umano. Il primo è da considerarsi estremamente remoto visto che l'intervento manuale è richiesto solo per guasto degli automatismi; anche l'evento E1 è caratterizzato da una bassa probabilità di accadimento considerando:
 - che le operazioni sono ripetitive
 - il personale è formato ed addestrato.

Si è conservativamente considerata una probabilità pari a $1,0E-3$ per evento.

Ne consegue quindi che il TOP EVENT ha una frequenza di accadimento pari a $3,0E-10$ occ/anno.

5. Lo stato dell'arte

I sistemi oggetto di studio rientrano tra le apparecchiature definite "critiche" destinate al controllo del mantenimento della pressione nei serbatoi.

Oltre all'osservanza delle specifiche norme di costruzione, il controllo periodico delle valvole di sicurezza è a garanzia della funzionalità del sistema.

Generalmente questo tipo di installazione equipaggia serbatoi di notevole dimensione impiegati a scopo industriale, e per lo più ricadenti nell'ambito di osservanza delle norme sui rischi di incidente rilevante di cui al d.lgs. 105/2015.

Normalmente il controllo operativo di tali apparecchiature avviene da remoto con un PLC (Programmable Logic Controller) dedicato in cui sono riportati i parametri operativi (temperatura e pressione) e gli allarmi prefissati secondo specifici set-point; di conseguenza l'operatore di impianto è avvisato tempestivamente sull'insorgere di anomalie funzionali.

Altro aspetto importante è la verifica di messa in servizio del cassetto valvole. Essa, benché semplice, deve seguire una specifica procedura di messa in servizio a valle dell'intervento dell'operatore in modo da lasciare libero il passaggio di scarico delle valvole.

6. Conclusioni

Lo studio ha evidenziato che sostanzialmente l'aliquota in capo al controllo operativo - ovvero di errore umano - è determinante al fine dell'esercizio funzionale dell'apparecchiatura.

Il campo di affidabilità meccanico appare elevato in relazione alla semplicità funzionale e al regime di controlli e ispezioni cui è sottoposta l'apparecchiatura.

Essendo un'apparecchiatura del tipo "in attesa", il cui intervento è strategico al fine del mantenimento delle condizioni di integrità strutturale del serbatoio, è auspicabile che il controllo sull'efficienza venga seguito in maniera scrupolosa e secondo precisi programmi di manutenzione che solo alla fine devono sfociare nelle verifiche periodiche prescritte dalla normativa di settore.

7. Bibliografia

[1] PED 97/23/CE per gli apparecchi a pressione

[2] ATEX 94/9/CE per prodotti destinati ad atmosfere potenzialmente esplosive

[3] Direttiva Macchine 2006/42/CE

[4] Decreto Ministero Interno 13/10/1994

Analisi statistica sui difetti rilevati nelle installazioni di piccoli serbatoi Gpl ad uso domestico ed industriale

A. Rotondaro¹, A. F. Cosentini²

¹ CPS Srl

² Inail - Uot di Catanzaro

Sommario

Le installazioni di serbatoi per stoccaggio GPL sono ancora largamente diffuse in gran parte del territorio nazionale. I depositi fissi in acciaio cilindrico risultano essere la soluzione migliore per l'immagazzinamento del gas di petrolio liquefatto ad uso di impianti domestici ed industriali. Trattandosi di depositi infiammabili è necessario che essi siano oggetto di un attento piano di controllo e manutenzione. Le verifiche sono affidate a società di manutenzione specializzate nel controllo dei depositi attrezzate per interventi ordinari e straordinari in caso di guasti e malfunzionamenti. Il presente lavoro si avvale della collaborazione di una società di manutenzione del gruppo Carbone srl, con esperienza trentennale nel settore del gpl, che, per l'area del centro-sud Italia, ha la gestione di un parco serbatoi installati presso gli utenti finali di circa 30.000 unità.

1. Introduzione

L'analisi dei dati relativi agli interventi ordinari e straordinari effettuati presso gli impianti di serbatoi GPL, installati presso i clienti, ha permesso l'elaborazione di un report statistico difettoscopico riguardante le principali problematiche riscontrate su queste installazioni. Tale analisi ha avuto come oggetto oltre 4.000 interventi effettuati negli ultimi anni nell'area del centro-sud Italia.

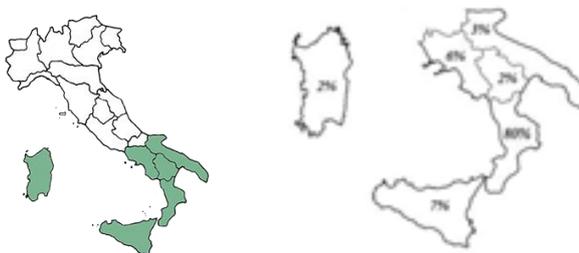


Immagine 1. Localizzazione degli interventi nell'area del sud - Italia

Il database ottenuto è stato utilizzato andando a settare vari parametri e variabili, quali stagionalità, localizzazione dei difetti, tipi di problematiche, tipologia e caratteristiche dei depositi fissi.

2. Gas di Petrolio liquefatto (GPL)

Gas di Petrolio Liquefatto, più comunemente detto GPL, è la definizione che viene usata per identificare gli idrocarburi, componenti del petrolio, che sussistono allo stato gassoso a temperatura ambiente ed a pressione atmosferica ma che sono facilmente liquefabili se assoggettati a moderate pressioni con sensibile diminuzione del loro volume.

Il GPL si ottiene sia dalla lavorazione del petrolio greggio (raffinazione) che dal gas naturale (frazionamento) estratto dai giacimenti. In ambito commerciale vengono utilizzate miscele che devono essere opportunamente odorizzate in modo che sia possibile percepire immediatamente all'olfatto la presenza di gas incombusti nell'ambiente.

Il propano commerciale è composto prevalentemente da idrocarburi C₃H₈ e contiene in limitate proporzioni butano e/o butilene. Il GPL ha una non elevata tensione di vapore alla temperatura ambiente ed è facilmente liquefabile se sottoposto a pressioni moderate.

3. Depositi fissi cilindrici per stoccaggio gpl

L'impianto di stoccaggio gpl è costituito essenzialmente da uno o più serbatoi di capacità adeguata equipaggiato con apparecchiature per l'esercizio, il controllo e la sicurezza. È progettato e fabbricato nel rispetto di quanto previsto dalle Direttive Europee e relative norme armonizzate per le apparecchiature a pressione.

3.1 Serbatoi gpl: elementi costitutivi

I serbatoi GPL sono costituiti essenzialmente da un corpo cilindrico (virola) e da due fondi. Il corpo cilindrico, a seconda della tipologia e della capacità dei serbatoi, ha diametro nominale variabile tra 600 e 1700 mm. È realizzato mediante calandratura di fogli di lamiera di qualità che rientra nelle categorie Fe 410.2 KG/KW – Fe 460.2 KG/KW – Fe 510.2 KG/KW fino all'entrata in vigore della PED e, P355 NH successivamente.

Alla virola sono assemblati, mediante saldatura, due fondi imbutiti stampati a freddo e realizzati con materiale con le stesse caratteristiche di quello delle virole.

Fanno parte della membratura a pressione dei serbatoi i manicotti femmina con filettatura NPT conica utilizzati per l'assemblaggio delle strumentazioni di sicurezza ed accessori di servizio necessari per l'utilizzo dei serbatoi stessi.

3.2 Analisi delle tipologie - depositi fissi cilindrici

Sono stati esaminati i depositi costruiti tra il 1970 ed il 2018 con le seguenti caratteristiche:

Capacità:	da 300 litri a 13.000 litri
Asse:	Verticale ed Orizzontale
Tipo di installazione:	Interrata e Fuori terra
Prodotto stoccato:	GPL Propano/ Butano con tensione di vapore $5 < PS < 18$ bar
Max riempimento:	80% della capacità nominale del serbatoio per il tipo fuori terra 85% della capacità nominale del serbatoio per tipo interrato
Pressione massima di esercizio:	17,65 bar

Quanto a dimensione i serbatoi si presentano in due distinte versioni:

- Asse orizzontale: si sviluppano lungo un asse orizzontale, parallelo al terreno, poggianti su 4 supporti metallici e con gli equipaggiamenti di sicurezza e di servizio posti sulla generatrice superiore del recipiente.
- Asse verticale: si sviluppano lungo un asse verticale, perpendicolare al terreno, poggianti su 3 supporti metallici e con gli equipaggiamenti di sicurezza e di servizio posti sul fondo bombato superiore.

La tipologia d'installazione del serbatoio, oltre alla sola collocazione fisica, determina una variante degli accessori di servizio a corredo del serbatoio stesso:

- Installazione Fuori Terra: è caratterizzata dall'ancoraggio del deposito fisso di gpl al di sopra del piano di campagna su un basamento in cemento armato preventivamente predisposto. Il serbatoio presenta la classica colorazione bianca. Gli accessori di sicurezza sono protetti da un cappellotto in plastica ignifugo. Il gruppo di riduzione di primo e di secondo stadio, che collega il deposito fisso cilindrico alla rete di adduzione dell'utilizzatore posta a valle, è posto all'esterno del cappellotto
- Installazione Interrata Epox: è caratterizzata dall'interramento del serbatoio al di sotto del piano di campagna in una buca preventivamente realizzata. Il serbatoio presenta

una colorazione verde in resina epossidica ed è ancorato ad una soletta in cemento armato che ha la funzione di anti-galleggiamento. Il serbatoio è totalmente interrato, resta al di fuori del terreno il torrino in polipropilene ignifugo a protezione degli accessori di sicurezza e di servizio. Il gruppo di servizio di primo e di secondo stadio risulta essere collocato all'interno del torrino. Questa tipologia di serbatoio presenta un equipaggiamento extra che consiste nel kit di protezione catodica composta da anodi di magnesio, elettrodo di riferimento e cassetta di assemblaggio del sistema.

- Installazione Interrata Guscio: è simile alla precedente nella modalità di installazione ma il serbatoio, in questo caso, presenta un rivestimento bianco (tipico del fuori terra), con una protezione totale in materiale plastico, da cui deriva il termine "guscio", che avvolge e protegge il serbatoio.

3.3 Classificazione delle utenze

A seconda del tipo di utilizzo e della tipologia di utenza finale è possibile effettuare la seguente classificazione del deposito di stoccaggio fisso:

- Utenza domestica: fa riferimento ad un uso prettamente domestico del gpl. Può essere a servizio di un singolo utente o di un gruppo di utenti mediante reti canalizzate.
- Utenza industriale: fa riferimento ad un uso di tipo industriale del gpl. Anche in questo caso, può essere a servizio di un singolo o di un gruppo di utilizzatori finali.

3.4 Dotazioni di sicurezza, di servizio e di protezione

a. Strumentazione di sicurezza e di servizio

Su ogni serbatoio per stoccaggio gpl sono presenti manicotti femmina con filettatura NPT su cui sono assemblate le strumentazioni di sicurezza e di servizio in conformità alla normativa europea UNI EN 14570, in particolare:

- Sotto valvola per valvola di sicurezza NPT 1" ¼ (NPT 2" per capacità ≥ a 5.000 litri)
[Le sotto valvole sono dotate di piattello interno di chiusura per la sostituzione della valvola di sicurezza con serbatoio in esercizio].
- Gruppo di servizio multi-valvola NPT ¾"
- Valvola di riempimento NPT 1" ¼
- Valvola di prelievo gas in fase liquida NPT 1" ¼ o ¾" associata ad un pescante interno
- Valvola di spurgo inferiore NPT 1" ¼ (o ¾") solo per serbatoi fuori terra
- Indicatore di livello magnetico a galleggiante
- Kit di riduzione della pressione di 1° e di 2° stadio.

b. Protezione contro la corrosione

Per i *serbatoi fuori terra* la protezione contro la corrosione è garantita da una verniciatura bi-componente, su un preventivo ciclo di sabbiatura della superficie esterna, generalmente di colore bianco che ha la funzione di proteggere il serbatoio dalla corrosione degli agenti atmosferici e dai raggi UV.

Per i *serbatoi interrati* la protezione contro la corrosione è garantita oltre che da un rivestimento a base di resina epossidica ad alto spessore, generalmente di colore verde, da un sistema di protezione catodica abbinato realizzato mediante anodi di magnesio ed elettrodo di riferimento.

c. Protezione contro gli agenti atmosferici

A *protezione degli accessori di servizio* dei serbatoi fuori terra è previsto che sia presente un cappello metallico o composto in materiale plastico ignifugo.

A *protezione del serbatoio dalle scariche atmosferiche* è previsto un dispersore di terra

A *protezione contro eventi come vento o terremoti* è previsto che i serbatoi siano ancorati

ad un'adeguata platea di cemento armato, allo scopo progettata.

3.5 Controlli periodici

a. Interventi ordinari

Ogni deposito è sottoposto ad un piano di verifiche periodiche. Tale piano di ispezioni e controlli ordinari ha lo scopo di mantenere sempre efficiente ed in totale sicurezza l'impianto di stoccaggio ad uso dell'utente finale. Il personale specializzato, durante il controllo, effettua un esame visivo generale per verificare gli accessori di sicurezza, degli equipaggiamenti (cappellotto, torrino, protezione catodica, dispersione di terra) e del sito del serbatoio nel suo complesso. Verifica inoltre le connessioni elettriche, il giunto dielettrico isolante, lo sfiato di sicurezza, il kit di riduzione di 1° e di 2° stadio. Qualora le verifiche non dovessero rispettare le condizioni di esercizio, il personale incaricato dovrà sospendere il regolare funzionamento del deposito in attesa del suo regolare ripristino. Un'ulteriore serie di controlli ordinari è garantita dagli addetti al rifornimento.

b. Interventi straordinari

Le ditte di manutenzione dei depositi fissi di stoccaggio gpl, si avvalgono di tecnici specializzati ed appositamente addestrati per rispondere in tempi brevi ad eventuali problematiche riscontrate sui serbatoi. Le aree di intervento straordinario riguardano maggiormente quelle legate alla fuoriuscita di gpl dal serbatoio di stoccaggio dalle parti in pressione, dagli accessori di sicurezza e di servizio o dal gruppo di riduzione e regolazione. Situazioni di potenziali pericoli devono essere gestite con interventi tecnici mirati atti a garantire il ripristino del regolare funzionamento dell'impianto o ad interrompere il servizio del deposito nei casi più gravi.

4. Analisi statistica

4.1 Tipologie di depositi analizzati

Il presente lavoro di ricerca è stato incentrato sull'analisi statistica degli interventi effettuati, dalla società di manutenzione, nel periodo compreso tra il 01/01/2012 ed il 30/06/2018.

Numero totale dei serbatoi verificati: **3.274**
 Serbatoi ad asse orizzontale: 2.622
 Serbatoi ad asse verticale: 652

Serbatoi fuori terra: 2.321
 Serbatoi interrati epox: 931
 Serbatoi interrati guscio: 22

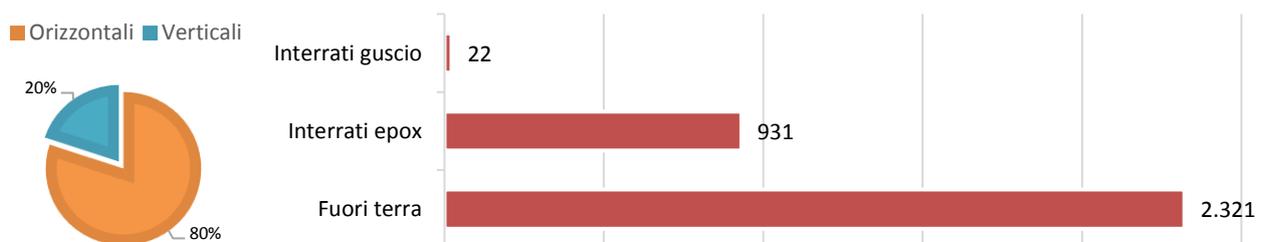


Grafico 1. Analisi dei depositi soggetti ad attività manutentiva



Immagine 2. Tipologia di depositi: da sinistra: Interrato Guscio, Fuori Terra, Interrato Epox

4.2 Rapporto statistico Nuove Installazioni / Dismissioni depositi di stoccaggio

Un'indagine preliminare ha riguardato il confronto, nel periodo temporale di riferimento, tra le nuove installazioni di depositi per stoccaggio e le dismissioni, per le versioni Fuori Terra ed Interrato Epox.

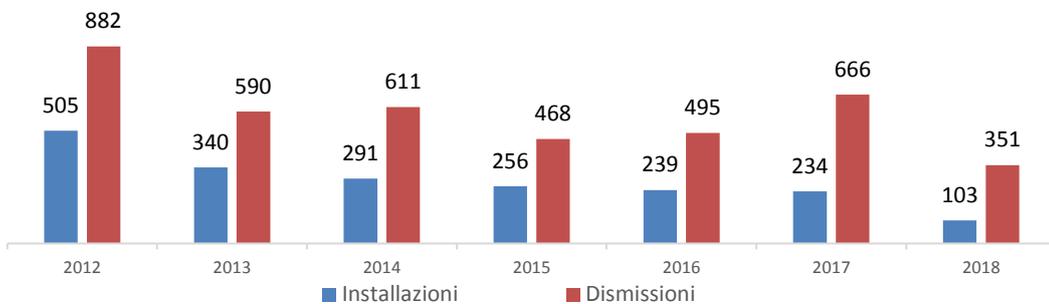


Grafico 2. Rapporto depositi di stoccaggio gpl: Nuove Installazioni / Dismissioni

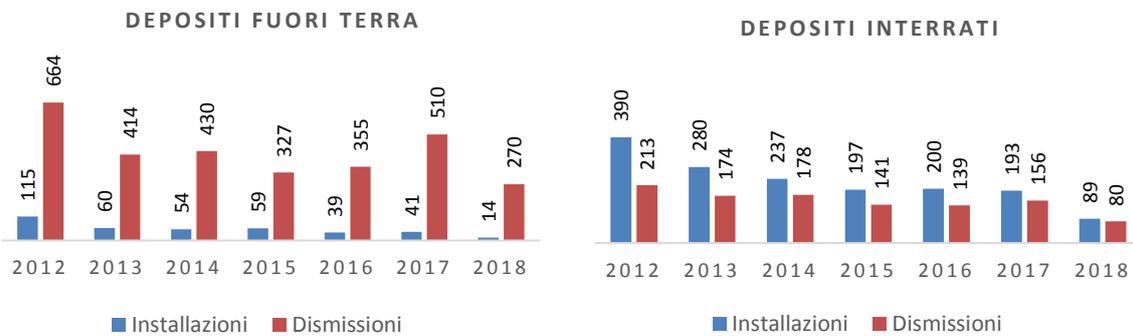


Grafico 3. Nuove Installazioni / Dismissioni in relazione alla tipologia di utilizzo

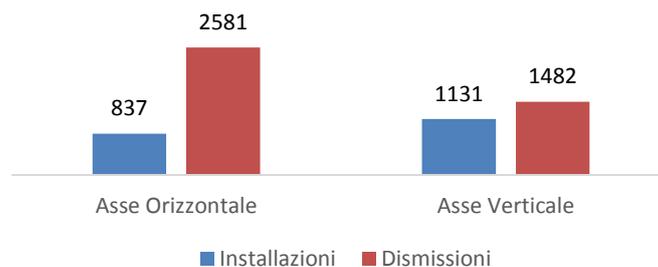


Grafico 4. Nuove Installazioni / Dismissioni in relazione all'asse del serbatoio

Si evince che il trend consolidato degli ultimi anni prevede, nel complesso, un numero di installazioni di nuovi depositi di stoccaggio pari a circa 0,5 volte il numero delle dismissioni. Nell'analisi particolare, invece, emerge che questo rapporto s'inverte nei depositi ad uso interrato. Quest'ultimo dato mette in evidenza la larga diffusione della tipologia interrata ma fa risaltare anche le grandi difficoltà legate alla dismissione dei depositi in disuso. L'utente finale, in molti casi, preferisce non far ritirare il serbatoio per non andare ad effettuare (o subire) delle lavorazioni impattanti per l'area di installazione del deposito esistente.

4.3 Analisi statistica generale degli interventi

Le attività di manutenzione, sorveglianza e controllo di un deposito per stoccaggio gpl sono state relazionate a delle macro aree di indagine:

- Tipologie di depositi
- Anno di fabbricazione del serbatoio di stoccaggio
- Tipologia di installazione ed asse del serbatoio
- Periodicità degli interventi

4.3.1 Tipologie di depositi

Gli interventi realizzati presso i depositi dalla società di manutenzione, nel periodo temporale considerato, sono stati esaminati con una serie di filtri successivi, a cascata, in modo da determinare ogni tipologia di attività manutentiva:

Numero totale degli interventi: **4.240**

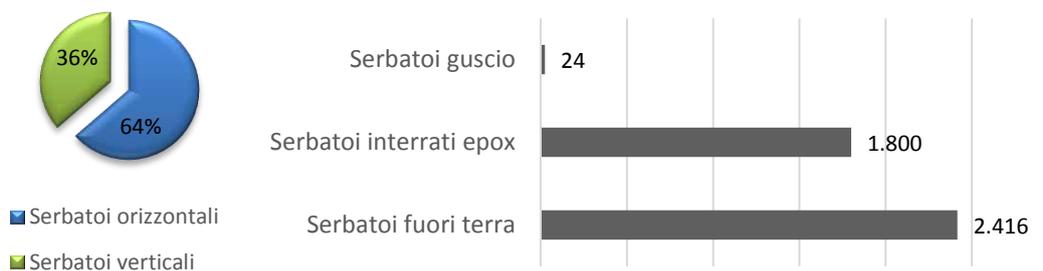


Grafico 5. Analisi dei dati relativi agli interventi

4.3.2 Anno di fabbricazione del deposito

È stata inoltre fatta un'analisi in base all'anno di costruzione del serbatoio oggetto di intervento distinguendo gli interventi effettuati su serbatoi fabbricati prima dell'entrata in vigore della Direttiva Europea 97/23/CE - PED (dal 1972 al 1997 escluso) o successivamente alla stessa (dal 1997 ad oggi). Anche se il numero di serbatoi ante PED installati è maggiore di quelli post PED, è evidente di come i serbatoi più datati abbiano bisogno di più manutenzione rispetto a quelli più recenti.

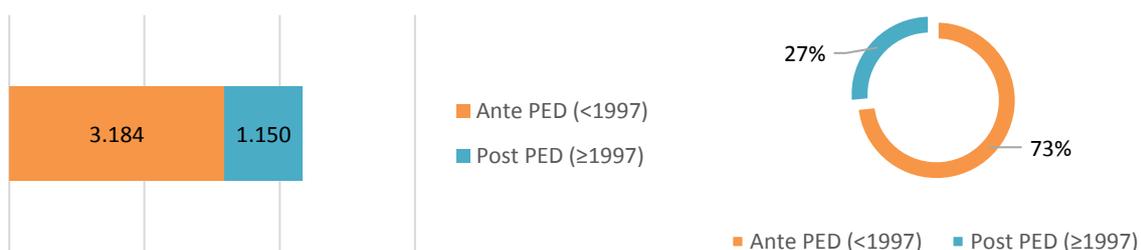


Grafico 6. Analisi degli interventi in rapporto all'anno di costruzione del serbatoio (Ante PED/Post PED)

4.3.3 Tipologia di installazione ed asse del deposito

Dall'analisi della correlazione dei dati tra gli interventi effettuati sui serbatoi installati e l'orientamento del deposito stesso scaturisce una casistica di interventi maggiore sui serbatoi ad asse orizzontale fuori terra e ad asse verticale interrato.

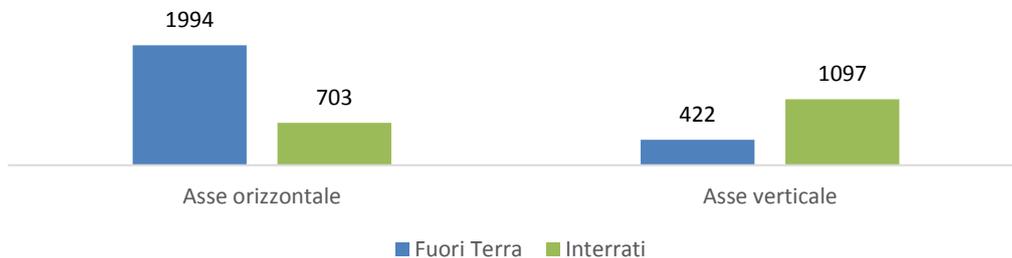


Grafico 7. Confronto tipologia di installazione / asse del deposito

4.3.4 Periodicità degli interventi

Un parametro importante nell'attività di programmazione delle manutenzioni scaturisce dall'analisi degli interventi (ordinari e straordinari) effettuati sul parco serbatoi in esame nel tempo definito dall'indagine statistica. Sono stati filtrati gli interventi effettuati nel periodo estivo (da maggio ad ottobre) ed in quello invernale (da novembre ad aprile).

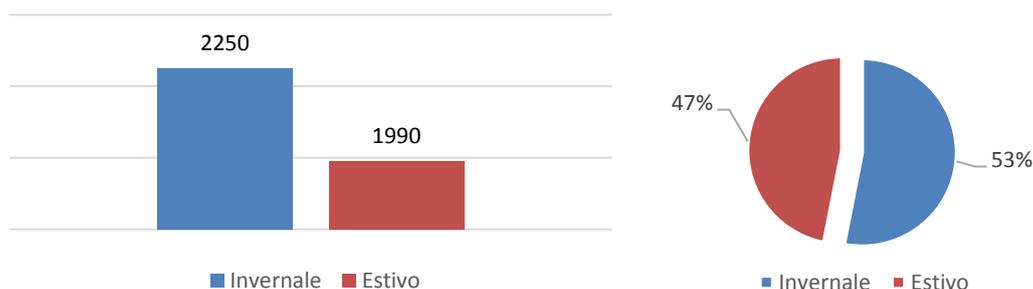


Grafico 8. Periodicità degli interventi

4.4 Analisi statistica particolare degli interventi

Dopo aver effettuato un'indagine generale degli interventi negli anni di riferimento, si è passati ad un'analisi su scala ridotta, relativa alle singole voci di attività manutentiva. Si è fatto quindi riferimento alle seguenti lavorazioni:

1. Interventi su accessori di sicurezza e di servizio (posti sul serbatoio)
2. Interventi su gruppo di regolazione / riduzione (posti tra il serbatoio e l'utilizzo finale)
3. Interventi sul sistema di dispersione di terra e protezione catodica
4. Interventi sugli equipaggiamenti di protezione

4.4.1 Interventi su accessori di sicurezza e di servizio

In questa categoria rientrano tutte le attività manutentive svolte su:

- Gruppo di servizio e/o manometro
- Indicatore di livello e/o quadrante
- Sotto valvola di sicurezza
- Valvola di carico

L'analisi è stata svolta sia sui depositi interrati che su quelli fuori terra. Il componente maggiormente soggetto a danneggiamento risulta essere il quadrante dell'indicatore di livello, soprattutto nei modelli più datati contenenti glicerina e nella versione fuori terra.

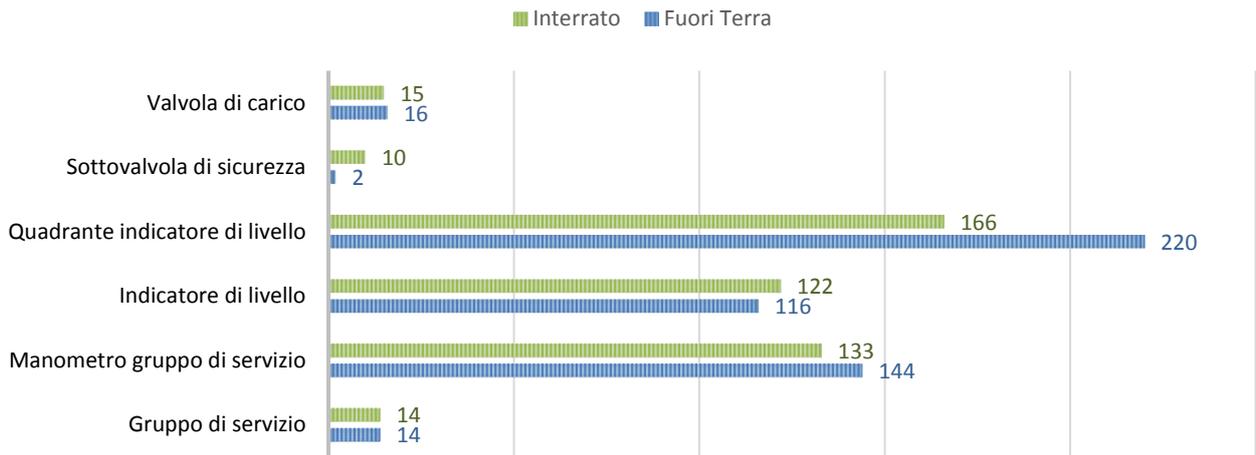


Grafico 9. Analisi degli interventi per ogni singolo accessorio di sicurezza e di servizio

Si è passati, quindi, a caratterizzare gli interventi sugli accessori in base all'orientamento del serbatoio. Si evince che nella versione fuori terra il deposito ad asse orizzontale è maggiormente soggetto ad interventi, cosa contraria nella versione interrata. Stessa analisi è stata fatta per l'anno di costruzione del serbatoio in relazione all'entrata in vigore della PED. La tipologia fuori terra ante PED e quella interrata post PED risultano le più coinvolte in attività di manutenzione.

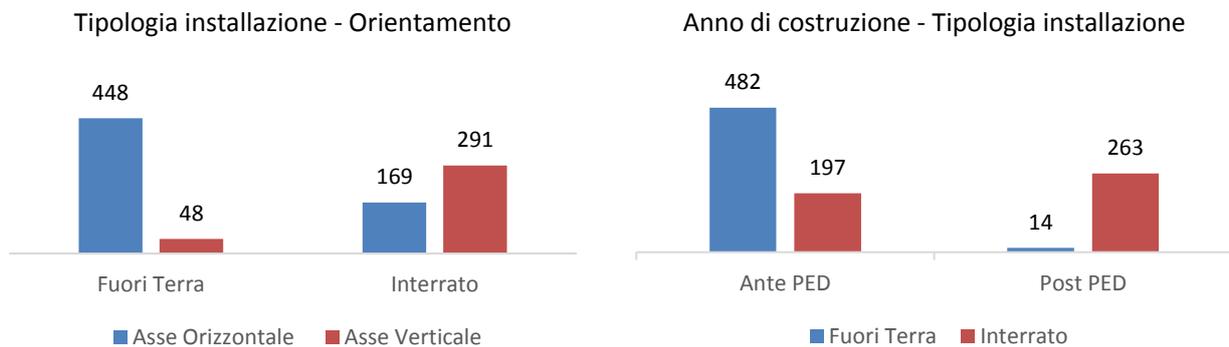


Grafico 10. Analisi degli interventi in relazione all'orientamento del serbatoio

4.4.2 Interventi su gruppo di riduzione e di regolazione

In questa categoria rientrano tutte le attività di intervento e manutenzione svolte su:

- Kit di 1° e 2° stadio
- Riduttore di 1° stadio
- Regolatore di 2° stadio
- Valvola a sfera e giunto dielettrico

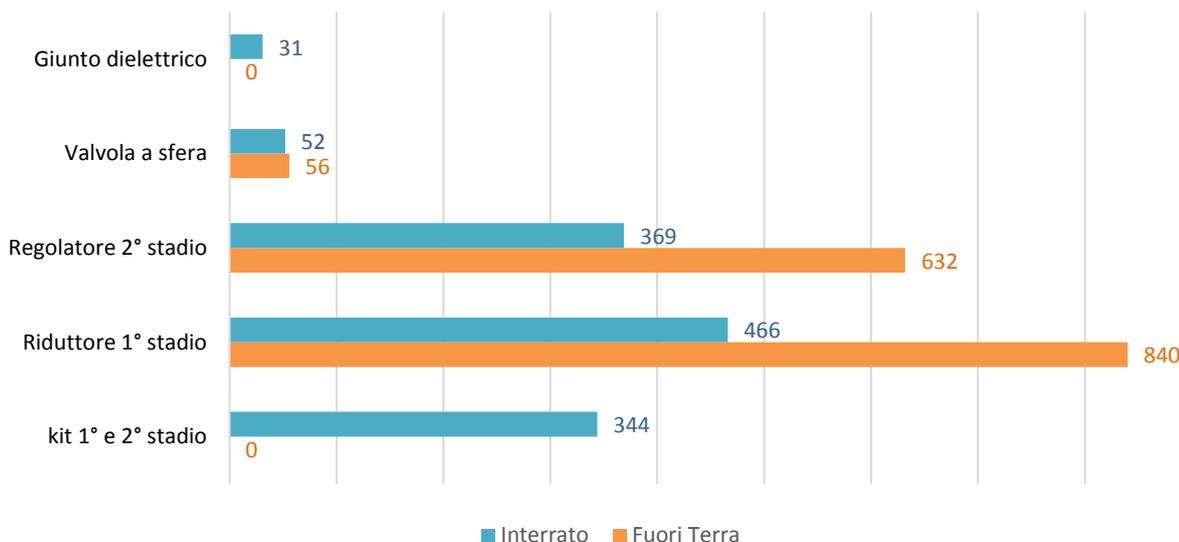


Grafico 11. Analisi degli interventi sul gruppo di regolazione e di riduzione

Gli elementi più sollecitati sono i riduttori ed il regolatore. Quasi il doppio degli interventi risultano essere effettuati sui serbatoi fuori terra, in quanto maggiormente esposti agli agenti atmosferici, quali pioggia, ghiaccio e polveri. Nel complesso risulta essere più soggetto ad attività di intervento il riduttore di 1° stadio sia sui serbatoi fuori terra che su quelli interrati. Nei serbatoi interrati, inoltre, devono essere considerati anche i kit pre-assemblati con regolatore e riduttore.

Di seguito si riporta analisi della relazione caratteristica tra orientamento del serbatoio ed intervento specifico nelle versioni fuori terra ed interrata:

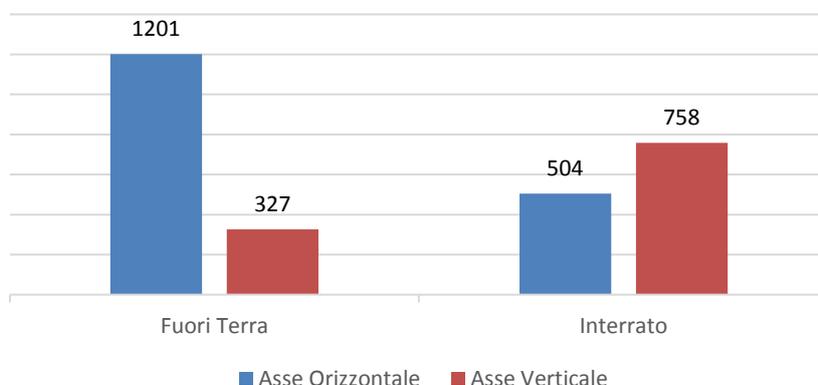


Grafico 12. Interventi sul gruppo di regolazione e riduzione in relazione all'orientamento del serbatoio

4.4.3 Interventi sul sistema di protezione catodica

In questa categoria rientrano tutte le attività di manutenzione del sistema di protezione catodica per i depositi interrati. Dall'analisi dei dati è scaturita un'incidenza maggiore di interventi sulla tipologia ad asse orizzontale rispetto a quella verticale.

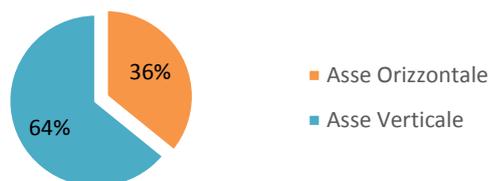


Grafico 13. Interventi su sistema di protezione catodica in depositi interrati

4.4.4 Interventi sugli equipaggiamenti di protezione

In questa analisi rientrano tutti gli interventi effettuati sugli equipaggiamenti di protezione degli accessori di sicurezza e di servizio. Nello specifico si fa riferimento ai “cappellotti” per i depositi fuori terra ed ai “torrini” in polipropilene per quelli interrati.

La manutenzione di questi equipaggiamenti risulta essere molto importante in quanto gli stessi garantiscono il primo sistema di protezione per le parti in pressione, gli accessori.

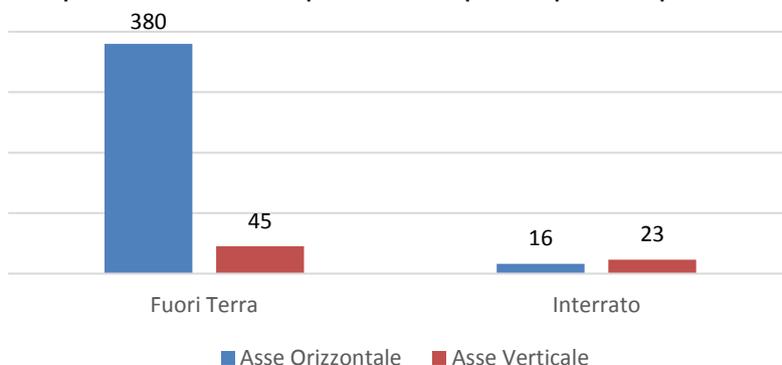


Grafico 14. Interventi su equipaggiamenti di protezione

Il “cappellotto” per i depositi fuori terra, totalmente esposto alle intemperie, è quello più soggetto ad usura ed è pertanto l’equipaggiamento più sostituito.

5. Conclusioni

L’obiettivo del presente elaborato è stato quello di identificare e catalogare i problemi legati alle manutenzioni dei piccoli serbatoi di GPL destinati sia alle utenze domestiche che a quelle industriali. Sono stati ottenuti una serie di casi studio, divisi per ambito e per tipologia, che possono essere di aiuto al lavoro dei manutentori nella gestione delle verifiche periodiche di ispezioni ordinarie e straordinarie.

L’analisi ha evidenziato come sia in netto calo l’attività di installazione di nuovi depositi se confrontata con quella di dismissione. Si evince, inoltre, che tale rapporto sia invertito nei depositi interrati, con una conferma della larga diffusione di questa tipologia.

Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria si concentrano soprattutto nel periodo invernale e riguardano principalmente i depositi ad asse orizzontale nei fuori terra e ad asse verticale negli interrati. Gli interventi di manutenzione riguardano in modo particolare l’indicatore di livello, soggetto ad usura soprattutto il modello con glicerina, ed il manometro del gruppo di servizio con una maggiore incidenza nella tipologia di depositi destinati all’installazione fuori terra nel periodo estivo, dove a causa del clima più caldo, si verifica un aumento della pressione interna dei serbatoi, con una diretta ripercussione sui manometri. Il gruppo di riduzione e di regolazione, in modo particolare il riduttore di 1° stadio e di 2° stadio, sempre per serbatoi i fuori terra, risulta essere soggetto ad una

frequente attività di verifica e controllo legata soprattutto alle condizioni esterne. Trovandosi, infatti, all'esterno a diretto contatto con gli agenti atmosferici risente dell'escursione termica. Il ghiaccio causa il blocco della membrana del regolatore di 2° stadio. Ne deriva, se resta completamente aperta, un'anomala fuoriuscita di gas; viceversa se tutta chiusa, ne impedisce il corretto passaggio con ripercussioni per l'utenza finale. Una forte escursione termica, inoltre, provoca un allentamento dei serraggi degli accessori di sicurezza e di servizio, soprattutto nel tappo di chiusura della valvola di prelievo liquido. Con questa analisi si è voluto creare uno strumento tecnico, un metodo di indagine, implementabile negli anni e nei contenuti in base alle esigenze, che ha lo scopo di fornire un valido supporto, mediante classificazione degli interventi, delle problematiche e delle relative soluzioni, a tutte quelle attività legate ai depositi fissi cilindrici per stoccaggio gpl.

Si ringrazia la Carbone Climatizzazione srl Unipersonale e la CPS srl del medesimo gruppo Carbone di Montalto Uffugo (CS) per la proficua e puntuale collaborazione. Si ringrazia in modo particolare per il supporto tecnico e documentale, mediante accesso al database di attività manutentiva, per la redazione del presente elaborato di ricerca.

6. Bibliografia

- [1] UNI EN 14570:2014 - Attrezzature e accessori per GPL
- [2] UNI EN 7131:2014 - Impianti a GPL per uso domestico e similare non alimentati da rete di distribuzione - Progettazione, installazione e messa in servizio
- [3] UNI EN 14129:2014 - Attrezzature e accessori per GPL – Valvole di sicurezza limitatrici di pressione per recipienti a pressione per GPL
- [4] d.lgs. 81/08 - Testo unico sulla sicurezza sul lavoro
- [5] d.m. 14 maggio 2014 - Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m³
- [6] CPS srl Fascicolo Tecnico PS001. Serbatoi GPL. Montalto Uffugo, 2012, vol.1
- [7] CPS srl Manuale di uso e manutenzione. Serbatoi GPL. Montalto Uffugo, 2016, rev.1

Rivestimento di apparecchiature in acciaio con resine per aumentarne la resistenza alla corrosione

R. Vasile¹, T. Guidi²

¹ Inail - Uot di Pescara

² Libero Professionista

Sommario

Le apparecchiature utilizzate negli impianti chimici devono essere progettate per resistere sia all'azione meccanica della pressione che all'azione chimica della sostanza contenuta. In molti casi non esiste un materiale capace di soddisfare entrambe le esigenze oppure il suo costo risulta esorbitante; la soluzione al problema è pertanto quella di realizzare apparecchiature in acciaio al carbonio, materiale resistente alle azioni meccaniche, e di rivestirne le parti a contatto con il fluido con un materiale compatibile con l'aggressività chimica del fluido stesso.

Pertanto il tempo di vita utile dell'apparecchiatura dipende dalla durata sia del rivestimento, che del suo ancoraggio alla parete dell'attrezzatura.

1. Introduzione

Nel presente studio viene esaminato un caso concreto in cui è stato applicato un rivestimento in resina all'interno di un serbatoio in acciaio contenente salamoia; il rivestimento effettuato utilizzando una resina a base di vinilestere non ha dato risultati soddisfacenti, per cui si è deciso di rimuovere il suddetto rivestimento e di applicarne uno nuovo con resina epoxy vinil che ad oggi sembra dare risultati migliori. Il lavoro analizza le modalità di preparazione della superficie dell'acciaio, il sistema di ancoraggio del rivestimento plastico sulla superficie e la tipologia di rivestimento per il contatto con la salamoia.

L'ancoraggio del rivestimento è fondamentale in quanto eventuali trafilamenti di salamoia a temperatura ambiente provocherebbero una corrosione da 0,5 a 1,26 mm per anno sulla superficie in acciaio, come indicato nella sottostante tabella.

		Acciai inox 304 e 321	Acciai inox 316	Acciaio al carbonio	Bronzo	Ghisa
Rame cianuro saturo	E	2	2	5	5	5
Rame cianuro	+20°	3	2	4	4	4
Rame nitrato 5%	+20°	1	1	4	4	4
Rame nitrato 50%	C	2	2	4	4	4
Rame solfato 5%	+20°	2	2	4	4	4
Rame solfato saturo	E	2	2	4	4	5
Resine ecolofonia	Ta	1	1	3	1	3
Salamoia	Ta	2	2	3	2	3

Tabella 1. Resistenza alla corrosione [1]

Legenda		
1	Eccellente	Materiali che non subiscono variazioni dimensionali essenziali. La velocità di corrosione è inferiore ad una penetrazione di 0,13 mm per anno.
2	Buono	Materiali che vengono attaccati, ma che sono generalmente prescritti dove un certo grado di corrosione può essere tollerato. Velocità di corrosione 0,1 26-0,5 mm per anno.
3	Scarsa resistenza	Materiali che normalmente non sono considerati adatti per la maggior parte degli impieghi negli impianti chimici. Velocità di corrosione 0,5-1,26 mm per anno.
4	Non raccomandato	Materiali con velocità di corrosione troppo alta per poter essere presi in considerazione. Velocità di corrosione superiore a 1,26 mm per anno.
5	Mancano informazioni	
E		Ebollizione
C		Caldo
Ta		Temperatura ambiente

Tabella 2. Legenda Tab. 1 [1]

2. Trattamento di preparazione della superficie (sabbatura)

La sabbatura è un procedimento che consiste nella rimozione della parte più superficiale di uno specifico materiale mediante un getto di abrasivo metallico o non metallico (naturale o sintetico). E' il processo di pulizia delle superfici più efficace in assoluto, in grado di rimuovere sostanze estranee come calamina, scaglie di laminazione, ossidi metallici e residui di vecchie pitture, in modo tale da rendere le superfici da trattare idonee a ricevere l'applicazione di un trattamento/rivestimento protettivo.

Gli Standard Internazionali a cui attenersi nelle operazioni di sabbatura con impianti manuali a getto libero o automatici sono rappresentati dalle norme ISO – SSPC – NACE e nel caso specifico è stata applicata la UNI EN ISO 8501-1:2012 [4].

La norma UNI EN ISO 8501-1:2012 per preparazione della superficie intende il complesso di operazioni, adeguate al tipo di supporto e di prodotto da applicare, atte a garantire la maggiore durata ed efficacia.

Le condizioni iniziali delle superfici sono definite in base agli standard fotografici specificati e sono previste le seguenti classi [Fig.1]:

A = Superfici abbondantemente ricoperte da calamina aderente e con poca ruggine;

B = Superfici in cui inizia il processo di corrosione e da cui inizia a staccarsi la calamina in scaglie;

C = Superfici sulle quali la calamina si è staccata completamente o da cui può essere rimossa, ma con piccole vaiolature visibili ad occhio nudo;

D = Superfici da cui la calamina si è staccata completamente ma con considerevoli vaiolature visibili a occhio nudo.

Il grado di preparazione della superficie è designato dalle lettere "Sa" (Sabbatura), "St" (Pulitura meccanica) e "HB" (Hydroblasted) indicante il metodo di pulitura applicato e da un numero indicante il grado di pulitura.

I gradi di preparazione sono definiti in base agli standard fotografici e in merito alla sabbatura sono stati definiti tre gradi [Fig.1]:

Sabbatura commerciale = Sa 2 - da impiegare nella generalità dei casi, in condizioni ambientali non corrosive.

Sabbatura a metallo quasi bianco = Sa 2,5 - da impiegare in condizioni ambientali mediamente corrosive;

Sabbatura a metallo bianco = Sa 3 - da impiegare nelle più severe condizioni ambientali molto corrosive.

La sabbiatura richiesta normalmente per le apparecchiature è di grado SA 2,5 conformemente alla norma UNI EN ISO 8501-01:2012, cioè deve risultare completamente rimossa calamina, ruggine, rivestimenti e materiali estranei. Ogni traccia residua di contaminazione deve presentarsi solo come macchia leggera in forma di punti o strisce. Le operazioni di sabbiatura devono essere eseguite solo se la temperatura del supporto è superiore al punto di rugiada di non meno di 5°C. Il confronto con gli standard fotografici dovrà essere effettuato entro 2 ore dalla sabbiatura. Eventuali sostanze estranee, nocive alla pitturazione, quali olio, grasso, terriccio, composti per taglio, residui di saldature o altri contaminanti, devono essere eliminati con idonei sistemi prima delle operazioni di preparazione. Tutte le eventuali sbavature dovranno essere rimosse e gli spigoli vivi opportunamente raccordati. Il controllo delle superfici da verniciare deve essere eseguito sia al termine della relativa operazione di preparazione (spazzolatura, sabbiatura, ecc.) sia immediatamente prima dell'applicazione della prima mano di pittura. In entrambi i casi il controllo deve essere eseguito confrontando visivamente le superfici in esame con la foto campione, relativo al grado di preparazione da conseguire. Il controllo deve essere eseguito sul 100% delle superfici, convenientemente illuminate sia con luce naturale sia con luce artificiale, appoggiando la foto campione sulle superfici da esaminare. Il controllo si intende concluso con esito favorevole se in nessuna parte si riscontrano condizioni peggiori di quelle stabilite. Il controllo da eseguire immediatamente prima dell'applicazione della prima mano di pittura deve inoltre accertare che le superfici in esame siano completamente asciutte, esenti da polvere e prive di qualunque traccia di grasso, olio, sporcizia. A seguito del trattamento di sabbiatura la superficie dell'apparecchiatura deve essere verniciata immediatamente, per esempio entro al massimo tre 3 ore se l'ambiente ha una umidità superiore al 70%.

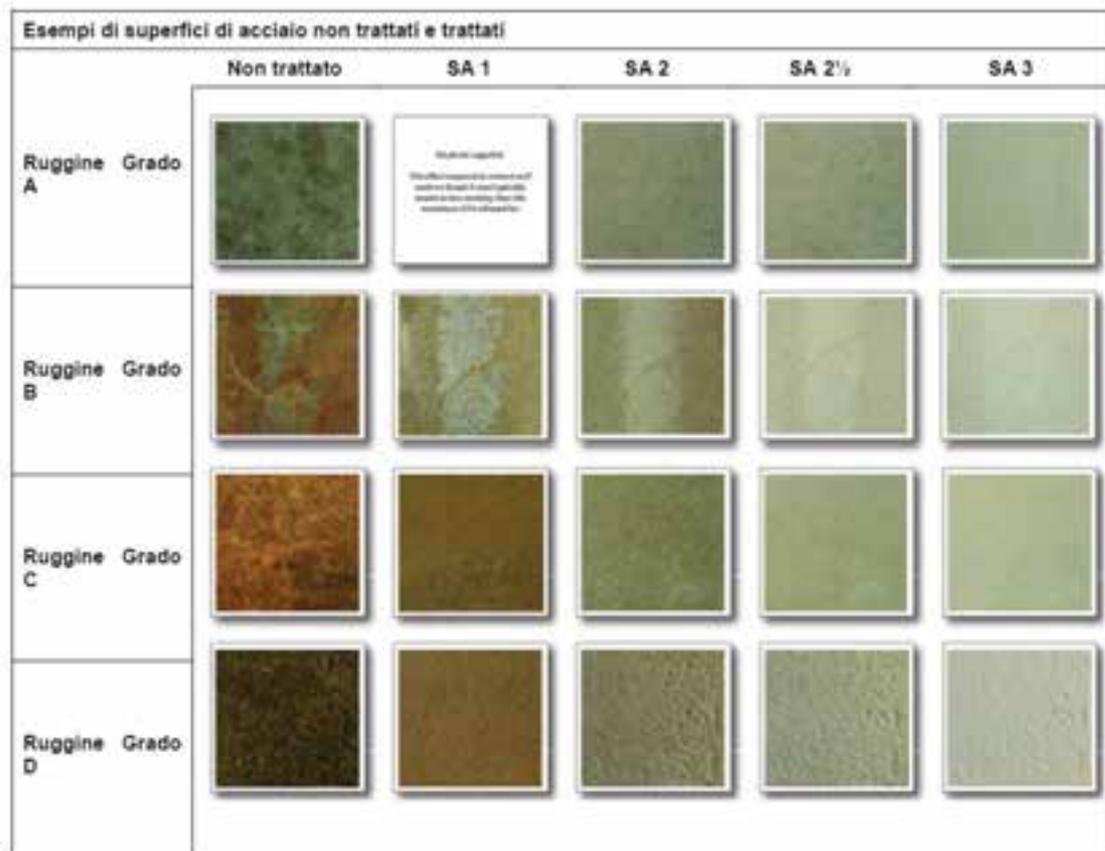


Figura 1. I quattro gradi di “arrugginimento” delle superfici d’acciaio secondo la norma UNI EN ISO 8501-01:2012 e la situazione dopo trattamento di sabbiatura [2]

3. Trattamento di resinatura

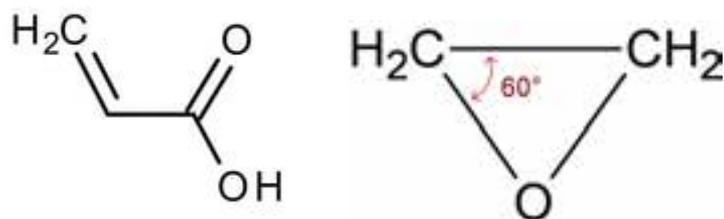
Nel caso di apparecchi industriali l'applicazione del rivestimento protettivo deve essere fatta manualmente e sul posto, l'applicazione può essere effettuata con o senza rinforzi in fibra di vetro. A seguito della reazione chimica post applicazione si forma una resina termoindurente.

La specifica di applicazione può prevedere l'inserimento di bende in fibra di vetro, al fine di aumentare la resistenza meccanica del rivestimento per impedirne il distacco. Le bende si presentano in rotoli. Il procedimento consiste nel realizzare un primo strato di resina mediante più passate a spruzzo, sulla resina bagnata viene fatto aderire lo strato di fibra di vetro, successivamente si realizza il secondo strato di resina, sempre con più passate a spruzzo, facendolo penetrare nello stato di fibra di vetro. In questo modo si realizza una struttura compatta come quella visibile nell'immagine che segue (Foto 2).

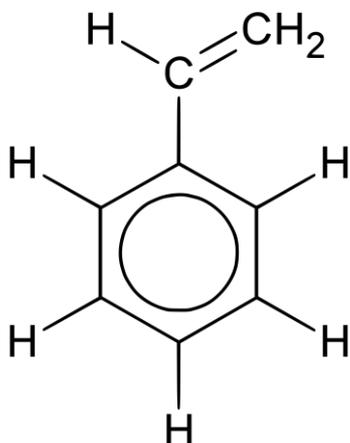
4. Confronto fra due resine simili

Le resine utilizzate nel caso in esame erano dichiarate in partenza, dalle rispettive case produttrici, con le medesime caratteristiche di resistenza chimica.

Il primo materiale, utilizzato in fase di realizzazione dell'apparecchiatura, era a base di vinilestere rinforzata con fibra di vetro. Il vinilestere o estere vinilico è una resina prodotta per esterificazione di un prepolimero epossido con un acido carbossilico insaturo come l'acido acrilico o l'acido metacrilico.

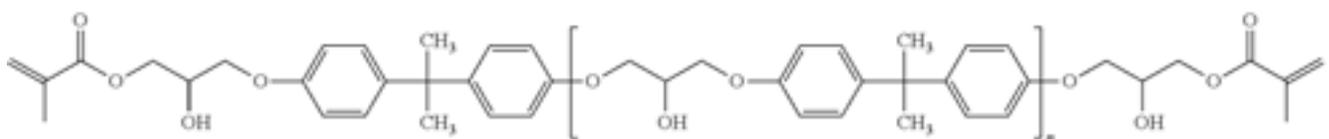
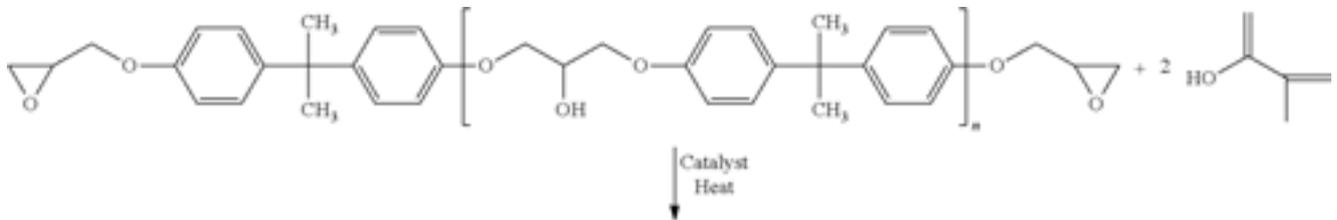
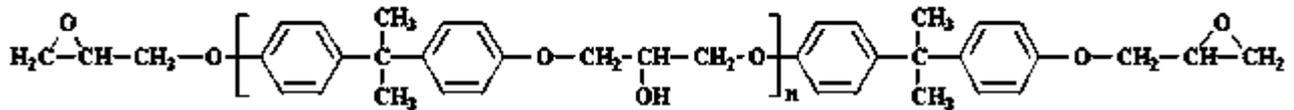
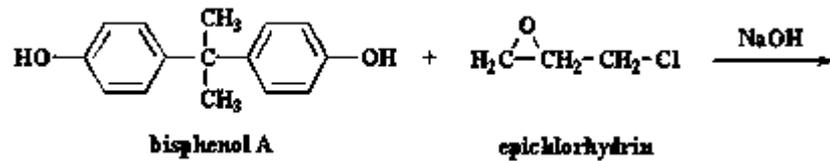


Il prodotto di reazione è un prepolimero telechelico che contiene un doppio legame nella catena chimica. Questo prepolimero viene in seguito disciolto in un solvente vinilico come lo stirene a una concentrazione compresa tra il 35% e il 45% in massa.



La reazione avviene per polimerizzazione radicalica nel corso della quale i doppi legami degli stireni reagiscono tra loro e con i doppi legami di ogni prepolimero.

Il materiale utilizzato nella seconda resinatura è un epoxy vinil estere a base di bisfenolo A rinforzato con fibra di vetro.



Confrontando le caratteristiche tecniche dei due materiali si evidenzia che entrambi resistono alle condizioni operative dell'apparecchiatura. L'unica differenza rilevata sulle schede delle case produttrici era la temperatura massima di esercizio, pari a 85°C per il primo materiale, contro i 100°C per il secondo materiale. I risultati sul campo hanno evidenziato che il primo materiale ha dato luogo a distacchi localizzati che hanno prodotto delle corrosioni localizzate sul mantello di acciaio. Si riporta di seguito l'immagine (Foto 1) della situazione dopo dieci anni dalla resinatura con il primo prodotto. Per il secondo prodotto non vi è ancora documentazione fotografica disponibile, ma è stato verificato con accurate osservazioni visive che il rivestimento è ancora ben aderente a distanza di tre anni dalla sua applicazione.



Foto 1. [3]

Di seguito si riporta un'immagine (Foto 2) di come si presentava l'apparecchiatura appena dopo la resinatura con il secondo prodotto effettuata nel mese di gennaio 2015.



Foto 2. [3]

Si evidenzia che il confronto tra le due resine è stato effettuato su periodi di tempo differenti, poiché non si dispone di informazioni oggettive sulla situazione della prima resina a tre anni dalla sua applicazione, in ogni caso, a memoria del personale addetto all'attrezzatura, la prima resina aveva manifestato problemi di distacchi limitati, tali da non compromettere la continuità del rivestimento, già a distanza di tre/quattro anni.

5. Conclusioni

Da quanto sopra riportato si evince che la scelta dei rivestimenti protettivi è strettamente subordinata al fluido con cui devono entrare in contatto e deve essere condotta, non solo rispetto a quanto riportato nelle schede informative dei fornitori, ma anche e soprattutto riferendosi alle esperienze maturate sul campo da parte degli utilizzatori, poiché ad oggi non tutti i casi sono tabellati in letteratura.

6. Bibliografia

- [1] Tabelle di corrosione Tempco;
- [2] Scheda informativa Valspar Industrial mix 1/2017;
- [3] Gentile concessione SCB;
- [4] UNI EN ISO 8501-1:2012.

Studio del sistema di sicurezza, secondo il d.m. 329/04, in un impianto di cogenerazione con caldaia a recupero fumi installata in batteria ad un generatore di vapore esistente

M. De Musso¹, A. De Musso²

¹ Inail - Uot di Bari

² Libero professionista

Sommario

Mai come oggi, alla luce di un continuo aumento del costo dell'energia elettrica e termica e della competitività globale, diventa prioritario per le aziende porsi l'obiettivo di ridurre i costi di produzione.

Nel presente lavoro si vuol descrivere le caratteristiche tecniche di un impianto di cogenerazione basato su motore endotermico di potenza elettrica di 1200 KW, alimentato a gas metano, e direttamente accoppiato ad un generatore elettrico sincrono trifase con sistema di controllo remoto.

L'impianto, oltre alla produzione di energia elettrica, recupera energia termica sotto forma di acqua calda e vapore prodotto da un generatore a recupero fumi alla pressione di 10 bar da utilizzare in batteria ad un generatore di vapore già esistente in stabilimento.

In particolare, per i due generatori di vapore in batteria, il primo classificato come insieme a pressione mentre il secondo come attrezzatura a pressione, lo studio vuol evidenziare le misure di sicurezza, protezione e controllo da adottare, ai fini dell'applicazione del d.m. 1/12/2004 n. 329, in fase di esercizio e adeguate ad ottenere l'esonero dalla supervisione continua del conduttore fino a 72h.

1. Introduzione

Per cogenerazione si intende la produzione combinata di energia elettrica ed energia termica. Queste due forme di energia sono generate in un unico impianto. I sistemi di cogenerazione vengono anche detti CHP, dall'acronimo inglese Combined Heat and Power.

Di solito energia elettrica e termica sono prodotte separatamente. Per generare l'energia elettrica si utilizzano centrali termoelettriche, che scaricano nell'ambiente energia termica a bassa temperatura, mentre per produrre energia termica, si utilizzano le centrali termiche che, con i generatori di calore, trasformano l'energia del combustibile in energia termica. Entrambe le centrali sono dotate singolarmente di apparecchiature di sicurezza e controllo prescritte dalle rispettive normative.

Pertanto se un'azienda ha l'esigenza, contemporaneamente, di energia elettrica ed energia termica, anziché acquistare l'energia elettrica dalla rete nazionale e installare una caldaia, può considerare di realizzare un sistema, che produca sia energia elettrica che energia termica cioè un impianto di cogenerazione. Chiaramente questo impianto renderà un risparmio energetico determinato dal minor consumo di combustibile.

Gli impianti di cogenerazione nascono, infatti, dal tentativo di sfruttare il calore disperso da un impianto di produzione di energia elettrica, dispersione che è innata nel processo stesso di produzione di energia elettrica.

Pertanto se un impianto costituito da un motore a combustione interna, viene alimentato a gas metano o gasolio, e ad esso si collega un generatore elettrico sincrono trifase, il calore prodotto nel motore attraverso un ciclo termodinamico si converte prima in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. Però, per il - *secondo principio della*

termodinamica - non tutto il calore può essere trasformato in lavoro in quanto una parte deve necessariamente essere ceduta o dissipata ad un'altra sorgente, per esempio, all'ambiente circostante per consentire il funzionamento del sistema.

Quindi il calore prodotto dal motore a combustione interna durante il suo funzionamento - combustione all'interno dei cilindri, riscaldamento dell'olio di lubrificazione, scarico dei prodotti della combustione - normalmente è disperso nell'ambiente; con la cogenerazione tale calore viene in gran parte recuperato e convertito a sua volta in energia termica attraverso l'utilizzo dei **generatori di vapore o degli scambiatori di calore a recupero fumi**.

Il presente documento ha lo scopo di descrivere le caratteristiche tecniche di un medio impianto di cogenerazione, da 1,2 MWe, da realizzare presso lo stabilimento della Morando SPA di Molfetta che è già dotato di un generatore di vapore e di descrivere le misure di sicurezza, protezione e controllo da adottare in fase di esercizio in batteria.

2. Descrizione dei componenti dell'impianto di cogenerazione.

L'impianto di cogenerazione oggetto di studio è stato progettato per soddisfare i bisogni energetici di uno stabilimento produttivo di mangimi per animali da compagnia (cani e gatti) della ditta Morando SpA – Molfetta – in modo da recuperare, dal gas esausto, energia termica sotto forma di vapore a 10 bar e, dal blocco camicie, acqua calda demineralizzata per l'alimentazione del generatore di vapore.

L'impianto preso in esame è costituito da un gruppo elettrogeno da 1.200 kWe, installato in un cassone metallico insonorizzato dotato di ventilazione forzata e abbattimento acustico (fig. 1). Nello stesso cassone viene installata la sala quadri, dove viene collocato il quadro comandi e controllo del gruppo e il quadro di potenza per il sincronismo; all'esterno e sul tetto del cassone è prevista l'installazione di un generatore di vapore a recupero fumi, il trasformatore elevatore di potenza ed il sistema di raffreddamento, con radiatore dissipativo, che interviene in caso di emergenza del calore prodotto dal circuito acqua e olio motore [1].



Figura 1. Immagine di un impianto di cogenerazione da 1.200 kWe compattato in container.

Nella fig. 2 è riportato uno schema a blocchi del funzionamento di un impianto di cogenerazione.

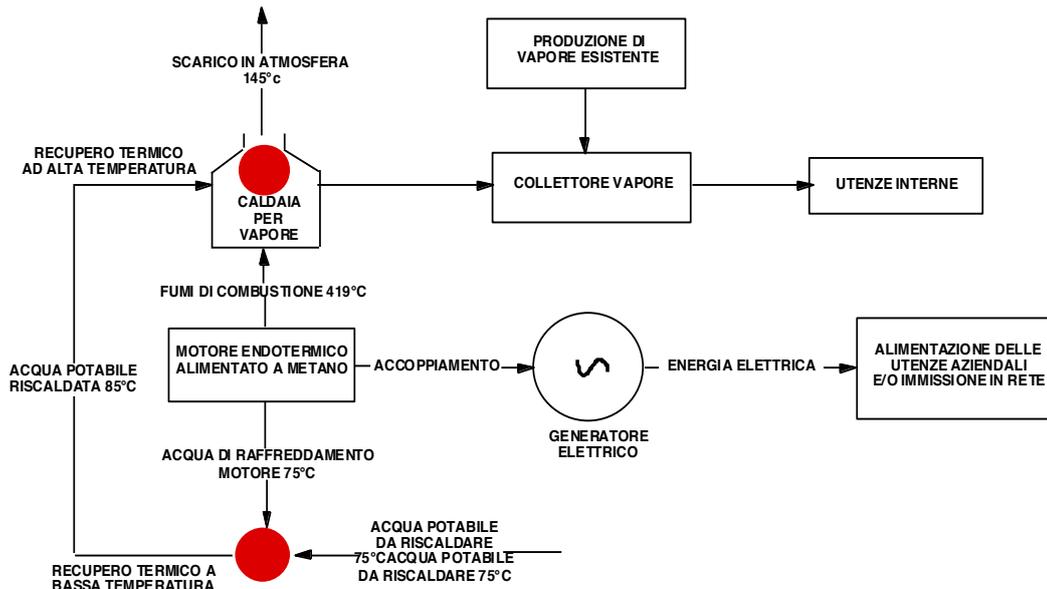


Figura 2. Schema a blocchi di produzione energia dal calore residuo a bassa ed alta temperatura

Le prestazioni attese dall'impianto ed il bilancio energetico del gruppo di cogenerazione in esame è riportato in Fig. 3.

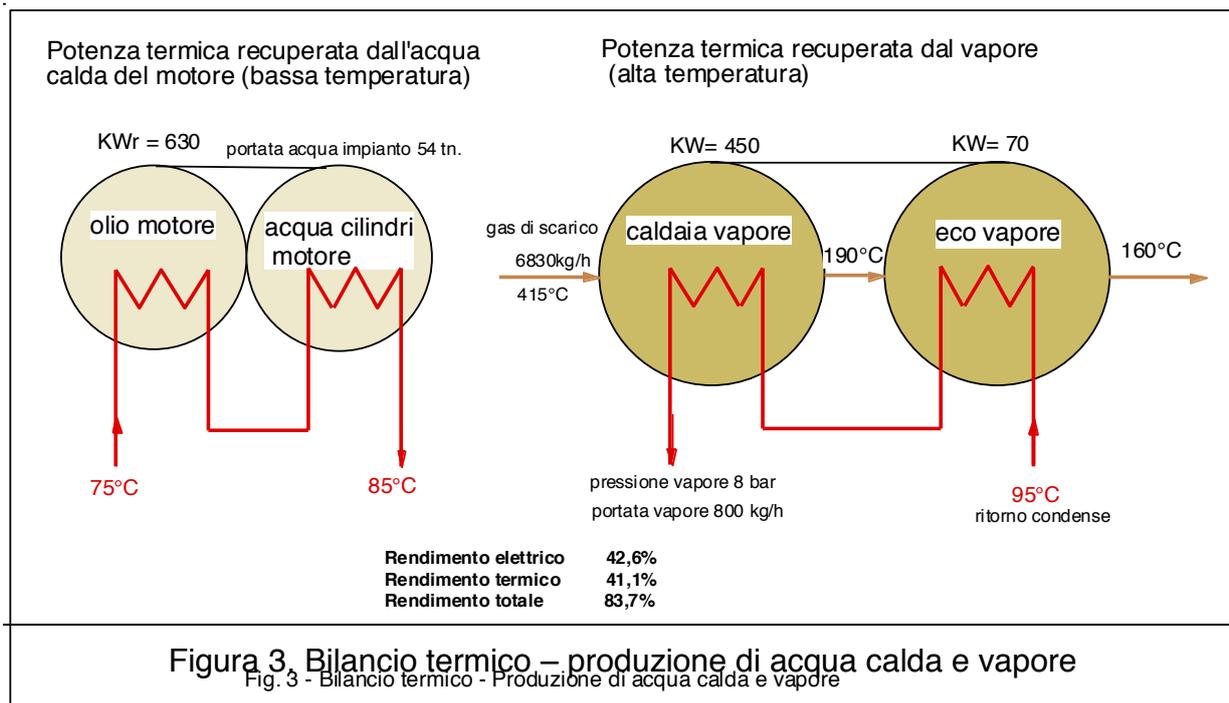


Figura 3. Bilancio termico - produzione di acqua calda e vapore

2.1 Motore endotermico a gas metano

Il gruppo elettrogeno è costituito da un motore endotermico, alimentato a gas metano a ciclo Otto, quattro tempi, con combustione magra, raffreddato ad acqua con intercooler e collettore gas di scarico a secco conforme alle norme CE. Il sistema di accensione ad alta tensione è controllato con microprocessore con distribuzione a bassa tensione, candele di accensione ad alta efficienza. Controllo e regolazione elettronica della miscela a mezzo temperatura della camera di combustione e della potenza/velocità, elaborate dal sistema del controllo motore. Il motore è accoppiato ad un alternatore sincrono trifase progettato per il funzionamento in parallelo con la rete.

L'impianto è dotato anche di silenziatore gas di scarico del tipo assorbitivo e di un catalizzatore ossidante per il contenimento degli ossidi di carbonio e degli idrocarburi incombusti. E' realizzato un gruppo monoblocco per il recupero del calore disponibile dal raffreddamento del motore, visto come contributo delle camicie motore, olio di lubrificazione e primo stadio intercooler completo di scambiatore di calore a piastre acqua di raffreddamento motore e di tutti gli accessori di regolazione e controllo di legge. In caso di emergenza (mancanza recupero termico lato utenza) il calore viene dissipato attraverso un sistema di raffreddamento installato all'esterno.

2.2 Descrizione dell'insieme generatore di vapore

La ditta Morando S.P.A., per la sua attività nello stabilimento di Molfetta, è già dotata di una centrale termica in cui è installato un generatore di vapore del tipo cilindrico orizzontale della ditta Nova Sigma SpA, avente i seguenti dati: pressione di progetto 12 bar, e di esercizio 8 bar, temperatura di progetto 191°C, producibilità al carico massimo continuo di 15.000 Kg/h di vapore saturo, superficie di riscaldamento di 305 mq, potenzialità max focolare di 10.465 Kw/h costruito in accordo alla Direttiva 97/23/CE, ed omologato da Ispesl Dipartimento di Bari.

L'installazione del nuovo impianto di cogenerazione, prevede un recupero termico dai gas di scarico del motore endotermico per produrre vapore mediante un generatore di vapore a recupero fumi da collegare in batteria con l'impianto esistente. Il generatore scelto, viene prodotto della Siat Italia Srl, è del tipo RECOPACK FT ed è costruito secondo la Direttiva 2014/68/UE e certificato come insieme. Trattasi di un generatore di vapore a grande volume d'acqua, del tipo a recupero da fumi e, quindi, a sorgente diversa dal fuoco [2] ed è rappresentato in Fig. 4.



Figura 4. Immagine del generatore di vapore Siat Italia Srl tipo Recopack

E' progettato per i limiti ammissibili di 10 bar e TS 175°C, ha una producibilità complessiva di 800 kg/h di vapore ed una potenza termica di 527 kw.

I rischi individuati sia rispetto alle attrezzature ricevitrici che al generatore esistente sono: sovrappressione, mancanza d'acqua, eccesso d'acqua, surriscaldamento, avaria valvola regolazione fumi, smaltimento del calore dopo shut-down, qualità dell'acqua.

3. Descrizione degli accessori di controllo e sicurezza a corredo del generatore

3.1 Disposizioni legislative

Come già riportato in precedenza, il generatore di vapore a corredo del gruppo di cogenerazione è da considerarsi del tipo a sorgente termica diversa dal fuoco cioè la produzione di vapore deriva dal recupero del calore dei gas di scarico di un motore endotermico e non da una combustione generata da un bruciatore a gas. Questa

condizione escluderebbe il generatore dall'applicazione della specifica tecnica UNI/TS 11325/3-2018 e dalla sorveglianza da parte di un conduttore in possesso di un certificato di abilitazione e renderebbe il generatore esonerato dall'applicazione di alcuni accessori di sicurezza. Il generatore di vapore in esame è comunque soggetto a pericolo di surriscaldamento delle membrature a pressione, perché è possibile superare la temperatura di progetto e, quindi, per la Specifica Tecnica UNI/TS 11325-3 "Attrezzature a pressione – Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi a pressione – Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata" [3] che definisce le modalità di sorveglianza per apparecchiature con focolare a rischio di surriscaldamento, deve essere necessariamente condotto da conduttore abilitato e dotato degli opportuni accessori di sicurezza.

La Direttiva PED 2014/68/UE del 15/5/2014 [4] ed il d.m. 01/12/2004 n. 329 [5] lasciano al fabbricante del generatore di vapore la scelta della strumentazione atta ad assicurare il soddisfacimento dei Requisiti Essenziali di Sicurezza contenuti nell'Allegato I della PED; più in particolare, i generatori di vapore sono soggetti a requisiti aggiuntivi che tengono in conto i particolari rischi derivanti dal pericolo di surriscaldamento (Par. 5 dell'Allegato I). Di conseguenza la valutazione del tipo e il dimensionamento dei dispositivi di protezione, costituiti da accessori di sicurezza ed accessori di controllo, deve garantire il non superamento dei limiti ammissibili dell'insieme tenuto conto delle peculiarità dello stesso e delle sue varie condizioni di esercizio. Nella valutazione di tali condizioni, il fabbricante, può decidere di permettere il funzionamento del generatore senza supervisione continua da parte di un conduttore abilitato (ciò è supportato anche dal contenuto delle norme armonizzate sui generatori di vapore a tubi da fumo). Infatti, la norma UNI EN 12953-6 "Caldaie a tubi da fumo – Parte 6: Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia" [6] specifica i requisiti per le apparecchiature di sicurezza da porre a corredo dei generatori a tubi da fumo. In particolare nell'appendice C – a carattere informativo – della norma, sono indicate le condizioni da rispettare in termini di prove, controlli e manutenzione dei dispositivi per un esercizio senza supervisione continua. La scelta finale non dovrebbe essere soggettiva ma basata su un'accurata analisi dei rischi specifica e su una progettazione del sistema di sicurezza. La guideline 8/15 richiede che il generatore sia provvisto di accessori di sicurezza contro il superamento dei limiti di pressione, temperatura e livello dell'acqua, di un monitoraggio capace di mantenere automaticamente il generatore entro i limiti ammissibili (regolazione automatica) di indicatori ed allarmi che vengono attivati all'origine di un'anomalia, di una funzione di blocco per assenza di energia a parti del generatore (esempio alimentazione dell'acqua), una protezione riguardo parametri della qualità dell'acqua la cui rapida variazione porterebbe a situazioni pericolose nel periodo di mancanza di vigilanza del generatore. La UNI EN 12953 parte 7 "Caldaie a tubi da fumo – Parte 7: Requisiti degli impianti di combustione della caldaia per combustibili liquidi e gassosi" [7] per alimentazioni a gas metano, prevede anche che la linea di mandata del combustibile sia dotata di dispositivo a scatto per l'alimentazione principale (azionata manualmente, mediante telecomando o interruttore di emergenza), di dispositivi di controllo e sicurezza automatici per sovrappressioni consistenti in una valvola d'intercettazione e di sicurezza più una valvola di sovrappressione, le quali svolgano automaticamente anche le funzioni di sicurezza nelle fasi di avviamento ed esercizio. Dopo il blocco, deve essere possibile riavviare il generatore solo manualmente dalla sala caldaia.

3.2 Accessori in dotazione al generatore a recupero fumi in esame

Il generatore in esame, prodotto della Siat Italia Srl, da installare presso la ditta Morando SPA, ha il corpo caldaia fabbricato in accordo al codice VSG mentre l'insieme del generatore di vapore è realizzato in conformità allo standard EN 12953-6:11. Perciò è

stata di grande importanza l'analisi dei rischi e la progettazione del sistema di sicurezza eseguita a monte della costruzione della caldaia per dotare il generatore di vapore di tutti gli accessori descritti in seguito per il rilievo di tutte le possibili segnalazioni di allarme e blocco che possono verificarsi. La dotazione degli accessori di sicurezza di cui viene corredato il generatore tiene conto del funzionamento con esonero dalla supervisione continua del conduttore fino a 72h. I rischi individuati per la fase di esercizio, in considerazione anche del funzionamento in parallelo con il generatore già esistente, sono dovuti a surriscaldamento, mancanza d'acqua, eccesso d'acqua, smaltimento del calore dopo un blocco istantaneo e scoppio. Il generatore esistente è alimentato a gas metano ed è dotato di valvola di blocco combustibile e del controllo della fiamma essendo il generatore munito di bruciatore dotato di un sistema di regolazione della portata di gas e dell'aria comburente mediante un inverte montato sul ventilatore di aspirazione. Inoltre, l'installazione è già dotata di un impianto di trattamento dell'acqua di alimento mediante un sistema ad osmosi inversa i cui parametri di alimento e di esercizio, per la pressione di bollo di 12 bar, sono verificati in accordo ai valori prescritti dal costruttore del generatore e riportati nel manuale d'uso e manutenzione ed alle norme nazionali. Dal P&I di Fig. 5 si possono notare tutti i dispositivi di protezione installati sul generatore a recupero fumi della Siat Italia Srl. In particolare l'insieme è dotato di:

- un manometro (**PI- 203**) per l'indicazione visiva della pressione all'interno del generatore;
- un trasmettitore di pressione (**PT- 204**) che trasmette al PLC nel quadro elettrico, con un segnale 4-20 mA, la misura della pressione in caldaia e consente al PLC di comandare la valvola fumi e la valvola di presa vapore tramite regolatori PID;

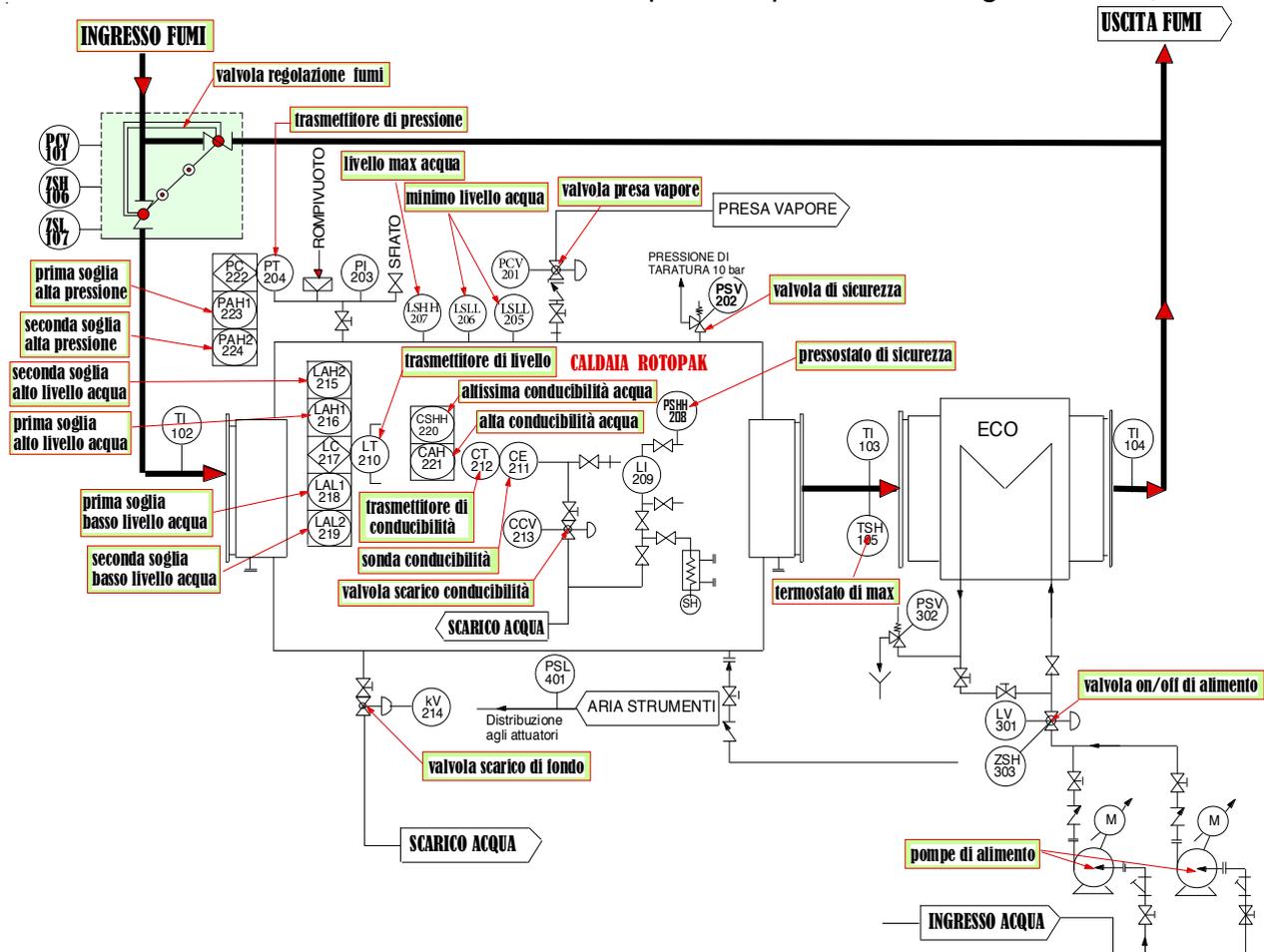


Figura 5. P&I degli accessori dell'insieme generatore di vapore

- un trasmettitore di pressione per la prima soglia di allarme alta pressione (**PAH1- 223**), rilevata dal software, in cui viene generata una segnalazione su touch screen la quale scompare quando la pressione scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un trasmettitore di pressione per la seconda soglia di allarme alta pressione (**PAH2 - 224**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione luminosa. I fumi tornano in caldaia quando la pressione scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un pressostato di sicurezza (**PSHH-208**) che interviene in caso di superamento della soglia di blocco del sistema con segnalazione visiva ed acustica. Il consenso al riavvio si ha dopo che, scesa la pressione sotto la soglia di disattivazione del blocco, l'operatore effettua il reset manuale tramite il pulsante sul fronte quadro;
- valvola di sicurezza (**PSV-202**) che provvede a scaricare meccanicamente la pressione quando si supera la soglia di taratura della valvola;
- di una valvola di regolazione fumi (**PCV-101;ZSH-106;ZSL-107**) che provvede ad indirizzare i fumi in caldaia o a camino in relazione alla pressione in caldaia. Viene comandata, tramite un regolatore PID, da un setpoint impostato nel PLC e restituisce i segnali di posizione grazie ai finecorsa di valvola aperta e chiusa;
- una valvola di presa vapore (**PCV-201**) che provvede ad aprire la tubazione di uscita vapore in relazione alla pressione in caldaia. Viene comandata, tramite un regolatore PID, da un setpoint impostato nel PLC.
- un indicatore di livello visivo (**LI-209**) che permette l'indicazione visiva del livello dell'acqua in caldaia:
- un trasmettitore di livello (**LT-210**) che trasmette al PLC nel quadro elettrico, con un segnale 4-20mA, la misura del livello dell'acqua in caldaia e consente al PLC di comandare le pompe di alimento, tramite un regolatore PID, e la valvola ON/OFF di alimento;
- di una prima soglia di allarme di alto livello dell'acqua in caldaia (**LAH1-216**), rilevata dal software, che ferma le pompe di alimento dell'acqua e chiude la valvola pneumatica di ingresso acqua in caldaia con segnalazione su touch screen. Le pompe si riavviano e la valvola si riapre quando il livello scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme.
- una seconda soglia di allarme di alto livello dell'acqua in caldaia (**LAH2-215**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass, ferma le pompe di alimento dell'acqua e chiude la valvola pneumatica di ingresso acqua in caldaia con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia, le pompe si riavviano e la valvola si riapre quando il livello scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- di un livellostato (**LSHH-207**) per il massimo livello dell'acqua in caldaia che manda i fumi in bypass, ferma le pompe di alimento dell'acqua e chiude la valvola pneumatica di ingresso acqua in caldaia con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia, le pompe si riavviano e la valvola si riapre quando il livello scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- una prima soglia di allarme di basso livello dell'acqua in caldaia (**LAL1-218**), rilevata dal software, in cui viene generata una segnalazione su touch screen. La segnalazione scompare quando il livello sale sopra la soglia di disattivazione dell'allarme;
- di una seconda soglia di allarme di basso livello dell'acqua in caldaia (**LAL2-219**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia quando il livello sale sopra la soglia di disattivazione dell'allarme.
- un livellostato di sicurezza per il minimo livello dell'acqua in caldaia (**LSLL A- B 205-206**) che in caso di superamento della soglia interviene il blocco del sistema con

segnalazione visiva e acustica. Il consenso al riavvio c'è solo dopo che, ripristinato il livello dell'acqua sopra la soglia di disattivazione del blocco, l'operatore effettua il reset manuale tramite il pulsante sul fronte quadro;

- di una valvola di scarico fondo (**KV-214**) che si apre a intervalli regolari, impostabili a PLC, per eliminare le sostanze che si depositano sul fondo della caldaia;
- una valvola ON/OFF di alimento (**LV-301; ZSH-303**) che si apre quando la caldaia necessita di reintegrare l'acqua e comunica, tramite finecorsa, lo stato di valvola aperta al PLC in modo da far partire le pompe. Quando è chiusa svolge la funzione di anti allagamento;
- due pompe di alimento che provvedono a reintegrare l'acqua in caldaia. Sono comandate, tramite un regolatore PID, da un setpoint impostato nel PLC;
- una sonda di conducibilità (**CE-211**) che provvede a leggere la conducibilità dell'acqua in caldaia;
- un trasmettitore di conducibilità (**CT-212**) che provvede a trasformare il segnale proveniente dalla sonda di conducibilità in un segnale 4-20mA acquisito dal PLC che poi comanda la valvola di scarico conducibilità;
- una soglia di allarme alta conducibilità acqua (**CAH-221**), rilevata dal software, che apre la valvola di scarico conducibilità con segnalazione su touch screen. La valvola si chiude quando il valore della conducibilità dell'acqua scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- una soglia di allarme di altissima conducibilità acqua (**CSHH-220**), rilevata dal software, che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia quando la conducibilità scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- una valvola di scarico conducibilità (**CCV-213**) che si apre quando la conducibilità dell'acqua supera la soglia impostata nel PLC e provvede ad abbassare il valore di conducibilità scaricando l'acqua di caldaia a livello superficiale favorendo il ricambio di acqua;
- un termometro (**TI-103**) che serve a leggere l'indicazione visiva della temperatura dei fumi allo scarico;
- una soglia di allarme - termostato di massima temperatura - uscita fumi da ECO (**TSH-105**) che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia quando la temperatura scende sotto la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un allarme di minimo livello acqua condense - Contatto da livello serbatoio condense - segnala il bassissimo livello del serbatoio delle condense, ferma le pompe di alimento dell'acqua e chiude l'elettrovalvola di ingresso acqua in caldaia con segnalazione visiva. Le pompe si riavviano e la valvola si riapre quando il livello sale sopra la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un allarme con pressostato per la minima pressione aria compressa (**PSLA**) che manda i fumi in bypass con segnalazione su touch screen e segnalazione visiva. I fumi tornano in caldaia quando la pressione sale sopra la soglia di disattivazione dell'allarme;
- un quadro elettrico di controllo che provvede a controllare e comandare, grazie al PLC e alle logiche cablate, tutti i dispositivi montati sulla caldaia garantendo il funzionamento automatico e la sicurezza di tutto il sistema.

3.3 Supervisione e telecontrollo

Oltre a tutti gli accessori descritti in precedenza per il funzionamento del generatore a recupero, l'insieme del gruppo di cogenerazione è dotato di sistema di controllo e

supervisione del motore a gas che raccoglie in un'unica unità tutte le più importanti funzioni del motore a gas e dei suoi ausiliari, compreso il generatore a recupero. Il terminale ha un video touch intelligente che, tramite un software, permette di navigare con facilità fra le varie maschere per operare sul gruppo stesso. Ogni maschera mostra la striscia di stato in basso con le più importanti informazioni sullo stato del gruppo. Tutti i controlli, le funzioni di servizio e controllo sono facilmente utilizzabili con un breve corso di istruzione del personale abilitato. L'unità operativa può essere posta vicino al gruppo oppure a distanza nei quadri di controllo. Il software permette di attivare un quaderno operativo elettronico del sistema che memorizza tutti i messaggi operativi e i cambi di operazioni all'esatto momento sino a 500 eventi, consentendo analisi veloci e dettagliate del comportamento del gruppo di cogenerazione, di avere una funzione storica e diagnostica dei controlli. Tutte le informazioni e modalità di operazione per la normale operatività sono chiaramente indicate in una maschera "Controllo Manuale". La funzione "Tempo reale" consente il controllo continuo dei valori misurati e delle funzioni di regolazione. In aggiunta allo storico e al quaderno operativo il sistema ha altre funzioni di diagnostica e service che contribuiscono considerevolmente alla efficienza generale del cogeneratore a gas metano. Come tutte le altre maschere anche quelle del service e diagnostica possono essere accessibili via modem tramite la normale rete telefonica. Questo consente la diagnostica da remoto con ottimizzazione dei tempi di reazione del servizio manutenzione. L'obiettivo del sistema è di gestire in maniera completamente autonoma, le sicurezze di caldaia, fornire informazioni di diagnostica e di gestire i blocchi delle caldaie. Attraverso dei selettori a chiave e un pannello operatore, il conduttore abilitato in loco può gestire i test sulle sicurezze che si riferisce all'esenzione operatore entro le 72 ore, e di avere informazioni sullo stato di esse. Tutti i test devono essere eseguiti con il selettore selezionato in "presenza operatore". Solo al termine dei test e solo se questi hanno avuto esito positivo, riparte il conteggio delle 72 ore e l'operatore può girare il selettore nella posizione "assenza operatore" per il suo esonero. **La responsabilità di queste azioni è dell'operatore addetto alla conduzione.** L'illustrazione che segue è un esempio di visualizzazione delle pagine d'interfaccia.



Figura 6. Visualizzazione di una pagina d'interfaccia

L'interfaccia operatore consente il settaggio di tutti i parametri limite e/o di regolazione individuate quali livello, pressione, portate, regolazione automatiche, emissioni, temperatura dei fumi e una visione generale dello stato della caldaia. Il sistema consente di allertare con accuratezza il conduttore informandolo immediatamente sul tipo di evento e sul grado di gravità.

4. Conclusioni

Come si è potuto vedere, nel caso qui esposto, per i generatori di vapore a recupero fumi, *a sorgente termica diversa dal fuoco*, ma soggetti a pericolo di surriscaldamento assume grande importanza l'analisi dei rischi e la progettazione del sistema di sicurezza, eseguita a monte della costruzione della caldaia. Infatti, ai fini dell'applicazione del d.m. 1/12/2004 n. 329, in fase di esercizio e inteso ad ottenere l'esonero dalla supervisione continua del conduttore fino a 72h tali generatori devono necessariamente essere equiparati ai generatori di vapore a fuoco diretto e quindi dotati di tutti gli accessori descritti al punto 3.2.

5. Bibliografia

- [1] Brochure Cogenerazione l'energia efficiente, CGT - Compagnia Generale Trattori – Vimodrone
- [2] Brochure Accessori in dotazione al generatore di vapore Caldaia Recopack Ft della Siat Your Heat Recovery Partner.
- [3] UNI/TS 11325-3:2018 - Attrezzature a pressione - Messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata.
- [4] d.lgs. 15 febbraio 2016, n. 26 – Attuazione della direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati Membri relativa alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione).
- [5] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004 - pubblicato su Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 22 del 28/01/2005 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [6] Norma UNI EN 12953-6:2011 - Caldaie a tubi da fumo – Parte 6: Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia.
- [7] Norma UNI EN 12953-7:2004 - Caldaie a tubi da fumo – Parte 7: Requisiti degli impianti di combustione della caldaia per combustibili liquidi e gassosi.

Fondamenti teorici delle formule principali della Raccolta R e considerazioni su alcuni casi particolari

T. Scalici¹, G. Gurnari², N. Palumbo¹, N. Rizzo¹

¹ Inail - Uot di Brescia

² Inail - Uot di Udine

Sommario

Le formule riportate nella Raccolta R derivano da concetti termodinamici generali, applicati al caso particolare delle centrali termiche. Il background di dette formule è importante per la comprensione del funzionamento degli impianti termici e per la consapevolezza dei rischi legati alla pressione e alla temperatura.

L'analisi svolta dimostra sia la sostanziale validità della Specifica Tecnica, in quanto basata su leggi fisiche, sia l'opportunità di alcune integrazioni al fine di coprire casistiche particolari.

1. Introduzione

La Raccolta R ed. 2009, costituisce la più recente revisione della regolamentazione tecnica degli impianti centrali di riscaldamento utilizzando acqua calda sotto pressione con temperatura non superiore a 110°C, e potenza nominale massima complessiva dei focolari superiore a 35 kW.

Tale specifica tecnica, la cui procedura d'informazione nel settore delle norme e delle regolamentazioni tecniche avviata presso la Commissione Europea dal Ministero dello Sviluppo Economico, ai sensi della direttiva 98/34/CE, si è conclusa favorevolmente nel mese di aprile 2010, scaturisce dalla necessità di adeguare la regolamentazione degli impianti centrali di riscaldamento utilizzando acqua calda sotto pressione all'evoluzione normativa e al progresso tecnologico in materia. Entrata in vigore il 1 marzo 2011 (Circolare Inail n.1 IN/2010 del 14 dicembre 2010), essa fa seguito all'edizione del giugno 1982 che, a sua volta, aggiornava la prima versione del 1976 emanata ai sensi dell'art. 26 del D.M. 1 dicembre 1975 (S.O. G.U. n. 33 del 6 febbraio 1976).

Nel passaggio tra le varie edizioni, le formule relative agli impianti a vaso chiuso sono rimaste sostanzialmente invariate. Tuttavia, la Raccolta R 2009, ha introdotto una sensibile modifica nel calcolo del volume di espansione del vaso chiuso introducendo una relazione che dà il coefficiente di espansione in funzione della temperatura.

In questa trattazione, si forniscono i riferimenti per la comprensione delle ipotesi e delle condizioni assunte per la scrittura di alcune relazioni di dimensionamento e di funzionamento di dispositivi/componenti dell'impianto a vaso chiuso previsti per garantire la sicurezza del generatore di calore dall'esplosione fisica.

Si esaminano specificatamente i casi relativi al dimensionamento della valvola di sicurezza, alla relazione della pressione di equilibrio e portata di scarico nella condizione di reintegro totale a seguito dell'intervento della valvola di scarico termico, al calcolo del volume del vaso di espansione chiuso, con e senza diaframma, al coefficiente di espansione, al tubo di collegamento al vaso di espansione e, infine, alla pressione di precarica e volume del "vaso equivalente".

Quest'ultimo caso particolare, poco frequente ma già oggetto di esame da parte degli autori del presente studio, non è considerato dalle sopraccitate edizioni della Raccolta R.

2. Valvola di sicurezza

La valvola di sicurezza deve essere dimensionata per scaricare una portata di vapore saturo corrispondente alla producibilità del generatore di calore, poiché, nel caso di mancato intervento dei dispositivi di protezione termici, l'acqua contenuta nel generatore vaporizza. La formula sotto indicata, di cui al punto 2.3.1 della Raccolta R 2009, fornisce l'area dell'orifizio della valvola di sicurezza:

$$A = 0,005QF/0,9K \quad (1)$$

con

A = area della minima sezione trasversale netta dell'orifizio della valvola in cm^2

Q = capacità di scarico della valvola di sicurezza, espressa in kg/h , pari a

$$Q = P/0,58 \quad (2)$$

P = potenza nominale del generatore in kW

F = fattore di pressione, desunto dalla tabella 2 in funzione della pressione

K = coefficiente di efflusso

0,9 = coefficiente di sicurezza

La relazione (1) deriva dalla formula dell'efflusso adiabatico di un gas attraverso un orifizio, riportata in Raccolta E nella forma seguente:

$$A \geq \frac{q}{(0,9K)(113,8C)} \sqrt{\frac{v_1}{p_1}} \quad (3)$$

in cui:

A = area della minima sezione trasversale netta dell'entrata valvola, in cm^2

q = portata massima da scaricare, in kg/h

0,9 = coefficiente di sicurezza

K = coefficiente di efflusso

p_1 = pressione, in bar assoluti, corrispondente alla massima portata q

v_1 = volume specifico, in m^3/kg , alle condizioni p_1 e T_1 (temperatura in K del fluido all'ingresso della valvola durante lo scarico)

C = coefficiente di espansione

$$C = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (4)$$

k = esponente dell'equazione dell'espansione isentropica alle condizioni p_1 e T_1

$$k = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \quad (5)$$

113,8 = fattore di conversione delle unità di misura.

Prima di esplicitare i passaggi che consentono di ricavare la (1) dalla (3), è necessario evidenziare come la formula (2), che dà la portata di scarico di vapore, si ottiene assumendo

convenzionalmente che il calore di vaporizzazione sia pari a 500 kcal/kg, come riportato nel punto R.3.A.3 della Raccolta R ed. 1976.

Infatti, se P è in kW, risulta:

$$Q = \frac{P \text{ kW}}{500 \text{ kcal/kg} \cdot 4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}} = \frac{P \text{ kW}}{2093,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} =$$

$$= \frac{P \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \frac{3600\text{s}}{1\text{h}}}{2093,4 \text{ kJ/kg}} = \frac{P}{0,58} \text{ kg/h}$$

Lo svolgimento dei calcoli che seguono dimostra quanto sopra anticipato.

Preliminarmente, deve essere determinato il valore di C per il vapore saturo, assumendo $k=1,14$, che è il coefficiente isentropico del vapore d'acqua nel campo di pressione e temperatura tipico degli impianti ad acqua calda (punto 2.3.1. della Raccolta R 1982), quindi:

$$C = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = \sqrt{1,14 \left(\frac{2}{1,14+1} \right)^{\frac{1,14+1}{1,14-1}}} = 0,637$$

Sostituendo tale risultato nella (3) e moltiplicando numeratore e denominatore per 200, si ricava:

$$A \geq \frac{q}{(0,9K)(113,8 \cdot 0,637)} \cdot \frac{200}{200} \cdot \sqrt{\frac{v_1}{p_1}} = \frac{q}{(0,9K)} \cdot \frac{1}{200} \cdot \frac{200}{113,8 \cdot 0,637} \cdot \sqrt{\frac{v_1}{p_1}} =$$

$$= \frac{q}{(0,9K)} \cdot 0,005 \cdot 2,759 \cdot \sqrt{\frac{v_1}{p_1}} \quad (6)$$

I valori di F di cui alla tabella 2 della Raccolta R 2009, sono calcolati secondo la seguente relazione (7), in funzione della pressione p_1 (pressione di taratura della valvola di sicurezza p_t , incrementata della sovrappressione del 10% ed aumentata di 1) e del corrispondente volume specifico v_1 .

$$F = 2,759 \sqrt{\frac{v_1}{p_1}} \quad (7)$$

e in conclusione, ponendo $q=Q$, si ricava la (1).

E' importante evidenziare che l'edizione del 1976 riporta i valori di F (ivi indicato con M) riferiti alla pressione di taratura della valvola di sicurezza, mentre nelle successive edizioni i valori di F si riferiscono alla pressione relativa di scarico ($p_s = p_t + 10\%$).

Come si evince dalla tabella 1, nella quale sono riportati i valori di M e di F , il fattore M della Raccolta R 1976 è stato ottenuto arrotondando a 3 il coefficiente 2,759 della relazione (7), con un'approssimazione di circa il 9%, mentre nelle versioni successive non è stato fatto nessun arrotondamento.

E' inoltre il caso di rilevare che i valori di F , calcolati applicando la (7), si discostano in maniera trascurabile rispetto a quelli indicati tra parentesi e in corsivo (valori tabellari delle Raccolte R) e sono imputabili alle diverse fonti da cui sono stati ricavati i volumi specifici v_1 del vapore d'acqua.

Infine, nelle ultime due emanazioni della Raccolta R, il sovradimensionamento dell'area di scarico della valvola di sicurezza è stato eliminato, correlando il fattore F alla pressione di scarico anziché a quella di taratura.

Raccolta R Ed.1976			M	Raccolta R Ed.1982 e 2009			F
p_t (barg)	$p_1 = 1,1p_t + 1$ (bara)	v_1 (m ³ /kg)	$3 \sqrt{\frac{v_1}{p_1}}$	p_s (barg)	$p_1 = p_s + 1$ (bara)	v_1 (m ³ /kg)	$2,759 \sqrt{\frac{v_1}{p_1}}$
0,5	1,60 ⁽¹⁾	1,09	2,48 (2,47)	0,5	1,5	1,16	2,43 (2,47)
1,0	2,10	0,81	1,86 (1,87)	1,0	2,0	0,89	1,84 (1,87)
1,5	2,65	0,68	1,52 (1,51)	1,5	2,5	0,72	1,48 (1,51)
2,0	3,20	0,57	1,27 (1,26)	2,0	3,0	0,61	1,24 (1,26)
2,5	3,75	0,49	1,08 (1,10)	2,5	3,5	0,52	1,06 (1,10)
3,0	4,30	0,43	0,95 (0,95)	3,0	4,0	0,46	0,94 (0,95)
3,5	4,85	0,39	0,85 (0,85)	3,5	4,5	0,41	0,83 (0,85)
4,0	5,40	0,35	0,76 (0,77)	4,0	5,0	0,37	0,75 (0,77)
4,5	5,95	0,32	0,70 (0,70)	4,5	5,5	0,34	0,69 (0,70)
5,0	6,50	0,29	0,63 (0,64)	5,0	6,0	0,32	0,64 (0,64)

(1) p_1 è calcolato con una sovrappressione di 0,1 bar e non del 10%, poiché la Raccolta R 1976 prevedeva che per pressioni di taratura non superiori a 1 kg/cm², la sovrappressione non doveva superare il maggiore tra il 20% della pressione di taratura e 0,1 kg/cm².

Tabella 1

In figura 1, si riporta un estratto della Raccolta R 1976 relativo all'argomento in esame, dove è indicato il procedimento, formalmente diverso ma sostanzialmente identico, con il quale si è ricavata la formula per il dimensionamento della valvola di sicurezza.

E' interessante osservare che nell'espressione per il calcolo del coefficiente di espansione C_I , di seguito riscritta:

$$C_I = 550 \sqrt{\frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{2}{n-1}}} \quad (8)$$

il coefficiente n (coincidente con k) è rigorosamente l'esponente dell'equazione di trasformazione isentropica di un gas, che coincide con C_p/C_v solo nel caso particolare dei gas perfetti, come può facilmente dimostrarsi calcolando la (5) per un gas perfetto, per il quale vale l'equazione di stato:

$$pv = RT \rightarrow p = \frac{RT}{v} \quad (9)$$

che, sostituita nella (5), fornisce:

$$\begin{aligned} k &= -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v}{p} \left(\frac{\partial \frac{RT}{v}}{\partial v}\right)_T = -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v}{p} \left(-\frac{RT}{v^2}\right) = \\ &= -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v}{p} \cdot \left(-\frac{pv}{v^2}\right) = \frac{C_p}{C_v} \end{aligned}$$

3. DIMENSIONAMENTO DELLE VALVOLE DI SICUREZZA.

3.1. Le valvole di sicurezza devono essere dimensionate in base alla seguente formula:

$$A = \frac{W}{0,9 \cdot K \cdot 0,29 \cdot C_1} \sqrt{\frac{V_s}{P_1}}$$

in cui:

A = area della minima sezione trasversale netta dell'orizzio della valvola, in cm^2 ,

W = capacità di sfogo di vapore, in kg/h , della valvola di sicurezza da assumersi pari a P/i essendo P la potenzialità nominale del generatore di calore, in kcal/h , ed i il calore di vaporizzazione assunto convenzionalmente uguale a 500 kcal/kg ,

K = coefficiente di efflusso che deve essere conforme a quanto specificato nei punti 3.3., 3.4. e 3.5.,

C_1 = coefficiente di espansione calcolabile a mezzo dell'espressione:

$$C_1 = 550 \sqrt{\frac{\pi}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}}$$

essendo $n = \frac{C_p}{C_v}$ il rapporto fra i calori specifici a pressione costante ed a volume costante nelle condizioni P_1 e T_1 ,

P_1 = pressione assoluta di scarico, in kg/cm^2 , in condizioni di efflusso della piena portata; detta pressione si assume pari alla pressione relativa di taratura della valvola incrementata del valore della sovrappressione ammessa, più 1 kg/cm^2 ,

V_s = volume specifico, in m^3/kg , alle condizioni di scarico P_1 e T_1 ,

T_1 = temperatura massima raggiungibile dal fluido all'ingresso della valvola durante lo scarico, in $^{\circ}\text{K}$,

0,9 = coefficiente di sicurezza,

0,29 = fattore di conversione delle unità di misura.

3.2. La formula riportata al punto 3.1. può essere impiegata anche nella seguente forma semplificata

$$A = \frac{P}{100.000} \times \frac{M}{0,9 K}$$

dove P è la potenzialità nominale del generatore di calore, in kcal/h , e M può desumersi dalla seguente tabella:

press. effettiva di taratura (kg/cm^2)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
M	2,47	1,87	1,51	1,26	1,10	0,95	0,85	0,77	0,70	0,64

3.3. Per valvole di sicurezza provate sperimentalmente, definite «valvole qualificate», K è il rapporto fra la quantità oraria di fluido, in kg/h , effettivamente scaricata dalla valvola, quale risultante dalle prove e la quantità teorica ricavabile dalla formula indicata al punto 3.1. ponendo $0,9 K$ uguale ad 1.

I valori di K determinati sperimentalmente devono essere desunti sulla base di prove effettuate secondo le specifiche richiamate al successivo punto 4.

3.4. Per valvole di sicurezza non qualificate per le quali viene determinato sperimentalmente il solo valore dell'alzata, secondo le specifiche richiamate al punto 4., definite «valvole ad alzata controllata», devono essere adottati i valori seguenti del termine $0,9 K$:

$h = (\text{alzata})$	$0,9 K$
$h \cong \frac{D}{4}$	0,43
$\frac{D}{4} > h \cong \frac{D}{12}$	0,21
$\frac{D}{12} > h \cong \frac{D}{16}$	0,16
$h < \frac{D}{16}$	0,10

dove D è il diametro minimo dell'orizzio.

3.5. Per le valvole di sicurezza per le quali non viene effettuata alcuna determinazione sperimentale, definite «valvole ordinarie», si deve assumere per il termine $0,9 K$ il valore 0,10.

3.6. Per le valvole «ad alzata controllata» e per quelle «ordinarie» i valori del rapporto $\frac{M}{0,9 K}$ della formula riportata al punto 3.2. sono i seguenti:

Figura 1

3. Pressione di equilibrio e portata di scarico nel reintegro totale

La prima edizione della Raccolta R (1976) non prevedeva l'installazione della valvola di scarico termico, che è stata introdotta con l'utilizzo degli scambiatori di calore in luogo dei generatori di calore a combustibile.

In un impianto termico a vaso chiuso, se la protezione contro la sovratemperatura è assicurata per mezzo di una valvola di scarico termico (VST), possono verificarsi due condizioni: quella di reintegro totale, in cui tutta la portata di scarico della VST viene rimpiazzata dalla rete idrica dell'acquedotto, e quella di reintegro parziale, in cui la stessa portata viene ripristinata parzialmente oppure non viene reintegrata.

Nel caso di reintegro totale, la condizione stazionaria si raggiunge allorché la portata di scarico, che diminuisce con l'abbassamento del battente idrostatico, eguaglia la portata di reintegro, che, al contrario, aumenta con l'abbassamento del battente idrostatico.

Le Raccolte R del 1982 e del 2009, forniscono una relazione che permette di calcolare la pressione di equilibrio, ossia quella pressione per la quale la portata di scarico è uguale a quella di reintegro.

Per ricavare la relazione sopracitata si scrivono le formule di cui ai punti 3.1.11 e 3.1.15 della Raccolta R 2009, che danno rispettivamente la portata di scarico e quella di reintegro:

$$Q = K_V \Delta p^a \quad (l/h) \quad (10)$$

$$Q_r = K_R \Delta p_r^a \quad (l/h) \quad (11)$$

nelle quali:

Q e Q_r = portata di scarico della VST e della valvola reintegro, in l/h

K_V e K_R = coefficienti di portata della VST e della valvola reintegro (VR), in $l/(h \cdot bar^{0,5})$

Δp = differenza tra la pressione dovuta al battente idrostatico e la resistenza offerta dalla tubazione di scarico sino allo sbocco nell'atmosfera, in bar

Δp_r = pressione di reintegro in bar

a = esponente desunto dal certificato di omologazione per la VST e assunto convenzionalmente pari a 0,5 per la valvola di reintegro.

A questo punto, indicando con:

p_a = pressione minima dell'acquedotto a monte della valvola di reintegro, in bar

p_e = pressione di equilibrio ($\geq 0,2$ bar, in quanto la VST si apre con un $\Delta p = p_e - p_{atm} \geq 0,2$).

p_{atm} = pressione atmosferica (0 bar);

e ponendo pari a 0,5 anche l'esponente a che compare nella portata di scarico nonché trascurando le perdite di carico a valle della VST, come previsto dalla Raccolta 2009 qualora la tubazione di scarico abbia un diametro non inferiore a quello di uscita della valvola stessa e la sua lunghezza fino allo sbocco nell'atmosfera non sia maggiore di 1 metro, la (10) e la (11), con riferimento alla figura 2, si possono scrivere:

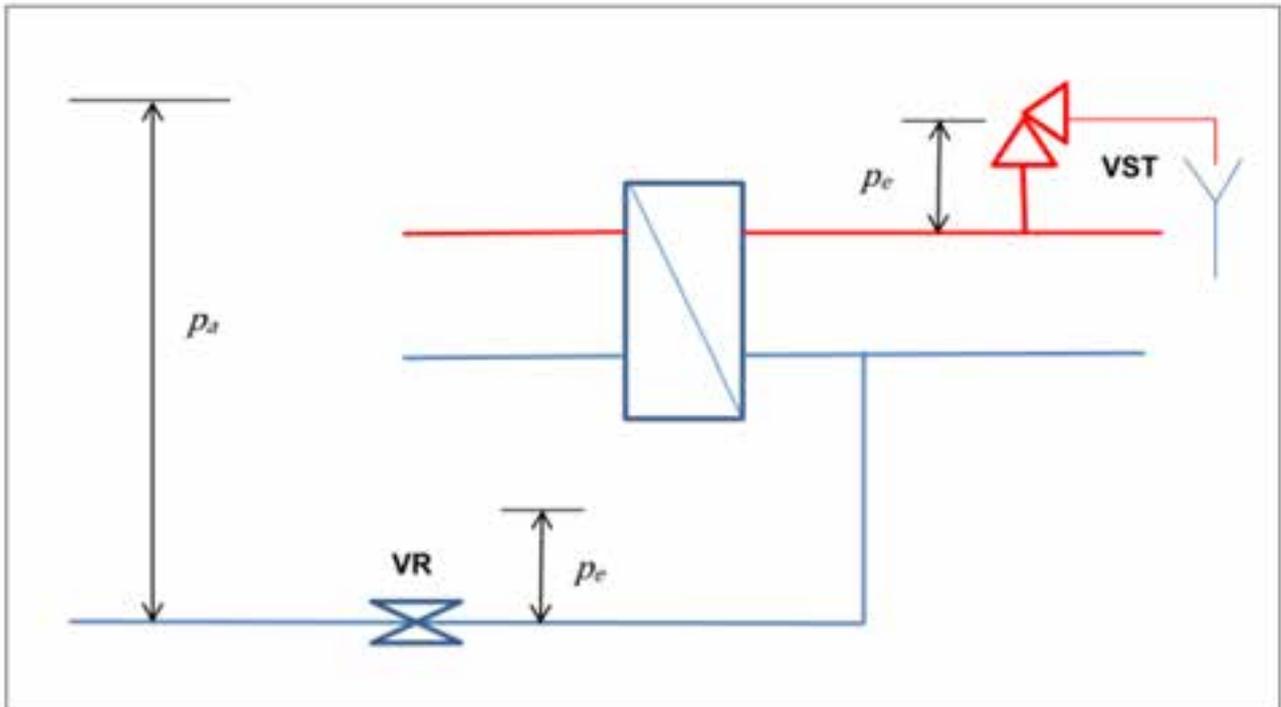


Figura 2

$$Q = K_V \Delta p^{0,5} = K_V (p_e - 0)^{0,5}$$

$$Q_r = K_R \Delta p_r^{0,5} = K_R (p_a - p_e)^{0,5}$$

e, all'equilibrio:

$$Q = Q_r$$

da cui:

$$K_V(p_e - 0)^{0,5} = K_R(p_a - p_e)^{0,5}$$

e quindi:

$$K_V^2 \cdot p_e = K_R^2(p_a - p_e)$$

ovvero:

$$(K_V^2 + K_R^2) \cdot p_e = K_R^2 \cdot p_a$$

dalla quale, infine, si giunge alla formula indicata in Raccolta R:

$$p_e = \frac{p_a}{1 + \frac{K_V^2}{K_R^2}} \quad (12)$$

In merito alla portata di scarico della VST, al punto 3.7.1 della nuova Raccolta R viene data la seguente:

$$Q = \frac{P}{0,093} \quad [l/h] \quad (13)$$

in cui P è la potenza termica nominale del generatore espressa in kW.

La stessa relazione, nella edizione del 1982 è fornita anche nel sistema tecnico, ossia:

$$Q = \frac{P}{80} \quad [l/h] \quad (14)$$

in cui P è la potenza termica nominale del generatore espressa in kcal/h.

La (14) deriva dall'applicazione del bilancio di massa e di energia al sistema aperto in regime stazionario, costituito dall'impianto termico, considerando una portata termica uscente di 100 kcal/h (acqua a 100°C) e una pari portata entrante di 20 kcal/h (acqua a 20°C), mentre la (13) si ottiene dalla (14) considerando il fattore di conversione tra kcal/h e kW, pari a 860.

4. Volume del vaso di espansione chiuso

Al punto 4 del Capitolo R.3.B della Raccolta R 2009, sono previste due formule per il calcolo del volume del vaso di espansione chiuso, una per il vaso senza diaframma e una per quello con diaframma.

Prima di esplicitare i passaggi matematici che conducono alle suddette relazioni è necessario premettere le definizioni che seguono, tratte dalla suddetta Raccolta R:

V_n = volume nominale del vaso, in litri;

P_a = pressione atmosferica assoluta, in bar;

P_1 = pressione assoluta iniziale, in bar, corrispondente alla pressione idrostatica nel punto in cui viene installato il vaso (o alla pressione di reintegro del gruppo di riempimento) aumentata di una quantità stabilita dal progettista e comunque non inferiore a 0,15 bar;

P_2 = pressione assoluta di taratura della valvola di sicurezza, in bar, diminuita di una quantità corrispondente al dislivello di quota esistente tra vaso di espansione e valvola di sicurezza, se quest'ultima è posta più in basso ovvero aumentata se posta più in alto;

$V_E = V_A \cdot n / 100$ = volume di espansione in litri, ove

V_A = volume totale dell'impianto, in litri

$n = 0,31 + 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot t_m^2$

t_m = temperatura massima ammissibile in °C riferita all'intervento dei dispositivi di sicurezza.

4.1 Vaso con diaframma

Si ammette che l'espansione dell'acqua contenuta nell'impianto, comprime il gas precaricato nel vaso a pressione superiore a quella atmosferica e che tale trasformazione sia isoterma.

Con riferimento alla figura 3 che rappresenta un vaso di espansione con diaframma e nella quale sono stati richiamati i simboli (P_i , P_f , V_i , V_f , E) della Raccolta R 1982, in quanto meglio descrivono le fasi del fenomeno fisico in esame.



Figura 3

Per quanto sopra, con l'ulteriore ipotesi che il gas sia perfetto, è possibile applicare la legge di Boyle tra lo stato iniziale e finale e quindi:

$$P_i \cdot V_i = P_f \cdot V_f \quad (15)$$

Con l'aumentare della temperatura, l'acqua si espande ed entra nel vaso, occupando un volume pari ad E , e di conseguenza il volume del gas si riduce da V_i a V_f , per cui, come risulta chiaro dalla figura 3, si può scrivere:

$$V_f = V_i - E$$

E sostituendo quest'ultima uguaglianza nella (12), si ottiene:

$$P_i \cdot V_i = P_f \cdot (V_i - E)$$

che conduce a:

$$(P_f - P_i) \cdot V_i = P_f \cdot E$$

ossia:

$$V_i = \frac{P_f}{P_f - P_i} \cdot E$$

Infine, dividendo per P_f numeratore e denominatore, si ha:

$$V_i = \frac{E}{1 - \frac{P_i}{P_f}} \quad (16)$$

e sostituendo V_i con V_n , E con V_E , P_i e P_f con P_1 e P_2 , si ottiene la formula del punto 4.3 della Raccolta R 2009.

$$V_n = \frac{V_E}{1 - \frac{P_1}{P_2}} \quad (17)$$

4.2 Vaso senza diaframma

La formula del punto 4.2 della Raccolta R 2009 si applica al caso di un vaso senza diaframma autopressurizzato, in cui la pressione prima del riempimento sia quella atmosferica. Ciò premesso, si scrivono le equazioni che consentono di passare dallo stato iniziale a quello finale, sotto le stesse ipotesi di trasformazione isoterma e gas perfetto del caso precedente.

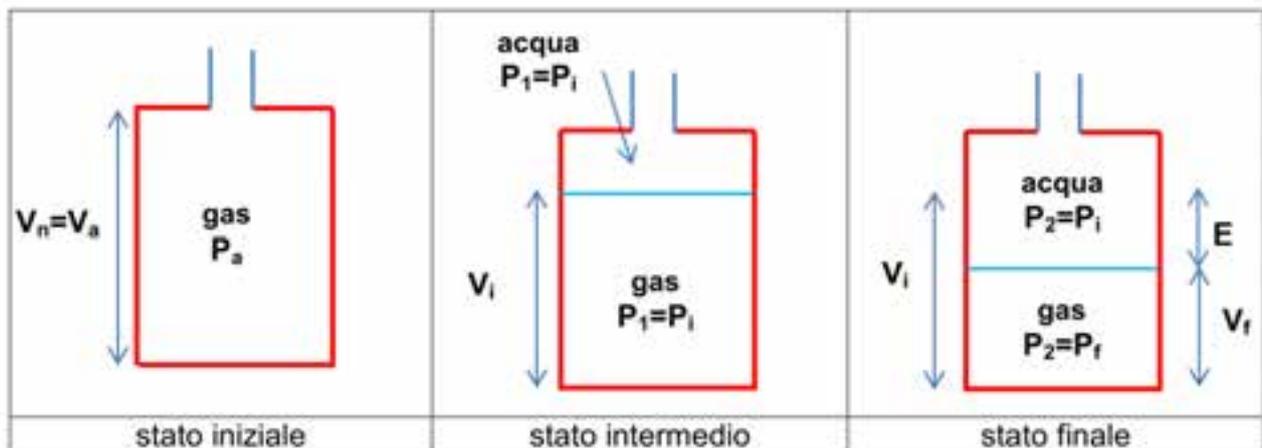


Figura 4

Utilizzando, come in precedenza, i simboli della Raccolta R 1982, si è inoltre introdotto il simbolo V_a che rappresenta il volume del gas a pressione atmosferica, coincidente con quello del vaso di espansione.

Per la legge di Boyle, la relazione tra pressione e volume nel passaggio tra lo stato iniziale e quello intermedio è:

$$P_a \cdot V_a = P_i \cdot V_i \quad (18)$$

la stessa legge isoterma tra lo stato intermedio e quello finale dà:

$$P_i \cdot V_i = P_f \cdot V_f \quad (19)$$

Dalla quale, essendo anche in questo caso:

$$V_f = V_i - E$$

si ottiene, con gli stessi passaggi del vaso con diaframma, la relazione:

$$V_i = \frac{E}{1 - \frac{P_i}{P_f}}$$

che sostituita nella precedente (14) fornisce:

$$P_a \cdot V_a = P_i \cdot \frac{E}{1 - \frac{P_i}{P_f}}$$

Dalla quale si evince il volume V_a del vaso:

$$V_a = \frac{P_i}{P_a} \cdot \frac{E}{1 - \frac{P_i}{P_f}} = \frac{1}{\frac{P_a}{P_i}} \cdot \frac{E}{1 - \frac{P_i}{P_f}}$$

e moltiplicando i due fattori al denominatore della relazione soprascritta, si ottiene la relazione del volume del vaso senza diaframma, come riportata in raccolta R 1982:

$$V_a = \frac{E}{\frac{P_a}{P_i} - \frac{P_a}{P_f}} \quad (20)$$

e sostituendo V_a con V_n , E con V_E , P_i e P_f con P_1 e P_2 , ottiene la formula del punto 4.2 della Raccolta R 2009.

$$V_n = \frac{V_E}{\frac{P_a}{P_1} - \frac{P_a}{P_2}} \quad (21)$$

5. Coefficiente di espansione

Per il calcolo del volume di espansione V_E dell'acqua contenuta in un impianto di riscaldamento è necessario conoscere il volume di acqua dell'impianto a freddo (convenzionalmente si assume che la temperatura di riempimento sia 10°C, come esplicitato nella tabella D.2 della UNI EN 12828:2005) e il coefficiente di espansione percentuale, ossia l'aumento percentuale di volume in corrispondenza di un aumento di temperatura.

Nel seguito, si confronta il coefficiente di espansione n della Raccolta R 2009, con quello previsto dall'appendice D della norma europea UNI EN 12828:2014, dalla tabella D.2 della

norma europea UNI EN 12828:2005 e dall'ASME IV (identico a quello del New York City Mechanical Code 2014).

5.1 Coefficiente di espansione secondo Raccolta R

Il coefficiente di espansione percentuale è:

$$n = (0,31 + 3,9 \cdot t_m^2)/100 \quad (22)$$

in cui t_m è la temperatura massima ammissibile in °C riferita all'intervento dei dispositivi di sicurezza.

La stessa formula era già riportata nell'appendice B del progetto di norma europea per i generatori a tubi da fumo pr12953_6 ed. 1997, ed è stata riconfermata nelle successive edizioni della UNI EN 12953-6 "Caldaie a tubi da fumi – Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia".

5.2 Coefficiente di espansione secondo UNI EN 12828:2014

Il coefficiente di espansione percentuale è:

$$e = 1 - \frac{\rho_{\vartheta,max}}{\rho_{\vartheta,min}} \quad (23)$$

in cui

$\rho_{\vartheta,max}$ e $\rho_{\vartheta,min}$ = densità dell'acqua alla temperatura rispettivamente massima e minima di esercizio, in kg/m³

5.3 Coefficiente di espansione secondo UNI EN 12828:2005

Il coefficiente percentuale si desume dalla tabella sottostante:

Expansion percentages, e , for various maximum design overshoot temperatures (filling temperature 10 °C - water volume base temperature 4 °C)

Maximum design overshoot temperature °C	expansion percentage e %
30	0,66
40	0,93
50	1,29
60	1,71
70	2,22
80	2,81
90	3,47
100	4,21
110	5,03
120	5,93
130	6,90

Tabella D.2 UNI EN 12828:2005

5.4 Coefficiente di espansione secondo ASME IV e NYC Mechanical Code

Il coefficiente di espansione si ottiene dalle seguenti relazioni, tratte dal punto HG-709.2 dell'ASME IV "Rules for Construction of Heating Boilers" e dal punto 1009.2 sezione 1009

“Hot Water Boiler Expansion Tank” del NYC Mechanical Code, espresse sia nel sistema anglosassone che nel sistema internazionale:

$$e = 0,00041 \cdot T - 0,0466 \quad T \text{ in } ^\circ F \quad (24)$$

$$e = 0,000738 \cdot T - 0,03348 \quad T \text{ in } ^\circ C \quad (25)$$

5.5 Osservazioni sulle relazioni del coefficiente di espansione

Per un confronto fra le relazioni del coefficiente di espansione, si sono tracciate le curve della figura 5, dalle quali si evince che la formula della Raccolta R 2009 (in rosso), coincide con quella UNI EN 12828:2005 (contrassegnata con X tra 30 e 90°C), mentre la formula della UNI EN 12828:2014 coincide praticamente con le prime due tra 60 e 100°C, e fornisce valori leggermente inferiori a partire da 100°C e sensibilmente inferiori fino a 60°C.

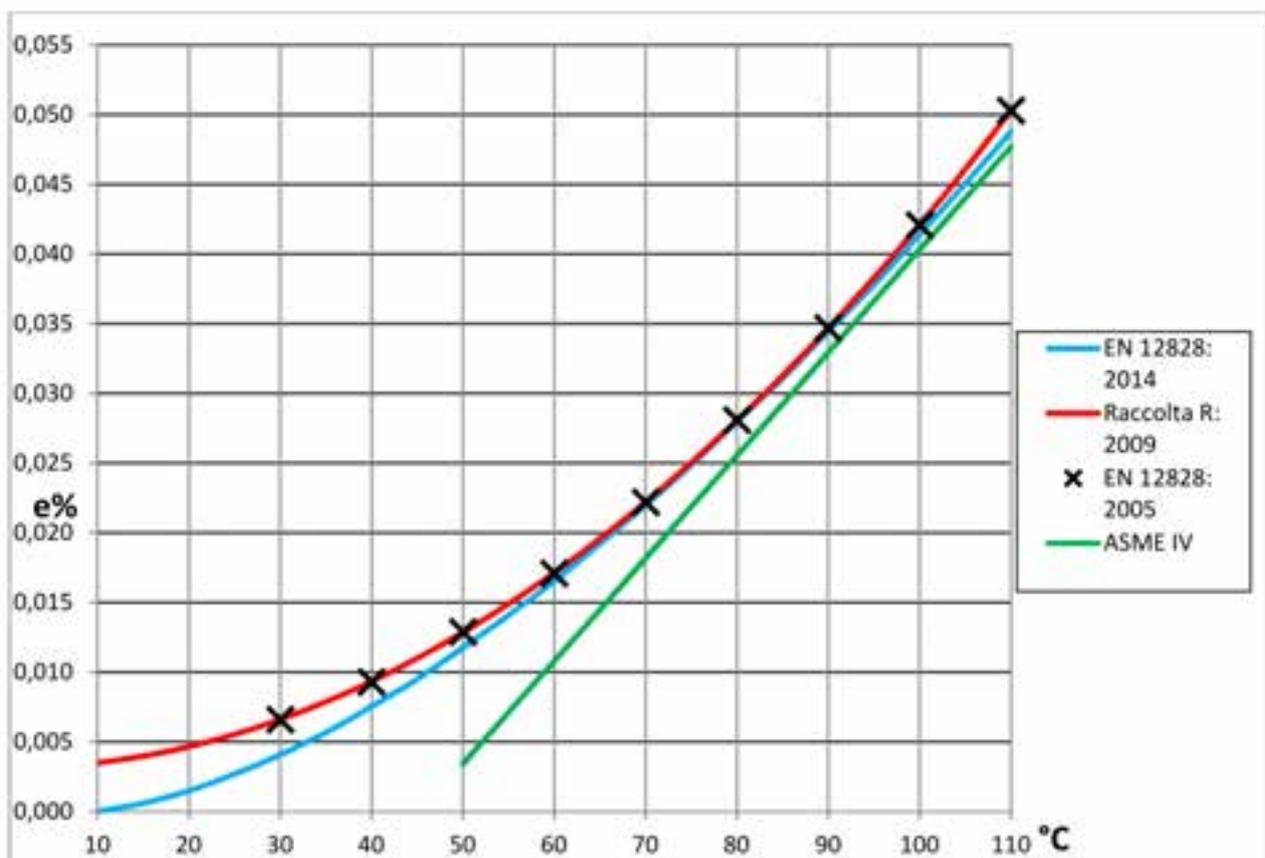


Figura 5

Si nota che le curve relative alla Raccolta R ed alla UNI EN 12828:2005, non hanno l'intercetta nulla in corrispondenza di 10°C (temperatura di riempimento); tale incongruenza non comporta problemi nel calcolo del volume di espansione per gli intervalli di temperatura tipici degli impianti di riscaldamento ad acqua calda.

Inoltre, la curva della UNI EN 12828:2014 non presenta l'incongruenza sopra evidenziata e consente di calcolare il volume di espansione anche nel caso di fluido termovettore costituito da acqua con l'aggiunta di sostanze addizionate (es. glicole e/o additivi anticorrosione).

A differenza delle norme viste prima, la norma ASME IV (tracciata tra 50 e 110°C) fornisce una relazione analitica lineare del coefficiente di espansione, la cui validità è di fatto limitata ad un campo di temperatura compreso tra 80 e 110 °C. Per temperature inferiori a 80°C, il

coefficiente si discosta notevolmente da quello delle altre norme, mentre, per temperature al di sotto di 45°C fornisce valori fisicamente inaccettabili.

E' importante sottolineare che nelle precedenti edizioni della Raccolta R (1976 e 1982), operativamente, si è utilizzato un valore di riferimento del coefficiente di espansione pari a 0,035, corrispondente alla t_{max} di 90°C; mentre il coefficiente di espansione attualmente adottato è pari a circa 0,042 (t_{max} 100°C), con un aumento del 20% nel volume del vaso.

6. Pressione di precarica e volume del “Vaso Equivalente”

Quando in un impianto siano installati due o più vasi di espansione aventi la stessa pressione di precarica, la verifica del volume di espansione è eseguita considerando un vaso equivalente di volume pari alla somma dei singoli vasi precaricato alla pressione comune.

Nel caso in cui la pressione di precarica dei vasi sia differente (es. vasi installati a quote diverse dell'impianto), il volume del vaso equivalente è pari ancora alla somma del volume dei singoli vasi, mentre la pressione di precarica è pari alla somma pesata delle pressioni dei singoli vasi, dove i pesi sono dati dai rapporti tra i volumi dei singoli vasi e la somma dei loro volumi.

In termini matematici, supponendo di avere n vasi di volume V_1, V_2, V_n , precaricati rispettivamente alle pressioni P_1, P_2, P_n , si ha, in forma abbreviata:

$$P_{eq} = \sum_1^n P_i \cdot \frac{V_i}{\sum_1^n V_j} \quad (26)$$

oppure, in forma non abbreviata:

$$P_{eq} = P_1 \cdot \frac{V_1}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} + P_2 \cdot \frac{V_2}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} + \dots + P_n \cdot \frac{V_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (27)$$

A titolo esplicativo, si ricava la relazione di cui sopra per il caso di due vasi.

Se P_1, V_1 , e P_2, V_2 , sono le pressioni di precarica e volumi dei due vasi, per calcolare il volume e la pressione di precarica del vaso equivalente occorre prima trovare il volume di gas a pressione atmosferica immagazzinato in ciascun vaso, e poi immaginare di comprimere questo volume fino al volume finale pari alla somma dei volumi dei vasi.

Passando alle formule, si può scrivere la legge di Boyle:

$$P_1 \cdot V_1 = P_a \cdot V_{1a} \quad e \quad P_2 \cdot V_2 = P_a \cdot V_{2a} \quad (28)$$

con P_a, V_{1a} e V_{2a} pari, rispettivamente, alla pressione atmosferica e al volume del gas dei due vasi, espanso alla pressione atmosferica.

Comprimendo la somma dei due volumi atmosferici V_{1a} e V_{2a} fino alla somma del volume dei due vasi $V_1 + V_2$, la pressione di precarica P_{eq} raggiunta dal gas, si ricava sempre dalla legge di trasformazione isoterma:

$$P_a \cdot (V_{1a} + V_{2a}) = P_{eq} \cdot (V_1 + V_2) \quad (29)$$

dalla quale, ponendo $P_a=1$ e considerando la relazione (28), si ricava la pressione di precarica del vaso equivalente P_{eq} , come caso particolare della formula generale:

$$P_{eq} = \frac{P_1 \cdot V_1 + P_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2} = P_1 \cdot \frac{V_1}{V_1 + V_2} + P_2 \cdot \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (30)$$

7. Diametro equivalente del tubo di espansione

Nel caso in cui il diametro interno del collegamento del vaso di espansione risulti inferiore al diametro richiesto dalla seguente relazione:

$$D_i \geq \sqrt{\frac{P}{1,163}} \quad (31)$$

dove:

D_i = Diametro interno tubo di espansione (mm)

P = Potenza utile del generatore (kW)

la stessa espansione dovrà essere suddivisa su più vasi (vedi figura 6)

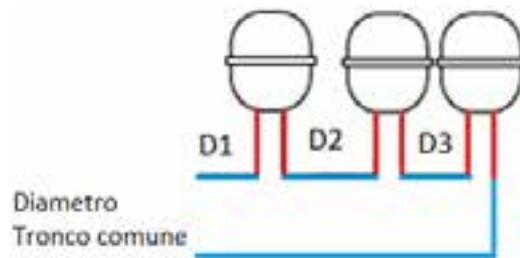


Figura 6

Il diametro equivalente si ottiene dalla somma delle singole sezioni dei tubi di collegamento ai vasi, con il procedimento sotto riportato:

$$S_{eq} = S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

$$D_{eq}^2 = D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2} \quad (32)$$

oppure, in forma abbreviata:

$$D_{eq} = \sqrt{\sum_1^n D_i^2} \quad (33)$$

Nel caso in cui il diametro di attacco dei vasi sia uguale, il diametro equivalente sarà pari a:

$$D_{eq} \geq \sqrt{n} \cdot D_i \quad (34)$$

con

D_{eq} = diametro equivalente (mm)

n = numero di vasi di espansione

D_i = diametro interno (mm)

Il diametro equivalente ottenuto con la (33) e quello del tronco comune ai singoli vasi non devono essere minori del diametro ricavato con la formula (31).

8. Conclusioni

Seguendo un percorso a ritroso, si sono poste in chiaro le basi teoriche e i riferimenti normativi delle formule principali contenute nella Raccolta R 2009, utilizzate in fase di progettazione e verifica degli impianti termici a vaso chiuso.

Si sono riscontrate sia la validità della Specifica Tecnica in termini di sicurezza sia la sua maggiore aderenza ai fenomeni fisici correlati al funzionamento degli impianti di riscaldamento ad acqua calda.

Con riferimento al confronto delle relazioni del coefficiente di espansione, si è rappresentata la curva derivante dalla UNI EN 12828:2014, il cui possibile utilizzo, ad integrazione della espressione fornita dalla Raccolta R, consente di calcolare il volume di espansione anche nel caso di fluido termovettore costituito da acqua con l'aggiunta di sostanze addizionate (es. glicole e/o additivi anticorrosione).

Inoltre, si sono approfonditi i casi particolari del tubo di espansione equivalente, della pressione di precarica e volume del "vaso equivalente", proponendo per essi una soluzione che integra le casistiche impiantistiche coperte dalla Raccolta R.

9. Appendice

9.1 Dati del National Institute of Standard and Technology (NIST)

In tabella si riportano i dati di densità, tratti dal sito del NIST, utilizzati per tracciare la curva di cui alla EN 12828:2014, con una temperatura di riempimento di 10°C.

Temperatura °C	Volume Specifico (m ³ /kg)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Espansione (%) $e = 1 - \frac{\rho_{\vartheta,max}}{\rho_{\vartheta,min}}$
10	1,00030	0,99970	0,00000
15	1,00090	0,99910	0,00060
20	1,00180	0,99820	0,00150
25	1,00300	0,99701	0,00269
30	1,00440	0,99562	0,00408
35	1,00600	0,99404	0,00567
40	1,00790	0,99216	0,00754
45	1,00990	0,99020	0,00951
50	1,01220	0,98795	0,01176
55	1,01460	0,98561	0,01409
60	1,01710	0,98319	0,01652

65	1,01990	0,98049	0,01922
70	1,02280	0,97771	0,02200
75	1,02580	0,97485	0,02486
80	1,02910	0,97172	0,02799
85	1,03240	0,96862	0,03109
90	1,03600	0,96525	0,03446
95	1,03960	0,96191	0,03780
100	1,04350	0,95831	0,04140
105	1,04750	0,95465	0,04506
110	1,05160	0,95093	0,04878

9.2 Regola 1009.2 della sezione 1009 “Hot Water Boiler Expansion Tank” del NYC Mechanical Code

$V_t = \frac{(0.000417T - 0.0466)V_s}{\left(\frac{P_f}{P_o}\right) - \left(\frac{P_a}{P_o}\right)}$	$V_t = \frac{(0.000738T - 0.03348)V_s}{\left(\frac{P_f}{P_o}\right) - \left(\frac{P_a}{P_o}\right)}$
U.S. Customary Units (°F)	S.I Units (°C)

con

V_t = Minimum volume of tanks (gallons) (L).	V_s = Volume of system, not including expansion tanks (gallons) (L)
T = Average operating temperature (°F) (°C).	P_a = Atmospheric pressure (psi) (kPa).
P_f = Fill pressure (psi) (kPa).	P_o = Maximum operating pressure (psi) (kPa).

9.3 Stralcio norma EN 12953-6 ed.1997 e 2005.

Page 29
prEN 12953-6:1997

B.2.3 Expanded volume (volume changed due to temperature change) V_e at filling temperature of 10 °C

The rate of water expansion n in % at maximum flow temperature t shall be determined by the following relationship:

$$n = 3.9 \times 10^{-4} \times t^2 + 0,31 \tag{B.2-1}$$

from which the expanded volume V_e shall be calculated as follows:

$$V_e = n (V_A/100) \tag{B.2-2}$$

B.2.3	<p>Il coefficiente di dilatazione dell'acqua n in % alla temperatura di uscita massima t deve essere determinato dalla relazione seguente:</p> $n = 3,9 \times 10^{-4} t^2 + 0,31 \tag{B.2-1}$ <p>dalla quale il volume espanso (volume variato a causa di una variazione di temperatura) V_e alla temperatura di riempimento di 10 °C deve essere calcolato come segue:</p> $V_e = n (V_A/100) \tag{B.2-2}$
--------------	---

10. Bibliografia

- [1] Raccolta R edizione 1976, (S.O. Gazzetta Ufficiale n. 33 del 6 febbraio 1976)
- [2] Raccolta R edizione giugno 1982
- [3] Raccolta R edizione 2009 (Circolare Inail n.1 IN/2010 del 14 dicembre 2010)
- [4] UNI EN 12828: 2005
- [5] UNI EN 12828: 2014
- [6] ASME IV "Rules for Construction of Heating Boilers"
- [7] New York City Mechanical Code 2014 "Hot Water Boiler Expansion Tank"
- [8] prEN 12953-6:1997
- [9] UNI EN 12953-6:2005 "Caldaie a tubi da fumo – Requisiti per l'apparecchiatura della caldaia".
- [10] National Institute of Standard and Technology (NIST): Steam Table

La variabile “pressione” nel processo di produzione della birra

P. Castellano¹, G. Battista², O. Di Donato², P. Belardi², R. Charbonnier³

¹ Inail - Uot di Aosta

² Inail - Uot di Avellino

³ Les Bières du Grand St. Bernard

Sommario

Lo studio si propone di analizzare i parametri “temperatura” e “pressione” nelle fasi lavorative del ciclo di produzione della birra. Sulla base di esperienze operative svolte dalla UOT di Aosta nel corso delle attività normative di verifica di cui all’art. 4 del d.m. 329/2004, si analizzano i parametri di dimensionamento dei dispositivi di sicurezza e controllo installati a protezione dei recipienti a pressione utilizzati nel ciclo di produzione della birra.

Prendendo a riferimento lo sviluppo del processo produttivo, e quindi le componenti tecniche ed impiantistiche funzionali all’ottenimento del prodotto finale, il lavoro si propone di definire, in collaborazione con aziende del settore, alcuni casi studio di processi di lavorazione per i quali la determinazione della variabile “pressione”, e di conseguenza il ruolo dei dispositivi di sicurezza destinati al controllo di tale variabile, rappresenta un fattore determinante nel risultato qualitativo del prodotto.

1. Les Bières du Grand St. Bernard

Les Bières du Grand St. Bernard (Fig. 1) è una giovane azienda artigianale che produce birra dal 2010 ai piedi delle Alpi aostane, nella valle del Gran San Bernardo, ai 1.000 metri di quota del comune di Gignod, lungo la via francigena che nel Medioevo collegava l'Italia con le Isole Britanniche, in un tecnologico impianto produttivo da 35 hl e una produzione annua di circa 20.000 hl.



Figura 1. Ubicazione dell’azienda

2. Il processo produttivo

2.1 Gli ingredienti

Per la produzione della birra sono sostanzialmente sufficienti quattro ingredienti (Fig. 2), ma le caratteristiche degli stessi e la variabilità con cui si presentano giocano un ruolo fondamentale nell’ottenimento di una tipologia di birra con caratteristiche diverse rispetto ad un’altra, offrendo una variegata combinazione di odori e sapori. Dunque acqua, malto d’orzo, luppolo e lievito vengono combinati in maniere differenti per arrivare al prodotto

finale, ma spesso entrano in gioco anche altri ingredienti (ad esempio frutta, mosto d'uva, cereali non maltati, spezie, fiori, verdure) che aggiungono al prodotto una grande varietà di aromi e fragranze.

Viene, di seguito, esaminato in dettaglio l'apporto dei componenti fondamentali alle caratteristiche della birra prodotta:

- **l'acqua:** svolge un ruolo fondamentale nel processo perché può condizionare l'influenza degli altri ingredienti sul prodotto finito; l'acqua di sorgente di alta montagna (come nel caso di Les Bières du Grand St. Bernard), rappresenta quella con le caratteristiche ideali, in quanto caratterizzata da basse concentrazioni di cloro;
- **il malto:** generalmente si tratta di malto d'orzo, "distico" (spighe a due file) e "esastico" (spighe a 6 file), ma anche farro, frumento, segale; sono i cosiddetti "cereali maltati", cioè sottoposti a procedimenti che trasformano gli amidi presenti nei chicchi in zuccheri che vengono poi fermentati dai lieviti e diventano alcol e anidride carbonica. Fornisce alla birra corpo, colore, dolcezza;
- **il luppolo:** è una pianta a fiore della famiglia delle cannabacee e si presenta a forma di coni, che vengono aggiunti dopo la disidratazione. Esistono molte varietà di luppolo, utilizzate in base alle diverse caratteristiche in funzione del tipo di birra che si vuole ottenere. Forniscono alla birra il senso di amaro grazie al potere amaricante degli α -acidi che possiedono, mentre i β -acidi contribuiscono all'aroma;
- **il lievito:** è l'elemento che durante la fermentazione trasforma gli zuccheri del malto in alcol e anidride carbonica. Generalmente i lieviti si suddividono in due grandi categorie, definite ad "alta fermentazione" e a "bassa fermentazione". I primi preferiscono temperature più alte durante la fermentazione, galleggiano nella parte alta del fermentatore e conferiscono al prodotto finito un profilo aromatico complesso, con toni fruttati e speziati. I secondi invece lavorano a temperature più basse e alla fine della fermentazione si depositano sul fondo del fermentatore.



Figura 2. Gli ingredienti (Fonte: pintamedicea.com)

2.2 Le fasi di lavorazione

In funzione del tipo di birra che si vuole ottenere, si procede alla scelta della miscela degli ingredienti, miscela che poi definirà il colore, l'aroma ed il profumo del mosto. Vengono di seguito riportate le diverse fasi di lavorazione per la produzione della birra, al fine di meglio comprendere i vari dispositivi presenti nel birrifico, destinati alla sua produzione.

- **Macinatura:** è il primo passo per la produzione della birra e consiste nello schiacciamento e sfarinatura del cereale maltato al fine di poter aprire i chicchi per consentire poi agli enzimi di attaccare più superficie durante la miscelazione.
- **Miscelazione:** la miscelazione del blend di malti con acqua calda, in quantità variabili in funzione della ricetta utilizzata, permette all'acqua stessa di arricchirsi delle proprietà del malto. La miscelazione avviene in un serbatoio chiuso e coibentato, che lavora a pressione atmosferica (caldaia di ammostamento), dotato di un agitatore interno

motorizzato, di un sistema di riscaldamento indiretto, di sonde di temperatura e di un sistema di aspirazione ed abbattimento del vapore acqueo che si sviluppa durante la cottura.

- **Ammostamento e saccharificazione:** è la fase del procedimento durante la quale si attivano gli enzimi che hanno il compito di modificare la struttura organolettica della birra, disgregando le eventuali proteine e gli amidi presenti nel malto per produrre gli zuccheri che non sono stati resi disponibili durante il processo di maltazione; ammostando a temperature diverse si ottengono risultati leggermente diversi. Alla fine del trattamento la miscela raggiunge una temperatura compresa tra i 78 e gli 80 °C ed è avvenuta la completa conversione dell'amido in zuccheri.
- **Filtrazione:** al termine della saccharificazione la miscela viene trasferita nel tino di filtrazione, un recipiente chiuso e coibentato che lavora a pressione atmosferica, dotato di un doppio fondo con griglia filtrante. Durante la fase di filtrazione il mosto limpido viene separato dalle trebbie del malto; per recuperare tutti gli zuccheri estratti la massa di trebbie viene poi risciacquata con acqua calda (fase di Sparging).
- **Bollitura e Luppolatura:** La fase di bollitura ha una durata di circa 90' ed avviene nella caldaia di ammostamento e bollitura. Durante questa fase si aggiunge il luppolo nelle quantità previste. La luppolatura del mosto mediante bollitura è necessaria per dare l'amaro e la conservabilità, essendo il luppolo un buon conservante naturale. Con la bollitura si ottiene la sterilizzazione del mosto, una concentrazione delle sostanze zuccherine, l'isomerizzazione delle molecole di α -acido (sostanze amaricanti) e la parziale solubilizzazione delle stesse, nonché la precipitazione di sostanze proteiche (albumine) indesiderate nella birra in quanto creerebbero problemi di stabilità e torbidità nel prodotto finito. A fine ebollizione il mosto subisce un ulteriore processo (detto "Whirpool") che prevede il prelievo, tramite una pompa, del mosto dal fondo del tino di ammostamento e bollitura, e la successiva reintroduzione attraverso un'entrata tangenziale; in questo modo si sottopone il mosto ad una rotazione che, per effetto della forza centripeta, fa convergere tutti i solidi verso il centro del tino, depositandosi a formare un cono costituito da sostanze proteiche flocculate e da residui del luppolo. Al termine del processo di Whirpool, il mosto limpido viene indirizzato ad uno scambiatore di calore a piastre per essere raffreddato fino ad una temperatura idonea a consentire la semina del lievito, per poi arrivare al fermentatore. Il raffreddamento si ottiene mediante un iniziale flusso d'acqua di rete e un successivo flusso di acqua gelida fornita da una vasca di accumulo. Durante il trasferimento del mosto dallo scambiatore al serbatoio di fermentazione viene insufflata aria sterile, necessaria ad avviare correttamente i processi di fermentazione.
- **Fermentazione:** Quando i lieviti vengono inoculati nel mosto fresco, il processo di fermentazione si sviluppa attraverso varie fasi successive che durano tra i 4 e i 10 giorni a seconda del tipo di birra che si intende produrre. Inizia con la produzione degli enzimi che serviranno a far crescere e fermentare il mosto. Successivamente ha luogo una "fermentazione tumultuosa", con il lievito che inizia a riprodursi per raggiungere la densità necessaria per innescare la fermentazione vera e propria. Si verifica poi una diminuzione della velocità di fermentazione ("seconda fermentazione") dovuta ad una minore vitalità del lievito e alla saturazione di CO₂ nella birra. Infine si ha l'arresto della fermentazione e la sedimentazione o il galleggiamento del lievito. Nelle ultime due fasi è previsto l'intervento diretto del "birraio" per le regolazioni necessarie; in particolare, al termine della fermentazione, i serbatoi vengono chiusi in modo che l'ambiente si saturi di anidride carbonica e tramite la regolazione di una valvola, si decide quanta anidride carbonica deve uscire, regolando in tal modo la gasatura della birra finita.
- **Maturazione:** Il periodo di maturazione dura dalle 3 settimane ai 4 mesi a seconda della birra artigianale prodotta e ha inizio con step di temperatura decrescenti, fino ad

arrivare a soli 2 °C, il che consente la sedimentazione del lievito, la chiarificazione del prodotto, l'amalgama di tutti i componenti e il riassorbimento di alcuni esteri. Abbassando la temperatura in fase di maturazione si otterrà una birra più limpida.

Nelle figure seguenti (3 e 4) si riportano alcune fasi di lavorazione e lo schema riepilogativo dell'intero ciclo di lavorazione.



Figura 3. Fasi di lavorazione



Figura 4. Il percorso degli ingredienti per diventare birra
(Fonte: bevandeverona.it)

3. L'impianto di produzione

Un impianto di produzione per la birra, dal più piccolo a quello a livello industriale, è costituito da una serie di macchine e attrezzature (Fig. 5) che svolgono il proprio ruolo nello sviluppo delle diverse fasi di lavorazione che portano al prodotto finito.

I componenti principali sono:

- Mulino (macinatura dei malti d'orzo)
- Mixer (serbatoio di miscelazione e successivo ammostamento)
- Tino di filtrazione (separazione del mosto dalle trebbie del malto)
- Caldaia di cottura (bollitura, luppolatura e processo whirlpool)
- Scambiatore di calore (raffreddamento del mosto limpido)
- Serbatoio di fermentazione (aggiunta del lievito)
- Serbatoio di maturazione (incorporazione dell'anidride carbonica nella birra)
- Tubazioni di raccordo tra i componenti
- Dispositivi di sicurezza e controllo



Figura 5. Attrezzature birrifico

In funzione della tipologia e delle caratteristiche tecniche delle varie attrezzature (volumi, pressione, temperatura) l'impianto può rientrare tra quelli soggetti a controlli e verifiche da parte di INAIL, come previsto dalla normativa vigente per gli impianti e le attrezzature a pressione.

Nel caso dell'Azienda in esame, appunto, l'attività della Uot di Aosta, con la collaborazione della Uot di Avellino, ha riguardato molte delle attrezzature facenti parte dell'impianto di produzione, che sono state quindi sottoposte ai controlli previsti dall'art. 4 del d.m. 329/04 per la verifica di messa in servizio e alle successive attività previste per la dichiarazione di messa in servizio secondo l'art. 6 dello stesso decreto, con l'acquisizione della parte documentale a corredo delle attrezzature. In funzione poi delle caratteristiche tecniche proprie delle singole attrezzature, le stesse rientrano nel discorso delle verifiche successive secondo la periodicità prevista dall'Allegato VII del d.lgs. 81/08 e le modalità indicate dal Decreto 11 aprile 2011.

Tornando alle fasi di lavorazione e come descritto in precedenza, nel corso della fase finale della fermentazione l'intervento dell'operatore è finalizzato alla regolazione della quantità di CO₂ prevista, in funzione del livello di gasatura da attribuire al prodotto finito. Nel caso dell'azienda presa in considerazione, tale operazione avviene mediante una opportuna valvola che appunto svolge tale compito.

Si tratta di un dispositivo di fabbricazione Kieselmann (Fig. 6) che consente la regolazione del quantitativo di CO₂ nel serbatoio di maturazione.



Figura 6. Ubicazione e particolare valvola regolazione CO2

In funzione della temperatura e della pressione misurate, l'operatore effettua manualmente la taratura della pressione di intervento della valvola (per il tipo di valvola in esame il range di pressione è 0,50 ÷ 3,00 bar) per ottenere l'esatto volume di CO2 che deve avere il prodotto finito.

VOLUMI DI CO2								
bar								
	0,069	0,138	0,207	0,276	0,345	0,414	0,483	
-1,11	1,82	1,92	2,03	2,14	2,23	2,36	2,48	
-0,56	1,78	1,88	2,00	2,10	2,20	2,31	2,42	
0,00	1,75	1,85	1,95	2,05	2,16	2,27	2,37	
0,55		1,81	1,91	2,01	2,12	2,23	2,33	
1,11		1,78	1,86	1,97	2,07			
1,67			1,83	1,93	2,03			
2,22			1,79	1,88	1,99			
2,78				1,84	1,94			
3,33				1,80				
3,89								

Figura 7. Stralcio tabella correlazione P, T, CO2



Figura 8. Fasi di regolazione e di intervento della valvola

4. Conclusioni

A conclusione di questo itinerario nel variegato mondo della produzione della birra, una prima osservazione, nel caso dell'azienda presa come riferimento, al di là di tutti gli aspetti produttivi e impiantistici (che ovviamente fanno entrare in campo le attività di verifica dell'Inail sulle attrezzature interessate dalle normative vigenti), porta alla differenza del processo di produzione nel caso della birra artigianale rispetto a quella industriale.

La completa automazione del ciclo di produzione industriale, che non termina con la fermentazione ma con la pastorizzazione (per una più lunga conservazione del prodotto), trova nel ciclo artigianale una variabile costituita appunto dall'intervento manuale e "creativo" del birraio artigiano che, nell'ultima fase del ciclo produttivo, quando il prodotto matura all'interno del serbatoio, va a valutare i valori della temperatura e della pressione e regola il livello di CO₂ che dovrà caratterizzare la sua birra.

L'ultima osservazione vuole porre in evidenza l'importanza, anche per una realtà come un birrificio, piccolo o grande che sia, della sensibilizzazione di quanti operano in tale contesto sul duplice aspetto "produzione-sicurezza". Nessuna attività che miri ad un buon prodotto finale può permettersi di prescindere dalla giusta attenzione alla manutenzione degli impianti, nel rispetto dei tempi dettati dalla normativa; anche questo è un fattore che, insieme agli ingredienti, contribuisce al migliore risultato finale.

La sicurezza nell'ambito delle attività subacquee professionali

F. R. Filograsso¹, F. Ioppolo¹, B. Palombo¹, M. Godono²

¹ Inail - Uot di Pescara

² Sistemi Iperbarici Srl - Gruppo Sapio

Sommario

Sono definite in dettaglio le caratteristiche tecniche di una Camera Iperbarica itinerante (e dei locali dove deve essere allocata) per trattamenti terapeutici di decompressione, di supporto ad un cantiere di lavoro.

Il Decreto legge 24 gennaio 2012 n. 1: "Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività" [1], meglio noto come "Decreto Liberalizzazioni", all'articolo 16 ("Sviluppo di risorse energetiche e minerarie nazionali strategiche") comma 2 precisa che le prestazioni lavorative in immersione devono essere svolte secondo le norme vigenti e le regole di buona tecnica di cui alla norma UNI 11366: "Sicurezza e tutela della salute nelle attività subacquee ed iperbariche professionali al servizio dell'industria - Procedure operative" [2]; queste ultime realizzate da AISI (Associazione Imprese Subacquee Italiane) ed ispirate alle linee guida emanate per tutto il mondo da IMCA (International Marine Contractors Association). Lo studio in oggetto si basa proprio su questa norma tecnica nazionale con cui l'Italia si è messa al passo con l'Europa in tema di sicurezza nell'ambito delle attività subacquee professionali, dato che il riferimento diretto nella Legge gli conferisce un valore cogente.

La soluzione migliore per offrire il corretto supporto ai cantieri relativi ad attività subacquee è di realizzare e certificare una camera iperbarica come attrezzatura/insieme "itinerante", pertanto nell'analisi dei rischi saranno presi in esame tutti i fattori derivanti dalla specifica attività.

1. Premessa

Nell'aprile del 2017 è pervenuta alla Uot Inail di Pescara una richiesta di verifica di messa in servizio di una Camera Iperbarica adibita a supporto di attività subacquee da espletarsi nell'ambito di diversi porti o cantieri mobili. Ecco quindi la necessità di sviluppare un processo di verifica che tenga conto della particolarità dell'attrezzatura a pressione destinata a trattamenti terapeutici a supporto dei cantieri.

2. Camera iperbarica itinerante

La necessità di avere un'attrezzatura a pressione così particolare che potesse rispondere, nei diversi cantieri di utilizzo, ai requisiti di sicurezza previsti dalle normative applicabili e riscontrabili in sede di verifica, ha di fatto comportato la realizzazione di un impianto completo all'interno di un container opportunamente modificato e dotato di tutte le sicurezze necessarie al particolare utilizzo.

Pertanto, in accordo all'art. 6 del d.m. 329/04 [3] è stata presentata una relazione tecnica dettagliata, con lo schema dell'impianto recante le condizioni d'installazione e di esercizio con le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate.

Il container è stato suddiviso in due locali:

- Uno adibito alla camera iperbarica ed alla consolle di comando e controllo;
- L'altro adibito alla gestione dei quadri di decompressione dei gas necessari alla pressurizzazione (ARIA RESPIRABILE) e alla respirazione degli occupanti in terapia

(OSSIGENO MEDICALE), lasciando all'esterno le fonti di pressurizzazione sotto forma di pacchi bombole.



Figura 1. Camera Iperbarica in Container

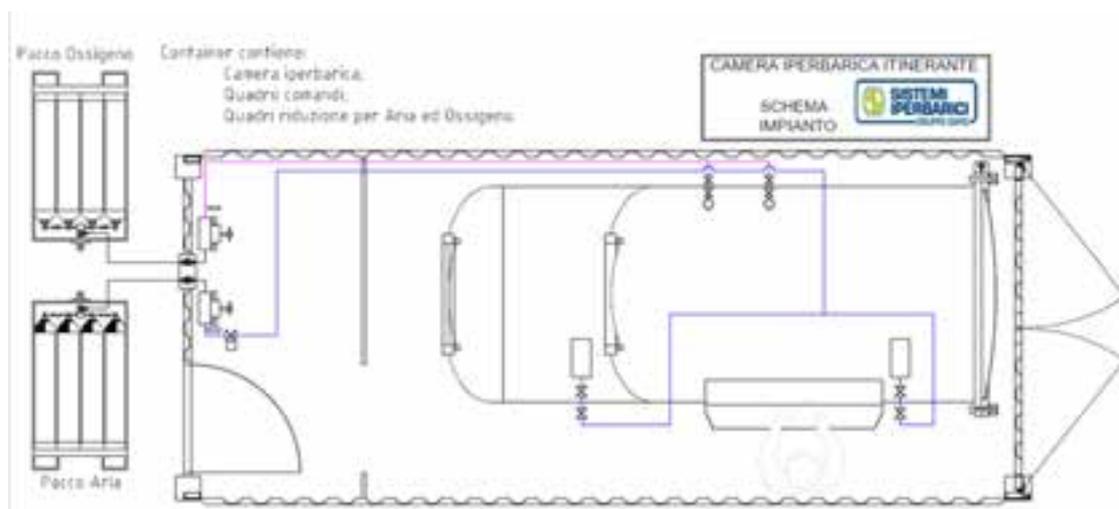


Figura 2. Suddivisione locali Container

L'impianto è pertanto costituito da:

1. Una camera iperbarica bollata a 5 bar, pressurizzata da:
 - n. 1 pacco bombole da trasporto, di aria respirabile, pressurizzato fino a 200 Bar; il pacco bombole viene collegato all'impianto attraverso l'apposita valvola (A.P.) posta nel vano ricavato lungo il lato posteriore del container, da qui attraverso una serpentina si collega al gruppo di riduzione di pressione mod. FRO 476, la pressione posta in linea è di max 11 bar (pressione di taratura della VDS posta a valle del gruppo di riduzione);
2. Sistema di erogazione aria ossigeno:

Il sistema ossigeno è costituito da:

 - n. 1 pacco bombole (come per l'aria), il pacco bombole viene collegato all'impianto attraverso l'apposita valvola (A.P.) posta nel vano ricavato lungo il lato posteriore del container (al lato di quella aria), da qui attraverso una serpentina si collega al gruppo di riduzione di pressione mod. FRO 420, la

pressione posta in linea è di max 10 bar (pressione di taratura della VDS posta a valle del gruppo di riduzione);



Figura 3. Locale GAS

Per ciascuna attrezzatura sono stati definiti i dispositivi di sicurezza intesi come:

- dispositivi per la limitazione diretta della pressione, quali ad es. valvole di sicurezza (**CSPRS: Controlled Safety Pressure Relief Systems**);
- dispositivi di limitazione che attivano i sistemi di regolazione e i dispositivi di "misurazione, controllo e regolazione per la sicurezza" (**SRMCR: Safety Related Measurement Control and Regulation**).

CATEGORIZZAZIONE DELLE ATTREZZATURE COSTITUENTI L'INSTALLAZIONE										
N	Denominazione	Fabbric. o Costrutt.	N. di fabbrica o Matric. Ispesl	PS (bar)	TS (°C)	Capacità (lt)	Fluido gruppo	Omologazione	VDS	P (bar)
1	Camera Iperbarica	DRASS GALEAZZI Spa	4964/88 BG NF 527	5	- 10°C÷+50°C	4100	1	ISPESL	016396 615	5
2	Rid.pressione aria FRO 476	FRO	"	250	- 10°C÷+50°C	"	"	art 3.3	016396 618	11
3	Rid. Pressione ossigeno FRO 420	FRO	"	250	- 10°C÷+50°C	"	"	art 3.3	016399 098	10
4	Tub.pressurizzazione camera	S.I. Srl	"	16	- 10°C÷+50°C	2	2	art 3.3	"	"
5	Tub.ossigeno alle maschere	S.I. Srl	"	16	- 10°C÷+50°C	1	1	art 3.3	"	"

Accessori di sicurezza			Dispositivi di controllo	
Attrezzatura	CSPRS	SRMCR	Strumentazione	Allarmi
1	<p>VDS tarata a 5 bar a protezione della Camera Iperbarica</p> <p>La VDS in CE è ininfluente in quanto non ha possibilità di pressurizzazione indipendente dal locale CP, pertanto non è stata installata</p>	EV (Elettro Valvola) di blocco della pressurizzazione per CP, attivata dal PLC di controllo	<p>Analizzatore di ossigeno in camera</p> <p>Manometro analogico scala 0-80 mt H2O per ciascun ambiente sulla consolle ed in ciascun ambiente della camera</p> <p>Trasduttore di pressione per l'ambiente di terapia CP</p> <p>Trasduttore di pressione per stoccaggio Aria</p> <p>Trasduttore di pressione per stoccaggio Ossigeno</p>	<p>Settaggio allarmi nel PLC come da manuale d'uso e manutenzione della C.I.</p>

2	VDS tarata a 11 bar a protezione della linea di pressurizzazione della Camera Iperbarica		<p>Trasduttore di pressione</p> <p>Manometro analogico a bordo rampa</p>	<p>Settaggio di allarmi come da manuale d'uso e manutenzione</p>
3	VDS tarata a 10 bar a protezione della linea di ossigeno ai mascherini della Camera Iperbarica		<p>Trasduttore di pressione</p> <p>Manometro analogico a bordo rampa</p>	<p>Settaggio allarmi come da manuale d'uso e manutenzione</p>

Nell'ambito della verifica di messa in servizio è stato valutato anche il container ed i relativi impianti in modo da acquisirne le dichiarazioni di conformità degli stessi in relazione alla particolare attività alla quale sono destinati.

3. Conclusioni

Il lavoro svolto per la verifica e messa in servizio della Camera Iperbarica Itinerante vorrebbe essere un punto di partenza per definire delle linee guida per le verifiche di queste particolari attrezzature a pressione; sono camere iperbariche non rivolte ad un utilizzo a carattere medico ma rappresentano un importante presidio di sicurezza per chi effettua lavori subacquei, settore spesso fuori dal campo di applicazione del DM 329/04, a meno che le attività non avvengano in terraferma. Quello che abbiamo potuto constatare, come Unità Operativa Territoriale Inail, è che spesso questi particolari utenti presentano delle richieste di verifica per impianti per i quali non risultano soddisfatti gli elementari requisiti di sicurezza; il lavoro di verifica, pertanto, ha comportato una fase preliminare di sensibilizzazione dell'utente a rivedere gli impianti alla luce delle normative vigenti, tenendo presente che il D. Lgs. n° 81 del 9 aprile 2008 [4] (Testo Unico sulla Sicurezza) e s.m.i. prevede precisi obblighi per il Datore di Lavoro e mette in evidenza le responsabilità dei diversi attori nell'ambito di un'attività lavorativa. Il tema della sicurezza in ambiente iperbarico rappresenta chiaramente un punto su cui la tecnologia subacquea concentra l'attenzione, allo scopo di rendere minimo il rischio, ma è significativo notare che solo un 15% dei sinistri nel campo apparecchiature è da attribuirsi ad un'installazione difettosa o carente di adeguati dispositivi di controllo o di sicurezza. La maggior parte degli incidenti, al contrario, è accidentale, dovuta a manchevolezza dell'elemento umano: l'uomo provoca l'85% di questi sinistri con il suo comportamento spesso inconsapevole, perché dovuto quasi sempre ad una mancanza od insufficiente conoscenza dei problemi di prevenzione e di protezione. Ecco allora la necessità di implementare delle procedure di controllo e di verifica ben definite allo scopo di ridurre le potenziali situazioni di rischio.

4. Bibliografia

- [1] Decreto legge 24 gennaio 2012 n. 1: "Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività";
- [2] UNI 11366: "Sicurezza e tutela della salute nelle attività subacquee ed iperbariche professionali al servizio dell'industria - Procedure operative";
- [3] d.m. 329/04 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art.19 del d.lgs. 25 febbraio 2000, n.93";
- [4] d.lgs. n° 81 del 9 aprile 2008 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".

Esposizione di un caso pratico sulla gestione in sicurezza degli accessi di operatori all'interno di un GVR

D. Sallustio¹, F. Sciommarella²

¹ Inail - Uot di Bari

² E.T.A. Energie Tecnologie Ambiente Srl – Centrale Termoelettrica - Manfredonia (FG)

Sommario

È noto che un generatore di vapore dedicato alla Termovalorizzazione rientra tra le attrezzature soggette al d.m. n. 329 del 1 dicembre 2004 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’art 19 del d.lgs. 25 febbraio 2000 n. 93” e al successivo d.m. 11 aprile 2011 che disciplina le modalità di effettuazione delle verifiche periodiche cui sono sottoposte le attrezzature di lavoro di cui all'allegato VII del d.lgs. n. 81/2008.

La riqualificazione periodica, con la verifica di integrità decennale, consiste nell’ispezione delle varie membrature esame visivo, esecuzione di controlli spessimetrici ed eventuali altri controlli che si rendano necessari a fronte di situazioni evidenti di danno. Per tale attività, così come in caso di riparazioni che si dovessero rendere necessarie per garantire la continuità di esercizio dell’attrezzatura, è necessario accedere all’interno con un operatore che, attraverso un passo d’uomo - accesso di limitate dimensioni - si troverà ad operare in uno spazio confinato. Al datore di lavoro è affidato il compito di identificare i pericoli specifici e valutare attentamente i rischi per l’accesso, anche considerando le condizioni al contorno. Nella presente memoria si espone un caso pratico su come, nel rispetto delle norme vigenti, viene gestito l’accesso in sicurezza degli operatori all’interno di un generatore di vapore a servizio di un termovalorizzatore, evidenziandone problematiche, soluzioni adottate, spunti di riflessione per migliorare le condizioni operative durante tali attività lavorative nonché di salvataggio in condizioni di emergenza.

1 Introduzione

“Prima di tutto pensare alla sicurezza” è una affermazione ed un punto di arrivo per chiunque gestisca personale operante su macchine ed impianti complessi e, nel caso specifico, un impianto di produzione di energia elettrica nella sua complessità di realizzazione e successiva gestione.

Per rendere tangibile l’affermazione “Safety First” (Prima la Sicurezza), occorre che i fabbricanti (in fase di costruzione) e i progettisti (in fase di ingegnerizzazione) di un impianto complesso realizzino pensando, oltre ad ottimizzare le prestazioni richieste come obblighi contrattuali, anche a chi poi dovrà esercire e mantenere, in maniera agevole e sicura, le apparecchiature e le macchine da loro approntate.

Al Gestore di un impianto complesso dovrebbe essere affidato un insieme di macchine e attrezzature che siano gestibili e performanti lo scopo per cui sono state acquistate o per cui è stato pianificato l’investimento. Al fine di garantire le prestazioni a lungo termine dell’impianto complesso è necessario sottoporre quest’ultimo a cicli programmati di manutenzione da eseguire in totale sicurezza e con utilizzo, laddove possibile, di attrezzature e/o personale impiegato nell’ordinaria manutenzione al fine di contenere i relativi costi di gestione.

Particolare attenzione è rivolta a quell’attività di manutenzione ordinaria e straordinaria, comprese le riparazioni e i controlli, che vede l’operatore, seppur dotato di idonei DPI, costretto ad operare in spazi confinati, angusti e poco illuminati, per i quali non si può

prescindere dal predisporre un piano operativo per il recupero dello stesso operatore in condizioni di emergenza.

2 La costruzione: prestazioni funzionali e minimizzazione dei costi

Al fine di essere sempre più competitivi sul mercato i Costruttori/Fornitori di impianti complessi, come una centrale Termoelettrica, hanno l'obiettivo di minimizzare i costi garantendo le prestazioni funzionali dell'insieme, adottando talvolta soluzioni costruttive di lay-out che lasciano al Gestore l'incombenza di affrontare i successivi problemi per l'esercizio e per la manutenzione delle relative macchie e attrezzature.

A tale proposito è fondamentale la competenza del Gestore che, in fase di stesura delle specifiche di acquisto, dovrà inserire, secondo la sua conoscenza ed esperienza nel settore, le prescrizioni appropriate relativamente a:

- numero, posizione e dimensioni minime delle aperture di accesso;
- predisposizione di scale e piani di servizio agli accessi oltre che alle apparecchiature che richiedano la presenza dell'operatore per il loro funzionamento, esercizio e manutenzione;
- realizzazione di vani interni che possano garantire la sopravvivenza e l'operatività corretta del manutentore consentendo di ottimizzare il proprio intervento in tutta efficienza e sicurezza;
- presenza di Manuali Operativi con disegni idonei alla gestione riportanti sezioni delle macchine con elenchi dettagliati dei componenti per evitare di impiegare parti e/o materiali non idonei, indicazione degli spazi necessari per estrazione/rimozione dei componenti.

Per realizzare quanto sopra, i costi di impianto possono lievitare e il Gestore, per una corretta comparazione tra le proposte concorrenti, deve dare le medesime prescrizioni ai potenziali concorrenti per la fornitura e controllarne l'effettiva comprensione e predisposizione al mantenimento degli impegni contrattuali poiché si tratta di richieste non direttamente influenti sulle prestazioni di quanto proposto, ma che mettono il Gestore ragionevolmente al sicuro per la gestione dell'impianto e/o dei suoi componenti.

3 L'accesso nei GVR (Generatore di Vapore a Recupero)

I GVR rientrano tra gli insiemi/attrezzature a pressione ricadenti nel d.m. n. 329/2004 per i quali sono previste delle specifiche verifiche di riqualificazione periodica [(a) verifiche d'integrità – (b) verifiche di funzionamento] che sono di responsabilità del datore di lavoro, in quanto a lui compete l'obbligo di mettere a disposizione attrezzature di lavoro rispondenti alle norme di sicurezza. Tra le attività previste nell'ambito della riqualificazione periodica, è prevista anche l'effettuazione delle ispezioni interne che mirano a individuare i possibili problemi interni del Generatore di Vapore e a identificare i possibili guasti o anomalie. L'accesso all'interno dei Generatori di Vapore, nell'ambito anche nelle diverse fasi del processo produttivo e in condizioni di esercizio e manutenzione presso l'utenza, deve far riferimento alla normativa cogente in contesti classificabili come ambienti sospetti di inquinamento o confinati (art. 1 comma 2 d.p.r. 177/2011). Per prevenire incidenti in ambienti sospetti di inquinamento o confinati, bisognerebbe evitare l'accesso o, laddove possibile, utilizzare sistemi alternativi (ad esempio utilizzo di robot con telecamere filoguidati) in grado di sostituire l'attività umana. In fase di costruzione e/o verifica e per gli interventi di riparazione questo, per ovvi motivi, non è possibile.

Per ogni situazione, è necessario identificare i pericoli specifici e valutare attentamente i rischi per l'accesso, anche considerando le condizioni al contorno. Questo, in particolare, quando si eseguono accessi all'interno dell'apparecchiatura già in esercizio presso

l'utilizzatore, condizione che richiede, prima dell'accesso, l'adozione di tutti i provvedimenti necessari per garantire la salute e sicurezza degli operatori addetti.

Come indicato nelle linee di indirizzo SGSL-AR [1], prima dell'inizio dei lavori, è sempre necessario effettuare una specifica analisi per l'identificazione dei pericoli dalla quale deve discendere un'adeguata valutazione dei rischi, tenendo conto delle possibili modifiche nel tempo delle condizioni ambientali e di lavoro iniziali, considerando, principalmente:

- l'ambiente di lavoro;
- la ventilazione;
- i monitoraggi ambientali;
- l'eventuale presenza di rischi indotti;
- l'eventuale isolamento dell'ambiente confinato;
- l'idoneità delle vie di accesso/uscita;
- la gestione delle emergenze/soccorso;
- la verifica della idoneità dei DPI (dispositivi di protezione individuale) e DPC (dispositivi di protezione collettiva);
- la verifica dei requisiti e di idoneità del personale addetto specificatamente formato.

In linea generale e sinteticamente, prima di accedere all'interno di un Generatore di Vapore, si procede con il raffreddamento della caldaia per circa 18 ore con insufflaggio di aria ambiente tramite il ventilatore dell'aria primaria. Terminata la fase di raffreddamento e di aerazione (già i rilevatori a camino misurano ossigeno pari a circa il 21% dopo pochi minuti dall'inizio della procedura di raffreddamento) vengono aperte tutte le portine (*considerando due portine per camera c'è la possibilità di utilizzare un ventilatore per immissione di aria forzata*). Mediante l'utilizzo di uno strumento portatile si misura la qualità dell'aria con lo scopo di verificarne la salubrità per la successiva predisposizione di un permesso di lavoro/modulo autorizzativo per l'accesso in sicurezza del lavoratore.

4 Problematiche di accesso riscontrate in pratica

Si riportano in questo paragrafo alcune immagini che evidenziano le problematiche che si riscontrano in casi pratici durante gli accessi in fase di ispezione, controllo e manutenzione.



Nelle foto n.1 e n.2 si evidenzia come la portina di accesso sia stata realizzata ad una quota troppo alta rispetto al ballatoio di accesso con difficoltà di accesso per l'operatore.



Nella foto n. 3 si evidenzia come le dimensioni ridotte della portina oltre a rendere difficoltoso l'accesso rende problematico un'eventuale operazione di soccorso in caso di emergenza per il lavoratore soggetto a malore. In questo caso l'accesso al vano è unico quindi si possono avere problemi di areazione all'interno del vano e inserire un ventilatore di areazione all'ingresso della portina ostruirebbe completamente la luce impedendo il passaggio.



Nelle foto n. 4, n.5 e n.6 si nota un caso comune di realizzazione di accessi ostruiti in parte da altre parti dell'impianto, in questo caso da una tubazione. Per evitare il problema sarebbe bastato prevedere, in fase di progetto, un altro percorso alla tubazione lasciando la piena agibilità davanti alla portina di accesso. Da notare le dimensioni che costringono l'operatore ad entrare in diagonale rispetto alla portina, anche in questo caso sarebbe estremamente complicato estrarre una persona che viene colta da malore all'interno dello spazio confinato.



Nelle foto n.7 e n.8 il problema di interferenza con parti di impianto è ancora più evidente: una tubazione passa pochi centimetri davanti la portina che si riesce ad aprire a malapena. Si ribadiscono le stesse considerazioni fatte in precedenza relativamente al soccorso in emergenza.



Nelle foto n.9 e n.10 si nota una situazione che capita spesso negli impianti, ovvero l'utilizzo di scale alla marinara per raggiungere accessi a spazi confinati che, pregiudica la facilità di accesso e rende difficoltoso anche il trasporto di una semplice borsa degli attrezzi. In questo

caso, inoltre, l'accesso alla portina è parzialmente ostruita da parti della struttura dell'impianto e il ballatoio realizzato per l'accesso permette a mala pena l'apertura della stessa. Si sottolinea ancora una volta la difficoltà di estrazione dell'operatore in caso di emergenza a causa degli spazi minimi e la difficoltà nella modalità di riporto a quota zero del malcapitato per permettere le prime cure necessarie.



Foto n.11



Foto n.12

La situazione evidenziata nelle foto n.11 e n.12, rispetto alle foto n.9 e n.10 è sicuramente migliore poiché il ballatoio è libero da ostacoli ma sarebbe stato meglio avere un ballatoio più ampio per permettere un accesso più agevole e soprattutto avere lo spazio adeguato a prestare i primi soccorsi ad un eventuale operatore colto da male e che deve essere evacuato dall'interno. Rimane l'inadeguatezza della scala alla marinara che non permette di scendere in modo adeguato chi ha bisogno di cure oltre a non essere agevole per il trasporto di materiali e/o attrezzi fino al ballatoio. Guardando la foto n.12 si vede che con un minimo investimento si potrebbe migliorare di molto lo spazio del ballatoio; infatti basterebbe spostare la scala alla marinara più a sinistra e far diventare ballatoio tutta la zona, chiaramente modificando anche il corrimano, migliorando, così, la mobilità degli operatori e la loro sicurezza.



Foto n.13

Nella foto n.13 si vede come la posizione del ballatoio rispetto alla portina non è idonea. Per poter accedere l'operatore è costretto a mettersi a carponi. La posizione non agevola una veloce ispezione dall'esterno; anche l'operatore che deve rimanere all'esterno (previsto ai fini della sicurezza) per controllare che all'interno le operazioni si svolgano correttamente è costretto ad assumere una posizione non idonea per avere piena visione di quello che succede all'interno per tutta la durata dell'intervento. Per evitare il problema sarebbe bastato

verificare e adeguare, in fase di progettazione, la posizione dei ballatoi in funzione degli accessi.



Foto n.14



Foto n.15

Nella foto n.14 si vede come pur avendo un ballatoio in prossimità della portina è stato previsto l'accesso alla stessa tramite una scala marittima dal ballatoio superiore come si evince nelle foto n.15. Sarebbe bastato realizzare una scala dal ballatoio in basso per raggiungere agevolmente la portina allargando il ballatoio a servizio della portina per migliorare la mobilità nell'entrare ed uscire dalla stessa.

5 Esempi di soluzioni per il miglioramento degli accessi

Si riportano di seguito alcune immagini inerenti all'impianto E.T.A. s.r.l. di Manfredonia (FG) che illustrano come si sia cercato già in fase di progettazione e in seguito all'esperienza dell'esercizio dell'impianto realizzare accessi che tengano conto delle considerazioni fatte al precedente paragrafo 4.



Foto n.16



Foto n.17

Nella foto n.16 (accesso alla parte bassa dell'economizzatore) si vede come il ballatoio è ampio, la dimensione della portina è adeguata al passaggio di una persona, e l'altezza dal ballatoio è tale che sporgendosi dalla portina non si possa correre il rischio di cadere nel

vuoto in quanto in quella zona all'interno non vi è un piano di appoggio. Stesse considerazioni si possono fare per la foto n.17 che è più bassa dal piano del ballatoio perché all'interno vi è un piano di appoggio poco più in basso del profilo inferiore della portina. Questi accorgimenti, insieme al fatto che alla stessa quota in maniera speculare vi è un'altra portina delle stesse dimensioni, permette di poter accedere comodamente all'interno e garantire una adeguata ventilazione, e, nel caso, di utilizzare un ventilatore per migliorare la circolazione dell'aria. Inoltre, l'operatore che presidia l'esterno, riesce comodamente a vedere cosa succede all'interno in modo da intervenire in caso di necessità.



Foto n.18



Foto n.19

Anche nelle foto n.18 e n. 19 si vedono gli ampi spazi e le dimensioni delle portine per garantire un accesso comodo e soprattutto sicuro



Foto n.20



Foto n.21

Nella foto n. 20 si osserva la soluzione trovata per accedere alle portine realizzando un ballatoio appositamente a una quota più bassa di quello principale, risolvendo tutte le problematiche evidenziate fino ad ora.

Nella foto n. 21 si nota la realizzazione di una scaletta per un agevole accesso considerata la quota elevata della portina.

Nelle prime fasi di esercizio dell'impianto è nato un problema di accesso in sicurezza all'interno della camera di combustione in quanto, in qualche occasione, si formavano delle fusioni di ceneri a quote elevate. Queste trovandosi in quota (prossimità dei cosiddetti nasi) risultavano difficilmente raggiungibili dal basso, e si correva il rischio che distaccandosi potessero cadere addosso agli operatori entrati in camera di combustione per effettuare ispezioni o lavori di manutenzione. Per eliminare questo pericolo si sono realizzate 4 portine all'altezza dei nasi della camera di combustione che permettono l'ispezione e l'eventuale pulizia di pezzi che potrebbero cadere permettendo il successivo ingresso in camera di combustione in tutta sicurezza.



Nelle foto da n.22 a n.25 si vedono le varie fasi della realizzazione delle nuove portine. L'operazione ha comportato la rimozione dei tubi dritti della parete per la successiva installazione di tubi appositamente sagomati per realizzare l'apertura. Successivamente sono stati gettati il refrattario all'interno della cassa realizzata in ferro e lungo la parete interna della camera di combustione.



Foto n.26

Nella foto n.26 si vede come oltre alla realizzazione delle portine sono stati adeguati i ballatoi in maniera da creare un accesso agevole e sicuro.



Foto n.27



Foto n.28

Nelle foto n.27 e n.28 si nota la parte interna degli accessi realizzati.

La realizzazione di queste portine ha garantito l'accesso in sicurezza all'interno dalla camera di combustione permettendo di eliminare tutti gli eventuali corpi (ceneri fuse o altro) prima dell'accesso.

La presenza di queste portine garantisce anche una buona areazione della camera di combustione nel momento in cui vengono effettuati gli interventi di manutenzione.

6 Conclusioni

Da quanto emerso nella suddetta esposizione, è indispensabile, per consentire accessi agevoli e sicuri in un Generatore di Vapore, adottare i seguenti fondamentali concetti:

- Verificare la posizione rispetto al vano a cui serve accedere (se è possibile fare sempre in modo che superata la portina ci sia un piano di appoggio per agevolare l'ingresso).

- Verificare che le dimensioni siano adeguate in primis per il passaggio delle persone (bisogna sempre considerare l'ipotesi peggiore di dover estrarre una persona che ha perso i sensi) e poi in funzione delle dimensioni di parti di ricambio da introdurre nel vano (spesso capita di dover operare aperture aggiuntive per poter inserire i pezzi di ricambio).
- Realizzare gli accessi in maniera che sia agevole l'accesso e sia possibile posizionare un uomo estratto in caso si sentisse male all'interno dello spazio confinato.
- Verificare che il vano di accesso abbia un piano di appoggio agevole facendo in modo che l'altezza della portina sia tale che nessuno sporgendosi possa cadere all'interno.
- Evitare di realizzare la portina ad altezza del ballatoio poiché l'accesso sarebbe possibile solo mettendosi a carponi. Tale posizione renderebbe più complicata la funzione di controllo delle operazioni dall'esterno da parte del operatore che secondo norma deve presidiare le operazioni che si svolgono all'interno dello spazio confinato.
- Verificare se possibile realizzare sempre almeno due portine per vano per poter garantire una sufficiente areazione e, nel caso, consentire l'installazione di sistemi di ventilazione forzata in caso di bisogno, senza chiudere l'unico accesso.

È evidente che l'aumento della dimensione delle aperture di passaggio comporta inevitabilmente una riduzione della stabilità dell'attrezzatura a pressione con richiesta di incremento di spessori delle pareti o con l'applicazione di piastre di rinforzo in adiacenza alle aperture. Questo per i costruttori ha un'incidenza dal punto di vista economico e di competitività, anche se, molto probabilmente, si garantirebbe un minor costo di gestione dell'impianto in quanto più agevoli e sicure sarebbero le attività di manutenzione. Però si è notato anche, come spesso si incontrano problematiche connesse a soluzioni di lay-out (percorsi tubazioni e scale prossime alle aperture, ballatoi non agevoli, ecc.) che, pur garantendo le prestazioni funzionali dell'impianto lasciano in mano al gestore di quest'ultimo il compito di garantire la sicurezza dei lavoratori nel pieno rispetto della normativa.

È, dunque, fondamentale che in fase di ingegnerizzazione si prevedano le opportune soluzioni impiantistiche che, nel raggiungere l'obiettivo di ottimizzare le prestazioni richieste dagli obblighi contrattuali, possano garantire di esercire e mantenere le attrezzature e le macchine in totale sicurezza in accordo alla legislazione vigente in materia.

7 Bibliografia

[1] Gestione del rischio di infortuni legati agli ambienti confinati. Linee di indirizzo SGSL-AR per l'implementazione dei sistemi di gestione per la salute e la sicurezza nelle imprese a rete SGSL – AR (Inail, Consel).

[2] Manuale illustrato per lavori in ambienti sospetti di inquinamento o confinati ai sensi dell'art. 3 comma 3 del DPR 177/2011 (Pubblicazione realizzata dal Sottogruppo Ambienti Confinati del Comitato 1 della Commissione Consultiva Permanente per la Salute e Sicurezza sul Lavoro).

[3] Documentazione fotografica rilasciata per concessione della ditta E.T.A. Srl Centrale Termoelettrica di Manfredonia (FG).

[4] Gruppo di lavoro: ambienti confinati. Indicazioni operative in materia di sicurezza ed igiene del lavoro per i lavori in ambienti confinati Regione Emilia-Romagna.

[5] INAIL. Guida operativa. Rischi specifici nell'accesso a silos, vasche e fosse biologiche, collettori fognari, depuratori e serbatoi utilizzati per lo stoccaggio e il trasporto di sostanze pericolose. 2008.

[6] Osha. Permit-required confined spaces [Internet]

https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9797.

Sicurezza, conduzione e gestione delle macchine frigorifere

A. Nuzzo¹, G. De Gennaro¹, F. P. Nigri¹

¹ Inail - Uot di Bari

Sommario

Le macchine frigorifere, ampiamente diffuse nelle industrie alimentari, presentano oltre ai problemi di sicurezza legati al superamento della pressione, anche e soprattutto, quelli conseguenti al rischio di rilascio in ambiente del fluido impiegato nel ciclo.

Nei processi di refrigerazione in campo industriale è molto diffuso l'R717 (ammoniaca) che è un fluido tossico, infiammabile e corrosivo pertanto questi impianti devono essere progettati il più possibile a tenuta ermetica, caratteristica questa che deve essere mantenuta anche durante la fase di funzionamento. Il tema della sicurezza di questi impianti è affrontato in modo dettagliato dalla norma UNI EN 378 che, suddivisa in quattro parti, ne definisce i requisiti di base, la progettazione, la costruzione, la scelta del fluido, l'installazione, l'esercizio, la manutenzione, la riparazione e il riutilizzo.

In tale norma, nel capitolo relativo alla manutenzione, viene specificato che ogni impianto frigorifero deve essere assoggettato a "manutenzione preventiva" in accordo con il manuale di istruzione.

Tra le tipologie di manutenzione preventiva si colloca la manutenzione predittiva che viene effettuata a seguito dell'individuazione di uno o più parametri legati allo stato di salute della macchina, quali ad esempio la misura di vibrazioni, la termografia, l'analisi delle correnti assorbite, allo scopo di individuare il tempo residuo prima del guasto.

Nella presente memoria si intende affrontare un caso di studio con un esempio concreto di applicazione della manutenzione predittiva ad un impianto frigorifero.

1. La sicurezza delle macchine frigorifere

1.1 Introduzione

Gli impianti frigoriferi, oltre che rispettare la direttiva macchine 2006/42/CE, rientrano tra le attrezzature a pressione e pertanto devono seguire anche la direttiva PED 2014/68/EU. Per tali impianti le problematiche da affrontare, a partire dalla costruzione fino all'installazione ed all'esercizio, non riguardano solo il campo della sicurezza ma anche quello ambientale. I fluidi frigoriferi impiegati sono spesso afferenti al gruppo 1 e quindi bisogna valutare attentamente il rischio connesso all'eventuale rilascio di fluido nell'ambiente nonché quello relativo all'accidentale diretto contatto con il refrigerante medesimo.

L'ammoniaca (NH₃ o R717 secondo l'ASHRAE o American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering) è stata uno dei primi refrigeranti ad essere utilizzato per il funzionamento degli impianti frigoriferi. Successivamente con l'avvento dei refrigeranti di natura chimica (CFC, HCFC) tale fluido è stato messo in disparte.

Col tempo ci si è resi conto che l'utilizzo di questi nuovi fluidi ha determinato un assottigliamento della fascia di ozono in quanto nella stratosfera le molecole di CFC (clorofluorocarburi totalmente alogenati) vengono dissociate dalla radiazione solare con liberazione di atomi di cloro in grado di distruggere l'ozono (O₃) che costituisce un utile filtro contro le radiazioni U. V. Altro effetto deleterio riscontrato, a partire dagli anni '80, è stato quello del riscaldamento globale del pianeta.

Il Protocollo di Montreal, in attuazione della Convenzione di Vienna (1985), ha stabilito nel 1987 gli obiettivi e le misure per la riduzione delle produzioni e degli usi delle sostanze pericolose per la fascia di ozono stratosferico ed è entrato in vigore nel gennaio 1989.

Questo stabiliva i termini di scadenza entro cui le Parti firmatarie si impegnavano a contenere i livelli di produzione e di consumo delle sostanze dannose (Clorofluorocarburi, tetracloruro di carbonio, tricloroetano, ecc.), e disciplinava, tra le altre cose, l'attività di ricerca, scambio di informazioni, ecc.

Al protocollo di Montreal si sono succedute nel tempo varie revisioni, regolamenti europei e leggi nazionali e pertanto sia i CFC che gli HCFC sono stati progressivamente eliminati e sostituiti con nuovi fluidi privi di cloro (HFC) a potenziale distruttivo nullo nei confronti dell'ozono.

Gli operatori del settore della refrigerazione sono stati indotti a considerare nuovamente i refrigeranti naturali, come l'ammoniaca, e questo non solo a seguito degli effetti del riscaldamento globale ma anche a causa dei costi sempre più elevati dell'energia che ha prodotto un crescente interesse nei confronti dell'uso di refrigeranti efficienti.

Infatti l'ammoniaca, che ha un GWP (Global Warming Potential) e un ODP (Ozone Depletion Potential) pari a zero (Tabella 1), offre, rispetto alla maggior parte dei refrigeranti chimici, anche migliori proprietà di trasferimento del calore considerando il suo elevato valore del calore latente di vaporizzazione a pressione atmosferica (1369,12 kJ/Kg) nonché la sua bassa temperatura di saturazione sempre a pressione atmosferica ($T_{sat} = -33,35^{\circ}\text{C}$).

1.2 Schema impianto frigorifero

Le macchine frigorifere utilizzano, durante il proprio funzionamento, il così detto ciclo frigorifero (o ciclo inverso) consistente in una trasformazione termodinamica ciclica che permette di trasferire calore da un ambiente a bassa temperatura ad uno a temperatura superiore esattamente al contrario di quanto avviene normalmente in natura.

Le parti componenti di una macchina frigorifera, che utilizzi il ciclo a compressione, sono sostanzialmente quattro: un compressore, un condensatore, una valvola di espansione (o di laminazione) ed un evaporatore. La possibilità di poter realizzare un ciclo inverso è dovuta all'apporto di lavoro esterno prodotto dal compressore. Nella Figura 1 è riportato lo schema di un ciclo frigorifero con i componenti principali che lo costituiscono.

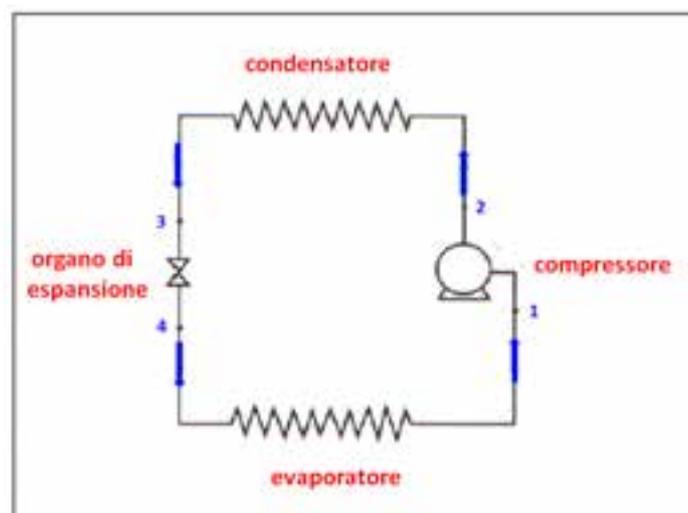


Figura 1. Schema di ciclo frigorifero

La condensazione del fluido frigorifero può avvenire tramite torri di condensazione evaporative nelle quali si verifica lo scambio termico del fluido con acqua ed aria. In figura 2 è riportata una torre di condensazione ed in figura 3 un compressore per ammoniaca.



Figura 2. Torre di condensazione



Figura 3. Compressore per ammoniaca

1.3 Uso industriale dell'ammoniaca

Molte industrie alimentari, che hanno necessità di fare frigoconservazione, utilizzano frigoriferi ad ammoniaca anidra per la conservazione di frutta e verdura (con temperature dell'ordine di $3 \div 4$ °C) e per la conservazione di carne, prodotti ittici, gelati (con temperature nell'ordine di $-30 \div -50$ °C). In quest'ultimo caso è largamente diffuso l'uso di celle di congelamento e tunnel di surgelazione.

Gli impianti frigoriferi possono essere realizzati sia con l'impiego diretto del fluido frigorifero, che nella cella scambia direttamente con il prodotto da congelare, che tramite l'utilizzo di un fluido di refrigerazione intermedio. Per impianti con fluido refrigerante intermedio, minori sono le temperature richieste nella cella e maggiore è la viscosità del fluido intermedio utilizzato con conseguenti maggiori costi energetici per la circolazione del fluido.

L'ammoniaca, come già innanzi illustrato, è uno dei refrigeranti più efficienti dal punto di vista energetico con migliori proprietà di trasferimento del calore rispetto alla maggior parte dei refrigeranti chimici e pertanto consente l'impiego di apparecchiature aventi una superficie di scambio termico inferiore e costi di costruzione più bassi. Ovviamente l'elevato scambio termico permette anche una riduzione dei costi di funzionamento. Inoltre il costo dell'ammoniaca (per kg) è notevolmente inferiore a quello degli HFC a cui si deve aggiungere il vantaggio che l'ammoniaca, allo stato liquido, ha una densità inferiore rispetto agli HFC.

1.4 Requisiti di sicurezza ed ambientali

Gli impianti frigoriferi, sia in relazione ai vari componenti che li costituiscono e sia in relazione all'intero impianto (insieme), rientrando tra le attrezzature a pressione, devono soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza contenuti nella direttiva PED 2014/68/EU. Essendo questa una direttiva di prodotto, ai fini della progettazione, costruzione ed installazione è necessario fare riferimento a norme di buona tecnica che se armonizzate costituiscono presunzione di conformità alla direttiva e quindi soddisfacimento dei RES in essa contenuti.

Questi impianti presentano parti in movimento ed utilizzano, nel compimento del proprio ciclo, gas refrigeranti in pressione che possono essere pericolosi nonché inquinanti per l'ambiente. A livello internazionale, i requisiti per la sicurezza e la salvaguardia dell'ambiente nella progettazione, costruzione, installazione e funzionamento degli impianti frigoriferi sono disciplinati dalla norma ISO 5149 "Refrigerating systems and heat

pumps – Safety and environmental requirements” mentre le specifiche riguardanti i refrigeranti sono contenute per esempio nella norma ISO 187.

Le norme internazionali sono state il riferimento per la stesura dello standard europeo costituito dalla norma EN 378, divisa in 4 parti, che nel tempo ha subito varie modifiche fino all'edizione attuale UNI EN 378:2017 pubblicata il 13 aprile 2017.

L'attuale revisione della norma armonizzata è stata resa necessaria per adattarla sia alla direttiva PED 2014/68/EU che al Regolamento CE 1272/2008 (CLP) relativo alla classificazione, all'etichettatura ed all'imballaggio delle sostanze chimiche e delle miscele. Il recepimento della direttiva PED 2014/68/EU è stato suddiviso in due fasi, secondo quanto prescritto dall'art. 49, che ha indicato la data del 1 giugno 2015 per l'entrata in vigore dell'art. 13, “Classificazione delle attrezzature a pressione”, con menzionato l'obbligo di fare riferimento al Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) per l'individuazione del gruppo di appartenenza del fluido mentre il 19 luglio 2016 sono entrati in vigore i restanti articoli.

1.5 Norma armonizzata di riferimento UNI EN 378.2017

Come innanzi precisato la norma armonizzata UNI EN 378:2017 è suddivisa in n. 4 parti e specificatamente:

- *UNI EN 378-1:2017 “Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 1: Requisiti di base, definizioni, criteri di classificazione e selezione”*

La presente parte della EN 378 specifica i criteri:

- di classificazione degli impianti di refrigerazione se diretti, con l'utilizzo di un unico vettore termico, o indiretti;
- di base per la progettazione e la costruzione;
- di classificazione dei fluidi frigoriferi in base sia all'inflammabilità che alla tossicità, nonché ai fini della salute e sicurezza;
- di scelta del fluido frigorifero in base alla potenzialità di riscaldamento globale (GWP) ed alla potenzialità di assottigliamento dello strato di ozono (ODP).

Nella Tabella 1 è riportato un esempio dei valori di ODP e GWP di alcuni fluidi frigoriferi

Fluido	ODP	GWP	Ciclo di vita in atmosfera (anni)
Triclorofluorometano (R-11)	1	4750	45
Clorodifluorometano (R-22)	1	10890	100
2,2-dicloro-1,1,1-trifluoroetano (R-123)	0,02	77	1,3
Propano (R-290)	0	20	0,041
Anidride Carbonica (R-744)	0	1	> 50
Ammoniaca (R-717)	0	0	0,01

Tabella 1. ODP e GWP di alcuni fluidi frigoriferi

- *UNI EN 378-2:2017 Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 2: Progettazione, costruzione, prova, marcatura e documentazione.*

La presente parte della norma nell'indicare le specifiche di progettazione e costruzione, oltre a fare riferimento alla direttiva PED 2014/68/EU, pone l'attenzione sulla pressione massima ammissibile che deve tenere conto di una serie di parametri quali ad esempio la temperatura ambiente, il metodo di sbrinamento, il possibile accumulo di gas non condensabili, l'irraggiamento solare.

Quando gli evaporatori possono essere sottoposti ad alta pressione, per esempio durante lo sbrinamento mediante gas caldo o un'operazione di ciclo invertito, deve essere utilizzata la temperatura specificata nel lato di alta pressione.

I materiali da utilizzare per la costruzione, la saldatura e la brasatura forte devono resistere ai fluidi frigoriferi utilizzati ed alle sollecitazioni meccaniche, termiche e chimiche prevedibili. La norma si sofferma specificatamente sulle tubazioni, sui giunti, sulla saldatura e sulla brasatura per assicurare una buona tenuta del circuito ed impedire la dispersione nell'ambiente del fluido refrigerante. Le valvole di intercettazione devono essere progettate in modo da evitare qualsiasi manovra da parte di persone non autorizzate, per esempio mediante cuffie, manicotti, serrature che possono essere manovrate solo con utensili, da parte di persone autorizzate. I compressori devono essere progettati secondo la UNI EN 12693:2008 "Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Compressori refrigeranti di tipo volumetrico".

Lo scarico di fluido frigorifero all'intervento dei dispositivi di sicurezza, quali valvole di sicurezza e dischi di rottura, deve essere realizzato in modo tale da non mettere in pericolo le persone ed i beni e scaricato in quantità adeguata al mezzo assorbente utilizzato.

Un esempio applicativo di quanto innanzi è evidenziato nelle figure sottostanti. In particolare sono raffigurate n. 2 valvole di sicurezza afferenti ad una valvola deviatrice a cassetto (Figura 3) il cui elemento di regolazione (Figura 4) è protetto da cappuccio metallico (Figura 3).



Figura 3



Figura 4

Tutte le tubazioni di scarico delle valvole di sicurezza presenti all'interno dell'impianto sono state convogliate e la tubazione finale termina nel mezzo assorbente.

Nella Figura 5 è raffigurato un recipiente, allocato all'esterno della centrale frigo, contenente acqua ed alla cui sommità si osserva l'ingresso del tubo collettore delle varie tubazioni di scarico di tutti i dispositivi di sicurezza installati nella centrale frigo.



Figura 5

- UNI EN 378-3:2017 – *“Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 3: Sito di installazione e protezione delle persone”*

La presente parte della norma si sofferma sulle peculiarità della sala macchine quali dimensioni, accessibilità, ventilazione, rilevatori di fuoriuscite di fluido, apparecchiature per la protezione delle persone ed attrezzature di soccorso.

- UNI EN 378-4:2017: *“Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 4: Conduzione, manutenzione, riparazione e recupero”*

La presente parte della norma fornisce stabilisce procedure per il funzionamento, la manutenzione, la riparazione di impianti di refrigerazione e il recupero dei refrigeranti. La manutenzione deve essere effettuata in modo tale che siano minimizzati gli incidenti al personale, i componenti dell'impianto rimangano in buono stato di funzionamento, siano identificate e riparate le perdite di fluido frigorifero e di olio. L'estensione e il calendario degli interventi di manutenzione devono essere completamente descritti nel manuale d'istruzione secondo quanto previsto dalla EN 378-2.

La norma prescrive che ogni impianto frigorifero deve essere assoggettato a manutenzione preventiva in accordo con il manuale d'istruzione. *Le parti interessate per l'impianto frigorifero devono assicurare che lo stesso sia ispezionato, regolarmente supervisionato e mantenuto in modo soddisfacente.*

In caso di manutenzione ordinaria che non comporta influenze sull'impianto frigorifero né sulla sua regolazione e che non richiede alcuna conoscenza specifica della tecnica di refrigerazione può essere effettuata da una persona di adeguata competenza alle dipendenze della persona responsabile.

La manutenzione deve essere effettuata in modo tale che:

- a) siano minimizzati gli incidenti al personale;*
- b) sia prevenuto il deterioramento dei beni;*
- c) i componenti dell'impianto rimangano in buono stato di funzionamento;*
- d) siano mantenute la funzione e la disponibilità dell'impianto;*
- e) siano identificate e riparate le perdite di fluido frigorifero e di olio;*
- f) lo spreco di energia sia minimizzato.*

L'estensione e il calendario degli interventi di manutenzione devono essere completamente descritti nel manuale d'istruzione, vedere EN 378-2.

Quando si usa un sistema di raffreddamento o di riscaldamento secondario il fluido termovettore deve essere controllato periodicamente per quanto riguarda la sua composizione e la presenza di fluido frigorifero.

Devono essere effettuate regolari prove di tenuta, controlli e verifiche delle attrezzature di sicurezza, secondo quanto descritto nella EN 378-2.

Lo stato dell'arte relativamente all'impiego sicuro di ammoniaca nel settore della refrigerazione è ben riassunto da un estratto dalla *“Relazione della Commissione Europea relativa agli ostacoli posti dai codici, dagli standard e dalla legislazione all'utilizzo di tecnologie rispettose del clima nei settori della refrigerazione, della climatizzazione, delle pompe di calore e delle schiume”* datata 30/11/2016 che, per l'uso dell'ammoniaca recita testualmente:

“Nella maggior parte dei casi, non sembra che i codici, gli standard o la legislazione, sia a livello europeo che nazionale, costituiscano un ostacolo significativo all'utilizzo di ammoniaca o di CO2 come refrigeranti. Provvedono ad assicurare l'uso sicuro di tali refrigeranti consentendo, al contempo, una più ampia penetrazione sul mercato di sistemi e apparecchiature che utilizzano tali sostanze. Gli esperti concordano sul fatto che l'ammoniaca è un refrigerante da utilizzare con cautela, ma che il rispetto delle prescrizioni degli standard di sicurezza vigenti, come l'EN 378 sono un passo avanti nella direzione giusta. Le prescrizioni nazionali aggiuntive non sembrano eccessivamente restrittive nella

maggior parte degli Stati membri. Analogamente, per le apparecchiature che utilizzano il CO₂, le prescrizioni in materia di sicurezza stabilite dagli standard vigenti, come l'EN 378 e la direttiva sulle apparecchiature a pressione, offrono un quadro adeguato per l'uso sicuro di tali sistemi in futuro."

2. La conduzione delle macchine frigorifere

2.1 Introduzione

Come si è innanzi illustrato è notevolmente aumentata nel tempo l'attenzione verso i rischi derivanti dall'impiego delle cosiddette sostanze pericolose sia per gli ambienti di lavoro che agli ambienti di vita.

Di conseguenza abbiamo assistito, in questi anni, ad un progressivo cambiamento della normativa europea relativa alle sostanze chimiche quali ad esempio la normativa ADR, il Regolamento REACH – riguardante la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche ed il Regolamento CLP. Quest'ultimo ha introdotto diverse novità in merito alla classificazione ed etichettatura delle sostanze e delle miscele con l'adozione del sistema GHS (sistema globale armonizzato della classificazione ed etichettatura delle sostanze chimiche).

La legislazione italiana ha affrontato tali problematiche sin dai primi del '900 con la pubblicazione, sulla Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia n. 49 del 1 marzo 1927, del r.d. n.147 del 9 gennaio 1927 "Approvazione del Regolamento speciale per l'impiego dei gas tossici", in applicazione dell'art. 57 del Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza, approvato con r.d. n.1848 del 6 novembre 1926. Tale regolamento, sebbene modificato nel corso degli anni in alcuni punti, risulta ancora in vigore e costituisce una *stringente linea guida* per coloro che sono impegnati nell'utilizzo di sostanze pericolose.

Ciò che del Regolamento n. 147 del 1927 è cambiato, nel corso del tempo, riguarda fondamentalmente l'elenco dei gas tossici e l'Autorità di riferimento per la richiesta delle autorizzazioni necessarie all'utilizzo dei gas tossici a seguito dell'evoluzione istituzionale dell'Italia. Infatti originariamente le competenze erano in capo ad i Prefetti mentre successivamente il Ministero della Sanità, istituito con la Legge 13.03.1958, ha rivendicato la competenza del medico provinciale per il rilascio delle autorizzazioni previste dal Regolamento. Con l'entrata in vigore poi del all'articolo 13 del d.p.r. n. 4 del 14/01/1972, "Trasferimento alle regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative statali in materia di assistenza sanitaria ed ospedaliera e dei relativi personali ed uffici", le competenze sono passate all'Assessorato Regionale della Sanità, Ufficio del Medico Provinciale. Infine, con l'istituzione delle USSL (Unità Socio Sanitarie Locali), l'ufficio del medico provinciale è stato abolito ed è stato istituito il "Dipartimento di Prevenzione".

Naturalmente la conduzione delle macchine frigorifere non può prescindere dall'applicazione di detto Regolamento.

2.2 Normativa di riferimento per la conduzione delle macchine frigorifere: r.d. n.147 del 9 gennaio 1927

All'art.1 è *definito gas tossico* qualsiasi sostanza che si trova allo stato gassoso, o che per essere impiegata deve passare allo stato di gas o vapore, che è può essere utilizzata sia per il suo potere tossico e sia per scopi diversi da tale caratteristica, e che è *riconosciuta pericolosa per la sicurezza e l'incolumità pubblica*. In allegato al r.d. n.147 sono elencate le sostanze ritenute tossiche compresa l'ammoniaca. L'elenco è stato successivamente modificato e sostituito con d.m. del 6 febbraio 1935 dell'allora Ministro degli Interni.

All'art. 3 del r.d. n. 147 troviamo la definizione di *impiego dei gas tossici* che consiste nell'*utilizzazione* a qualsiasi scopo, nella *custodia* a qualsiasi scopo, nella *conservazione* a qualsiasi scopo ed nel *trasporto*.

Tutti gli impieghi innanzi elencati sono soggetti ad autorizzazione in quanto il titolare deve dimostrare di dare le necessarie garanzie di sicurezza, sotto i diversi punti di vista dell'adeguatezza degli impianti, delle procedure di utilizzazione e della competenza del personale impiegato. A questo proposito il regolamento prevede che gli addetti alle operazioni relative al gas tossico siano provvisti di apposita patente ed inoltre richiede che la direzione tecnica dei servizi relativi all'impiego del gas tossico sia riservata ad un laureato in chimica, chimica industriale, ingegneria chimica o farmaceutica. Nel caso dell'ammoniaca l'autorizzazione è prevista quando la massa della sostanza in questione supera i 75 Kg.

3. La gestione delle macchine frigorifere

3.1 Introduzione

Una gestione efficiente di un impianto consiste nel preservare nel tempo il suo corretto funzionamento. In un contesto, come quello industriale, nel quale è necessario garantire la sicurezza delle persone e la disponibilità degli impianti, alla funzione gestionale si associa quella manutentiva. La manutenzione, se concepita ed attuata in modo corretto, permette di:

- conservare gli impianti;
- garantire un funzionamento ottimale delle macchine;
- minimizzare le fermate per guasti;
- garantire la sicurezza delle persone e la tutela dell'ambiente.

Negli ultimi decenni la concezione della manutenzione si è profondamente evoluta ed ha assunto un ruolo sempre più complesso e centrale nel processo produttivo. E' diventata una vera e propria *mission* e si è trasformata da attività prevalentemente di riparazione, e fonte di costi, ad un complesso sistema gestionale orientato a prevenire i guasti.

3.2 Manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva è una manutenzione di tipo preventivo che permette di individuare in anticipo le parti o componenti che iniziano a degradarsi riuscendo così a rilevare l'insorgere di malfunzionamenti che possono compromettere il funzionamento della macchina. La manutenzione predittiva è definita, secondo la norma UNI 10147, come quel tipo di manutenzione preventiva effettuata a seguito dell'individuazione di uno o più parametri e dell'estrapolazione, secondo modelli appropriati, del tempo residuo intercorrente prima del guasto. La logica alla base dell'adozione di questo approccio è che un guasto, nella maggioranza dei casi e soprattutto nel campo della meccanica, costituisce il punto di arrivo di un deterioramento progressivo. L'applicazione di politiche di manutenzione predittiva è complessa in quanto richiede la definizione accurata dei parametri critici ritenuti rilevanti e dei valori di soglia di questi.

Vanno inoltre attentamente vagliate le metodologie di indagine da porre in essere come ad esempio la misura delle vibrazioni, le analisi tribologiche sui lubrificanti, l'analisi termografica, l'analisi delle correnti assorbite. Le constatazioni che sono alla base di questi differenti metodi partono dalle seguenti considerazioni:

- un cuscinetto danneggiato, e quindi un disassamento in una turbomacchina, provoca un aumento delle vibrazioni;
- le parti che sono soggette ad usura con l'aumentare dell'attrito producono calore e quindi un aumento di temperatura che può essere monitorato con analisi termografiche;
- l'usura delle parti rilascia nell'olio del particolato metallico.

Tale forma di manutenzione ha avuto un notevole sviluppo a partire dagli anni '70 con l'introduzione, nel settore aeronautico, della cosiddetta CBM, acronimo anglosassone che sta per Condition Based Maintenance.

3.2.1 La curva P-F

Il concetto alla base della “manutenzione predittiva” è rappresentato efficacemente dalla “curva P-F” (Figura 6), che mostra l’evoluzione nel tempo delle condizioni di funzionamento di una macchina.

La curva consente di individuare due punti salienti:

- 1) punto P che corrisponde al guasto Potenziale, ovvero al guasto che produce un’alterazione della condizione di funzionamento della macchina rilevabile attraverso il controllo di determinati parametri operativi;
- 2) punto F che corrisponde al guasto Funzionale, ossia al guasto che non permette più alla macchina di svolgere la funzione per la quale è stata inserita nell’impianto.

L’ampiezza dell’intervallo di tempo che separa i punti P ed F dipende dal tipo di guasto. Essa varia da pochi minuti ad alcune settimane o addirittura mesi. Per i guasti caratterizzati da un’evoluzione molto rapida (pochi minuti), l’intervento più appropriato consiste nell’arresto immediato della macchina, al fine di evitare cedimenti improvvisi e danni ingenti al personale e all’impianto. Per altri modi di guasto, caratterizzati da uno sviluppo decisamente più lento, si ricorre alle moderne tecniche di diagnostica industriale.

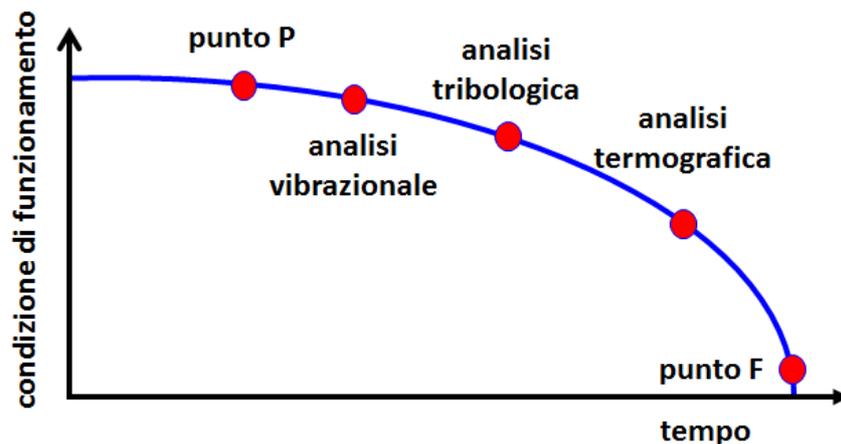


Figura 6. Curva P-F

Le tecniche diagnostiche hanno un duplice obiettivo:

- 1) identificare il componente nel quale il guasto inizia a svilupparsi;
- 2) tenere sotto controllo lo stadio di avanzamento del guasto nel tempo.

3.3 Esempio di manutenzione predittiva su compressore per ammoniacca

Per le turbomacchine, l’analisi vibrazionale rappresenta la tecnica diagnostica che, più delle altre, consente di rilevare un guasto in fase incipiente. Il compressore in esame, in condizioni di regime, ha una velocità di rotazione largamente superiore a quella che caratterizza il primo modo naturale di vibrare dell’elemento rotante (l’eventuale piccolo discostamento fra velocità angolare dell’asse di rotazione della macchina e frequenza naturale di vibrazione del sistema influisce in modo negativo sul comportamento dinamico della turbomacchina).

L’asse di rotazione della turbomacchina, opportunamente giuntato a quello del motore elettrico di trascinamento, è provvisto di cuscinetti a rulli. La lubrificazione dei cuscinetti è a circolazione d’olio, idonea all’elevata velocità angolare dell’asse di rotazione della macchina. I cuscinetti svolgono una duplice importante funzione:

1. sostengono l'asse di rotazione;
2. permettono il moto relativo dell'asse rispetto alle parti fisse della turbomacchina.

Da ciò deriva la necessità di rilevare l'ampiezza della vibrazione dell'asse di rotazione rispetto ai cuscinetti. A tal fine, si utilizzano strumenti atti a rilevare le velocità misurate assialmente, verticalmente e orizzontalmente da confrontare con dei valori limite in modo da rilevare eventuali deviazioni dei parametri rispetto ai valori normali. Lo scostamento rilevato è indice di usura dei cuscinetti o malfunzionamento in generale della macchina.

Nelle figure sottostanti si riporta un esempio applicativo di manutenzione predittiva. Nella Figura 7 sono indicati i punti in cui è stato posizionato il sensore dello strumento atto a rilevare valori di velocità verticali, orizzontali ed assiali in mm/s, mentre la Figura 8 raffigura un disegno schematico del medesimo compressore su cui sono riportati i valori di velocità misurati (evidenziati in colore verde) ed i valori limite (evidenziati in colore giallo) oltre i quali è necessario prevedere un intervento di manutenzione mirato.

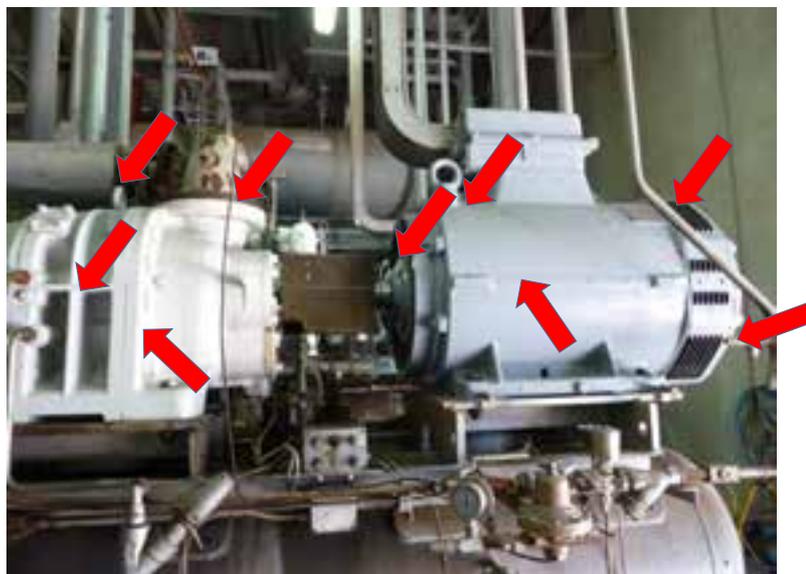


Figura 7. Parti del compressore per ammoniaca su cui effettuare le misurazioni di velocità

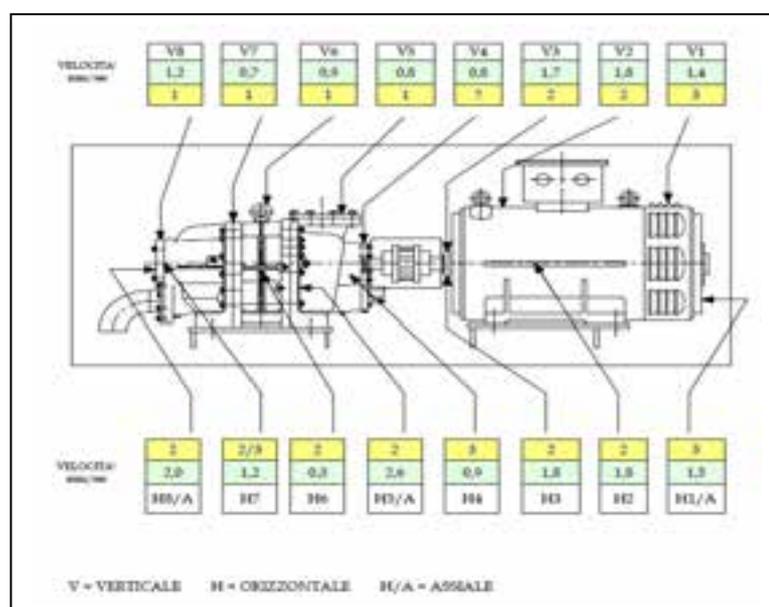


Figura 8. Report di misure di velocità puntuali espresse in mm/s

4. Conclusioni

A differenza di altre attrezzature a pressione, per le quali il rischio fondamentale da considerare è quello del superamento della pressione di progetto, le macchine frigorifere presentano in aggiunta il rischio connesso all'impiego di fluidi generalmente tossici e quindi il quadro normativo da rispettare è più vasto e complesso. Per la progettazione la norma di riferimento è la PED 2014/68/EU, da attuarsi tramite le norme armonizzate UNI EN 378, mentre l'impiego di fluidi tossici impone l'applicazione anche del R.D. n.147 del 9 gennaio 1927. Passando poi al controllo, che deve essere effettuato durante il ciclo di vita dell'attrezzatura, l'eventuale incidente connesso al superamento della pressione comporterebbe, a causa della pericolosità dei fluidi impiegati, sia un rischio per la sicurezza che per la salute delle persone coinvolte. Pertanto l'ipotesi di utilizzo della manutenzione predittiva è assolutamente auspicabile in quanto consentirebbe di verificare costantemente il reale stato di funzionamento della macchina e di programmare tempestivamente gli interventi manutentivi con conseguente riduzione del rischio di malfunzionamento nonché di accidentale rilascio di fluido frigorifero all'esterno.

Bibliografia

- [1] Norme UNI EN 378-1:2017; UNI EN 378-2:2017; UNI EN 378-3:2017; UNI EN 378-4:2017.
- [2] r.d. n.147 del 9 gennaio 1927 - "Approvazione del Regolamento speciale per l'impiego dei gas tossici"
- [3] Direttiva PED 2014/68/EU
- [4] Norma UNI EN 12693:2008
- [5] Girardi M. "Il fluido frigorifero ammoniaca legislazioni a confronto" – Ed. Marzo 2000.

Innovazioni impiantistiche: la cogenerazione e la trigenerazione nel settore rurale

P. Napolitano¹, E. Ferrari¹

¹ Inail - Dit

Sommario

L'Unione Europea si trova di fronte a sfide senza precedenti determinate da una maggiore dipendenza dalle importazioni di energia, dalla scarsità di risorse energetiche, nonché dalla necessità di limitare i cambiamenti climatici e di superare la crisi economica. L'efficienza energetica costituisce un valido strumento per affrontare tali sfide. Questa, infatti, migliora la sicurezza di approvvigionamento dell'Unione, riducendo il consumo di energia primaria e diminuendo le importazioni di energia. In tal modo si riducono le emissioni di gas serra in modo efficiente in termini di costi e quindi i cambiamenti climatici. Il passaggio a un'economia più efficiente sotto il profilo energetico dovrebbe inoltre accelerare la diffusione di soluzioni tecnologiche innovative e migliorare la competitività dell'industria, rilanciando la crescita economica e la creazione di posti di lavoro di qualità elevata in diversi settori connessi con l'efficienza energetica.

Uno degli obiettivi prioritari che l'Unione si è prefissa per una crescita intelligente, sostenibile ed inclusiva («strategia Europa 2020») è un risparmio dei consumi di energia primaria dell'Unione del 20 % rispetto alle proiezioni entro il 2020.

In questo contesto la cogenerazione presenta significative possibilità di risparmio di energia primaria ancora largamente inutilizzate nell'Unione. Tale innovazione impiantistica permette, infatti, di incrementare il rendimento energetico, aumentando la competitività delle imprese e allo stesso tempo riducendo l'emissione dei gas climalteranti, conformemente al protocollo di Kyoto. L'Unione Europea considera l'agricoltura un settore prioritario per la realizzazione degli obiettivi del pacchetto Europeo Clima & Energia 20-20-20 (20% di rinnovabili, 20% di risparmio energetico, 20% di riduzione di CO₂). Nell'Unione Europea a 27 stati membri, le aree considerate rurali rappresentano non meno del 90% del territorio e comprendono circa il 50% della popolazione comunitaria [1]. Oggetto del presente lavoro è quello di valutare l'utilizzo dei processi cogenerativi nel comparto agroalimentare (agricoltura + industria alimentare), attività economica che viene svolta preferenzialmente in un contesto territoriale in cui domina "il verde" ossia una zona rurale, che per definizione si contrappone al contesto urbano.

Nell'attuale contesto socio-economico, infatti, all'attività agricola si chiede, da un lato, di produrre di più, dall'altro di ridurre il suo impatto ambientale, contribuendo alla lotta al cambiamento climatico. In questa sfida un utile alleato sembra essere rappresentato dall'adozione di forme di migliore sfruttamento delle fonti energetiche disponibili.

Ecco come il comparto rurale si propone per le applicazioni della cogenerazione, fondamentalmente per due motivi: il primo è legato a caratteri intrinseci dei processi produttivi che caratterizzano l'agroalimentare, i quali, richiedendo diversi carichi termici, oltre il freddo, trovano nella cogenerazione, e ancor più nella trigenerazione, un importante strumento per soddisfare tale esigenza; il secondo motivo riguarda la rilevante quantità di energia fossile che il moderno settore agroalimentare richiede, oltre al non trascurabile impatto ambientale ad esso correlato, tale che il 10% delle emissioni di gas climalteranti siano imputabili all'agricoltura e all'industria alimentare. Alcuni esempi applicativi di un certo interesse riguardano i mattatoi, la lavorazione delle carni, nonché le moderne serre.

1. La cogenerazione

Il consumo energetico globale sta crescendo rapidamente negli ultimi anni, tanto che se ne prevede un aumento del 25% entro il 2040 [2]. L'incremento della domanda di energia elettrica sarà ancora più elevato, fino al 65%, nello stesso periodo. Ulteriori criticità sono legate alla crescente instabilità della rete, contestualmente all'utilizzo delle rinnovabili, all'aumento dei costi dei carburanti e agli obblighi normativi in materia di emissioni, in particolare per gli ossidi di azoto, il monossido di carbonio, e i VOC (composti organici volatili).

Partendo da questa consapevolezza, la direttiva 2012/27/UE (Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE) stabilisce un quadro di misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica che puntano a conseguire un risparmio dei consumi di energia primaria tra il 2010 e il 2020.

In questo contesto le innovazioni di processo e di prodotto stanno assumendo un'importanza sempre più rilevante, riguardando in maniera trasversale tutti i comparti delle attività economiche, dal settore primario, al comparto industriale fino a quello dei servizi. Di certo la tecnologia di cogenerazione rientra a pieno titolo tra le innovazioni concernenti l'utilizzo dell'energia primaria estraibile dalle varie tipologie di combustibili utilizzate.

Con il termine di cogenerazione si intende *la generazione simultanea in un unico processo di energia termica ed elettrica o di energia termica e meccanica o di energia termica, elettrica e meccanica* (art. 2 del d.lgs. 8 febbraio 2007, n.20¹ "Attuazione della direttiva 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia, nonché' modifica alla direttiva 92/42/CEE"); I vari processi co-generativi (co-, tri-, quadri-) rappresentano casi specifici di una tecnologia che a livello più generale viene chiamata poligenerazione; essa è per definizione il processo per il quale diverse forme di energia (input) vengono utilizzate per la produzione di molteplici forme di energia utile al processo (termica, meccanica, elettrica, etc.). Qualora le forme poligenerate vengono prodotte dall'utilizzo di un solo combustibile, ossia di una sola fonte energetica, allora si realizza un processo chiamato cogenerativo.

La cogenerazione si fonda sul concetto per il quale, in un qualsiasi ciclo termodinamico che consenta la produzione di lavoro utile (nel caso specifico energia elettrica/meccanica), una quota del calore a più elevata temperatura che entra nel ciclo viene ceduto ad una minor temperatura. Questo calore ceduto rappresenta quindi una perdita nel processo di conversione dell'energia, che, nel caso della cogenerazione, viene in parte recuperata, determinando livelli di efficienza molto elevati.

fluido operativo	calore %	temperatura C°
gas di scarico	30 - 35	400 - 500
acqua di raffreddamento	10 - 20	75 - 89
aria di sovralimentazione	13 - 25	130 - 150
olio di lubrificazione	4- 7	75 - 85

Tabella 1. Temperatura e recupero di calore per i diversi fluidi operativi [3]

Solitamente per produrre la sola energia elettrica si utilizzano centrali termoelettriche che disperdono parte dell'energia primaria nell'ambiente. Per la produzione convenzionale

¹ La Direttiva 2004/8/CE è stata abrogata dalla Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012, sull'efficienza energetica.

separata, l'energia termica viene prodotta tramite caldaie che convertono l'energia primaria contenuta nei combustibili, a elevato valore termodinamico, in energia termica di ridotto valore termodinamico.

Qualora si richieda la produzione combinata di energia termica ed elettrica, la caldaia viene sostituita da un'unità che realizza un ciclo termodinamico, sfruttando il calore rimanente in seguito alla realizzazione del ciclo stesso. Tale soluzione "*combined heat and power*" (chp) converte il gas in energia elettrica e in calore con un unico processo, direttamente presso il sito aziendale. I vantaggi delle tecnologie cogenerative sono indubbiamente molteplici, quali il risparmio energetico, legato ad una maggiore efficienza di utilizzo e una conseguente riduzione dell'impronta di carbonio (carbon footprint), in grado di ridurre i gas serra fino al 30%, nel caso di utilizzo di combustibili fossili, o di azzerarli, nel caso di utilizzo efficiente di energie rinnovabili [4] (biomassa, biogas, solare, ecc.); in ultimo bisogna considerare anche la convenienza economica relativa alla fattibilità dell'impianto cogenerativo, che, rispetto all'onere determinato dalla realizzazione di entrambi gli impianti di produzione separata, presenta un abbattimento dei costi di circa il 20-30% rispetto al complessivo [5].

Negli ultimi anni si sta diffondendo anche la tecnologia trigenerativa, nella quale i prodotti sono calore elettricità e freddo. La trasformazione dell'energia termica in energia frigorifera avviene tramite la realizzazione di un ciclo frigorifero ad assorbimento, il cui funzionamento si basa sullo sfruttamento del vapore residuo.

Sulla linea del processo trigenerativo, si è evoluta la tecnologia quadrigenerativa, ossia la produzione combinata di elettricità, calore, freddo e acqua potabile tramite un processo di desalinizzazione dell'acqua marina. Un esempio in Italia della quadrigenerazione, si è avuto nel comparto beverage (sport e energy drink), settore in netta crescita nel nostro Paese.

2. Descrizione degli impianti cogenerativi: tipologie e combustibili utilizzati

Le tecnologie di cogenerazione sono quelle definite dall'Allegato I Parte II della Direttiva 2012/27/UE e indicate nel Rapporto annuale sulla cogenerazione in Italia [5]:

- turbina a gas a ciclo combinato con recupero di calore (C.C.);
- turbina a vapore a contropressione (T.V.Cp.);
- turbina di condensazione a estrazione di vapore (T.V.Cd.);
- turbina a gas con recupero di calore (T.G.);
- motore a combustione interna (M.C.I.);
- microturbine a gas (M.T.G.);
- motori Stirling, pile a combustibile, motori a vapore, cicli Rankine a fluido organico e ogni altro tipo di tecnologia o combinazione di tecnologie che non rientra nelle definizioni precedenti.

I combustibili sono classificati così come indicato negli Allegati I e II del Regolamento Delegato (UE) 2015/2402 della Commissione del 12 ottobre 2015:

- gas naturale, GPL e GNL;
- prodotti petroliferi liquidi (che include le voci gasolio, olio combustibile pesante, ecc.);
- carbone (che include le voci antracite, carbone bituminoso, carbone sub-bituminoso, coke, semicoke, coke di petrolio);
- fonti rinnovabili (che include le voci biogas da digestione anaerobica, gas di sintesi, biomassa secca fra cui legna e altri tipi di biomassa solida compresi pellet, mattonelle di legno e trucioli di legno essiccati);
- rifiuti (che include le voci rifiuti urbani e industriali (non rinnovabili) e rifiuti rinnovabili/biodegradabili).

Per combustibile “altro”, si intende l’insieme dei seguenti combustibili: gas di raffineria, idrogeno, gas di cokeria, gas di altoforno, altri rifiuti gassosi e calore residuo recuperato. Le turbine a gas a ciclo combinato con recupero di calore rappresentano la tecnologia con maggior capacità di generazione elettrica installata, mentre i motori a combustione interna, in relazione alla numerosità, è la scelta impiantistica tecnologia maggiormente utilizzata. Ai fini della determinazione del contributo di ciascuna tecnologia cogenerativa utilizzata, vengono presi in considerazione i seguenti i parametri:

- numero di unità;
- capacità di generazione elettrica totale;
- capacità di generazione elettrica media;
- produzione di energia elettrica lorda;
- produzione di calore utile;
- rapporto energia elettrica lorda/calore utile.

Il gas naturale è il combustibile più utilizzato come principale fonte di energia primaria (rapporto), costituendo in termini pratici la fonte di alimentazione esclusiva per i motori a combustione interna, per le turbine a gas in assetto “semplice” e per le microturbine. Oltre al gas naturale, seguono per diffusione i combustibili di processo e il TAR di raffineria. L’utilizzo dei rifiuti riguarda invece le turbine di condensazione ad estrazione di vapore. Per quel che concerne il carbone, esso viene sfruttato nell’ambito di unità costituite da turbine a vapore a contropressione. Le energie rinnovabili occupano ancora una percentuale esigua rispetto ai consumi totali, ma il loro incremento ha avuto una crescita del 50% rispetto il 2015. Tale aumento di energia alimentata da fonti rinnovabili è stato determinato da vari fattori, tra cui anche gli orientamenti delle politiche e gli incentivi ai sensi del DM 6 luglio 2012. Esistono diversi parametri ai fini della valutazione dell’efficienza energetica, tra cui i più importanti sono:

- l’indice di risparmio di energia primaria (“Primary Energy Saving”, PES) da cui deriva il riconoscimento di CAR (cogenerazione ad alto rendimento), che esprime il risparmio percentuale di combustibile che si ottiene producendo energia elettrica e calore in cogenerazione e non separatamente;
- il rendimento di primo principio (η_I), che esprime la percentuale del combustibile impiegato che viene trasformata in energia utile (elettrica o termica).

3. Applicazioni nel settore agroalimentare

L’agricoltura, allo stato dell’arte, richiede una rilevante quantità di energia fossile per la produzione di prodotti alimentari sia vegetali che animali. Il rapporto tra input energetici e output relativo al processo produttivo agricolo, è 1 a 10; ciò significa, in termini concreti, che per produrre una chilocaloria di cibo è necessario utilizzare 10 chilocalorie di combustibile oltre alla richiesta energetica correlata all’estrazione, la raffinazione e il trasporto, mentre la produzione industriale di 1 kg di carne bovina allevata a cereali prevede l’utilizzo di 9 litri di combustibili [6]. Inoltre, l’agroalimentare assume un ruolo non più trascurabile in relazione alla produzione di gas climalteranti, primo fra tutti la CO₂, essendo responsabile della produzione del 10% delle emissioni di gas serra in Europa e di numerosi effetti negativi sull’ambiente (deforestazione, erosione e/o salinizzazione dei suoli). Il consumo di energia relativo ad 1 kg di cibo pronto per mangiare risulta tra 2 MJ e 220 MJ in relazione al tipo di cibo (animale o vegetale), alle tecnologie di coltivazione, alla trasformazione e al trasporto [7]. In particolare, nelle produzioni di serra, 1 kg di pomodoro coltivato nel Nord-Europa richiede 26,73 MJ ed emette 1459,4 g di CO₂/kg, mentre 1 kg di lattuga richiede 22,9 MJ ed emette 1250,2 g di CO₂/kg. In Italia, i “consumi energetici finali” complessivi di energia (termica ed elettrica) per il sistema agricolo sono mediamente pari a 3,3 MTEP [8]. TERNA al 2010 registra un consumo di energia elettrica di 5,61 TWh, pari all’1,81% del bilancio

elettrico nazionale [9], con un consumo di energia finale stimato per l'industria alimentare pari a 3,1 MTEP [10]. Conformemente al Dlgs. 115 del 2008, attuativo della direttiva 2006/32/CE, l'Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica (ENEA) e la società Ricerca sul sistema energetico (RSE), su mandato del Gestore dei Servizi Energetici (GSE), hanno il compito di controllare e verificare il risparmio energetico tramite miglioramento dell'efficienza energetica, la quale viene premiata con l'emissione di certificati bianchi, o "titoli di efficienza energetica" (TEE)² [11].

Dal 1° gennaio al 30 giugno 2018 il GSE, nell'ambito del meccanismo di incentivazione della cogenerazione ad alto rendimento (CAR) ha inviato inoltre al GME 764.106 TEE.

Del volume complessivo di TEE inviati al GME, il 92% sono dovuti all'installazione di nuove unità di cogenerazione, il 4,2% al rifacimento di vecchie unità cogenerative e il 3,8% a unità cogenerative entrate in esercizio prima del 07/03/2007 [12]

Sia le serre, sia l'intero comparto dell'agroalimentare per loro caratteristiche intrinseche ben si adattano all'utilizzo della cogenerazione in tutte le sue forme, dato che in tali settori vi è la necessità di avere diversi output energetici, quali elettricità, nonché vapore, freddo e calore a diverse temperature. Nel settore alimentare i vettori energetici del termico che caratterizzano il processo produttivo sono due: il vapore e l'acqua calda, e qualora ne subentri un terzo, ossia il freddo, si parla di trigenerazione. Un esempio è quello dei produttori di pasta secca, i quali sfruttano l'acqua calda per gli impasti, il vapore per l'essiccazione e il freddo (ricavato tramite acqua calda), per confezionare il prodotto. Un altro esempio sono le latterie, nelle quali il vapore serve per la pastorizzazione, l'acqua calda per detergere i contenitori, e il freddo per ridurre la temperatura del latte prima di confezionarlo. Il settore agroalimentare può essere suddiviso in 7 subcomparti di seguito riportati [13]:

1	carne e pesce
2	cibi e verdure cotte
3	olii, grassi, olio di oliva
4	bevande, succhi, birra, vino e liquori
5	farine, cereali, mais, pasta panetteria, caffè e the'
6	cioccolato zucchero e pasticceria
7	latticini, latte e gelati

Tabella 2. Sub-comparti dell'agroalimentare [13]

² I Certificati Bianchi, o Titoli di Efficienza Energetica (TEE) sono titoli negoziabili che certificano i risparmi energetici conseguiti negli usi finali di energia, realizzando interventi di incremento dell'efficienza energetica. Il sistema dei CB è un meccanismo di incentivazione che si basa su un regime obbligatorio di risparmio di energia primaria per i distributori di energia elettrica e gas naturale con più di 50.000 clienti finali. Per ogni anno d'obbligo, dal 2017 al 2020, sono stati fissati gli obiettivi di risparmio che i distributori devono raggiungere attraverso la realizzazione di interventi di efficienza energetica. I soggetti obbligati possono adempiere alla quota d'obbligo di risparmio in due modi: realizzando direttamente o attraverso le società da essi controllate, o controllanti, i progetti di efficienza energetica ammessi al meccanismo; acquistando i titoli dagli altri soggetti ammessi al meccanismo, ovvero altri distributori, ESCO certificate o utenti finali pubblici o privati che hanno nominato un EGE certificato.

Per ogni comparto dell'agroalimentare è possibile individuare i carichi termici necessari per compiere il processo produttivo, come si evince dalla tabella seguente:

processo termico	T°	comparto alimentare						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
raffreddamento	4 a 8 C°	X	X		X	X	X	X
congelamento	-15 a -40 C°	X	X			X		X
scottatura	80 C°		X					
cottura, ebollizione, frittura	90 a 150 C°, 100 a 300 C°	X	X	X				
sgommatura	100 C°			X				
tostatura	370 a 540 C° (caffè) 130 a 150 C° (cacao)					X	X	
pastorizzazione	72 C°				X			X
candeggio	150 C°			X				
deodorizzazione	180-270 C°			X				
cottura a forno	300 a 400 C°					X		
sbrinamento	20 a 40°	X						
conservazione a freddo	4 a 8 C°		X		X		X	XX
congelamento	-18 a -40 C°	X	X					XX
condizionamento aria	10 a 20 C°	X						

Tabella 3. Sintesi di alcuni dei principali processi termici utilizzati nell'industria agroalimentare, indicati per i relativi sub-comparti [13]

I vari processi poligenerati come già affermato, causano anche una riduzione delle emissioni di anidride carbonica misurabile: 0,26 kg CO₂/kWhel (ossia 0,26 kg di CO₂ per ogni kg di KW ore di energia elettrica), per la cogenerazione, mentre la riduzione di emissioni per la trigenerazione è pari a 0,436 kg CO₂/kWhel [13]

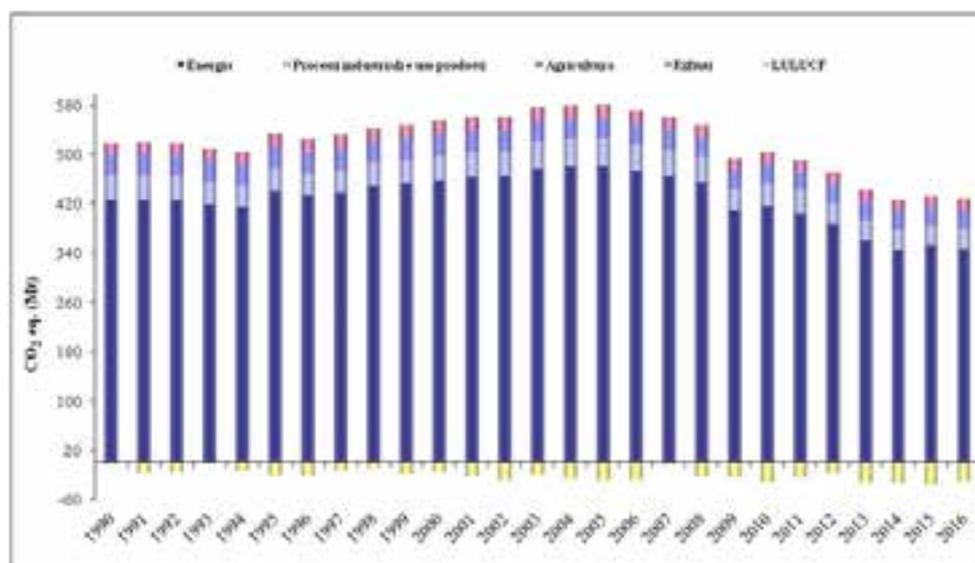


Tabella 4. Emissioni nazionali di gas climalteranti dal 1990 al 2016 per settore (National Inventory Report 2018- ISPRA) [14]

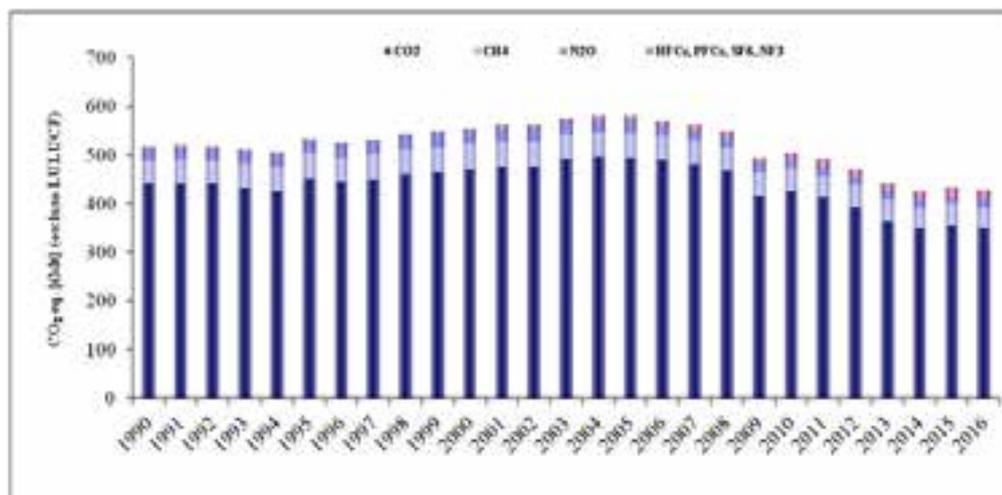


Tabella 5. Emissioni nazionali di gas climalteranti dal 1990 al 2016 per gas [14]

Il settore delle carni, ad esempio, consuma una rilevante quantità di energia ogni anno, per la trasformazione, la refrigerazione, l'acqua calda e il vapore. Per la maggior parte delle aziende che lavorano la carne, l'energia rappresenta il quarto fattore per il contributo al costo totale, dopo quello per le materie prime, l'eliminazione dei rifiuti e la manodopera [15]. Di solito nelle aziende che lavorano la carne l'utilizzo tipico dell'energia prevede che il 50% di essa venga utilizzata per la produzione di vapore e acqua calda, il 35% per la refrigerazione e il 15% per l'elettricità. L'elettricità viene utilizzata per la refrigerazione, per l'illuminazione la ventilazione, etc; l'acqua calda e il vapore invece servono per numerosi processi, quali la sterilizzazione, il lavaggio, e i processi di raffreddamento. Chiaramente tali percentuali variano in funzione di diversi parametri, quali la dimensione dell'impianto, il prodotto finale o il tipo di animale allevato; gli impianti per i suini, ad esempio utilizzano l'80% dell'energia per produrre vapore e acqua calda, mentre gli impianti che lavorano carne ovina, utilizzano, per produrre acqua calda e vapore, il 30-50% dell'energia totale. Pertanto per produrre una tonnellata di carne bovina pronta alla vendita si utilizzano 775 kWh di energia, mentre ne servono 685 kWh per produrre una tonnellata di carne ovina. Anche la destinazione del prodotto influisce sulle variazioni energetiche: ad esempio, le aziende deputate all'esportazione necessitano di un maggior raffreddamento e di conseguenza si avvantaggiano di più dell'utilizzo di impianti trigenerativi. La trigenerazione permette in pratica di mantenere un livello di carico più uniforme durante l'anno, consentendo quindi di incrementare la redditività dell'impianto rispetto alla sola cogenerazione di elettricità e calore. In alternativa il freddo può essere impiegato nella stagione estiva negli impianti di condizionamento per le serre. Le serre "hi-tech" che sfruttano l'innovazione impiantistica poligenerativa si sono diffuse in particolare nei Paesi Bassi, fra le prime nazioni a sfruttare la tecnologia chp per la serricoltura. A partire dal 2006, tutte le serre realizzate in Olanda sfruttavano unità chp e nel 2010 il 62% della superficie totale occupata dalle serre utilizzava la tecnologia chp [16] sia per le serre illuminate, ossia deputate alla produzione floreale, sia per le serre buie, utilizzate per la produzione di ortaggi. La tecnologia chp è stata sfruttata anche per la produzione di CO₂, sebbene l'anidride carbonica proveniente dalle caldaie sia più pura rispetto a quella estratta dal processo chp. Tramite gli impianti cogenerativi nelle serre è quindi possibile autoprodurre elettricità, scaldare le serre e fertilizzare tramite CO₂. Oltre a favorire la coltivazione in serra, l'elettricità prodotta dai sistemi di cogenerazione e non auto consumata può anche essere immessa nelle rete elettrica locale. Pertanto le serre alimentate a chp rappresentano la scelta tecnologica che maggiormente consente di rispettare gli obiettivi di Kyoto, e nello stesso tempo incrementare la competitività delle aziende.

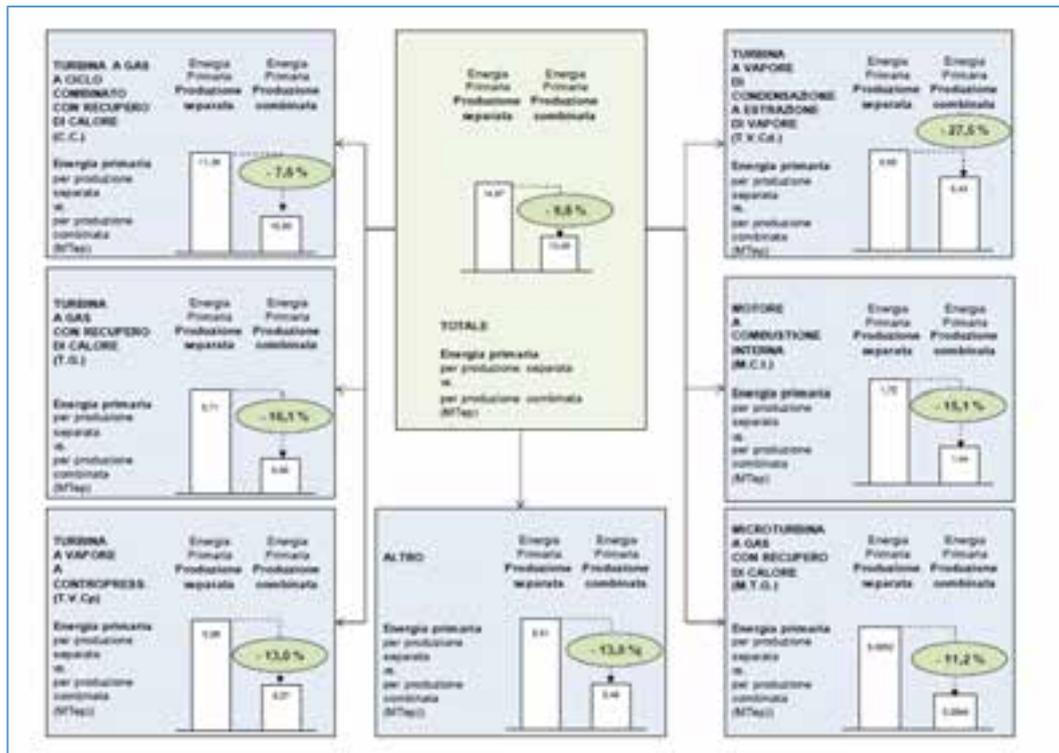


Tabella 6. Risparmio di energia primaria complessivo e per ciascuna tecnologia di cogenerazione [5]

Conclusioni

Il ricorso a sistemi poligenerativi nell'ambito delle costruzioni rurali consente senza indubbiamente di ottenere un miglior rendimento rispetto alle fonti energetiche convenzionali, quali gli idrocarburi. A livello globale, tale innovazione di processo permette di ridurre la dipendenza del settore agroalimentare (e dei paesi in cui l'agroalimentare ha una certa rilevanza, come l'Italia), dal petrolio e quindi dai paesi esportatori di petrolio conosciuti come Opec (Organization of the petroleum exporting countries). Nell'immediato futuro per poter supportare la diffusione del ricorso a tali tecnologie impiantistiche sarà necessario eliminare o quantomeno ridurre le criticità economiche e tecniche connesse all'implementazione delle tecnologie poligenerative. Le prime potrebbero essere ridotte, ad esempio, facendo in modo che le utenze termiche elettriche e frigorifere si trovino in prossimità del sistema di generazione dell'energia, in particolare per quel che concerne la rete di distribuzione del calore e del freddo. Dal punto di vista tecnico, invece, le limitazioni maggiori riguardano la richiesta di calore che deve essere a bassa temperatura; difatti la cogenerazione è più vantaggiosa quando il carico energetico termico è a temperatura ridotta.

Prendendo in considerazione i vari sub-comparti dell'agroalimentare, quello delle carni è sicuramente il settore che esprime il più alto potenziale per l'applicazione della tecnologia della poligenerazione (26%), seguito dall'industria della birra e dei cereali. Nello specifico, i processi cogenerativi riguardano principalmente il settore delle carni (24%), della birra (15%) e dall'industria dello zucchero (8%); per quanto riguarda la trigenerazione, il settore di gran lunga dominante è quello delle carni (55%), seguito dai "cooked food vegetables" (11%) e dalla birra (7%) [13]. Oltre alla cogenerazione e alla trigenerazione, una terza tecnologia poligenerativa che presenta delle potenzialità nell'agroalimentare è la produzione combinata di calore ed elettricità, utilizzando come fonte energetica primaria il biogas ottenuto in seguito a trattamento anaerobico applicato al flusso dei rifiuti e ai prodotti

indesiderati del settore agroalimentare, quali residui provenienti dalle carcasse animali (carne e pesce), rifiuti delle lavorazioni dei vegetali e delle carni, grani esausti nella produzione della birra, siero della produzione dei formaggi, salse esauste degli olii vegetali etc.

Bibliografia

- [1] De Castro P. L'Agricoltura Europea e le nuove sfide globali. Saggine, Donzelli ed. (2010).
- [2] IEA, World Energy Outlook, 2014.
- [3] Baldini M., Simeoni P., Mattiussi A., Inf. Agr. 40/2008, pag 16.
- [4] Intelligent Energy Europe –Cogeneration Observatory and Dissemination Europe, 2014.
- [5] Ministero dello Sviluppo Economico Direzione generale per il mercato elettrico, le rinnovabili e l'efficienza energetica, il nucleare. Relazione annuale sulla cogenerazione in Italia, 2018.
- [6] Rifkin, J. The hydrogen economy. J.P. Tarcher, 2002.
- [7] Saunders C., Hayes P. Air fresh transport of fresh fruit and vegetables. Research report n.299, October 2007.
- [8] ENEA, Rapporto Energia e Ambiente, 2007.
- [9] TERNA Dati statistici sull'energia elettrica in Italia. 2010.
- [10] Kaminski J., Leduc G. Energy efficiency improvement options for the EU food industry. Polityka Energetyczna, PL ISSN 1429-6675, 2010.
- [11] ENEA Titoli di Efficienza Energetica, cosa sono e come si ottengono i “certificati bianchi” Guida Operativa. ENEA, giugno 2011.
- [12] “Dati ufficiali del GSE circa Procedimenti amministrativi conclusi e titoli di efficienza energetica riconosciuti dal 1° gennaio al 31 maggio 2018 ai sensi del D.M. 28 dicembre 2012, del d.m. 11 gennaio 2017 e del D.M. 5 settembre 2011”, https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20Certificati%20Bianchi/Comunicazione%20situazione%20CB_2018_gennaio-maggio_2018.pdf
- [13] OPTimum Integration of POLYGENeration the food industry (OPIPOLYGEN), innovative projects supported by the IEE programme, 2005-2006.
- [14] National Inventory Report 2018 - Italian Greenhouse Gas Inventory ISPRA, 1990-2016, 2018.
- [15] Resource Use in the British Beef and Lamb Processing Sector, AHDB Beef & Lamb, 2013.
- [16] van der Veden. Diffusion of combined heat and power in Dutch greenhouses – a case study Final report December 2012.

Le innovazioni derivanti dalla quarta rivoluzione industriale 4.0 applicabili nelle operazioni di ispezione e di ausilio alla manutenzione

A. Bruzzone¹, M. Pirozzi², F. di Palo², A. Di Filippo², F. Cassandra²

¹ Simulation Team Università di Genova

² Inail - Dit

Sommario

Premesso che lo scenario relativo ai sistemi “UxVs” è di recente sviluppo e abbraccia vari settori non solo commerciali, gli studi illustrati nel presente lavoro potranno in corso d’opera essere influenzati da tutti i possibili cambiamenti inerenti il rapido sviluppo tecnologico ad oggi ancora non previsti. Nel documento sono presentate alcune attività di ricerca che Inail ed in particolare i laboratori del Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti ed Insedimenti Antropici quali il Laboratorio Macchine ed Attrezzature di Lavoro e il Laboratorio Impianti a Pressione e Stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante, in collaborazione con il Simulation Team dell’Università di Genova, stanno portando avanti nel settore dell’applicazione di soluzioni innovative relative ai sistemi a pilotaggio remoto. Tali attività consistono sostanzialmente nello studio, applicazione, progettazione e realizzazione di sistemi innovativi che integrano gli “UxVs” in modo da permettere lo svolgimento di compiti gravosi e difficili nelle operazioni di ispezione e di ausilio alla manutenzione di macchine e impianti, con particolare riferimento a quelle operazioni che devono essere svolte sulle attrezzature e impianti a pressione e negli ambienti dove quest’ultimi sono presenti. Il fine è quello di ridurre i rischi di danni per quei lavoratori impegnati in tali compiti garantendo la sicurezza delle ispezioni e dei monitoraggi anche con azioni svolte da remoto e mediante il posizionamento dei vari operatori in zone sicure.

1. Glossario

APR: Aeromobile a Pilotaggio Remoto; AUV: Autonomous Underwater Veichile (Mezzo Autonomo Sottomarino); CAVE: Cave Automatic Virtual Environmen (Ambiente Virtuale Immersiva); CPS: cyber-physical system (sistema informatico-fisico); EASA: European Aviation Safety Agency (Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea); ENAC: Ente Nazionale Aviazione Civile; Dominio Applicativo: entità concettuale di convenienza derivante da un processo mentale di astrazione interdisciplinarmente unificante e generalizzante nel discorso e nelle rappresentazioni logico-grafiche; DCS: Digital Control System; GDPR: General Data Protection Regulation (Regolamento generale sulla protezione dei dati); HLA: High Level Architecture (Standard di Simulazione Interoperabil); IA: Intelligent Agents; IDRASS: Immersive Disaster Relief and Autonomous System Simulation (Sistema di Simulazione Immersivo di Sistemi Autonomi per Casi di Disastri); MS2G: Modeling, interoperable Simulation and Serious Games; MTOM: maximum take-off mass (massa massima al decollo); NPA: Notice of Proposed Amendment (Avviso di modifica proposta); RHIB: Rigid Hull Inflatable Boat (gommoni); ROA: Remotely Operated Aircraft; RPA: Remotely piloted aircraft; RPV: Remotely piloted vehicle; SAPR: Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto; Sink: termine inglese per definire un nodo di calcolo a logica programmabile, interrogabile, che acquisisce, elabora ed inoltra dati e comandi da/a tutti o parte i nodi di una WSN; Smart Actuator: termine inglese per definire un nodo di calcolo a logica programmabile di una WSN che acquisisce dati dalla WSN ed agisce sull’ambiente che lo circonda (Attuatore Intelligente, convertitore di energia); Smart Sensor: termine inglese per definire un nodo di calcolo a logica programmabile di una WSN che acquisisce ed elabora dati dall’ambiente che lo circonda (Sensore Intelligente, convertitore di energia); SPIDER:

Simulation Practical Immersive Dynamic Environment for Reengineering (Ambiente Virtuale e di Simulazione Dinamico e Intuitivo per supportare l'Ingegneria); T-REX: Threat network simulation for REactive eXperience (Simulazione di Network di Minacce e Sistema di Sperimentazione Intelligente e Reattiva); UAV: Unmanned Aerial Veichile (Mezzo Aereo Senza Pilota); SO2UCI: Simulation for Off-Shore, On-Shore & Underwater Critical Infrastructure (Simulazione di Infrastrutture Off-Shore e On-Shore, Subacque e critiche); UAS: unmanned aerial system (sistema aereo senza pilota); UGV: Unmanned Ground Veichile (Mezzo Terrestre Senza Pilota); USV: Unmanned Surface Veichile (Mezzo di Superficie Senza Pilota); UUV: Unmanned Underwater Veichile (Mezzo Subacqueo Senza Pilota); UxVs: Unmanned x-Domain Vehicle (Veicolo senza equipaggio operante in qualsivoglia dominio, aria, terra, acqua); WSN: Wireless Sensor Network (Rete di sensori senza fili).

2. Introduzione

Il termine Industria 4.0 indica una tendenza dell'automazione industriale che integra e trasforma le componenti dei processi produttivi in cosiddetti cyberphysical system ovvero sistemi che sono composti da una parte reale ed una digitale aperta alla rete; in questo modo Industrial 4.0 integra alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro e aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti, senza dimenticare le condizioni di sicurezza per gli operatori che devono adeguarsi alle eventuali nuove condizioni di pericolo introdotte. Sotto questo profilo, come già detto, la chiave di volta di industria 4.0 sono proprio i "sistemi ciberfisici" (CPS), ovvero sistemi fisici che sono strettamente connessi con i sistemi informatici e che possono interagire e collaborare con altri sistemi CPS. Questo sta alla base della decentralizzazione e della collaborazione tra i sistemi, che è strettamente connessa con il concetto di industria 4.0. Tra tutte le tecnologie coinvolte in questo nuovo processo industriale di automazione CPS, è integrata anche la nuova categoria dei cosiddetti UxVs, cioè tutti quei mezzi a controllo remoto che operano su tutte le superfici quali terra, acqua o aria indipendentemente dalla sorgente di alimentazione e autonomia. Questo genere di veicoli senza equipaggio offre molti vantaggi, che spaziano dalla rapidità di esecuzione delle funzioni per cui sono stati costruiti, alla possibilità di raggiungere luoghi ritenuti impervi o pericolosi per l'uomo, permettendo l'esecuzione di specifiche operazioni o lavorazioni altrimenti di difficile svolgimento senza esporre l'operatore/gli operatori incaricato/i o le possibili terze persone a rischi gravi. Grazie proprio alla proprietà di sostituire l'essere umano che gli UxVs si stanno affermando in diversi campi di applicazione tra i quali molto interessante risulta essere il loro possibile utilizzo nelle operazioni di ispezione di attrezzature e impianti.

3. I sistemi UxVs: definizione, tipologie e storia

Un veicolo a pilotaggio remoto, comunemente noto come drone, è un apparecchio caratterizzato dall'assenza del pilota a bordo. Il suo movimento è controllato da un computer con installato un software che ne stabilisce le rotte, oppure tramite il controllo remoto di un navigatore o pilota. L'impiego può essere di carattere aereo, terrestre o acquatico. L'utilizzo è ormai consolidato per usi militari ed è crescente per applicazioni civili, così come per ambienti di lavoro. Sono note ad esempio le operazioni di prevenzione e intervento in emergenza incendi, per operazioni di sorveglianza generale, per finalità di telerilevamento e ricerca e, per ispezioni di ambienti confinati nonché di attività lavorative varie. In generale, in tutti i casi in cui tali sistemi possano consentire l'esecuzione di missioni "noiose, sporche e pericolose" spesso con costi economici ed etici minori rispetto ai mezzi aerei tradizionali. Sono noti anche con altri acronimi, molti dei quali di derivazione anglosassone: oltre a RPA possono essere indicati come UAV, RPV, ROA o UVS, UAS, ma

quello che sembra poter sostituire in modo definitivo tutti i precedenti sarà UxVs (Unmanned Vehicles).^[1]

4. Quadro normativo

Il quadro normativo degli aeromobili senza equipaggio ha cominciato il suo percorso per un significativo cambiamento a partire dal 22 agosto scorso, giorno in cui è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea il Regolamento (UE) 2018/1139^[3] recante norme comuni nel settore dell'aviazione civile. Tale Regolamento, denominato Nuovo Regolamento, entrato in vigore l'11 settembre 2018 abroga e sostituisce il Regolamento (UE) 2008/216 "Regolamento Base". Il Nuovo Regolamento costituisce un passo in avanti in quanto introduce le prime norme basiche dell'Unione Europea in tema di droni al fine di garantire la sicurezza e la tutela dell'ambiente, della privacy e dei dati personali, nonché i rischi derivanti in caso di eventuali impatti verso l'essere umano. Gli Stati Membri da questo momento saranno governati da regole uniformi, con una notevole riduzione delle casistiche e specificità "regolate" dalle legislazioni nazionali. Attualmente, infatti, la maggior parte dei droni è soggetta a normative nazionali molto diverse fra loro, che obiettivamente ostacolano uno sviluppo più sostenuto dell'intero settore^[5]. In Italia la normativa di riferimento, trae origine dall'art. 743 del Codice della Navigazione il quale, nel fornire una definizione di "aeromobile", accanto alle macchine destinate al trasporto per aria di persone o cose, includeva anche i mezzi aerei a pilotaggio remoto rinviando, per una compiuta definizione, alle leggi speciali, ai regolamenti dell'ENAC nonché, per quelli adoperati per fini militari, ai decreti del Ministero della Difesa. Senza entrare nel merito delle differenze tra i dettami della legislazione nazionale italiana e il Nuovo Regolamento europeo di recente emanazione, sinteticamente di seguito si riportano le principali novità introdotte focalizzando l'attenzione su alcuni possibili ulteriori sviluppi. Secondo il nuovo regolamento unico europeo per i droni, tutti gli aeromobili a pilotaggio remoto dovranno essere progettati in modo da poter essere utilizzati senza mettere a rischio le persone tenendo in massimo conto i rischi derivanti anche da eventuali impatti con esseri umani. In base al rischio correlato al peso del drone stesso o all'area operativa, ogni velivolo dovrà essere dotato di funzionalità aggiuntive come ad esempio sistemi anticollisione, ovvero sistemi di atterraggio automatico. Soluzioni in tal senso sono già disponibili su molti droni attualmente in commercio. In considerazione della manifesta necessità che gli operatori di droni siano a conoscenza delle normative vigenti ed in grado di gestirne il volo in tutte le condizioni più complesse e difficili, il regolamento unico europeo pone molta attenzione alla formazione dei piloti di droni attraverso appositi percorsi formativi idonei per creare la giusta consapevolezza e professionalità^[5] e ciò comporterà un rinnovamento dei contenuti formativi e informativi che le scuole di volo dovranno proporre. Così come oggi già avviene in Italia, il regolamento europeo prevede l'identificazione di tutti gli operatori di droni in appositi registri nazionali, così come i relativi droni che dovranno essere dotati di apposite targhette identificative. Inoltre non esisterà più la distinzione tra aeromodelli e SAPR, e sarà introdotto il "geofencing". Nonostante le suddette significative novità normative/regolamentari non bisogna però accontentarsi poiché, se da una parte però ci si adopera per favorire la diffusione dei droni, intravedendone la loro utilità anche fini della loro applicazione nel settore della prevenzione e della sicurezza del lavoro, al tempo stesso non si può ignorare che l'introduzione di una nuova tecnologia può essere essa stessa portatrice di nuovi pericoli, precedentemente non presenti o comportanti rischi minori. A tal proposito occorre puntualizzare/rimarcare il fatto che ancora la maggior parte di tipologie di UxVs non hanno specifiche direttive di regolamentazione di prodotto e che molte di esse, in considerazione della destinazione d'uso, possono anzi devono essere considerate delle vere e proprie attrezzature di lavoro con tutte le conseguenze in termini di requisiti di sicurezza che costruttivamente debbono possedere e in termini di prescrizioni da seguire per il loro uso

derivanti dall'applicazione del d.lgs. 81/08, testo unico in materia di sicurezza del lavoro. L'Inail-Dit e il Simulation Team dell'Università di Genova, pertanto, in linea con la propria missione, stanno approcciando questi nuovi sistemi a pilotaggio remoto avendo ben presente anche quest'ultimo aspetto. Le misure di sicurezza da adottare nella costruzione e nell'utilizzo dei droni e degli UxVs in generale, quali ad esempio lo studio dei materiali e del design idonei a garantire la protezione delle persone oltre che le prestazioni richieste, oppure lo sviluppo e/o adozione di equipaggiamenti sufficientemente evoluti di dispositivi di sicurezza, sono solo alcuni dei temi che dovranno essere affrontati al fine di ottenere dei prodotti all'altezza di tutte le applicazioni in cui potranno essere utilmente impiegati. La Commissione Europea, sulla base di questi principi fondamentali, dovrà considerare l'emanazione (o comunque una continua implementazione dell'esistente) di nuove regolamentazioni, relativamente soprattutto alle altre tipologie di UxVs, in modo da avere regole dettagliate comuni a livello europeo che garantiscono la sicurezza degli operatori sempre e in ogni caso.

5. Progetti di ricerca e casi di studio

5.1. Ispezioni di ambienti a carattere confinati e/o sospetti di inquinamento.

Lo studio è rivolto principalmente alla valutazione della possibile adozione di SAPR per il controllo e la qualità dell'aria in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento. Si sta quindi procedendo ad un'analisi delle caratteristiche della sensoristica smart ad oggi esistente per individuare quella che per caratteristiche sia la più facilmente applicabile su droni e che consenta la valutazione delle diverse condizioni al contorno caratterizzanti un determinato ambiente in modo da capire se sussistano le giuste condizioni per un ingresso degli operatori in quell'ambiente e definire anche eventuali accorgimenti per un suo accesso e permanenza in sicurezza. In questi casi è importante valutare preventivamente anche le caratteristiche intrinseche dei droni, al fine di garantirne un uso sicuro e adeguato, in considerazione delle particolari situazioni ambientali nelle quali potrebbero operare. A tal proposito si pensi ad ambienti con la rilevante presenza di liquidi, vapori o polveri, e, più in generale, ad ambienti molto pericolosi quali ad esempio gli ambienti o zone soggetti alla cosiddetta direttiva ATEX. Si sottolinea che con il termine "Smart Sensor" (sensore intelligente) si indica un tipo di sensore che ha al suo interno circuiti elettronici capaci, oltre che di rilevare una grandezza di tipo fisico, chimico o elettrico, anche di elaborare le informazioni e di trasmetterle all'esterno sotto forma di segnale digitale anche attraverso un'interfaccia di comunicazione. Schematicamente, all'interno di un sensore intelligente possiamo identificare un trasduttore, un circuito di amplificazione, un convertitore A/D, un microprocessore e un'interfaccia di comunicazione. Il microprocessore contiene in genere sia la base dati, sia il programma per l'elaborazione dell'informazione. L'interfaccia di comunicazione verso l'esterno, solitamente di tipo digitale, può essere di tipo seriale, bus di campo, wireless, Ethernet, IP. Proprio il collegamento dei sensori intelligenti con i sistemi destinati a raccogliere i loro dati costituisce un elemento concreto di innovazione, soprattutto in relazione all'esigenza diffusa di poter connettere un trasduttore al sistema di controllo con la massima semplicità e affidabilità. I sensori smart sono perciò sensori basati su tecnologie che permettono la comunicazione macchina-macchina e quindi sono inseribili in un contesto di controllo di quegli ambienti dove può esserci il rilascio di sostanze pericolose. Lo studio di queste nuove tecnologie ha lo scopo di capire come e in che misura tali sistemi possano essere utili nella valutazione del rischio e nella definizione dei criteri di tale valutazione. Per farlo occorre definire i requisiti standard necessari dei sistemi smart che si ritiene idonei allo scopo partendo dalla preliminare individuazione dei possibili metodi di valutazione (in termini di ripetibilità e affidabilità) di tali requisiti. Sicuramente gli elementi da considerare per una caratterizzazione di questi sistemi sono: il sensore per rilevare i dati; la tipologia di comunicazione wireless utilizzata correlata alla capacità di trasmissione macchina-

macchina; la possibilità di identificazione e localizzazione di tali sistemi. Infine elemento fondamentale è il software che ha lo scopo di elaborare i dati in informazione/conoscenza implementando le funzioni e specializzando la tecnologia nei specifici contesti industriali di applicazione.

Stante quanto sopra si sta procedendo ad una valutazione delle potenzialità di utilizzo dei «droni» nell'ottica di una riduzione dell'esposizione dei lavoratori a quei rischi, difficilmente riducibili mediante approcci diversi, presenti durante l'esecuzione di ispezioni e monitoraggi per il mantenimento della funzionalità di strutture e attrezzature di lavoro. Con tale attività si vogliono individuare le caratteristiche costruttive che i droni/metaplani devono avere correlabili ai requisiti di sicurezza che un prodotto del genere comunque deve possedere e si vogliono valutare le possibili misure di sicurezza da implementare anche successivamente alla prima fabbricazione e immissione sul mercato di tali prodotti in relazione al loro utilizzo. In tal senso si sta procedendo allo studio di quei materiali e del design idonei a garantire, oltre che le prestazioni richieste, la protezione sia degli operatori che di terzi e allo sviluppo di dispositivi di sicurezza sufficientemente evoluti d'adottare a bordo dell'attrezzatura come equipaggiamento ausiliario.

5.2. L'uso dell'APR nel monitoraggio ed ispezione di impianti, sistemi o apparecchiature industriali: un approccio strutturato ed interdisciplinare.

La possibilità di utilizzare gli APR per il monitoraggio e l'ispezione di impianti, sistemi o apparecchiature industriali deve prevedere necessariamente, tra l'altro, quanto stabilito dal regolamento ^[4] "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" dell'Enac cioè la possibilità di utilizzare APR con massa operativa al decollo minore di 25 Kg per operazioni specializzate critiche laddove sia assicurato un livello di sicurezza coerente con l'esposizione al rischio. L'Enac nel corso della valutazione delle domande di autorizzazione per operazioni specializzate critiche, ha rilevato un'estesa similarità degli scenari operativi di riferimento e quindi ha stabilito di introdurre elementi di semplificazione dei procedimenti autorizzativi. Sono stati quindi definiti degli scenari standard, in funzione della massa operativa al decollo e dell'ambiente operativo, che consentano di associare agli stessi prescrizioni tecnico operative in base all'esposizione al rischio, tali da garantire i livelli di sicurezza previsti dal Regolamento ENAC. L'introduzione degli scenari standard, semplificando le modalità degli accertamenti necessari, ha ridotto i tempi del processo di autorizzazione al volo, ha abbattuto notevolmente i tempi di attesa dando quindi una più efficace risposta alle esigenze dell'utenza. Gli scenari standard attualmente in vigore, suscettibili di variazioni future che saranno conseguenti anche a quanto ^[4] discusso dalla Commissione Europea al "Workshop EASA sugli scenari standard" dal 9 all'11 luglio 2018, che si suddividono come già detto, per fasce di massa operativa al decollo e per ambiente operativo, sono i seguenti:

S01 - impiego di APR di massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg che non possiedono le caratteristiche di inoffensività di cui all'art. 12 in area urbana;
S02 - impiego di APR di massa operativa al decollo maggiore di 2 kg e minore o uguale a 4 kg in area urbana;
S03 - impiego di APR di massa operativa al decollo maggiore di 4 kg e minore o uguale a 10 kg in area urbana;
S04 - impiego di APR di massa operativa al decollo minore o uguale a 4 kg che non possiedono le caratteristiche di inoffensività di cui all'art. 12 in area extraurbana su cantieri o infrastrutture lineari quali ad es. autostrade, elettrodotti, ferrovie, gasdotti;
S05 - impiego di APR di massa operativa al decollo maggiore di 4 kg e minore di 25 kg in area extraurbana su cantieri o infrastrutture lineari quali ad es. autostrade, elettrodotti, ferrovie, gasdotti che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano addestrate allo scopo;

S06 - impiego di APR di massa operativa al decollo minore o uguale a 4 kg che non possiedono le caratteristiche di inoffensività di cui all'art. 12 in area extraurbana per riprese televisive cinematografiche;

S07 - per impiego di APR di massa operativa al decollo maggiore di 4 kg e minore di 25 kg in area extraurbana per riprese televisive cinematografiche.

Nonostante lo scenario S05 potrebbe sembrare maggiormente plausibile ed utile ai fini del monitoraggio e l'ispezione anche in tempo reale, di impianti, sistemi o apparecchiature industriali, per situazioni di contingenza particolarmente specialistiche in condizioni ed ambienti che esulano da quelli standard si rende necessario il ricorso all'autorizzazione per scenari non standard con conseguente aggravio dei costi e della tempistica prevedendo la normativa la presentazione di una domanda corredata di analisi di rischio, manuale di volo, programma di manutenzione, manuale delle operazioni, configurazione, report delle attività sperimentale per l'accertamento caso per caso di una specifica approvazione. Quest'ultimi scenari costituiscono del resto preponderante "normalità" al punto che, risulta se si vuole, spontaneo e/o conveniente, nello studio di fattispecie, l'introduzione di un'entità concettuale interdisciplinamente unificante che possa rappresentare la vasta gamma di situazioni che è possibile incontrare in campo industriale e non come appunto il monitoraggio in tempo reale e/o differito industriale (impianti, sistemi o apparecchiature), delle strutture, ambientale, agricolo di precisione, pre e post sisma, applicazioni militari, mediche, personali, assistenza sanitaria, gestione delle catastrofi, controllo del traffico veicolare ecc.: il "Dominio Applicativo".

Una rete di sensori può ragionevolmente definirsi come una rete in senso classico (insieme di nodi fisicamente interconnessi) nella quale i nodi rappresentino elementi trasduttivi appunto sensori o attuatori interconnessi tramite cavi. Ciò che caratterizza e differenzia crucialmente una rete di sensori senza fili (Wireless Sensor Network, WSN) oltre alla mancanza di collegamenti fisici materiali tra i nodi ed al fatto che quest'ultimi siano veri e propri nodi di calcolo (Smart Sensor, Smart Actuator, Sink) cioè sistemi fisici digitali programmabili a microprocessore aventi capacità di elaborazione autonoma, è il concetto di insieme di sistemi distinti dislogati disgiuntamente ad alta densità, tipicamente fino a 20-30 per metro cubo, nel Dominio Applicativo in grado di interfacciarsi con esso e di cooperare collaborativamente in maniera coordinata al fine di fornire servizi informativi congiunti cioè di costituire un'architettura di rete distribuita. Al di là di quelle che possano essere le problematiche di specifica per determinati requisiti e di realizzazione fisica di una WSN, qui neanche accennate per ragioni di spazio, emerge imperiosa la necessità di analisi e sviluppo di un Algoritmo Distribuito che implementi l'attività di cooperazione, di volta in volta finalizzata al Dominio Applicativo, tra gli Smart Sensor/Actuator ed i nodi Sink di raccolta e richiesta (Query) di informazioni di una WSN e che non volendo prescindere da quelle che siano le caratteristiche uniche degli APR di sorvolare luoghi impervi non sempre raggiungibili e/o comunque rischiosi per l'essere umano li annoveri al ruolo di nodo Sink o Utente locale (Local User) mobile di una WSN (Fig. 1). Come riferimento di esame visivo sulle attrezzature a pressione, è possibile seguire la Linea Guida pubblicata nel 2006 dall' ex Ispesl, ^[35] e il disegno di Linee Guida dell'Inail. ^[36]

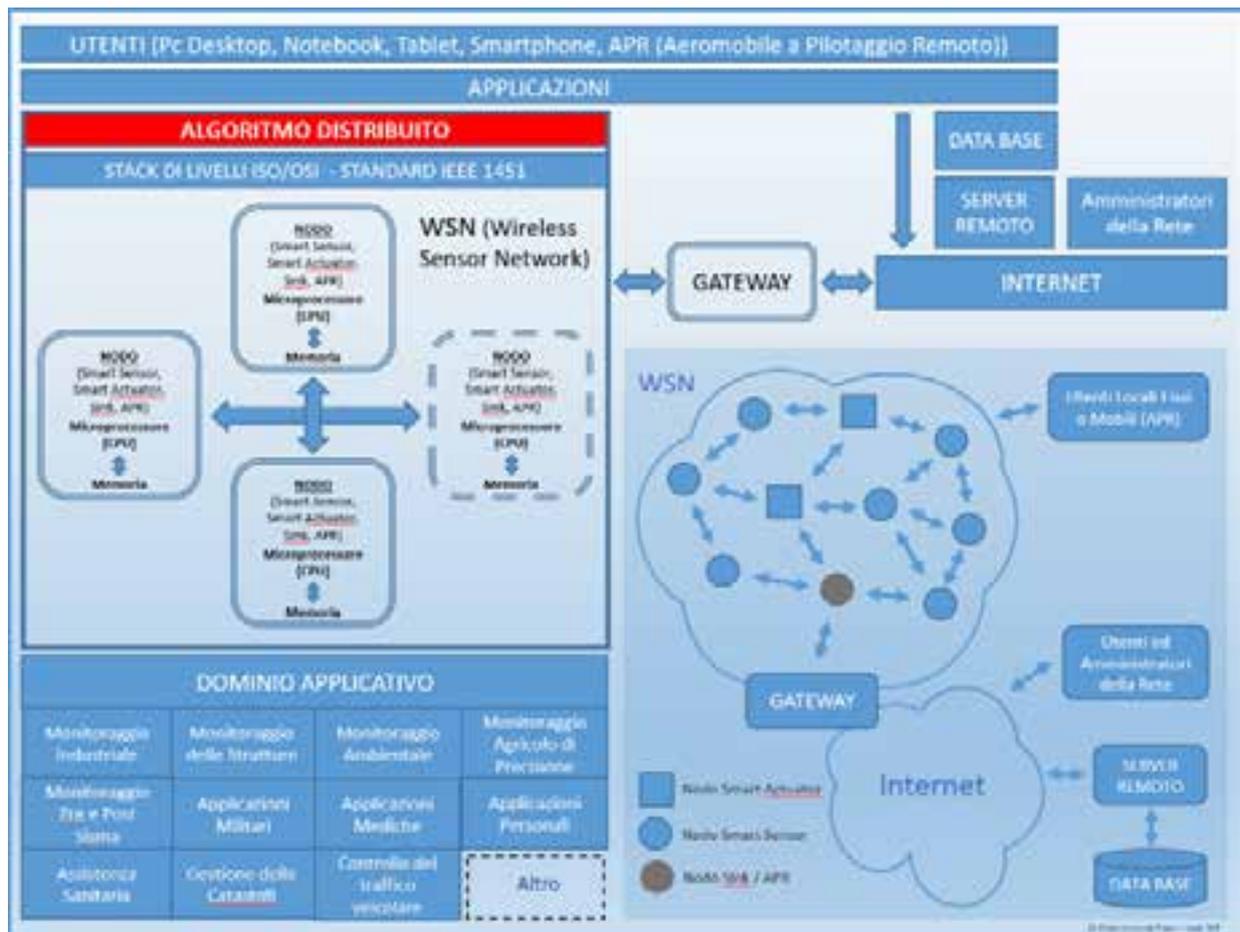


Figura 1. Rappresentazione grafica strutturata ed interdisciplinare di uso dell'APR nel monitoraggio e nell'ispezione di impianti, sistemi o apparecchiature industriali.

5.3. Simulation Team & Università di Genova

Simulation Team e il suo gruppo presente presso l'Ateneo Genovese è da tempo attivo su molteplici progetti legati all'impiego di sistemi autonomi e robotizzati in contesti complessi. In effetti nel seguito sono proposti sinteticamente esempi di progetti di Ricerca e Sviluppo legato all'uso di UxVs, spesso in nuovi campi, di applicazione e con implementazioni specifiche di soluzioni innovative. In questi contesti ^[9] va detto che per completare la progettazione, il test e la sperimentazione e valutare efficacia e rischi correlati in termini di sicurezza, è necessario ricreare un ambiente virtuale di missione realistico; in questo modo diventa possibile testare tramite la simulazione le soluzioni e ottimizzarne progetto, configurazione e modalità di impiego oltre a creare ambienti per addestrarne i piloti o i supervisor. In effetti questa esigenza deve essere affrontata con il ricorso al M&S (modellazione e simulazione) e alle sue più recenti evoluzioni ^[14]; il Simulation Team è tra i pionieri nell'adozione del nuovo paradigma MS2G che garantisce un vantaggio cruciale dato che consente di combinare diversi modelli, simulatori e anche attrezzature reali all'interno di un ambiente sintetico comune ^[10]. Inoltre questi ambienti di simulazione risultano, con questo approccio, particolarmente intuitivi e interattivi proprio perché impiegano le più avanzate soluzioni di Mixed Reality; un esempio in questo senso è fornito dallo SPIDER, ideato proprio dal Simulation Team e capace di fungere da supporto nello sviluppo di soluzioni che impieghino sistemi autonomi e robotizzati ^[11]. In effetti lo SPIDER è un particolare tipo di CAVE che applica i concetti del MS2G in modo integrale garantendo sia l'interoperabilità che l'immersività e l'interattività del mondo simulato sia con gli attori umani che con sistemi di intelligenza artificiale e agenti autonomi.

Nel seguito si propongono alcuni casi di studio per dimostrare i risultati già conseguiti in queste ricerche ^[9] e visibili su www.itim.unige.it/projects ^[6] e su www.liophant.org/video ^[7].



Figura 2. Il Simulatore IDRASS mentre impiega un Sistema autonomo ad ala rotante all'interno di un impianto industriale

5.3.1 Caso di studio: IDRASS

Le operazioni con mezzi autonomi all'interno degli impianti industriali sono molto promettenti per le tematiche di sicurezza, specialmente nei casi in cui l'ambiente possa essere contaminato; quindi questi contesti rappresentano un esempio ideale per applicare UxVs; da questo punto di vista, il supporto durante i disastri nelle strutture industriali è un'area molto popolare per la ricerca e lo sviluppo in questo campo proprio a causa delle sfide rappresentate da questi ambienti complessi ^[11]; il team di Genova ha sviluppato in questo settore il sistema IDRASS che crea un ambiente virtuale interno ed esterno di impianti industriali e permette di operare con diverse tipologie di mezzi tradizionali e autonomi (in modo indipendente e/o coordinato) in caso di contaminazione CBRN (chimica, biologica, radiologica e nucleare) dovuta sia a incidenti causati dall'uomo che accidentali o dovuti a disastri naturali (vedi figura 2). IDRASS simula sia le operazioni interne ed esterne in caso di incidenti in diverse tipologie di complessi industriali quali per esempio impianti chimici e/o nucleari ^[11]. In questi contesti è di solito necessario introdurre molti soggetti per riprodurre l'intero scenario di crisi e, ovviamente, l'uso di IA è una risorsa fondamentale per essere in grado di sviluppare grandi e complessi ambienti di missione che siano realistici. Inoltre, i problemi di sicurezza nell'utilizzo di droni all'interno di strutture industriali sono legati alla complessità proprie di questi contesti ^[24]: cavi, canaline cavi, condotte, serbatoi sono ostacoli fisici che popolano l'area con un'alta densità. Inoltre in molti casi vi sono anche sistemi di sfiato e valvole di sicurezza che potrebbero creare perturbazioni impegnative per UxVs in termini di flussi, portate, vampate e forti sbalzi di temperatura; va aggiunto che negli impianti, spesso, l'atmosfera potrebbe includere (in condizioni normali o durante particolari momenti) polveri, agenti corrosivi e elementi ad alta temperatura pericolosi in termini di irradiazione.

È evidente che esistono barriere solide, termiche e gassose non facili da rilevare e capaci di creare ambienti complessi; infine in queste missioni l'UxVs potrebbe essere costretto ad operare anche in ambienti confinati dove il mix d'aria potrebbe rivelarsi pericoloso per esplosioni rispetto alle caratteristiche di alcuni componenti del sistema robotico stesso o del suo carico. In effetti, l'intero impianto industriale potrebbe includere diversi sistemi con potenziali rischi ed effetto domino in caso di collisione tra il UxVs e-o anche solo per semplice interazione; infatti l'interferenza elettronica tra i controlli UxVs e tutti i sistemi di automazione e di supporto alla DCS potrebbe influire sulla sicurezza dell'impianto medesimo e sulla affidabilità del drone. In effetti, è anche necessario ricordare l'aspetto cruciale della compatibilità elettromagnetica. Questi aspetti sono comuni anche con la

semplice presenza di linee e apparecchiature ad alta tensione nell'impianto industriale, ma diventano ancora più intensi in presenza in casi specifici, per esempio nel sistema IDRASS si possono anche riprodurre e testare virtualmente incidenti dove vi siano di radiazioni ionizzanti causate da sversamenti e contaminazioni nucleari, che potrebbero portare a perdita di connessione e malfunzionamenti dei droni [22]. Inoltre, è necessario considerare la presenza di barriere di comunicazione "naturali", causate dalla riflessione e dall'interferenza delle onde elettromagnetiche a causa dell'alta densità di infrastrutture metalliche (e non solo); questi ostacoli influenzano, specialmente nella parte indoor, le comunicazioni e le operazioni con UxVs nell'impianto.

Da questo punto di vista, è evidente che il drone debba poter operare, parzialmente, anche quando isolato e quindi sia richiesto un alto livello di autonomia per l'UxVs e vada modellizzato anche il rischio di perdere il contatto con il controllo centrale.

IDRASS affronta quindi questo complesso contesto operativo e affronta anche il problema legato all'autonomia della batterie del UxVs, considerando che per spostarsi all'interno di un impianto industriale e per effettuare misure di raccolta dati e impiego di sensori potrebbe essere difficile avere abbastanza autonomia per completare l'intera missione e che l'impiego dei diversi apparati e delle differenti modalità operative influenza i consumi, soprattutto quando si è in movimento al coperto e/o in spazi limitati. Infine, gli impianti industriali includono la presenza di esseri umani e l'UxVs deve essere testato per poter operare interagendo con essi, ma soprattutto evitando di ferirli, magari per diretta collisione o, indirettamente, generando altri incidenti. IDRASS fornisce valutazioni dei rischi e delle prestazioni e permette di operare in modo automatico o interattivo in questi scenari operativi, fornendo un fondamentale supporto nella definizione di sistemi UxVs e delle relative procedure d'impiego in impianti industriali; le simulazioni includono sia UAV (sia ad ala fissa che rotante) che UGV attivi sia in modo indipendente che collaborativo.

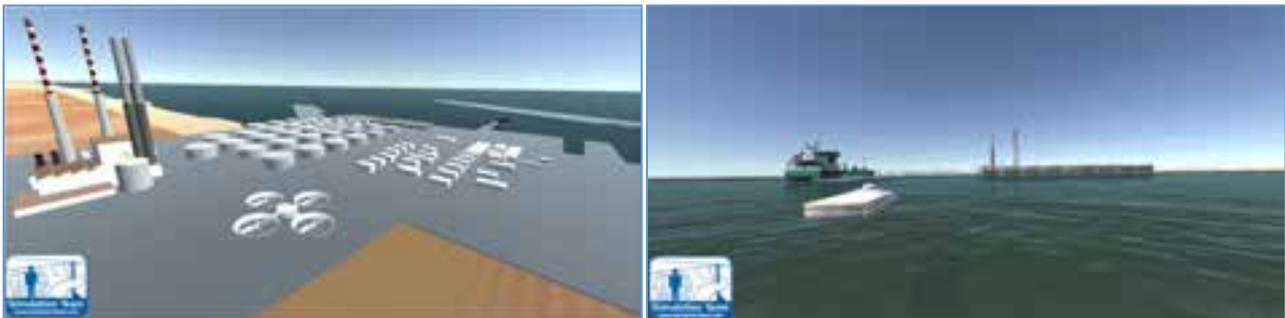


Figura 3. UAV, USV e AUV in T-REX operano in sinergia in Infrastrutture Critiche



Figura 4. Un AUV pattuglia una Zona Industriale Strategica in cooperazione con UAV

5.3.2 Caso di studio: T-REX

In riferimento alla necessità di affrontare la protezione di infrastrutture critiche On-Shore, il team di simulazione ha sviluppato una simulazione innovativa definita T-REX che ricrea, in

un ambiente virtuale immersivo interattivo, questi scenari complessi ^[12]. Il simulatore T-REX è stato utilizzato per affrontare diversi problemi e prevede l'utilizzo combinato di UAV, UGV, USV e AUV per proteggere un complesso industriale che fornisce servizi strategici (produzione energia, trattamento acqua e dissalazione, stoccaggio e trasporto petrolio e gas naturale) in una regione che coinvolge diverse città come proposto nelle immagini 3 e 4.

La collaborazione multi-dominio (e.g. terra, aria, acqua e anche cyberspace) è cruciale nella protezione di infrastrutture critiche, specie se si trovano nella zona costiera che richiede di prendersi cura delle tematiche di rischi provenienti da aria, terra, superficie del mare e ambiente sottomarino. In questo quadro marittimo esteso, è fondamentale sviluppare capacità di coordinamento ^[32].

Risultati molto promettenti sono stati raggiunti, nell'ultimo decennio, nel coordinamento degli UAV per arrivare a completare con successo operazioni complesse come il rifornimento di carburante ^{[25]; [26]}.

Pertanto oggi una delle principali sfide è legata alla creazione di una rete di sistemi autonomi collaboranti che operano su domini diversi ^{[28]; [30]; [31]; [34]}.

In effetti, per avere successo, diventa necessario sviluppare una capacità di controllare una rete eterogenea di risorse diverse ^{[15]; [17]; [18]}.

Da questo punto di vista, un'idea interessante è quella di assegnare il ruolo di supervisore agli umani invece di costringerli a pilotare ogni singolo UxVs come espresso dal concetto man-on-the-loop supportato dalla soluzione T-REX/SPIDER del Simulation Team proposto nella figura 5 ^[22].

Questa è una grande opportunità, che riduce drasticamente il numero di persone necessarie per supportare operazioni complesse e guidare ciascun mezzo, ma anche ovviamente si tratta di una sfida per la sicurezza e introduce altre sfide in termini di soluzioni tecnologiche e formazione ^[11]. Inoltre, nel caso della protezione delle infrastrutture critiche, un grosso problema riguarda i falsi allarmi; in effetti, la grande maggioranza degli eventi sospetti sono legati a casi che riguardano condizioni innocue dovute al traffico generale, infrazioni civili non intenzionali, cattiva classificazione di uccelli o animali, ecc. ^{[8]; [16]}. Oltre a queste considerazioni, è anche possibile affrontare errori e guasti del sensore che potrebbero creare condizioni critiche nei sistemi di protezione ^[23].

In realtà, questo problema richiede la copertura 24 ore su 24, 7 giorni su 7, in presenza di condizioni meteorologiche e di condizioni climatiche difficili ^[20].

L'uso di UxVs potrebbe essere quindi utile per rafforzare la protezione delle infrastrutture critiche, considerando che potrebbe divenire una soluzione robusta, supportata da fusione di dati multiplatforma e multisensoriale e capace di finalizzare ulteriori indagini specifiche direttamente in prossimità degli allarmi, proprio al fine di discriminare fra quelli reali e quelli fasulli. Ovviamente questi elementi suggeriscono requisiti specifici in termini di capacità di collaborazione, ridondanza e reattività del sistema multi UxVs che proprio T-REX consente di studiare.



Figura 5. Man on the Loop per supervision delle operazioni in T-REX/SPIDER

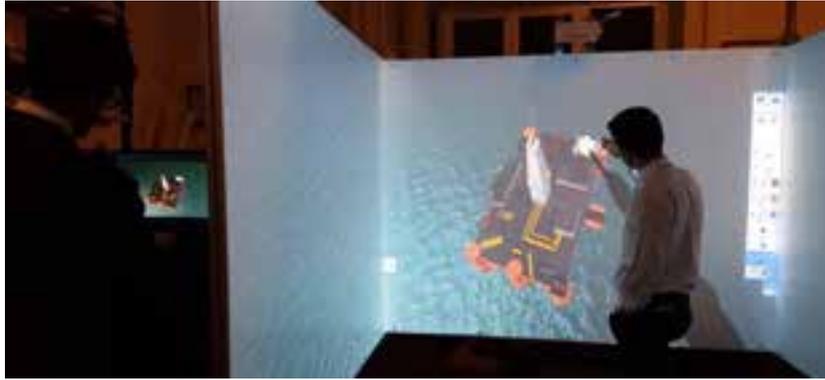


Figura 6. Supervisione di operazioni congiunte di mezzi autonomi su un Oil Rig

5.3.3 Caso di studio: SO2UCI

Le operazioni a bordo delle piattaforme Off-Shore sono molto complesse e l'ambiente interno ed esterno all'impianto è molto impegnativo a causa della complessità della piattaforma e delle condizioni ambientali estreme in cui spesso opera (ad esempio mare e condizioni meteorologiche); in questo caso l'uso di USV, UAV e AUV / UUV, in modo combinato, potrebbe essere molto utile come proposto dal sistema di simulazione SO2UCI (vedi figure 6). Per queste ragioni è interessante indagare le capacità di reti eterogenee di sistemi autonomi all'interno di questo campo di applicazione [15].

In effetti, il coordinamento tra UxVs che operano in diversi domini è un elemento cruciale per affrontare questo tipo di missioni complesse [27]; [29]; [31].

In questo caso, l'uso di UxVs coordinati in diversi domini è fondamentale [13]; [19]. Ovviamente le capacità di collaborazione sono fortemente correlate all'introduzione di una soluzione avanzata per l'IA e potenzialmente al concetto di human on the loop già citato [15]; [33].

In effetti SO2UCI è un sistema di simulazione per la progettazione delle procedure e per la formazione relativo all'impiego di UxVs a supporto di piattaforme off-shore e infrastrutture critiche sottomarine (ad es. Cavi, condotte); il simulatore consente di valutare minacce asimmetriche utilizzando sia risorse tradizionali che sistemi autonomi (es. RHIB, Elicotteri, Sensori, UAV, USV, AUV, Alianti, ecc.). Il simulatore è interoperabile utilizzando HLA e supporta l'integrazione con apparecchiature reali e con altri simulatori e soluzioni come lo SPIDER. SO2UCI integra inoltre scenari destinati ad addestrare nell'uso di sensori specifici; per esempio si possono usare sensori su UAV ad ala rotante per discriminare le barche sospette che invadono il perimetro della piattaforma conducendo anche riconoscimento facciale dell'equipaggio o usando termocamere.

6. Conclusioni

Le considerazioni fatte e gli esempi proposti rappresentano già una valida dimostrazione del potenziale relativo all'impiego di sistemi UxVs nell'Ispezione, Controllo e Gestione Manutenzione in Sistemi Industriali; in particolare gli esempi confermano l'opportunità di affrontare i problemi di sicurezza con sistemi autonomi andando a creare nuovi ruoli e a definire nuovi campi di applicazione.

Ovviamente è difficile indagare su tutti i diversi elementi che concorrono alla sicurezza e all'efficacia delle politiche e delle tecnologie in questione per prevenire e mitigare i rischi; quindi si evidenzia la necessità di procedere con determinazione al potenziamento di queste ricerche e queste sinergie; inoltre si evidenzia che la simulazione è sicuramente la tecnica più promettente in grado di gestire scenari ampi e complessi influenzati da fattori stocastici che coinvolgono nuove applicazioni di UxVs; si prevede pertanto che questi ambienti di simulazione si evolvano ulteriormente adottando ed estendendo il paradigma MS2G come proposto dagli esempi di impiego dello SPIDER.

Questo approccio è fondamentale per supportare lo sviluppo di un'intensa collaborazione tra le diverse parti interessate a tale contesto, su un quadro di sperimentazione virtuale comune e comprensibile.

7. Riferimenti bibliografici

- [1] Wikipedia https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0
- [2] Dario De Cristofaro, Maury Crox. Robot del passato. Postumano.com. 2012;
<https://www.postumano.com/2011/02/12/robot-del-passato/>
- [3] EUR-LEX <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1536842302975&uri=CELEX:32018R1139>
- 4] Danilo Scarato
<https://www.quadricottero.com/2018/08/regolamento-europeo-droni-workshop-easa.html>
- [5] Federico De Girolamo
<http://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20180607IPR05239/eu-wide-rules-for-safety-of-drones-approved-by-european-parliament>
- [6] www.itim.unige.it/projects
- [7] www.liophant.org/video
- [8] Bass, T. (2000) "Intrusion detection systems and multisensor data fusion" Communications of the ACM, 43(4), pp.99-105
- [9] Bruzzone A.G., Massei M., Agresta M., di Matteo R., Sinelshchikov K., Longo F., Nicoletti L., di Donato L., Tommasini L., Console C., Ferraro A., Pirozzi M., Puri D., Vita L., Cassandra F., Mennuti C., Augugliaro G., Delle Site C., Di Palo F., Bragatto P. (2017a) "Autonomous Systems & Safety Issues: the Roadmap to enable New Advances in Industrial Application". Proc. of EMSS, Barcelona, September
- [10] Bruzzone A.G., Massei M., Maglione G.L., Sinelshchikov K., Di Matteo R. (2017b) "A strategic serious game addressing system of systems engineering", Proc. of MAS, Barcelona, September
- [11] Bruzzone A.G., Longo F., Massei M., Nicoletti L., Agresta M., Di Matteo R., Maglione G.L., Murino G., Antonio Padovano A. (2016a) "Disasters and Emergency Management in Chemical and Industrial Plants: Drones simulation for education & training", Proc. of MESAS, Rome, June 15-16
- [12] Bruzzone A.G., Massei M., Longo F., Cayirci E., di Bella P., Maglione G.L., Di Matteo R. (2016b) "Simulation Models for Hybrid Warfare and Population Simulation", Proc. of NATO Symposium on Ready for the Predictable, Prepared for the Unexpected, M&S for Collective Defence in Hybrid Environments and Hybrid Conflicts, Bucharest, Romania, October 17-21
- [13] Bruzzone A.G., Massei M., Maglione G.L., Di Matteo R., Franzinetti G. (2016c) "Simulation of Manned & Autonomous Systems for Critical Infrastructure Protection", Proc. of I3M, Larnaca, Cyprus, September
- [14] Bruzzone A.G., Massei M., Agresta M., Poggi S., Camponeschi F., Camponesch M. (2014) "Addressing Strategic Challenges on Mega Cities through MS2G", Proceedings of MAS, Bordeaux, France, September 12-14
- [15] Bruzzone, A.G., Berni, A., Fontaine, J.G., Cignoni, A., Massei, M., Tremori, A., Dallorto, M., Ferrando, A. (2013) "Virtual Framework for Testing/Experiencing Potential of Collaborative Autonomous Systems", Proc. of I/ITSEC, Orlando. FL USA
- [16] Cárdenas, A. A., Amin, S., Lin, Z. S., Huang, Y. L., Huang, C. Y., & Sastry, S. (2011) "Attacks against process control systems: risk assessment, detection, and response",

- Proceedings of the 6th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security, March, pp.355-366
- [17] Feddema, J.T.; Lewis, C.; Schoenwald, D.A., (2002) "Decentralized control of cooperative robotic vehicles: theory and application, "Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol.18, no.5, pp.852, 864, Oct
- [18] Ferrandez J.M., De Lope H., De la Paz, F. (2013) "Social and Collaborative Robotics", International Journal Robotics and Autonomous Systems, 61
- [19] Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, V., Pappas, G., (2006) "Cooperative air and ground surveillance", Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol.13, no.3, September, pp.16-25
- [20] Kastek, M., Dulski, R., Zyczkowski, M., Szustakowski, M., Trzaskawka, P., Ciurapinski, W., Grelowska G., Gloza I., Milewski S, Listewnik, K. (2012) "Multisensor system for the protection of critical infrastructure of seaport" In Proc. of SPIE, Vol. 8288, May
- [21] Magrassi C. (2013) "Education and Training: Delivering Cost Effective Readiness for Tomorrow's Operations", ITEC Keynote Speech, Rome, May
- [22] McCurry Justin (2017) "Dying robots and failing hope: Fukushima clean-up falters six years after Tsunami", The Guardian, March 9
- [23] Merabti, M., Kennedy, M., & Hurst, W. (2011) "Critical infrastructure protection: A 21 st century challenge", Proc. of IEEE Int.Conf. On Communications and Information Technology, ICCIT, March, pp. 1-6
- [24] Mobley, R. K. (2001) "Plant engineer's handbook", Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- [25] Richards A., J. Bellingham, M. Tillerson, and J. P. (2002) "How: Co-ordination and control of multiple UAVs", Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Monterey, CA, August
- [26] Ross, S., D. Jacques, M. Pachter, and J. Raquet, (2006) "A Close Formation Flight Test for Automated Air Refueling," Proceedings of ION GNSS-2006, Fort Worth, TX, Sep
- [27] Shafer, A.J., Benjamin, M.R., Leonard, J.J., Curcio, J., (2008) "Autonomous cooperation of heterogeneous platforms for sea-based search tasks", Oceans, September 15-18, pp. 1-10
- [28] Shkurti, F., Anqi Xu, Meghjani, M., Gamboa Higuera, J.C., Girdhar, Y., Giguere, P., Dey, B.B., Li, J., Kalmbach, A., Prahacs, C., Turgeon, K., Rekleitis, I., Dudek, G., (2012)"Multi-domain monitoring of marine environments using a heterogeneous robot team", Proc. of IEEE Intelligent Robots and Systems (IROS), vol., no., pp.1747,1753, October 7-12
- [29] Stilwell D. J., A. S. Gadre, C. A. Sylvester and C. J. Cannell (2004) "Design elements of a small low-cost autonomous underwater vehicle for field experiments in multi-vehicle coordination", Proc. of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, June, pp. 1-6
- [30] Tanner H. G. (2007a) "Switched UAV-UGV cooperation scheme for target detection", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, April, pp. 3457-3462.
- [31] Tanner H.G., D.K. Christodoulakis, (2007b) "Decentralized cooperative control of heterogeneous vehicle groups", Robotics and Autonomous Systems 55, pp 811–823
- [32] Tether, T. (2009) "Darpa Strategic Plan", Technical Report DARPA, May
- [33] Sujit, P. B., Sousa, J., Pereira, F.L., (2009) "UAV and AUVs coordination for ocean exploration", Oceans - EUROPE, vol., no., pp.1, 7, 11-14 May
- [34] Vail D. & M. Veloso, (2003) "Dynamic multi-robot coordination", Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata, Vol II, pp. 87-100.
- [35] C. De Petris, C. Mennuti, C. Delle Site, (ISPESL - 2006) "Linea Guida – L' esame visivo su attrezzature a pressione". <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-linea-guida-esame-visivo.pdf>
- [36] C. De Petris, C. Mennuti, G. Ingui, (INAIL – 2012) "Esame visivo e spessimetria" <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-esame-visivo-e-spessimetria.pdf>

Gestione della taratura delle valvole di sicurezza per mezzo della tecnologia RFID

F. Massarini¹, S. Mazzoni¹

¹ MC Multiservice

Sommario

La nuova tecnologia RFID permette una gestione assistita delle manutenzioni delle valvole di sicurezza che ottimizza le tempistiche e minimizza le irregolarità.

Una efficiente archiviazione dei documenti di fabbricazione aiuta il corretto esercizio e la corretta taratura delle valvole di sicurezza a protezione delle attrezzature in pressione soggette alle verifiche periodiche previste dal d.m. 329/04.

La digitalizzazione dei documenti ed una veloce rintracciabilità garantiscono lo smontaggio ed il rimontaggio delle valvole senza possibilità di errori.

La rintracciabilità viene gestita apponendo sulla valvola un TAG contenente un microchip; quest'ultimo consente la lettura dei dati per mezzo di un comune smartphone, il tutto senza alcun contatto.

La taratura e le attività di manutenzione vengono registrate in un database dedicato che può essere consultato direttamente on line; il software di gestione inoltre permette all'utente di essere tempestivamente avvisato prima della scadenza della taratura.

In questo intervento si intende illustrare come sia possibile semplificare la gestione alle aziende e contemporaneamente garantire la massima trasparenza agli enti addetti alle verifiche periodiche ed al controllo della messa in servizio delle attrezzature.

1. Introduzione

La gestione di ogni specifica attività manutentiva è un argomento di grande interesse per tutte le aziende che le porta ad avere la necessità di organizzare una enorme quantità di informazioni e notizie.

I dati diventano spesso accessibili da vari sistemi informatici integralmente oppure parzialmente. Una mancata selezione di quello che può essere utile, una non corretta sistematizzazione o il frazionamento dei dati digitali con quelli cartacei, porta ad una inefficienza dei sistemi di archiviazione.

Non è sufficiente infatti avere dei sistemi informatici o degli archivi materiali se poi non vengono gestite correttamente le informazioni e filtrati i dati che realmente occorrono per le attività future.

La gestione delle informazioni dovrebbe percorrere tre principali fasi:

1. La sistematizzazione dei dati iniziale
2. Aggiornamento dei dati
3. La consultazione dei dati

Per la fase iniziale di sistematizzazione, la corretta raccolta dei dati e la creazione di un database presuppongono che ogni componente dell'impianto venga codificato attraverso l'assegnazione di un codice identificativo univoco.

Il codice univoco è essenziale per una efficace rintracciabilità del componente in tutti i flussi informativi. La mancanza di sistemi adeguati spesso compromette la rintracciabilità del componente nell'impianto oppure la fa risultare laboriosa ed economicamente svantaggiosa.

L'aggiornamento dei dati relativi al componente andrebbe effettuato in tempo reale e contemporaneamente su tutti i sistemi informatici e su tutti gli archivi cartacei che lo

riguardano. La mancanza di allineamento tra questi sistemi al momento dell'aggiornamento porta ad una invalidazione degli stessi per la non attendibilità che ne deriva.

La consultazione dei dati dovrebbe essere organizzata su più livelli, in una modalità tale che possano essere effettuate ricerche selettive o con più opzioni. Le consultazioni inoltre dovrebbe essere di facile accesso per tutte le figure tecniche interessate.

La gestione della manutenzione delle valvole di sicurezza (PSV) a protezione degli impianti industriali è un onere legislativo importante che garantisce l'incolumità delle persone operanti negli stessi. Negli impianti industriali generalmente sono presenti un numero non esiguo di valvole di sicurezza, questo comporta un aggravio nella gestione delle stesse e dei dati ad esse correlati. La legislazione vigente prevede delle scadenze di manutenzione legate alle verifiche periodiche a cui sono sottoposte le attrezzature in pressione.

2. Disposizioni legislative

Le verifiche periodiche delle attrezzature in pressione sono regolamentate in Italia dal DM 329/04, poi successivamente ripreso nell'allegato VII del d.lgs.81/08 e dal d.m. 11 Aprile 2011. Nel d.m. 329 si sanciscono anche alcune modalità operative all'atto delle verifiche periodiche che riguardano direttamente gli accessori di sicurezza e nel caso specifico le PSV.

Per le valvole di sicurezza deve essere garantito che i requisiti di funzionalità rispettino i limiti temporali di validità stabiliti dai relativi fabbricanti; all'atto delle verifiche di messa in servizio e della prima verifica periodica deve esserne accertata invece l'esistenza e la funzionalità. Per la verifica di funzionalità dei dispositivi indicati come valvole di sicurezza è consentito, ove possibile, effettuare simulazioni sul banco di prova che riproducano le possibili variazioni del parametro di esercizio. Quindi all'atto delle verifiche di funzionalità delle attrezzature in pressione non avverrebbe altro che l'accertamento di avvenuta taratura entro i limiti temporali stabiliti dal fabbricante e comunque entro i limiti relativi alle periodicità delle verifiche di riqualificazione. [1] [2]

Tutti i requisiti tecnici delle valvole di sicurezza e gli accorgimenti per una corretta installazione andrebbero cercati nelle disposizioni tecniche applicative del d.m. 21 maggio 1974 (Raccolta E- ed 1979). Le disposizioni contengono appunto le formule per la determinazione della portata di scarico di una valvola di sicurezza, legata al fluido da scaricare alle condizioni di progetto delle attrezzature in pressione che andrebbe a proteggere la valvola di sicurezza sopra citata.

Nella fase di messa in servizio delle attrezzature in pressione e nelle successive verifiche periodiche delle stesse sono chiamati ad interagire con le PSV a protezione dell'impianto, non solo gli utilizzatori ma anche i manutentori terzi, i soggetti titolari delle verifiche quali tecnici Inail ex Ispesl, tecnici Asl e tecnici dei Soggetti abilitati privati iscritti regolarmente agli elenchi ministeriali.

3. Manutenzione e taratura delle valvole di sicurezza

La taratura delle PSV spesso viene confusa con la loro manutenzione. In realtà la taratura è una prova di efficienza che potrebbe essere effettuata senza una manutenzione preliminare. Si possono distinguere quindi tre tipologie di attività: la revisione ordinaria, la revisione straordinaria e la taratura.

La revisione ordinaria prevede le seguenti attività da effettuarsi in officina una volta smontata la valvola di sicurezza:

1. Disassemblaggio della valvola in ogni sua parte.
2. Pulizia e verifica accurata di tutti i suoi componenti.
3. Controllo giochi snodi: stelo, porta otturatore e lucidatura.

4. Controllo ed eventuale sostituzione del soffiutto di bilanciamento, per le valvole che ne sono provviste.
5. Smontaggio prigionieri o ugello per l'eventuale ripresa al tornio della tenuta otturatore/ugello.
6. Grafitaggio di tutte le filettature compresa la vite di taratura.
7. Sostituzione di guarnizioni.
8. Smerigliatura e lappatura delle sedi di tenuta boccaglio-otturatore.
9. Pulizia accurata delle parti smerigliate.
10. Grafitaggio dell'alloggiamento della flangia di guida.
11. Riasssemblaggio completo della valvola.
12. Identificazione con cartellino, sul cappello, della sigla, pressione di scatto e data taratura.
13. Taratura.
14. Prova di tenuta secondo le norme API Standard 527.
15. Compilazione della scheda tecnica di manutenzione.

La revisione straordinaria può rendersi necessaria solo dopo aver disassemblato la valvola. A titolo esemplificativo e non limitativo si intendono attività quali:

- ripresa al tornio delle sedi di tenuta;
- ripristino e ripresa al tornio dell'ugello lato ingresso;
- ripristino e ripresa al tornio disco otturatore e porta otturatore;
- ripristino e ripresa al tornio anello blow-down e relativo fermo.

La taratura a banco delle valvole di sicurezza deve essere effettuata secondo quanto previsto dalla Raccolta E al punto E.1.D.2. Il banco di prova, come ulteriormente esplicitato dalla circolare Ispesl 01/05 dell'11/01/2005, deve essere certificato secondo la direttiva PED e rispondere ai requisiti indicati nella raccolta stessa. [3] [4]

La volontà di trovare una nuova tecnologia o l'applicazione di una già esistente, che faciliti la comunicazione e la trasparenza delle azioni intraprese relative alle attività di taratura e manutenzione delle PSV, ha portato all'analisi della tecnologia RFID ed NFC.

4. Tecnologia RFID e NFC

La tecnologia NFC (near-field communication) in italiano significa letteralmente "*Comunicazione di prossimità*", è una tecnologia che fornisce connettività wireless (senza fili) bidirezionale a corto raggio (fino a un massimo di 10 cm). È stata sviluppata congiuntamente dalle più grandi aziende produttrici del mondo della telefonia mobile. La prima applicazione risale all'anno 2006 per poi diventare negli ultimi anni uno standard comunemente fruibile non solo dai sistemi di telefonia mobile.

La tecnologia NFC si è evoluta da una combinazione dell'RFid (Identificazione a Radio Frequenza) e di altre tecnologie di connettività. Contrariamente ai più semplici dispositivi RFid, l'NFC consente una comunicazione bidirezionale: quando due apparecchi NFC vengono accostati entro un raggio di 4cm, viene creata una rete peer-to-peer tra i due ed entrambi possono inviare e ricevere informazioni.

Attualmente questa nuova tecnologia può essere utilizzata per diverse applicazioni, una diversa dall'altra, come: il controllo degli accessi, un servizio di localizzazione, i pagamenti mobile, lo scambio di informazioni, ecc...



Figura 1. Schema di ricezione del segnale di risposta del TAG [5]

La tecnologia NFC opera alla frequenza di 13,56 MHz e può raggiungere una velocità di trasmissione massima di 424 Kbit/s. L'NFC è integrato ai moderni Smartphone tramite un chip ed è quindi una tecnologia fruibile su larga scala da un ampio target di consumatori. Il cellulare equipaggiato con l'NFC è capace di "leggere dei tag" (etichette elettroniche) ciò consente di raccogliere informazioni o azionare un processo automatico dallo/sullo smartphone. [6]

5. Applicazione della tecnologia RFID e NFC per la gestione della taratura delle PSV

L'applicazione della tecnologia NFC in ambito industriale e più precisamente nell'ambito della taratura e della manutenzione delle PSV, ha permesso di ottimizzare il processo di archiviazione, di aggiornamento e di consultazione dei dati.

Al momento della fornitura di una nuova PSV o in un processo di censimento delle PSV presenti in un impianto esistente, viene legato ad ognuna di esse una etichetta elettronica (TAG). Tale etichetta, di dimensioni pari ad una carta di credito standard, riporta stampato il logo della ditta presso cui è stata effettuata la taratura ed i dati principali della PSV scritti con pennarello indelebile.

Il TAG non è elettrificato, è resistente agli sbalzi termici ed alle intemperie, quindi risulta adatto ad ogni ambiente industriale, anche alle zone considerate ATEX.

Le caratteristiche del TAG permettono una applicazione puntuale su ogni PSV. Al momento dell'assegnazione del TAG ad una PSV si associa un codice seriale univoco che andrà poi a costituire il database generale del manutentore ed i singoli sottogruppi di valvole degli impianti utilizzatori. Il tecnico interessato potrà consultare i dati della PSV legata a quel codice seriale attraverso il TAG ed il dispositivo NFC, nel caso specifico lo smartphone. La consultazione avverrà attraverso il web per mezzo di una connessione al database sviluppato dall'azienda che ha effettuato la manutenzione e la taratura.

6. Conclusioni

La creazione di un database e di uno scadenziario digitale presenta dei vantaggi che possono essere riassunti brevemente nei seguenti punti:

- La consultazione degli aggiornamenti avviene in tempo reale, questa caratteristica permette una affidabilità della veridicità dei dati che un database cartaceo non avrebbe.
- L'aggiornamento e la modifica dei documenti viene effettuato direttamente dall'azienda manuttrice e da personale tecnico specializzato così da lasciare meno margine ad errori ed alla sovrapposizione di più figure che non dovrebbero essere abilitate al cambiamento dei dati.
- Lo scadenziario digitale della periodicità delle tarature permette di impostare degli alert automatici per mezzo mail e/o messaggi su dispositivi cellulari alle persone interessate alle attività di manutenzione.
- La trasparenza verso i soggetti titolari della verifica che al momento delle fasi di identificazione della targa apposta dal fabbricante sul corpo della valvola di sicurezza possono vedere in tempo reale la veridicità dei documenti legati alla stessa.

Infine va sottolineata la fruibilità e la facilità d'uso della tecnologia NFC in fase di lettura, che non prevede formazione o considerevoli investimenti economici ma trova spazio negli strumenti tecnologici di uso comune come gli smartphone.

Bibliografia

[1] d.m. 329/04 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

[2] d.m. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo (G.U. del 29.4.2011, n. 98, S.O. n. 111).

[3] Specificazioni tecniche applicative del d.m. 21 maggio 1974 - Norme integrative del regolamento approvato con r.d. 12 maggio 1927, n. 824, e disposizioni per l'esonero da alcune verifiche e prove stabilite per gli apparecchi a pressione

[4] Circolare Ispesl 01/05 del 19/01/2005 – Linea guida per le operazioni al banco delle valvole di sicurezza

[5] "La nascita e la storia della tecnologia RFID". sito internet: <https://www.payxlabel.it/nascita-e-storia-tecnologia-rfid/>

[6] "Che differenza c'è tra NFC ed RFID?" sito internet: <https://www.alfacod.it/home>

Impiego delle tubazioni in polietilene ad alta densità (PEAD) nel settore delle attrezzature a pressione

D. Di Fonzo¹, G. Vaccaro¹, G. Gorrino², E. Pichini Maini³

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail - Uot di Alessandria

³ Inail - Dit

Sommario

Il principale utilizzo di *piping* in *PEAD* riguarda il trasporto del gas naturale e la costruzione di condotte civili. Altre applicazioni di grande sviluppo ed interesse riguardano l'industria chimica, alimentare, il settore energetico e le tubazioni di processo. Obiettivo della memoria è quello di comporre un iniziale quadro dei vari impieghi delle tubazioni in PEAD, per capire quali utilizzi rientrino nel campo di applicazione della PED, quali tra questi rientrino anche nei regimi di assoggettabilità al d.m. 329/04, al d.lgs. 81/08 e al d.m. 11 aprile 2011, quali siano comunque da considerarsi e controllare all'interno di un sistema di gestione della sicurezza. Tale quadro renderà più evidenti le condizioni tecniche e di esercizio per cui il PEAD viene preferito ai tradizionali materiali metallici. E servirà come riferimento e punto di partenza per ogni successiva analisi riguardante la compatibilità con i fluidi trasportati, l'invecchiamento nell'ambiente circostante, la criticità rappresentata da eventuali giunzioni e stacchi: più in generale la possibilità di studiare i meccanismi di danneggiamento possibili e monitorare l'effettiva integrità strutturale di questo particolare e interessante tipo di tubazioni.

1. Introduzione

Il *polietilene ad alta densità* (spesso abbreviato in PEAD, o in HDPE dall'inglese *high-density polyethylene*) è un polimero termoplastico ricavato dal petrolio e composto essenzialmente da carbonio e idrogeno. Per ottenere un chilogrammo di PEAD sono necessari 1,75 kg di petrolio, in termini di energia e di materia prima. È riciclabile.

Nel 2007 il mercato globale del PEAD ha raggiunto un volume di oltre 30 milioni di tonnellate.

Il PEAD resiste a molti diversi solventi e ha una grande varietà di applicazioni, tra cui:

- ✚ cavi per le telecomunicazioni (corrugati, canaline, tubi di protezione)
- ✚ isolatori interni di cavi coassiali
- ✚ tubazioni interrato e non per il trasporto di fluidi in pressione (servizi domestici, distribuzione di gas naturale, trasferimento del calore geotermico, sostanze chimiche aggressive...)
- ✚ geomembrane per applicazioni idrauliche (canali, rinforzi di banchine...) e il contenimento di composti chimici
- ✚ protezione dalla corrosione per tubazioni d'acciaio

E ancora:

- ✚ mortai per fuochi d'artificio resistenti al calore
- ✚ contenitori: flaconi di detersivo per abiti, bottiglie per il latte, taniche di carburante per veicoli, innaffiatoi, bottiglie riutilizzabili, tappi per bottiglie
- ✚ mobili e accessori di plastica: tavole pieghevoli, sedie pieghevoli, borse
- ✚ baracche per ricovero attrezzi, zanzariere, barriere per radici, Tyvek (tessuto non tessuto)
- ✚ ...

Il PEAD è anche usato in amplissimi fogli, resistenti alle sostanze chimiche, per isolare le discariche e impedire l'inquinamento del suolo e delle falde acquifere da parte del percolato dei rifiuti. Riciclato, trova grande impiego nella realizzazione di materiali compositi. È largamente usato anche nel commercio di materiali pirotecnici: i mortai in PEAD sono preferiti a quelli d'acciaio o di PVC perché più durevoli e molto più sicuri; in caso di esplosione, infatti, il PEAD si 'strappa' senza prodursi in frammenti affilati.

La più importante area applicativa del PEAD è la realizzazione mediante *blow molding* di bottiglie (anche per uso alimentare) e altri contenitori e oggetti cavi. Il materiale ha beneficiato del dibattito sulle possibili contaminazioni sanitarie e ambientali provocate dal PVC e dal bisfenolo-A associato al policarbonato, così come dei vantaggi che presenta rispetto a vetro, metallo e cartoncino.

Di larghissimo impiego nelle applicazioni idrauliche (letteralmente, per il trasporto di acqua), ha richiamato la nostra attenzione allorché – un paio di anni fa – alcuni utilizzatori ci hanno chiesto come dovessero procedere per le verifiche periodiche.

2. Caratteristiche strutturali del PEAD

Il *polietilene* (PE) è un omopolimero termoplastico semicristallino sintetizzato¹ a partire da prodotti ottenuti mediante la distillazione del craking del petrolio. Venne scoperto in Gran Bretagna nel 1933 e in seguito, con successive elaborazioni, è diventato una delle materie plastiche più diffuse. La struttura chimica del monomero *etilene* è costituita da due atomi di carbonio connessi da un doppio legame: la sua formula è indicata come $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. Nel caso specifico del polietilene, aggiungendo¹ fra di loro i monomeri, il legame doppio fra atomi delle stesse unità si trasforma in legame singolo fra atomi di unità differenti, dando vita al polimero, il polietilene (Fig. 1). La formula chimica del polietilene è $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ dove n rappresenta il numero di monomeri che costituiscono la catena polimerica; per gli impieghi commerciali questo varia da 2.000 a 40.000.

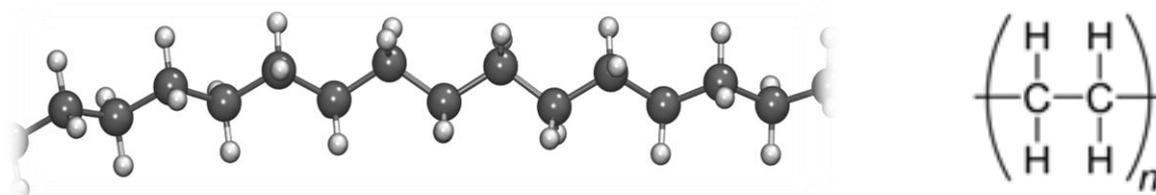


Figura 1. Rappresentazione grafica e formula chimica del polietilene

Rispetto alla propagazione lineare della catena di atomi di carbonio si possono verificare ramificazioni¹. La quantità di tali ramificazioni, controllabili a piacimento in base alle condizioni operative di sintesi, contribuisce significativamente alla qualità del prodotto finale: ad esempio, nel caso in cui le catene polimeriche si sovrappongano le une sulle altre senza una presenza significativa di ramificazioni, si ottiene il polietilene ad alta densità (HDPE o PEAD), materiale rigido e con un peso specifico pari a $0,95 \text{ g/cm}^3$; nel caso in cui le ramificazioni siano presenti in grandi quantità il materiale risultante è il polietilene a bassa densità (LDPE), duttile. Durante la polimerizzazione del PE, si possono aggiungere altri prodotti quali additivi o altri monomeri copolimeri (tipo butene, exene) per creare delle piccole ramificazioni laterali alla catena principale. Nel PEAD il numero limitato di ramificazioni delle catene polimeriche fa sì che le forze intermolecolari siano maggiori che nelle varietà di polietilene meno dense. Ne conseguono differenze significative nelle caratteristiche meccaniche: il PEAD possiede una resistenza alla trazione più alta. È anche più duro e più opaco, e può sopportare temperature più elevate (fino a 110 °C in continuità,

¹ Si veda l'Appendice – Generalità sui materiali polimerici

In particolare per la produzione di tubi di polietilene ad alta densità (PEAD), media densità (PEMD) e bassa densità (PEBD) è utilizzata la tecnologia per estrusione. Con le moderne macchine per estrusione (Fig. 3) si possono ottenere tubi dai pochi millimetri fino ai 2500 mm di diametro per una vastissima gamma di applicazioni.

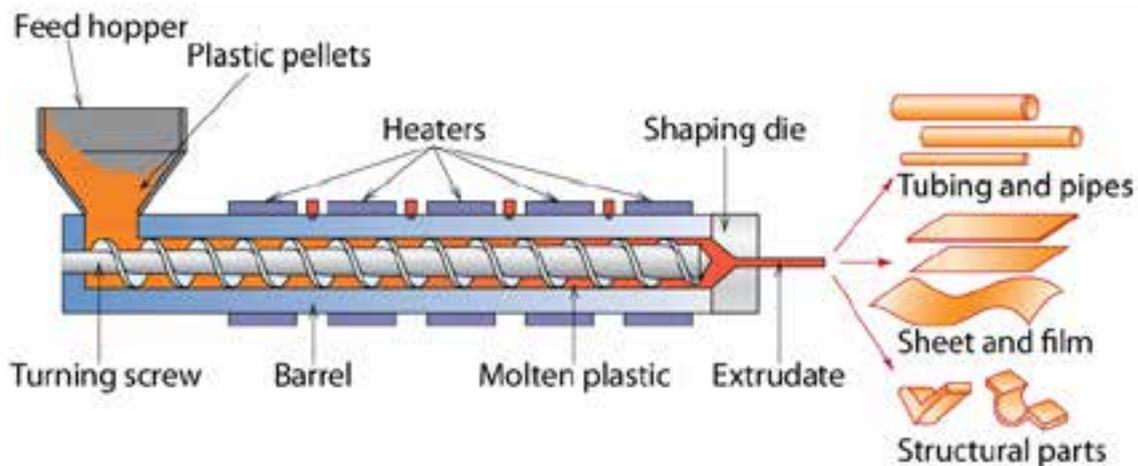


Figura 3. Attrezzatura per stampaggio per estrusione

5. Aspetti impiantistici

Per quanto riguarda gli aspetti tecnologici e impiantistici, in funzione delle varie condizioni di esercizio - il carico, la temperatura, le condizioni di lavoro al contorno, fattori ambientali e/o corrosivi - le applicazioni delle tubazioni in PE ad alta e media densità sono oggi innumerevoli nei settori industriali più svariati. Tali tubazioni inoltre grazie alle loro proprietà intrinseche e meccaniche, risultano - al pari dei materiali compositi - valide alternative alle tubazioni fabbricate in tradizionale materiale metallico. In particolare le tubazioni in PEAD presentano caratteristiche di: leggerezza, resistenza, impermeabilità, facilità di posa e di lavorazione, pieghevolezza. Hanno inoltre elevata resistenza alla propagazione lenta della frattura (Slow Crack Growth – dati Dalmine) che ne misura la capacità di resistere a intagli e carichi concentrati, ed elevata *resistenza allo scorrimento plastico*. Nella applicazione per fluidi in pressione, primaria importanza è attribuita a quest'ultima caratteristica, indice del cosiddetto *invecchiamento* del materiale: essa viene determinata come valore di resistenza minima richiesta a 50 anni (Minimum Required Strength a 20 °C) attraverso la costruzione delle curve di regressione secondo ISO/TR 9080 per i diversi tipi di polietilene alta e media densità (Fig. 4). Per ciascun materiale operando su campioni di tubi sottoposti a diverse temperature (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C) fino a rottura, si determinano come detto, le curve di regressione e da quella a 20 °C si desumono i parametri di progetto. Il valore del carico da assumere per il progetto (σ di progetto per il calcolo dello spessore del tubo) è pari all'MRS di riferimento ridotto di un coefficiente di sicurezza di 1,25 (acqua) e 3,25 (gas).

Alcuni esempi significativi d'impiego sono:

- condotte di trasporto fluidi e liquidi in pressione;
- condotte di trasporto gas;
- *liner anticor* in tubi in materiale metallico (*Relining*);
- sistemi di scarico non in pressione;
- tecniche di installazione alternative;
- installazione interrata e fuori terra di tubazioni per sistemi in pressione e non, all'esterno dei fabbricati;
- sistemi e componenti di approvvigionamento acqua all'esterno di edifici;
- connessioni di scarico e collettori di fognatura.

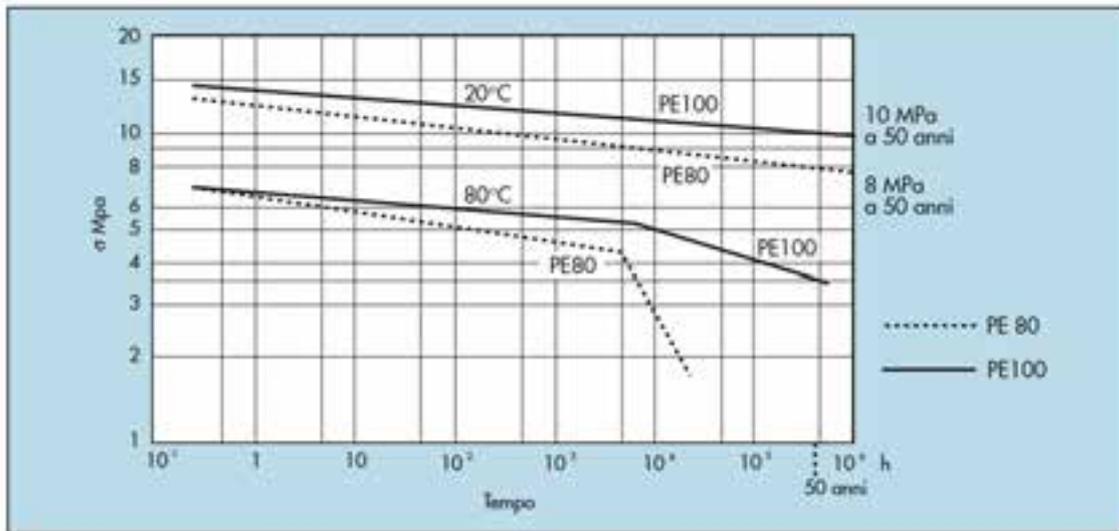


Figura 4. Curve di regressione. Determinazione del valore di MRS di PE100 e PE80

Nel campo della distribuzione di gas metano e del convogliamento di GPL, l' idoneità dei tubi all'impiego è garantita dalla conformità al DM del 24/11/84 "Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l'accumulo e l'utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8" e successivi aggiornamenti fino al Decreto 16 aprile 2008. In base ai decreti citati, le tubazioni in polietilene sono così classificate:

- condotte di 1^a specie: pressione massima di esercizio MOP > 24 bar;
- condotte di 2^a specie: 12 bar < MOP ≤ 24 bar
- condotte di 3^a specie: 5 bar < MOP ≤ 12 bar
- condotte di 4^a specie: 1,5 bar < MOP ≤ 5 bar
- condotte di 5^a specie: 0,5 bar < MOP ≤ 1,5 bar
- condotte di 6^a specie: 0,04 bar < MOP ≤ 0,5 bar
- condotte di 7^a specie: MOP ≤ 0,04 bar.

Analogamente a quanto previsto per le tubazioni metalliche costruite in accordo con la direttiva PED 2014/68/UE, in merito all'impiego di tubazioni in PEAD aventi DN>80, contenenti fluidi del Gruppo 1 e classificate nella I, II, e III categoria, oppure contenenti fluidi del Gruppo 2 e classificate nella III categoria, dette attrezzature risultano soggette alle riqualificazioni periodiche di cui al DM 329/04. Le tubazioni contenenti fluidi del Gruppo 2 e classificate nella I e II categoria, sono invece esenti dalla riqualificazione periodica ai sensi dell'art. 11 del medesimo decreto (Tab. 2).

	LIQUIDI	GAS
GRUPPO 1	soggette a verifica se DN>80	soggette a verifica se DN>80
GRUPPO 2	non soggette (solo I e II categoria)	soggette a verifica se DNxP>5000 (III categoria)

Tabella 2. Caratteristiche delle tubazioni soggette ad ispezione periodica

Ma anche per le tubazioni in PEAD escluse dalle verifiche obbligatorie di messa in servizio o dalle verifiche di riqualificazione periodica, è comunque in capo al Gestore/Utilizzatore - il responsabile della politica generale per la sicurezza della suddetta attrezzatura a pressione, e il destinatario di quanto previsto all'art. 71, comma 8 del Decreto Legislativo n. 81/08 - l'onere di valutare il permanere delle condizioni di prevenzione e sicurezza relative al corretto utilizzo dell'impianto stesso. Inoltre nel caso specifico di tubazioni che siano comunque da considerarsi all'interno di un Sistema di Gestione della Sicurezza, visto

l'allegato 3 punto B comma iii) del d.lgs. 105/15 (decreto di attuazione della direttiva 2012/18/UE Seveso III), il Gestore/Utilizzatore è tenuto a valutare il buon funzionamento e lo stato di invecchiamento delle attrezzature installate.

6. Sistemi per la giunzione delle tubazioni in PEAD

Nelle applicazioni industriali a bassa e media pressione di esercizio, per la giunzione o la riparazione delle tubazioni PEAD, le metodiche più utilizzate sono:

TERMO-GIUNZIONE TESTA A TESTA (a piatto caldo mediante l'ausilio di piastre elettriche o per elettrofusione mediante dedicati supporti o manicotti di giunzione), in grado di conferire alle condutture una condizione di perfetta continuità, permanente tenuta stagna, e buone garanzie di affidabilità ed efficienza (Fig. 5). Nel caso di giunzioni a piatto caldo, le superfici da saldare devono essere opportunamente regolarizzate e pulite e dovendo presentare le facce parallele ed un disassamento contenuto entro il 10% dello spessore del tubo, gli estremi delle tubazioni vengono allineati e bloccati con appositi posizionatori. Tra le testate viene inserita la termo-piastra; trascorso il tempo di riscaldamento delle testate, funzione dello spessore del tubo, ed estratto rapidamente il piatto caldo, le superfici da saldare vengono accostate e compresse tra loro per un tempo anch'esso funzione dello spessore del tubo (variabile dai 10 minuti per DN 110 mm ai 28 minuti per DN 160).

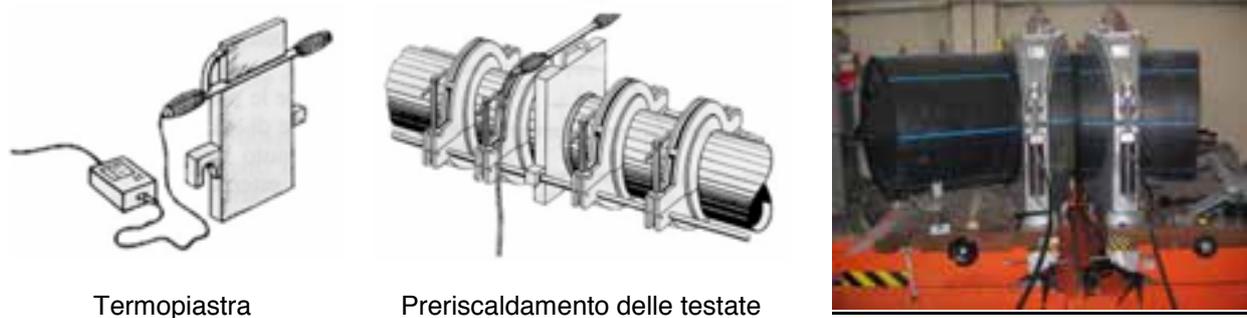


Figura 5. Termogunzione testa-testa a piatto caldo (immagini di archivio)

Per evitare discontinuità nel cordone di saldatura anche la fase di raffreddamento è lenta, di durata simile al tempo di saldatura; trascorso tale tempo è possibile liberare il tubo dalle ganasce del posizionatore.

SALDATURA PER ELETTROFUSIONE che consente collegamenti mediante un elemento a manicotto con resistenza incorporata (Fig. 6). Nella parte superiore del manicotto sono ubicati due spinotti da collegare a una saldatrice che, previa lettura di un codice a barre stampato sul manicotto, imposta automaticamente i tempi di saldatura in funzione del diametro e dello spessore del tubo. Anche in questo caso occorre preliminarmente preparare le giunzioni da collegare controllandone la testate che devono essere piane e ortogonali al proprio asse. Durante la saldatura le resistenze vengono portate a una temperatura di circa 235°C: il tubo riscaldato si espande contro il raccordo e le zone più fredde del manicotto solidificano il polietilene fuso che fuoriesce. Raggiunto il tempo necessario per la fusione, la saldatrice si spegne automaticamente.



Figura 6. Manicotto con resistenza incorporata

GIUNZIONI MECCANICHE O A FREDDO (Fig. 7) realizzate con anelli di graffaggio e collari filettati in metallo/resina, o per frangitura con cartelle di appoggio saldate di testa all'estremità del tubo e flange scorrevoli in acciaio con interposta guarnizione toroidale e bulloni di serraggio.

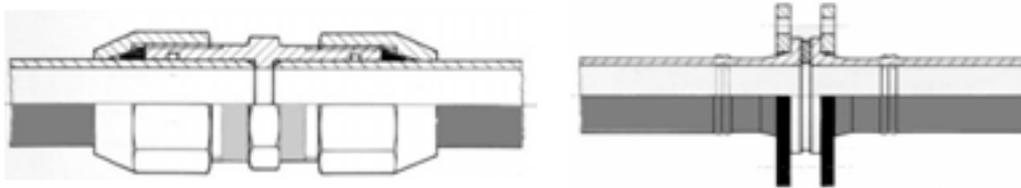


Figura 7. Schemi di giunzioni meccaniche (Manuale tecnico Centratubi srl)

Nel caso di tubazioni in PEAD con o senza rinforzi metallici, per applicazioni specialistiche ad alta pressione, le giunzioni tubo-tubo o tubo-flangia si effettuano per giunzione meccanica, mediante l'ausilio di appositi terminali metallici di accoppiamento, attraverso i quali l'unione è garantita grazie a un idoneo serraggio.

7. Conclusioni

Le tubazioni in PEAD presentano dunque diversi vantaggi: disponibili in barre o in rotoli di notevoli lunghezze e diametri, possono essere facilmente movimentate e installate grazie alla loro leggerezza e flessibilità; le installazioni (interrate e non) possono interessare anche aree instabili grazie alla particolare capacità del PEAD di assorbire vibrazioni e sollecitazioni. Essendo atossiche, possono trasportare acque potabili o fluidi alimentari. L'elevata resistenza alla corrosione e l'inerzia chimica del polietilene ne rende possibile l'impiego per il trasporto di una ampia gamma di prodotti chimici anche in terreni aggressivi e in presenza di correnti vaganti senza riduzioni dello spessore di parete. Presentano ridotte perdite di carico - con conseguente ridotta formazione di incrostazioni - e rispetto alle condotte in acciaio assicurano una portata maggiore a parità di diametro. Hanno elevata tenacità, e dunque una buona resistenza agli urti anche alle basse temperature. Hanno inoltre una buona resistenza al gelo, mantenendo immutate le caratteristiche fino a -20°C per impieghi normali, e per impieghi particolari fino a -60°C . D'altro canto, le sostanze detergenti possono favorire il fenomeno della propagazione della frattura, mentre i solventi idrocarburici possono essere assorbiti con la conseguente riduzione della resistenza meccanica. Inoltre, se da un lato i produttori garantiscono (in fase progettuale) una vita utile di più di 50 anni, si è visto come nel PEAD il fenomeno dello scorrimento plastico determini un invecchiamento del materiale. Pertanto nei tratti in cui la tubazione venga piegata o saldata, col passare degli anni il materiale potrebbe rivelarsi non più capace di resistere alle sollecitazioni alle quali era stato inizialmente sottoposto. L'esistenza di normative che disciplinano l'esecuzione delle saldature, la qualifica dei saldatori e delle attrezzature e i metodi di controllo dei giunti saldati per tubazioni in polietilene, offre all'utilizzatore di tubazioni in PEAD un buon margine di affidabilità. Molto, se non tutto, rimane ancora da definire relativamente ai controlli e alle verifiche da effettuarsi per Legge e in ogni caso per garantire la sicurezza delle tubazioni in PEAD nel tempo.

Bibliografia

- [1] W.D. Callister Jr., David G. Rethwisch - Materials Science and Engineering: An Introduction, Enhanced eText, John Wiley & Sons 9th Edition, dic. 2013
- [2] Tubi di polietilene per distribuzione di gas - Manuale tecnico Dalmine resine, genn. 2010
- [3] Informazioni generali sul polietilene - Hürner, http://www.hurner.it/pdf/INF_GEN_PE.pdf

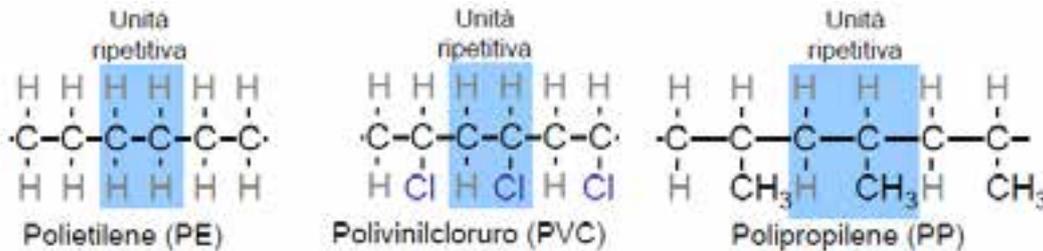
[4] Polimeri sintetici – Preparazione e proprietà – A. Citterio, http://iscamap.chem.polimi.it/wp-content/uploads/sites/2/2016/01/M9_1c_15_polymers1_eng.pdf

Principali riferimenti di legge e normativi

- [1] d.m. 24/11/84 “Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l’accumulo e l’utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8” e s.m.i.
- [2] Decreto 16 aprile 2008 “Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8”
- [3] d.m. 1/12/2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all’art. 19 del d.lgs. 25/02/00, n. 93
- [4] Direttiva 2014/68/UE (97/23/CE) recepita con d.lgs. 15/02/16, n. 26 (PED)
- [5] d.lgs. 26/06/15, n. 105 (Attuazione della direttiva Seveso III 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose)
- [6] Serie UNI EN 1555: Generalità, Tubi, Raccordi, Valvole, Idoneità all’impiego del sistema
- [7] UNI CEN/TS1555-7:2013 – Guida per la valutazione della conformità
- [8] UNI 10520:2009 Saldatura ad elementi termici per contatto – Saldatura di giunti testa a testa di tubi e/o raccordi in polietilene per il trasporto di gas combustibili, di acqua e di altri fluidi in pressione.
- [9] UNI 10521:2012 saldatura per elettrofusione – Saldatura di tubi e/o raccordi in polietilene per il trasporto di gas combustibili, di acqua e di altri fluidi in pressione.

Appendice - Generalità sui materiali polimerici

COMPOSIZIONE CHIMICA: I *polimeri* sono composti a elevata massa molecolare, costituiti da molecole di grandi dimensioni, formate dall'unione di piccole unità costituenti denominate *monomeri* che nella fase di sintesi del polimero reagiscono un elevato numero di volte a formare la macromolecola. La reazione chimica che trasforma i monomeri in polimero è detta *reazione di polimerizzazione*: Poli (molte) + mero (parti, unità ripetitive)



I polimeri formati da un solo tipo di monomero prendono il nome di omopolimeri, mentre quando si ha la presenza di due o più tipi di monomero nella stessa catena si parla di copolimeri.

Il numero di volte che il monomero si ripete nella catena per formare l'intera molecola, è definito *grado di polimerizzazione (DP, degree of polymerization)*. Si ha un *oligomero* se il DP < 10, un *basso polimero* se DP < 100, un *alto polimero* DP > 1000.

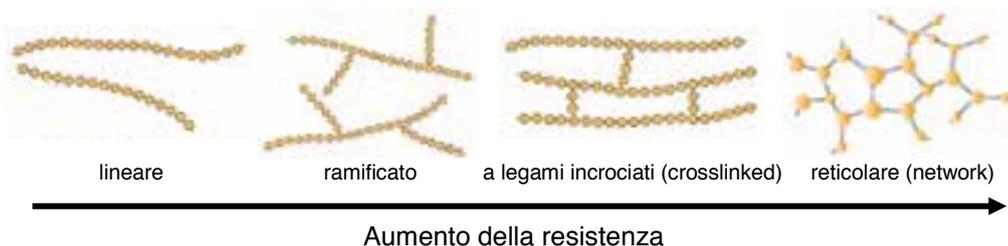
Raramente un polimero commerciale è costituito da un unico elemento formato da tutte le unità che hanno partecipato alla reazione di polimerizzazione in maniera sequenziale. È un fatto assai comune quello di trovare una miscela di prodotti finali aventi diversi pesi molecolari. Pertanto, un ulteriore fattore determinante la qualità del polimero è l'*indice di polidispersione (PDI, polydispersity index)* che rappresenta il rapporto tra la massa molecolare media ponderale e numerica del polimero: quanto più questo numero è vicino a 1, tanto più la reazione ha prodotto macromolecole con lo stesso grado di polimerizzazione.

ORIGINE: In base alla loro origine i polimeri possono essere classificati in:

- *naturali*: sono presenti in natura, come cellulosa, seta polisaccaridi, proteine, acidi nucleici, ecc.;
- *sintetici*: ottenuti per sintesi chimica dai monomeri costituenti, come ad esempio il nylon;
- *artificiali*: ottenuti modificando chimicamente un polimero naturale, come ad esempio la celluloido e il cuoio.

STRUTTURA: Dal punto di vista della struttura molecolare i polimeri si dividono in:

- *lineari*: costituiti da singole catene lineari;
- *ramificati*: costituiti da catene che presentano ramificazioni laterali;
- *reticolati*: costituiti da catene principali collegate da catene laterali che fanno da ponte (*cross linked*) con le catene principali.



A seconda del tipo di struttura si hanno notevoli differenze in alcune proprietà, come ad esempio la densità (i *polimeri ramificati* o *reticolati* sono meno densi di quelli lineari poiché le loro molecole hanno minore tendenza ad impacchettarsi). Inoltre, la presenza di gruppi laterali nelle catene (ad esempio il metile, $-\text{CH}_3$ nella polimerizzazione del propene, $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$) dà luogo a variazioni di densità, di rigidità, di resistenza all'aggressione chimica).

MECCANISMO DI FORMAZIONE: La formazione del polimero (*polimerizzazione*) può avvenire per:

- *addizione* o reazione a catena: innescata da una reazione del monomero con un iniziatore che lo converte in un radicale o in uno ione, in grado di reagire con il monomero in modo sequenziale.

Porta rapidamente alla formazione del prodotto desiderato, ma solitamente presenta un PDI da 10 a 20 (e.g. PE, PP, PVC, PTFE).

- *condensazione* o reazione a stadi: è innescata dalla presenza di un catalizzatore o da un aumento di temperatura. Il primo stadio è la reazione tra i gruppi funzionali di due monomeri che genera un dimero. In seguito questo dimero reagisce con altri monomeri fino alla realizzazione del polimero. Nel corso della reazione, oltre al polimero, sono presenti anche dimeri, trimeri e specie a basso grado di polimerizzazione. Il prodotto risultante ha, in genere, peso molecolare minore rispetto alla polimerizzazione per addizione, si ottiene con processi più lunghi e un PDI da 2 a 3, anche se è possibile arrivare a 1,5 controllando le condizioni di lavoro (e.g. PET, PEEK).

I legami chimici primari che si instaurano tra gli atomi dei monomeri sono principalmente covalenti o covalenti polari, legami che producono un consistente guadagno energetico rispetto alla situazione in cui i due atomi sono divisi. Entrambe le tipologie di legami prevedono la compartecipazione dei propri orbitali atomici e dei propri elettroni secondo la rappresentazione proposta da Lewis. Il legame tra le varie macromolecole polimeriche, è dovuto invece alle interazioni tra i dipoli elettronici presenti nella catena polimerica, dovuti a una differente elettronegatività (tendenza ad attirare elettroni verso il proprio nucleo) degli elementi costituenti (dipoli permanenti) o a una momentanea asimmetria nella distribuzione degli elettroni (dipoli momentanei) o ad una asimmetria dovuta alla presenza di dipoli permanenti (dipoli indotti). Questi legami chimici secondari, sono classificati come forze di van der Waals: forza di Keesom (legame idrogeno, dipolo permanente-permanente), forza di London (dipolo istantaneo-indotto), forza di Debye (dipolo permanente-indotto). Sebbene queste forze forniscano un guadagno energetico molto inferiore rispetto alla formazione di un legame chimico, sono spesso determinanti a causa del loro elevato numero.

CRISTALLINITÀ: La cristallinità influenza le proprietà meccaniche, termiche e ottiche dei polimeri. La maggior parte dei polimeri sono materiali semicristallini, in cui in funzione della storia termica del materiale, vi è la coesistenza di una quantità relativa di regioni cristalline, all'interno di una fase amorfa. In essi sono distinguibili zone cristalline, detti *cristalliti*, in cui le catene di polimero sono ripiegate a lamella (unità fondamentale che caratterizza la morfologia dei cristalli polimerici), ordinate e fortemente interagenti, e zone amorfe, in cui le catene sono distese, disordinate e scarsamente interagenti. Se prevale il volume occupato dai cristalliti il polimero ha proprietà tipiche dei materiali cristallini (rigidità, elevata resistenza meccanica, fragilità, opacità); se prevale il volume occupato dalle zone amorfe il polimero presenterà tipiche dei materiali amorfi (sofficità, bassa resistenza meccanica, elasticità, trasparenza). La cristallinità tende ad aumentare al diminuire della velocità di raffreddamento, essendo maggiore il tempo a disposizione per allineare e distribuire le catene.

TEMPERATURA DI FUSIONE E DI TRANSIZIONE VETROSA: A bassa temperatura le catene molecolari sono fisse nelle loro posizioni e i legami intermolecolari vengono deformati per applicazione dei carichi meccanici. A elevata temperatura, il comportamento dei polimeri è più complesso, perché possono verificarsi dei *riarrangiamenti* e movimenti (attivati termicamente) all'interno e tra le catene. Tali processi detti di *rilassamento* sono i principali responsabili delle proprietà fisiche e meccaniche dei polimeri, differenti nelle regioni cristalline ed amorfe.

I *polimeri cristallini*, con percentuale di cristallinità superiore all'80%, presentano una definita *temperatura di fusione* T_m (*melting temperature*) alla quale i cristalliti fondono e permettono alle catene, di muoversi liberamente e di scorrere plasticamente.

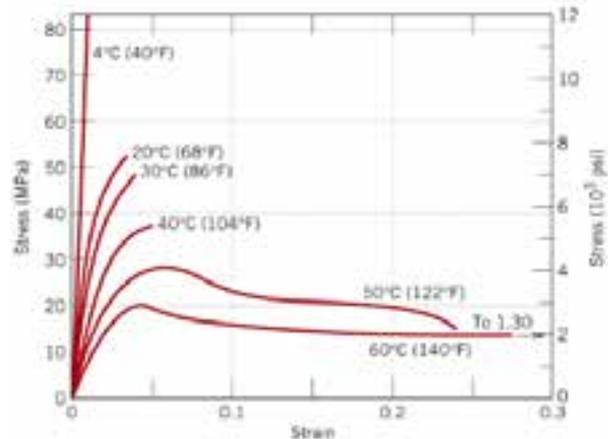
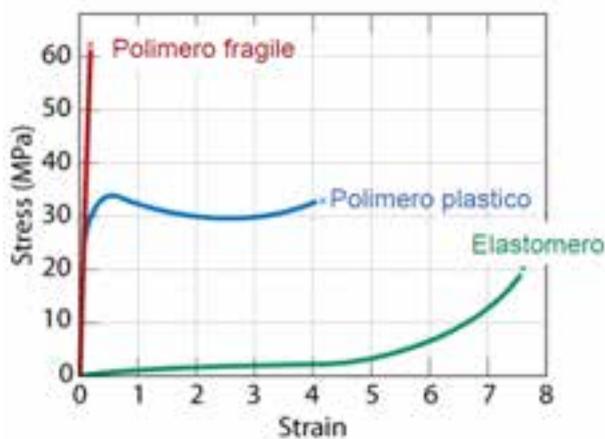
I *polimeri amorfi*, con percentuale di cristallinità inferiore al 20%, non fondono ma rammolliscono a causa della transizione vetrosa, che avviene alla *temperatura di transizione vetrosa* T_g (T_{glass} , *glass transition temperature*). Per temperature più basse di T_g il materiale si presenta vetroso e rigido ed i movimenti delle catene sono impediti; al contrario, per temperature più alte di T_g le catene sono più libere di muoversi, il materiale diventa gommoso, senza fondere, e si comporta come un liquido di elevata viscosità. La T_g dipende dalla natura, dalla struttura chimica e dalla morfologia del materiale e determina il suo campo di applicazione. Sia T_m che T_g aumentano all'aumentare della rigidità della catena del polimero.

I *polimeri semicristallini* nei quali non prevalgono nettamente né i cristalliti né le zone amorfe, possono essere caratterizzati da entrambe le temperature, cioè T_m e T_g .

CLASSIFICAZIONE E COMPORTAMENTO: Nel linguaggio comune il materiale polimerico prende il nome di *materia plastica* o più semplicemente *plastica*. Con le materie plastiche si producono oggetti di

ogni genere per effetto della temperatura e/o della pressione, attraverso processi di formatura. A seconda del comportamento al calore si distinguono in:

- **Polimeri Termoindurenti (TI):** caratterizzati da una struttura rigida tridimensionale con catene ramificate o non. Possono essere lavorati per fusione una sola volta poiché il materiale, se nuovamente riscaldato, diventa rigido e infusibile. Somministrando calore infatti il polimero fonde e reticola permanentemente decomponendosi a causa di reazioni chimiche con formazione di legami covalenti tra catene di polimero diverse. Una volta induriti, non potendo più essere rimodellate, non sono utilizzabili in giunzioni per saldatura. Sono generalmente più resistenti e più fragili delle termoplastiche, sono igroscopiche e hanno di conseguenza una vita di immagazzinamento più breve rispetto alle resine termoplastiche. Non sono riciclabili. Esempi di polimeri termoindurenti sono il poliuretano e varie tipologie di resine (epossidiche, fenoliche, poliesteri, viniliche, poliammidiche e altre).
- **Polimeri Termoplastici (TP):** caratterizzati da catene lineari flessibili (ramificate o non), una T_g e da una T_m . Se riscaldati rammolliscono e fondono, possono essere sagomati in stampi dove solidificano per raffreddamento. Il ciclo fusione/solidificazione è reversibile e può essere ripetuto più volte. Potendosi per tali polimeri avere più modellazioni, si possono "saldare per incollaggio" all'aumentare della temperatura. Hanno un allungamento a rottura e proprietà a flessione, maggiori delle resine (TI), sono in grado di assorbire colpi, vibrazioni, e quindi più tolleranti all'impatto che non i materiali compositi e termoindurenti. Inoltre, non essendo igroscopici, assicurano caratteristiche meccaniche costanti nel tempo. Possono essere amorfi o semicristallini. Esempi di polimeri termoplastici amorfi sono: il *polivinilcloruro* (PVC), il *polistirene* (PS), il *policarbonato* (PC). Esempi di polimeri termoplastici semicristallini sono il *polipropilene* (PP), il *politetrafluoroetilene* (PTFE), il *poliammide* (Nylon), il *polietilene* (PE). Per via della loro struttura omogenea, i polimeri termoplastici possiedono in genere comportamento isotropo, esibendo proprietà meccaniche e termiche uguali in tutte le direzioni. Nel particolare, le caratteristiche meccaniche dei polimeri termoplastici dipendono dalla velocità di deformazione, temperatura, natura dell'ambiente (presenza di acqua, ossigeno, solventi organici, ecc.).



Andamento della tensione e della deformazione in funzione del comportamento plastico o fragile del polimero e in funzione della temperatura di esercizio

Rispetto ai materiali termoindurenti, risultano avere resistenza alla trazione $\sigma = E\varepsilon$ e coefficiente di rigidità (modulo di Young) più bassi.

- **Elastomeri:** detti anche gomme, sono polimeri, naturali o sintetici, caratterizzati da deformazione reversibile: si possono allungare sotto sforzo (anche di 10 volte) senza rompersi e quindi riprendere le dimensioni originarie quando lo sforzo cessa. Hanno struttura amorfa ma con catene flessibili e vincolate in alcuni punti tra loro mediante reticolazioni, per evitare lo scorrimento plastico del materiale sotto sforzo e la conseguente deformazione permanente. Gli elastomeri devono avere una T_g nettamente inferiore alla temperatura alla quale vengono utilizzati, per avere una adeguata mobilità delle catene polimeriche.

Danni sulla bulloneria e sulle flange durante la manutenzione dei giunti con interposta guarnizione. Una rondella e migliorie sui dadi esagonali per prevenirli

R. Acerboni¹, F. Boella¹, A. De Palma¹, P. Morucchio¹, A. Falla², M. Cantone²

¹ Inail - Uot di Venezia-Mestre

² VED - Vetroresina Engineering Developmeent

Sommario

Il metodo maggiormente impiegato per il tensionamento delle aste filettate nelle giunzioni flangiate imbullonate è indubbiamente quello con chiavi torsionometriche. Il carico che si applica alle aste filettate è il minore tra quelli massimi sopportabili da guarnizione, flange e aste.

Talvolta già durante l'applicazione della coppia di serraggio si rileva, tra dado e superficie della flangia su cui esso fa riscontro, una frizione eccessiva, non quantizzabile, che genera delle deformazioni irregolari evidenziando che la relazione "coppia-carico sull'asta" finisce di essere lineare è diventata praticamente incontrollabile. Il fenomeno, a parità di materiale della bulloneria, ricorre con maggiore frequenza al diminuire della dimensione di essa.

E' inoltre frequente che, in particolare su giunzioni che sono state esercite a temperature superiori a 300 °C e durante le fasi di smontaggio del giunto, nel tentativo di svitare il dado, si verificano dei fenomeni di grippaggio tali da provocare la spanatura dei filetti con la conseguente impossibilità di riutilizzo della bulloneria. Questo può impattare sui programmi di manutenzione a causa dei tempi più lunghi di smontaggio, a volte, per la non disponibilità di bulloneria di scorta.

Il lavoro vuole evidenziare come, a partire dalla teorizzazione di quanto esposto, interventi su dadi e sulle rondelle possono limitare gli effetti negativi descritti.

1. Introduzione

Durante il disserraggio delle aste filettate di giunzioni flangiate talvolta si verificano fenomeni di grippaggio del dado sull'asta. Tale fenomeno è maggiormente ricorrente su giunzioni esercite a temperature particolarmente elevate, per quanto tali temperature non superano i limiti imposti dalle norme applicabili.



Figura 1

Il materiale su cui si verifica più frequentemente il grippaggio è l'ASTM A 193 Gr.B16 (1Cr-1/2Mo-V) per le aste e l'ASTM A 194 Gr.4 (1/4 Mo) per i dadi, questo perché sono i materiali maggiormente impiegati nel caso in cui la temperatura di progetto della giunzione supera, mediamente, i 350 °C rispettando comunque i limiti superiori imposti dalle norme applicabili. Di solito il materiale delle flange è un basso legato.

Quando si verifica il grippaggio durante il disserraggio, può essere un serio problema se chi ha programmato la manutenzione non ha pensato di approvvigionare una adeguata scorta di bulloneria oppure se, avendo a disposizione adeguate scorte, si ricorre al sistema più invasivo per la bulloneria, ovvero al taglio ossiacetilenico (Fig.1), più costoso per svariati motivi (*organizzazione di attività, cosiddette a caldo, in impianti dove sono presenti sostanze infiammabili, acquisto di tutta la bulloneria, etc.*). Pertanto è opportuno studiare metodi e tecniche che ne permettano il normale riutilizzo.

2. Impostazione dello studio

Dalla letteratura tecnica si ricava che, nel caso di una giunzione dado-vite, il 90% del carico di trazione applicato alla vite si scarica nei primi 4 ÷ 5 filetti e addirittura il 70% circa nei primi 3. Se la pressione specifica che viene a nascere tra i filetti risulterà oltremodo alta, si avrà che, a seguito del disserraggio, quando anche l'effetto dell'anti-seize applicato sarà nullo o limitato per il fatto che la giunzione è stata in esercizio ad alta temperatura, si potranno verificare fenomeni di grippaggio. L'esame della bulloneria su cui si è verificato il grippaggio e le osservazioni fatte su di essa confermano che i filetti su cui si verifica il danno e che poi innescano il grippaggio sono proprio i primi (Fig.2).



Figura 2

È importante riportare come, di norma, si arriva al blocco del dado sulla vite nel cercare di operare il disserraggio:

- 1) dapprima si regola la chiave idraulica ad un valore di coppia all'incirca il doppio di quello a cui il giunto è stato serrato;
- 2) si applica la chiave al dado da disserrare e si dà coppia;
- 3) il dado ruota sotto l'azione di una coppia inferiore a quella a cui la chiave è stata regolata (*lo si deduce osservando il manometro che indica la pressione dell'olio nella centralina che non raggiunge il valore a cui era stata regolata*);
- 4) dopo aver ruotato per meno di un giro si osserva un graduale aumento della pressione alla centralina indicativo che tra vite e dado si è verificato il grippaggio.

Il ripetersi di ciò su più aste induce a cambiare strategia di smontaggio ricorrendo quasi sempre al taglio ossiacetilenico.

Il fenomeno diventa più evidente all'aumentare del size della vite, perché anche il carico unitario sui filetti aumenta: è sufficiente osservare che a parità di tensione applicata al nocciolo della vite, ed a parità di passo della filettatura, il carico che trasmette la vite aumenta con il quadrato per distribuirsi su una lunghezza che invece aumenta linearmente.

In pratica, all'aumentare del size della vite il carico sui filetti aumenta più che linearmente; il grafico evidenzia che, fatto 100 il carico su un'asta da 1" con filettatura 8UN, su un'asta da 3" esso diventa 359 (Fig.3).

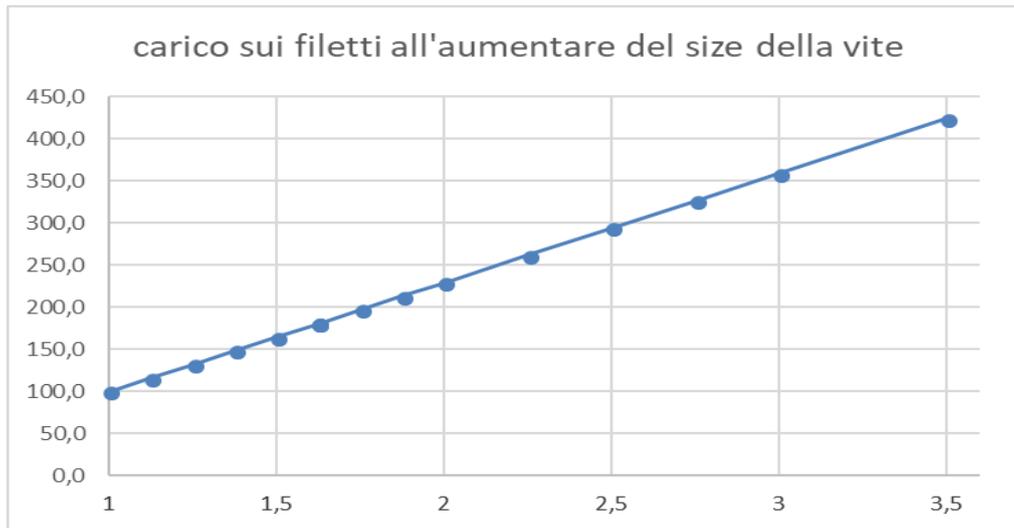


Figura 3

Proviamo a fare un'analisi di ciò che succede tra i filetti di vite e dado, dal precarico al raggiungimento delle condizioni operative di regime ed anche successivamente:

- del precarico applicato, il 70% si concentra sui primi 3 filetti, il 20% circa sul 4 e il 5 filetto e il restante 10% sugli altri filetti. Per quanto si tratti di grosse concentrazioni di carico su pochi filetti, a temperatura ambiente non si rilevano segnali indicativi di quanto potrà succedere nella fase di disserraggio;
- completate le operazioni di precarico, si incomincia ad avviare l'impianto e la temperatura della giunzione aumenta gradatamente (non stiamo considerando gli effetti della pressione);
- con l'aumentare della temperatura il giunto, le aste ed i dadi si dilatano e i carichi di snervamento del materiale dei dadi e delle aste si abbassano;
- laddove, nei componenti coinvolti dall'aumento della temperatura, le sollecitazioni diano origine a stati di tensione pari al valore dello snervamento a tale temperatura, si verificheranno delle deformazioni plastiche con la conseguente modifica della geometria iniziale. Tale situazione si raggiunge proprio nei primi filetti. Si noti che le modificazioni geometriche possono avvenire già nel percorso che porta alla temperatura di regime.

Si aggiunga che, raggiunte le condizioni di regime, il giunto può rimanervi per lungo tempo, anche più di cinque anni. Durante tale periodo, le elevate pressioni di contatto tra i filetti possono dare origine a dei legami sempre più forti che, unitamente a fenomeni di scorrimento, possono creare un unico blocco vite-dado.

Nel momento in cui si dovrà disserrare il giunto, sarà molto probabile osservare che il dado non ruoterà affatto; sono stati osservati casi in cui solo dopo due giorni di esercizio di un giunto a temperatura con bulloneria ASTM A 193 Gr.B16 / l'ASTM A 194 Gr.4, dovendo procedere al disserraggio, per motivi che esulano dalla presente trattazione, tutti i dadi si sono grippati. Ciò è indicativo della influenza veloce dell'effetto della temperatura sulle dinamiche che portano al grippaggio del dado sulla vite.

3. La proposta

Sulla base di quanto finora esposto appare evidente che una soluzione al problema è quella di:

- limitare il precarico da applicare alle aste filettate al valore minimo necessario per assicurare la tenuta alla pressione nelle condizioni di esercizio del giunto;
- distribuire su un maggior numero di filetti il carico trasmesso dalla vite in modo da minimizzare la pressione specifica e limitare la sollecitazione su di essi.

Un modo semplice ed immediato per limitare il precarico è impiegare washers (Fig.4) di materiale e geometria tali da permettere di applicare il carico più agevolmente e migliorarne il mantenimento nel tempo.



Figura 4

Secondo ASME PCC-1, “l’impiego delle washers è un optional. Tuttavia è provato che l’impiego di washers di materiale opportuno migliora la trasmissione del carico sulle aste preservando le superfici delle flange dalle azioni di frizione dei dadi in rotazione, riducendo i fenomeni di rilassamento dovuti agli effetti di incasso del dado sulla superficie delle flange” (Fig.5).



Figura 5

Un corretto dimensionamento delle washers produrrà un effetto positivo sul serraggio in quanto contribuirà a rendere trascurabili, o comunque minimi, gli effetti negativi, purtroppo inevitabili dei giochi tra aste filettate e fori delle flange, che comunque sono necessari per consentire il montaggio dei componenti essenziali del giunto: le aste filettate, i dadi esagonali, le flange del giunto e la guarnizione (il gioco tra asta e foro della flangia è normalmente di 1/8 di pollice, pari a 3,175 mm; il massimo off-set dell’asta rispetto al foro della flangia vale 1/16 di pollice, pari a 1,588 mm).

L’impiego di washers di dimensioni opportune, sempre compatibili con gli standard di progettazione delle flange secondo TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Association) e con gli standard delle flange maggiormente impiegati nelle attrezzature a pressione, ANSI

B16.5, ASME B16.47 etc. etc. comporta la riduzione della pressione specifica sulla superficie della flangia con un incremento medio del 70% della superficie di contatto. Si tratta di una riduzione di pressione significativa, che, oltre a preservare la flangia da frizione diretta del dado esagonale, limita l'effetto locale di incasso (impronta che aumenta nel tempo sotto carico). Inoltre il materiale delle washers ha caratteristiche di resistenza alla frizione molto superiori rispetto a quelle del materiale delle flange e ciò permetterà una regolarizzazione delle condizioni di attrito, favorendo la linearità della relazione "coppia di serraggio – carico sull'asta".

Durante i vari test eseguiti è stato osservato che, durante il serraggio, all'aumentare della pressione specifica tra i filetti di vite e madrevite e tra la faccia del dado e la flangia, o la washer, il coefficiente di attrito aumenta, come se all'aumentare dello sforzo diminuisse l'azione dell'anti seize.

Impiegando le washers si ha una drastica riduzione dell'usura tra dado e superficie su cui esso friziona e di conseguenza il serraggio della giunzione è più rapido, venendo a mancare la profondità di usura talvolta confrontabile con l'allungamento elastico dell'asta filettata.

Bolt size	Washer contact area	Nuts contact area	% increased area
1/2	322	182	77%
5/8	528	288	84%
3/4	679	416	63%
7/8	903	511	77%
1	1.229	679	81%
1 1/8	1.464	870	68%
1 1/4	1.785	1.006	78%
1 3/8	2.148	1.236	74%
1 1/2	2.533	1.489	70%
1 5/8	3.059	1.767	73%
1 3/4	3.424	2.067	66%
1 7/8	3.796	2.391	59%
2	4.435	2.738	62%
2 1/4	5.575	2.816	98%
2 1/2	6.846	3.597	90%
2 3/4	8.247	4.471	84%

Tabella 1

I valori in Tabella 1, riferiti all'area di contatto dei dadi sono solo teorici; in pratica a causa di una spesso scarsa fattura dei dadi che si manifesta con: presenza di uno smusso eccessivo, finitura e rugosità della faccia di contatto non idonea all'impiego (Fig.6), faccia di contatto non perpendicolare all'asse della madrevite, la reazione tra dado e flangia avviene con modalità peggiorative rispetto al teorico.



Figura 6

Per ovviare a quanto è utile migliorare la superficie di appoggio del dado lavorandolo alle macchine utensili al fine di eseguire una finitura superficiale più liscia ed uniforme e nel contempo per eliminare lo smusso presente al suo interno ed avere certezza dell'ortogonalità tra asse della filettatura e superficie di appoggio del dado (Fig.7).

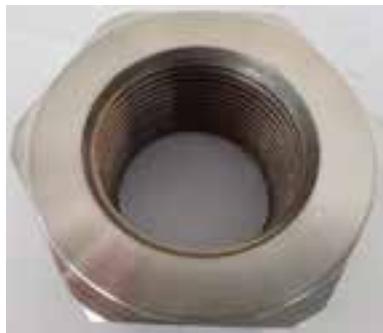


Figura 7

Riepilogando, l'utilizzo di dadi di buona fattura, o eventualmente resi tali, e l'impiego delle washers danno un sensibile contributo a limitare il fenomeno del grippaggio poiché permettono di applicare un carico di serraggio più basso (riduzione dell'effetto di incasso) e nel contempo un carico più regolare (regolarizzazione delle condizioni di attrito).

L'altra azione da intraprendere per evitare il grippaggio tra dado e tirante a parità di carico di trazione è quella di abbassare la pressione specifica che nasce tra i filetti di dado e tirante. Il modo più intuitivo per far questo è quello di ripartire il carico scambiato tra più filetti possibili ricercando modifiche e migliorie geometriche di dadi e/o washers e verificandone la combinazione migliore al fine di variare le reazioni vincolari e il conseguente stato tensionale.

La prima operazione da eseguire è quella di tornire la base di appoggio dei dadi garantendo, oltre ai benefici per il serraggio già citati derivanti dal miglioramento della finitura superficiale e della conseguente riduzione del coefficiente di attrito, anche una superficie perfettamente piana che permette di sollecitare uniformemente il dado con forze prettamente assiali che evitino l'insorgere di stati tensionali non controllati ed indesiderati.

Un'altra modifica che può essere adottata è quella di variare la geometria delle Washers costruendole con la superficie di contatto con la flangia perfettamente piana e la superficie di contatto con il dado con un profilo concavo inclinato di $1^\circ - 2^\circ$ gradi (Fig.8) L'intento è quello di generare per reazione dei momenti sul dado al fine di scaricare la base del dado e ripartire il carico di trazione, conseguente all'applicazione della coppia di serraggio, su un numero maggiore di filetti estendendolo quindi anche a quelli della zona superiore del dado, abbassando così la pressione specifica che nasce tra i filetti di asta e dado.



Sez. Washer Concava

Figura 8

Infine un'ulteriore miglioria si ottiene modificando la geometria dei dadi, asportando per tornitura i primi 3 filetti (circa 10 mm) della madre vite (Fig.9). Questa modifica viene fatta in modo che la inevitabile deformazione che nasce per la compressione del dado sulla superficie della flangia, o washers se presente, non va ad aumentare la pressione specifica tra i primi filetti conseguentemente all'applicazione del carico di serraggio.

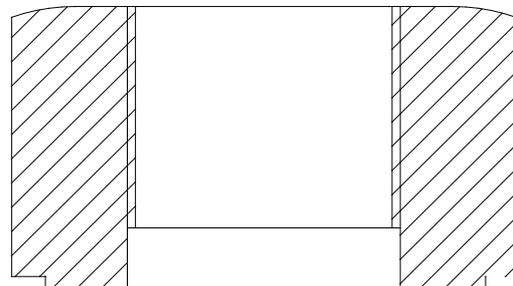


Figura 9

4. Applicazioni e Conclusioni

Per la verifica di quanto illustrato si è proceduto ad eseguire dei test di serraggio in laboratorio avvalendosi di un simulacro (Fig.10) per emulare un accoppiamento flangiato e utilizzando chiavi a controllo di coppia, strumenti di misura centesimali e anche un forno in modo da introdurre nelle prove eseguite anche il parametro temperatura che dalle esperienze operative fatte è risultato essere il fattore più critico per l'innescò del grippaggio tra filettatura del dado e tirante.



Figura 10

Per tutte le prove si è scelto di impiegare dadi con la superficie di appoggio lavorata alle macchine utensili in modo da evitare influenza nei risultati derivati dalla differente fattura degli stessi. La bulloneria impiegata è 2" 8UN, B16 per le aste e Gr.4 per i dadi.

Per la prima prova sono state impiegate Washers piane inserite tra dado e flangia, si è eseguita la corretta lubrificazione dei filetti e delle superfici soggette a strisciamento per rotazione e quindi si è proceduto al serraggio aumentando gradualmente la coppia applicata fino ad arrivare al valore di 5900 Nm; con tale valore di coppia, per le caratteristiche dei tiranti in prova e nell'ipotesi di coefficiente di attrito pari a 0,14, valore comunemente impiegato nella pratica corrente, teoricamente si origina sulla sezione di nocciolo del tirante la tensione di 345 N/mm².

Dal rilievo degli allungamenti dei tiranti sotto carico e sulla base della lunghezza efficace è stato calcolato che l'effettiva tensione trasferita ai tiranti è pari a 400 N/mm² corrispondente ad un incremento di circa il 16%; tale aumento è imputabile all'aver ipotizzato un coefficiente di attrito maggiore di quello effettivo e che in base ai valori ricavati può essere stimato essere pari a 0,12.

Si ha pertanto conferma di quanto ipotizzato e cioè con l'impiego delle washers si ha una sostanziale riduzione dell'attrito tra dado e superficie su cui esso friziona e conseguentemente minore usura delle superfici a contatto, così come si è potuto verificare dopo il disserraggio e a seguito dell'ispezione visiva delle stesse.

Sulla base delle osservazioni fatte si è eseguita un altro test impiegando bulloneria nuova e washers piane nuove, limitando il carico trasferito ai tiranti per mezzo di un incremento graduale della coppia e procedendo di volta in volta al rilievo degli allungamenti subiti dai tiranti, fino a raggiungere l'allungamento di 0,29 mm, che corrisponde ad una tensione effettiva di 300 N/mm². Per ottenere tale tensione è stato necessario applicare la coppia di 4300 Nm valore che dà ulteriore conferma del coefficiente di attrito di 0,12.

Eseguito il serraggio si è posto il simulacro in forno e lo si è mantenuto alla temperatura di 470°C per 48 ore; quindi, fatto raffreddare a temperatura ambiente, si è proceduto al disserraggio, durante il quale si sono verificati dei minimi impuntamenti tra dado e tirante. Da una attenta osservazione delle filettature si sono evidenziate delle piccole irregolarità nei primi filetti dei dadi sui quali si era applicata direttamente la coppia: tali zone di filettatura parzialmente alterata rappresentano i potenziali punti di innesco per il grippaggio, al quale si sarebbe con molta probabilità arrivati applicando un carico superiore o prolungando l'esposizione ad alta temperatura.

Con la stessa modalità di applicazione del carico, tensione di 300 N/mm², allungamento dei tiranti di 0,29 mm e stessa esposizione ad alta temperatura, si sono testate le washers concave con inclinazione di 2°. Trascorse 48 ore alla temperatura di 470°C e dopo il raffreddamento a temperatura ambiente si è proceduto al disserraggio che è avvenuto senza impuntamenti né grippaggi; dal controllo della filettatura di dadi e tiranti non è emerso alcun difetto e provando ad avvitare manualmente i dadi scorrevano liberamente sui tiranti. Si è ripetuta la prova con la medesima procedura ma montando washers piane e dadi con i primi 3 filetti scaricati. Anche in questa circostanza al disserraggio non si sono verificati problemi di grippaggio e la filettatura di tiranti e dadi è rimasta integra.

Una ultima prova è stata eseguita utilizzando tiranti e dadi già precedentemente impiegati ed adottando su un tirante washers coniche con dadi piani e sul secondo tirante washers coniche con dadi scaricati. La fase di serraggio è rimasta invariata e, applicando una coppia di 4300 Nm, si sono confermati gli allungamenti di circa 0,29 mm. Con questo test si è voluto evidenziare quanto può incidere una esposizione prolungata ad alta temperatura sui risultati ottenuti; pertanto il provino preparato e serrato come su descritto è stato tenuto in forno alla temperatura di 470°C per 10 giorni al termine dei quali, una volta raffreddato, è stato disserrato con modalità e risultati del tutto analoghi alle prove precedenti: coppia di distacco circa 6000 Nm, nessun difetto tra la filettatura e nessun principio di grippaggio, nessuna evidenza di segni di frizione ed usura sulla superficie delle washers.

I test condotti hanno dato evidenza pratica degli indubbi vantaggi che si hanno per il serraggio e la buona conservazione di bulloneria e flange grazie all'uso delle washers che,

oltre a preservare le superfici delle flange dalle azioni di frizione dei dadi in rotazione, offrendo una superficie di appoggio per il dado più ampia e uniforme, permettono di ridurre i fenomeni di rilassamento nel tempo dovuti agli effetti di incasso del dado sulla superficie delle flange; questo inoltre consente di limitare il carico necessario al serraggio e conseguentemente ridurre il rischio di grippaggio tra dado e tirante causato da una eccessiva pressione specifica tra i filetti.

Nei casi più severi in cui l'elevata temperatura gioca un ruolo determinante nel ridurre la tensione di snervamento della bulloneria, favorendo l'insorgere di deformazioni plastiche e fenomeni di scorrimento viscoso e causando il grippaggio del dado sul tirante, il solo impiego delle washers può non essere sufficiente a prevenire tale fenomeno.

I risultati ottenuti dalle prove eseguite hanno dato riscontro che l'impiego di washers realizzate con la superficie di appoggio concava riesce a modificare lo stato tensionale dei dadi distribuendo il carico su più filetti, riducendo così la pressione specifica tra i primi filetti ed evitando l'insorgere sotto carico di deformazioni permanenti causa del grippaggio in fase di disserraggio.

A risultati analoghi si è arrivati anche con l'impiego di dadi ai quali vengono rimossi i primi 3 filetti: in questo caso la logica adottata è quella di evitare l'influenza sui primi filetti in presa della deformazione di compressione che nasce alla base del dado.

Combinando le due soluzioni su descritte si migliora ulteriormente la distribuzione dei carichi sul dado aumentando considerevolmente la possibilità di evitare il fenomeno del grippaggio ad alta temperatura e il deterioramento della bulloneria, rendendola riutilizzabile per un successivo impiego.

5. Bibliografia

- [1] ASME PCC1 Guidelines for pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code" Section II Part.A
- [3] ASME B 16.5 Pipe flanges and flanged fittings
- [4] ASME B 16.47 Large Diameter Steel flanges
- [5] TEMA Tubular Exchanger Manufacturers Association

Il progetto PELM: una piattaforma SmartBench

O. Borgia¹, M. Guerrieri¹

¹ SAIPEX Srl

Sommario

Le attrezzature in pressione rappresentano un'importante fonte di rischio all'interno di un sito industriale. La gestione del rischio di tali apparecchiature, che hanno una significativa incidenza sulla *Business Continuity* aziendale, richiede una visione ed un approccio che guardi l'intero ciclo di vita dell'asset. D'altra parte i continui sviluppi normativi e le rinnovate esigenze di competitività delle aziende hanno creato un quadro legislativo particolarmente composito che accentua i requisiti di competenze specifiche e valorizzazione delle informazioni.

In questo contesto si vanno ad aggiungere gli importanti sviluppi in termini di digitalizzazione dei processi ed innovazione tecnologica, che negli ultimi anni con progetti quali *Internet of Things* (IoT) ed *Industry 4.0*, stanno trovando una diffusione ed applicazione sempre maggiore.

La stessa INAIL in collaborazione con alcune università italiane sta promuovendo e sviluppando un progetto europeo denominato *Smart Bench*, una piattaforma innovativa basata su tecnologia web, mobile e IoT per migliorare la sicurezza nei luoghi di lavoro.

La piattaforma **PELM** (Pressure Life Cycle Management) rappresenta una prima iniziativa in tal senso, che ha trovato reale applicazione nel contesto della gestione del rischio delle attrezzature in pressione.

Tale piattaforma presenta, oltre ai contenuti base dei comuni sistemi informativi (anagrafica, gestione documentale, scadenziario, ecc), importanti innovazioni in termini di geolocalizzazione ed identificazione delle attrezzature, implementazione di specifici strumenti di analisi dei rischi, ma soprattutto una reale integrazione con i *mobile device* più comuni.

Questo articolo si propone di illustrare, con un caso di studio reale, come l'adozione di piattaforme innovative, possa semplificare e facilitare tali attività, liberando risorse umane ed economiche a beneficio della competitività aziendale.

1. Le attrezzature in pressione come asset industriale strategico

Nella maggior parte dell'industria italiana, che può essere definita per lo più manifatturiera, l'attrezzatura e gli impianti in pressione sono spesso considerati alla stregua di un semplice macchinario o se non addirittura molto meno. Questo tipo di sensibilità è dovuta principalmente al fatto che tali attrezzature non trattano molto spesso il "prodotto" vero e proprio realizzato nell'industria ma sono a servizio delle macchine stesse che lo realizzano o dell'intero stabilimento produttivo. Proprio questa visione semplicemente "funzionale" ha relegato le attrezzature in pressione nel mondo delle attrezzature di servizio che spesso risultano essere quelle oggetto di minor attenzione.

Fanno eccezione a questo tipo di visione le industrie di tipo petrolchimico dove tali oggetti, rappresentano uno strumento di lavoro vero e proprio, che guarda caso tratta direttamente la materia prima per trasformarla nel prodotto finale.

Esistono invece numerosi settori industriali dove le attrezzature in pressione sono utilizzate in maniera intensiva e diffusa e pertanto rappresentano un vero e proprio *asset* industriale strategico e per tale andrebbero considerate e di conseguenza trattate. Ci riferiamo specificatamente alle industrie di tipo farmaceutico o alimentare oppure alle cartiere ma anche all'ambito sanitario, del packaging ed in alcuni casi anche nel settore

metalmecanico. Sul territorio nazionale esistono aziende nei settori appena citati al cui interno sono presenti centinaia di attrezzature in pressione per un grande valore economico, spesso trascurato, ma soprattutto con una incidenza sulla cosiddetta *Business Continuity* determinante.

Proprio in queste aziende ci si ricorda di queste “attrezzature di lavoro” solo in occasioni particolari come guasti, malfunzionamenti o verifiche di legge, destinandole quindi ad una gestione inefficace ma soprattutto inefficiente e classificandole come semplice centro di costo o poco più.

Cambiare visione di tali beni riconoscendo lo *status* di *asset* industriali strategici migliorerebbe tanti aspetti della loro gestione ma soprattutto proprio in questo momento in cui la congiuntura economica non è favorevole potrebbe essere uno strumento per recuperare competitività tramite obiettivi di efficacia tecnica ed efficienza economica nella loro gestione.

2. Le piattaforme Smart Bench

Il progetto di Ricerca SmartBench [14], promosso da Inail, all'interno della cornice più ampia del progetto *SAFETY 4.0* e da alcune Università Italiane si propone di:

- sfruttare ai fini della sicurezza le tecnologie che stanno rendendo possibile la nuova rivoluzione industriale che va sotto il nome di *Industry 4.0*;
- rendere centrale il tema della sicurezza nell'*Industry 4.0*;
- ripensare la sicurezza sfruttando tutte le potenzialità tecnologiche oggi disponibili;
- conseguentemente aumentare la sicurezza dei lavoratori ad un livello mai visto.

Lo sviluppo della piattaforma *SmartBench* potrà avere un'ampia ricaduta nel mondo produttivo per i vantaggi che può generare a partire dal miglioramento della awareness dei lavoratori con conseguente miglioramento dei loro comportamenti e quindi una significativa riduzione degli incidenti sul lavoro. La possibilità di inserire un sistema di monitoraggio nelle strategie di progettazione degli impianti industriali avrà considerevoli risvolti socio-economici tra i quali:

- aumento della sicurezza operativa e degli impianti e del servizio erogato grazie alla possibilità di rilevare in tempo reale l'insorgere di difetti, di stimarne la severità e l'effetto sulle condizioni operative;
- abbattimento dei costi operativi per i lavori di ispezione e manutenzione (il monitoraggio strutturale continuo consente di passare da una strategia di manutenzione programmata ad una di manutenzione *on condition*, riducendo le numerose attività di ispezione e controllo); estensione della vita utile degli impianti.

In questo progetto ci si propone di sviluppare una piattaforma innovativa (*SmartBench*) basata su tecnologia web, mobile e IoT per migliorare la sicurezza nei luoghi di lavoro.

SmartBench prevede:

- di integrare informazioni provenienti da dispositivi smart, montati direttamente sugli impianti e nei luoghi di lavoro, volti al monitoraggio di integrità dei componenti e delle strutture, allo stato di invecchiamento e alle condizioni operative ed alle informazioni su eventuali pericoli e/o risorse disponibili;
- di elaborare poi le informazioni acquisite al fine di evidenziare agli operatori situazioni di rischio e/o non adeguatezza con l'obiettivo ultimo di migliorare la consapevolezza del rischio in ogni attività lavorativa.

A tale scopo, *SmartBench* propone di sviluppare le verticalizzazioni tecnologiche necessarie per lo sviluppo dei singoli sistemi.

Il progetto *SmartBench* consentirà di esplorare nuovi temi nella gestione del rischio a due livelli distinti: la metodologia di integrazione e lo sviluppo dei singoli sistemi. La piattaforma consentirà di interfacciare, aggregare e interpretare informazioni disomogenee e di implementare le azioni necessarie in modo integrato.

3. La piattaforma PELM

Quanto appena descritto trova naturale espressione e testimonianza nella piattaforma **PELM**: *Pressure Equipment Lifecycle Management* che ha lo scopo di raccogliere, condividere ed archiviare le informazioni che si sviluppano durante il ciclo di vita di un'attrezzatura in pressione e di distribuirle ai diversi attori coinvolti nella loro gestione con i seguenti requisiti:

- affidabilità in termini di correttezza tecnica ed aggiornamento;
- disponibilità in termini di:
 - al momento giusto;
 - alla persona giusta;
 - con il giusto strumento.

La piattaforma **PELM** nasce del 2013, in totale indipendenza dal progetto *SmartBench*, ma la significativa vicinanza in termini di filosofia, obiettivi e strumenti operativi e tecnologici testimonia l'evidente esigenza di mercato.

E' singolare infatti che in due contesti totalmente diversi: uno di ricerca (quello di Inail con *SmartBench*) ed uno industriale (quello di SAIPEX con **PELM**) si sia sostanzialmente concepito uno strumento con struttura simile che risponde alle stesse esigenze.

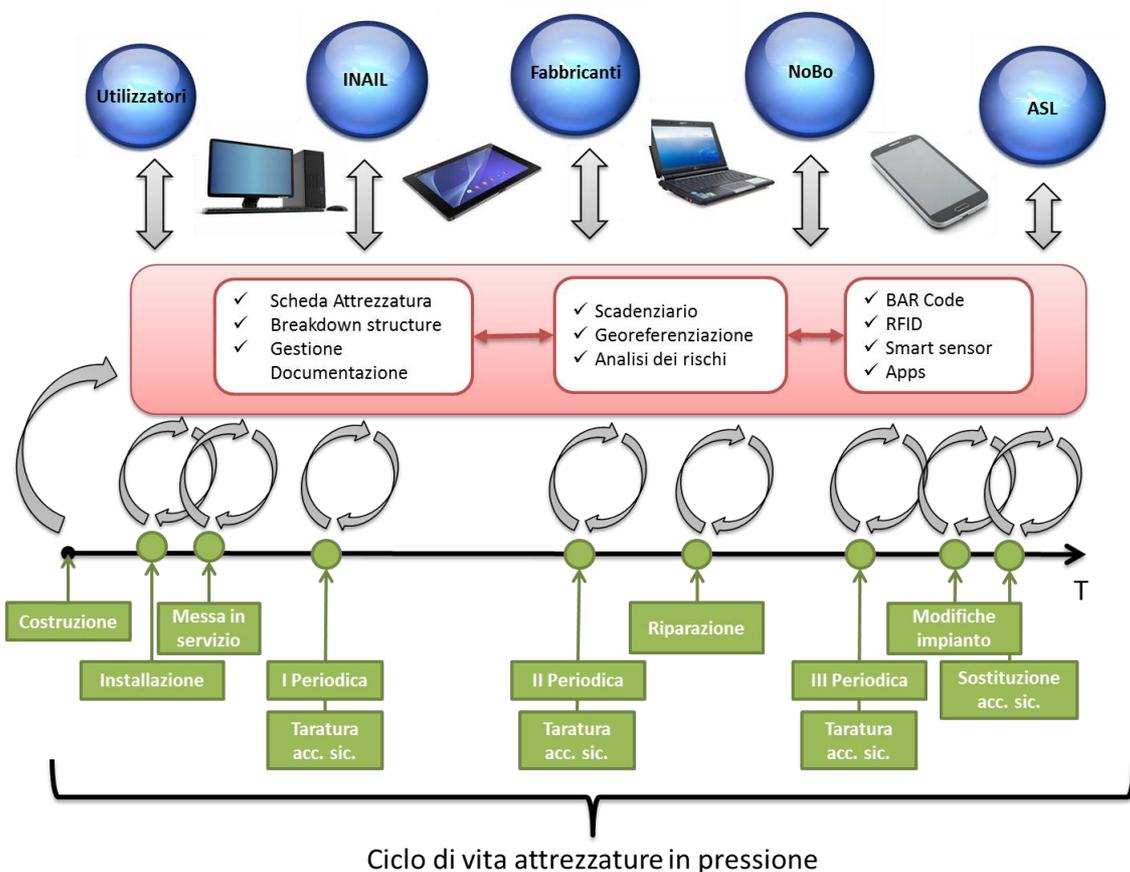


Figura 1. Flussi informativi e la piattaforma **PELM**.

La Figura 1 mette in evidenza come gli eventi che caratterizzano il ciclo di vita di un'attrezzatura in pressione siano dei "generatori" di informazioni e dati; ma nello stesso in cui generano dati, spesso per completare le azioni scaturite da un evento è necessario avere a disposizione altre informazioni che sono state generate in un momento diverso del ciclo di vita dell'attrezzatura [8]. Normalmente il "custode" di tutto ciò è l'utilizzatore delle attrezzature in pressione ma molto spesso alcune informazioni non sono nelle sue disponibilità o non è completamente cosciente di quali deve archiviare, come farlo e soprattutto quando renderle disponibili.

Per quanto sopra esposto la letteratura propone dei modelli di gestione delle informazioni con specifiche caratteristiche in termini di architettura e struttura definite come *service software platform* [9] [10] [12].

Proprio a questi modelli si ispira la piattaforma **PELM** che per facilità di utilizzo e di accesso è di tipo *web-based*. Questa prima caratteristica garantisce l'accessibilità da qualsiasi punto sia disponibile una connessione rete dati, utilizzando uno strumento informatico fornito di un semplice *browser*.

Profili di accesso con proprietà diversificate in funzione dell'attore ed aggiornamento in tempo reale sono altri vantaggi estremamente utili di questa scelta.

Strumenti di questo tipo inoltre hanno il vantaggio di non richiedere particolare formazione per il fruitore delle informazioni in quanto sono basate su visualizzazioni e modalità di utilizzo comuni a quelle delle classiche navigazioni web.

Per quanto riguarda la strutturazione dei dati e delle informazioni contenute all'interno della piattaforma ci siamo rivolti ad una architettura con scomposizione ad albero.

Questo tipo di approccio, su cui si basano tra l'altro anche i principali CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) presenti sul mercato ed illustrato in Figura 3, ha molteplici vantaggi tra i quali la facilità di ricerca delle informazioni che sono state archiviate con un criterio di scomposizione logica piuttosto intuitivo. Inoltre questo approccio ha il vantaggio di sposarsi molto bene con le principali metodologie di analisi del rischio e pertanto è una modalità di rappresentazione propedeutica a diverse fasi di vita dell'apparecchio.

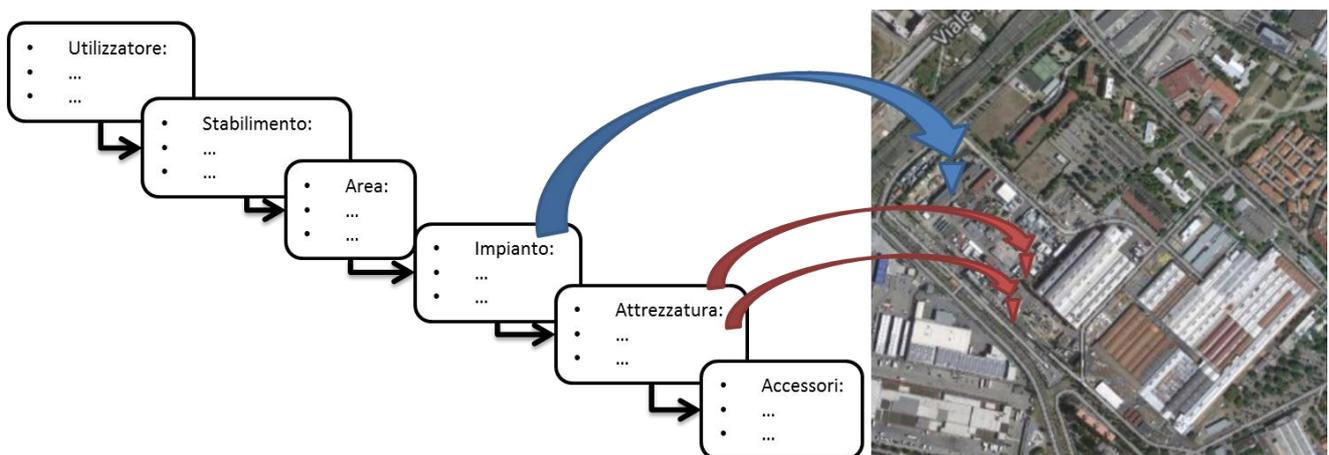


Figura 2. Scomposizione ad albero della struttura dati georeferenziata

La scomposizione ad albero è strutturata attualmente su n°6 livelli. I primi cinque livelli rispecchiano il percorso tipico dei principali sistemi informativi di manutenzione e tale scelta è nata anche da una logica integrativa per eventuali opportunità di mercato.

Il sesto livello invece è una caratteristica specifica della piattaforma e si pone l'obiettivo di mappare tutti quegli accessori di sicurezza, regolazione o controllo (valvole di sicurezza, dischi di rottura, pressostati, termostati, ecc) la cui gestione di scadenze, sostituzioni, riparazioni o tarature è necessaria o utile ai fini dell'apparecchiature su cui sono installati.

La piattaforma **PELM** associa inoltre a questo tipo di struttura delle informazioni anche il concetto di georeferenziazione delle attrezzature e degli impianti, che risulta essere molto comodo nel caso sia presente la necessità di procedere con ricerche in base al posizionamento delle attrezzature o per sviluppare mappature del rischio in funzione della concentrazione e delle tipologie di attrezzature in pressione presenti in determinate aree degli stabilimenti.

Per quanto riguarda la gestione della documentazione associabile ad un'attrezzatura in pressione la piattaforma propone tutte le proprietà dei più diffusi *Document Management System* garantendo l'accessibilità selettiva in funzione del profilo di utenza e la disponibilità alla consultazione, modifica e caricamento in tempo reale di qualsiasi documento presente nei principali formati *software* presenti sul mercato.

Stesso discorso per lo scadenziario, che permette di gestire gli appuntamenti legislativi delle attrezzature ed accessori con tutto il preavviso e la pianificazione necessaria, preallertando e coinvolgendo solo chi veramente necessario.

Mentre per gli accessori associati è possibile gestirne le principali tipologie di intervento quali taratura e sostituzione.

La piattaforma è poi orientata anche all'analisi dei rischi collegata alle attrezzature in pressione. E' possibile sviluppare per ciascuna attrezzatura un'analisi dei rischi dedicata con metodologie dedicate del settore di tipo qualitativo basate sui criteri di *Risk Based Inspection*, al fine di supportare gli utenti nella gestione del rischio [16].

Tale metodologia, ispirata soprattutto all'approccio europeo, che ha trovato spazio prima nel progetto RIMAP (*Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures*) e poi nella norma UNI EN 16991:2018, pur non entrando nel dettaglio dei meccanismi di danneggiamento è un valido strumento per una prima valutazione del livello di rischio associato all'attrezzatura in pressione.

In particolare associando tale approccio alla georeferenziazione è possibile implementare delle vere e proprie mappature delle aree di rischio per lo studio delle opportune misure di mitigazione ed eliminazione dei rischi, avendo uno sguardo globale al proprio sito produttivo. Inoltre un'ulteriore opportunità è quella di poter sviluppare piani di manutenzione ed ispezione delle attrezzature in funzione del loro effettivo stato di conservazione.

Sempre nell'ottica della valutazione del rischio e della *compliance* normativa la piattaforma è stata arricchita con un modulo dedicato per determinazione della vita residua per una particolare tipologia di attrezzature in pressione: le tubazioni e linee presenti in impianto.

Tale sviluppo, estremamente specifico e di dettaglio, è nato dall'esigenza di alcuni progetti eseguiti nell'ambito dell'esecuzione della verifica periodica di integrità per parchi tubazioni di medio-grandi utilizzatori.

Inoltre la piattaforma è stata dotata di alcuni moduli di calcolo automatizzati che permettono di:

- valutare la categoria di rischio PED e la periodicità delle verifiche di esercizio in maniera automatica inserendo i principali dati di specifica di un'attrezzatura;
- determinare la categoria SIL della catena di sicurezza associata ad un accessorio di sicurezza andando a definire la struttura della catena ed i componenti di cui è composta.

Per quanto concerne invece l'identificazione locale delle singole attrezzature in impianto al momento è stata adottata la tecnologia del QRCode. Quest'ultimo viene applicato direttamente sulla targa dati dell'attrezzatura o dell'accessorio, in una posizione di facile accesso, che permette con qualsiasi dispositivo mobile di avere accesso immediato ai dati ed all'informazione dell'attrezzatura sotto analisi.

Quanto sopra esposto, grazie alle moderne tecnologie, è disponibile su tutte le tipologie di supporto informatico: dalla postazione fissa ai più avanzati dispositivi mobili, questo al fine di garantire la piena e completa fruibilità delle informazioni al momento giusto ed alla persona giusta. Infatti, la recente diffusione ed utilizzo, anche in ambito industriale, di dispositivi mobili informatici permette di massimizzare l'efficienza di tale strumento che potrebbe essere così disponibile sia per le attività di tipo amministrativo in ufficio, ma anche come supporto per gli operatori tecnici direttamente in campo.

4. Casi di studio

L'approccio presentato in questo articolo e la piattaforma **PELM** sono stati oggetto di implementazione in diversi casi di studio, alcuni dei quali ben articolati per numerosità delle attrezzature in pressione presenti e per la complessità della loro gestione.

La piattaforma ed i relativi servizi associati hanno trovato applicazione in diversi ambiti tra cui:

- industrie metalmeccaniche;
- industrie alimentari;
- settore sanitario ed ospedaliero;
- settore gas tecnici.

In tutte le applicazioni i principali vantaggi riscontrati da parte degli utilizzatori sono stati i seguenti:

- raggiungimento della *full compliance* normativa in un lasso di tempo massimo di n°24 mesi. Questo in funzione del tasso di compliance iniziale che mediamente si aggira sul 28% delle attrezzature ma che purtroppo non è mai andato oltre il 50%;
- notevole sgravio da parte degli operatori precedentemente dedicati alla funzione di gestione delle attrezzature in pressione. In tutti i casi infatti, nonostante la numerosità delle apparecchiature e le attività necessarie lo richiedessero, nessun utilizzatore aveva nel suo organico almeno una risorsa dedicata. Piuttosto al responsabile manutenzione meccanica o sicurezza era richiesto di occuparsi di queste attività. Con l'utilizzo della piattaforma e dei servizi associati, l'utilizzatore ha potuto recuperare il tempo dedicato dal proprio operativo dedicandolo al *core business* aziendale.

In seconda battuta, volendoli definire vantaggi secondari o indiretti, è stato possibile riscontrare:

- completezza e disponibilità della documentazione associate alle attività;
- diminuzione dei tempi associati all'esecuzione delle singole attività. Questo grazie ai tecnici con competenze specifiche, i rapporti con gli enti preposti alle verifiche e la disponibilità dei documenti;
- riduzione degli errori nel processo di acquisto di beni e servizi relativi a queste attività, grazie alla supervisione dei tecnici dedicati (acquisto e realizzazione nuove attrezzature ed impianti, taratura accessori, ecc).

I risultati, appena descritti, sono stati ottenuti associando l'utilizzo della piattaforma ad un servizio di gestione ingegneristica delle attività tramite un progetto dedicato che si è generalmente sviluppato con le seguenti fasi:

1. raccolta dati ed informazioni per la completa definizione dell'anagrafica del parco attrezzature ed impianti presi in carico;
2. analisi della situazione attuale ed individuazione dei gap per il raggiungimento della completa compliance legislativa (mappatura delle installazioni);
3. predisposizione di un piano dettagliato delle attività in funzione delle principali criticità riscontrate e delle scadenze legislative;

4. gestione delle attività routinarie:
 - messe in servizio;
 - verifiche periodiche;
 - modifiche/riparazioni;
 - attività straordinarie/revamping;
 - messe fuori servizio.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Il principale risultato dell'adozione di questo tipo di strumento è rappresentato dalla possibilità di poter gestire e condividere informazioni utili, dati, documenti, ecc. lungo l'intero ciclo di vita di un'attrezzatura in pressione, creando così un database che integra e rende disponibili tutto ciò che è necessario.

E' evidente come i risultati illustrati nel caso di studio siano dovuti anche all'esternalizzazione del servizio che permette di coinvolgere tecnici dedicati e con competenze specifiche.

Per quanto riguarda il panorama di applicazioni similari già in commercio, il mercato propone numerosi sistemi informativi dotati di enorme potenzialità e flessibilità (MAXIMO, SAP, ecc). Nessuno di questi sistemi però è stato sviluppato nell'ottica specifica della gestione delle attrezzature in pressione per cui è necessaria una rilevante fase di implementazione. Inoltre, la loro adozione, oltre ad essere onerosa da un punto di vista economico, risulta spesso essere anche impegnativa dal punto di vista dell'organizzazione aziendale.

Un altro punto debole dei *database* commerciali è quello di non prevedere la possibilità di implementare qualsiasi tipo di analisi e valutazione del rischio. Quest'ultimo limite risulta particolarmente impattante sulla conseguente possibilità di sviluppare piani di manutenzione e gestione delle attrezzature in funzione del loro effettivo stato di efficienza e conservazione.

Lo sviluppo specifico per il settore degli impianti e delle attrezzature in pressione rappresenta quindi un punto di forza della piattaforma **PELM**, nonostante ciò è necessario valutare con attenzione l'opportunità di integrazione ed interazione tra essa ed i principali CMMS presenti sul mercato.

Per quanto riguarda i futuri ambiti di sviluppo che ci si propone di indagare, da un punto di vista prima modellistico e poi operativo, possiamo citare quello di implementare l'utilizzo di RFID (*Radio-Frequency IDentification*) e *Smart Sensor* che interagiscano direttamente con la piattaforma.

I primi rappresenterebbero la naturale evoluzione dell'attuale sistema identificativo e garantirebbero la possibilità dell'auto-attivazione oltre ad essere in grado di trasferire tipologie di informazioni più strutturate ed una quantità di dati sensibilmente maggiore.

Gli *smart sensor*, invece, rappresentano l'ultima frontiera per l'acquisizione di informazioni dal campo, tipicamente misure di grandezze fisiche, in modalità wireless; che potrebbero essere associate direttamente alla relativa attrezzatura in pressione, permettendo di tenerne sotto controllo per esempio lo stato di conservazione ed efficienza [15].

Gli sviluppi appena descritti permetterebbero di automatizzare alcune fasi del processo di trasferimento dei dati ed informazioni oltre ad ampliare la tipologia di dati contenuti nel *database* della piattaforma.

Ulteriori sviluppi della piattaforma, già pianificati nel breve termine, sono quelli che la vedranno estesa per la gestione delle attrezzature di sollevamento e gli impianti di riscaldamento. Tale scelta nasce dalle esigenze manifestate dai clienti che, a valle dei risultati raggiunti in termini di compliance sulle attrezzature in pressione, vorrebbero poter usufruire dei medesimi benefici per altre tipologie di attrezzature di lavoro.

Invece, nell'ambito degli accessori associabili ad un'attrezzatura, si sta procedendo con l'implementazione di un modulo dedicato alla gestione degli accoppiamenti flangiati, che essendo spesso una fonte primaria di pericolo per il rischio perdite, rappresentano un componente molto critico. In questo caso, oltre alle informazioni e dati tecnici, sarà possibile calcolare la coppia di serraggio maggiormente idonea all'applicazione ed ai materiali utilizzati; oltre a poter gestire a livello di pianificazione e registrazione i principali interventi ispettivi e manutentivi su questa tipologia di componenti (allineamenti, parallelismo, continuità elettrica, verifica serraggio, verifica tenuta, ecc).

Infine per una completa fruibilità della piattaforma in ambito dispositivi mobili, si sta valutando l'opportunità di sviluppare una specifica applicazione per *smartphone* che permetta di garantire la disponibilità delle informazioni in tutte le condizioni di campo.

5. Bibliografia

- [1] d.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo coordinato con il d.lgs. 3 agosto 2009, n. 106) - Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
- [2] D.M. 1 Dicembre 2004, n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [3] D.M. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
- [4] Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 – In attuazione della Direttiva Europea 97/23/CE in materia di attrezzature in pressione come modificato dal d.lgs. n°26 del 15/02/2016.
- [5] Ahuja M.K. & Carley K.M. 1999, Network Structure in Virtual Organizations, Organization Science, Vol. 10, No. 6.
- [6] Gulati R., Nohria N. & Zaheer A. 2000, Strategic networks, Strategic Management Journal, 21, pp. 203-215.
- [7] Bangemann, T., Rebeufet, X., Reboul, D., Schulze, A., Szymanski, J., Thomesse, J.P., Thron, M., and Zerhouni, N. (2006). PROTEUS – Creating distributed maintenance systems through an integration platform. Computers in Industry, vol. 57, pp. 539-551.
- [8] Kiritsis, D. (2004). Ubiquitous product lifecycle management using product embedded information devices. Proceedings of International Conference on Intelligent Maintenance Systems (IMS 2004).
- [9] Camarinha-Matos, L. and Afsarmanesh, H. (2004). Collaborative networked organizations: a research agenda for emerging business models. Springer-Verlag, London Berlin Heidelberg.
- [10] Camarinha-Matos, L. and Afsarmanesh, H. (2007). Comprehensive modeling framework for collaborative networked organizations. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 18 (5), pp. 529-542.
- [11] Tucci, M., Rapaccini, M., De Carlo, F., Borgia, O. (2008). New Maintenance Opportunities in Legacy Plants. 9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems Szczecin, Poland, 9-10.10.2008.
- [12] Rapaccini, M., Visintin, F., Borgia, O., and De Carlo, F., (2008). Providing industrial maintenance services through a virtual enterprise network: the e-Meccanica project. Proceeding of APMS2008, International Conference on Innovation in Networks, 14-17 September Espoo, Finland.

- [13] UNI EN 16991:2018 - Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio.
- [14] Biancolini M & al. SmartBench: quando la sicurezza negli stabilimenti industriali diventa Smart. *Analisi e Calcolo*. N. 86. Maggio/Giugno 2018.
- [15] Testoni N., Aguzzi C., Arditi V., Zonzini F., De Marchi L., Marzani A., Salmon Cinotti T. (2018). A sensor network with embedded data processing and data-to-cloud capabilities for vibration based real-time SHM (in press *Journal of Sensors* May 2018).
- [16] Vianello C., Milazzo M.F., Guerrini L., Mura A., Maschio G. (2016). A risk-based tool to support the inspection management in chemical plants. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, vol. 41, p. 154-168, ISSN: 0950-4230.

Vantaggi di una corretta manutenzione dei generatori di vapore

F. Taurasi¹, G. Vaccaro²

¹ Inail - Uot di Campobasso

² Inail - Uot di Potenza

Sommario

Per i generatori di vapore, oltre alle verifiche di legge eseguite ai sensi dell'art. 71, comma 11 del d.lgs. 81/2008 e s.m.i. e al relativo allegato VII, una adeguata manutenzione ne prolunga la vita utile, consentendo, nel contempo, minori consumi e migliori prestazioni oltre che a ridurre drasticamente i guasti ed i conseguenti fermi impianto. In questo lavoro vengono illustrati esempi di buone pratiche di manutenzione, conservazione nei periodi di fermata, conservazione a secco e a umido oltre che casistiche dovute ad una errata gestione dei generatori di vapore. Saranno analizzati i principali meccanismi di danno, le cause di degrado, l'importanza di un efficiente trattamento dell'acqua. Una maggiore comprensione di questi fattori e il loro impatto porterà a identificare strumenti più efficaci, mettendo in atto opportune azioni di intervento e mitigazione. Manutenzioni «opportunamente dosate» sono uno strumento per una corretta gestione dei generatori di vapore.

1. Introduzione

La manutenzione, nel suo significato più esteso, avviene in vari momenti.

Il primo momento si ha già nelle fasi di progettazione, costruzione e di installazione dell'impianto, avendo ben presenti le condizioni ambientali, continua nella fase di realizzazione e può proseguire durante la sua vita di servizio con interventi programmati di ispezione e manutenzione. Le attrezzature a pressione tra cui anche quelle a focolare (es: generatori di vapore e di acqua surriscaldata) devono essere progettate, costruite, controllate, equipaggiate ed installate in sicurezza, prevenendo anche i pericoli derivanti da usi impropri, in particolare bisogna:

- 1) Eliminare o ridurre i rischi alla fonte (sicurezza intrinseca);
- 2) Se non è possibile eliminare i rischi applicare misure di protezione;
- 3) Se sull'apparecchio pensato sicuro e protetto con protezioni permane un rischio residuo informare e formare se necessario gli utenti dei rischi residui.

Il secondo momento della manutenzione si ha prima della messa in funzione dell'impianto, mediante la normale revisione delle membrane e degli accessori. Queste operazioni sono indispensabili perché una mancata «messa a punto» può provocare danni anche di grande rilevanza.

Il terzo momento è dato dalla conduzione (questa è la parte che più interessa il conduttore), che comporta una serie di operazioni necessarie per il corretto funzionamento dell'impianto.

Più ampiamente si deve intendere per manutenzione tutti quei provvedimenti che evitano, allontanano, rendono meno frequenti le riduzioni di produzione o le fermate degli impianti o anche ne ripristinano, ne conservano, ne migliorano le originarie capacità produttive.

Si osserva che ogni tipo di intervento può essere classificato nei seguenti modi:

- manutenzione d'emergenza o accidentale;
- manutenzione preventiva programmata;
- manutenzione preventiva d'ispezione;
- manutenzione correttiva o migliorativa.

La prima spesso definita di pronto intervento costituisce, purtroppo, la forma di

manutenzione più diffusa altrimenti l'apparecchiatura non può continuare a funzionare. E' bene sin d'ora precisare che spesso molti episodi di manutenzione accidentale potrebbero essere evitati con una più tempestiva manutenzione preventiva, il cui costo è ovviamente minore perché è stata programmata in precedenza.

La manutenzione preventiva programmata comprende tutti quegli interventi a scadenze periodiche fisse, prestabiliti in relazione a norme di sicurezza o a particolari situazioni produttive, comprende pertanto tutti quei tipi di intervento effettuati prima che si verifichi il guasto.

La manutenzione preventiva programmata o quella preventiva di ispezione riducono i danni alle persone e alle cose, oltre che contenere i costi globali.

La manutenzione correttiva o migliorativa è un ulteriore tipo di intervento che, attraverso l'indagine critica sul progetto e sulla costituzione dell'impianto, tende ad apportarvi tutte quelle modifiche idonee a rendere meno frequenti le riduzioni di produzione o anche a ripristinare, conservare, migliorare le originarie capacità produttive dell'impianto stesso.

In alcune aziende, in particolare quelle piccole, la manutenzione è affidata al conduttore specie quella di emergenza. Pertanto è necessario che il conduttore sia qualificato anche per svolgere questi compiti, tenendo però ben presenti i suoi limiti e le sue effettive capacità di intervento.

Prima di iniziare qualsiasi tipo di intervento o accingersi allo smontaggio di pannelli o protezioni di qualsiasi macchina o apparecchiatura elettrica come nel caso di un generatore di vapore è necessario disconnetterlo dall'impianto elettrico e idraulico, inoltre è necessario provvedere a scaricare tutta l'acqua contenuta nel corpo caldaia.

Prima di qualsiasi operazione di smontaggio è necessario assicurarsi che la pressione dell'impianto sia nulla.

Nel caso l'impianto sia stato appena fermato è preferibile attendere il suo raffreddamento prima di eseguire la manutenzione piuttosto che dotarsi di protezioni personali per operare ad impianto caldo.

Altri fattori di rilevante importanza in capo al conduttore e relativi alla manutenzione riguardano i vari controlli da effettuare sul funzionamento del generatore di vapore, occorre infatti:

- verificare frequentemente che il livello dell'acqua nel generatore non scenda sotto al valore minimo indicato nella livelletta a vetro. Un eventuale abbassamento sotto il valore minimo deve provocare l'intervento dei due livellostati di sicurezza.
- verificare frequentemente che la pressione del vapore nel generatore si mantenga sotto il valore massimo riportato nella targa di assieme del generatore. Un eventuale innalzamento anomalo della pressione deve provocare, in un primo momento l'intervento del pressostato di sicurezza, quindi l'apertura delle valvole di sicurezza.

2. La corrosione elettrochimica

La corrosione elettrochimica rappresenta la più comune forma di aggressione dei metalli. Avviene quando la perdita di elettroni determina la formazione di ioni metallici che passano in soluzione determinando una continua asportazione di materiale ed i prodotti di corrosione a loro volta possono interagire con le sostanze presenti. Ogni metallo, posto in contatto con un solvente, ad esempio l'acqua, ha una certa tendenza a lasciare andare in soluzione i suoi atomi sotto forma di ioni. Qualsiasi fenomeno chimico o fisico in grado di sottrarre ioni Fe^{++} o elettroni, comporta uno scioglimento del ferro ovvero una corrosione. Per avere una sottrazione di elettroni basta che ci siano zone a differente potenziale atte a favorire il procedere della reazione di dissoluzione del ferro. Gli elettroni migrano nel circuito fino al catodo e, reagendo con gli idrogenioni, danno luogo allo sviluppo di idrogeno gassoso. Gli ioni ferrosi liberati all'anodo sono attratti dal gruppo OH^- sempre

presente nella soluzione e, combinandosi con esso, danno luogo alla formazione di un composto instabile che è l'idrossido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$, il quale precipita depositandosi nella zona anodica. La corrosione ha inizio perché nel metallo si crea un sistema che si comporta come un circuito elettrico, definito cella elettrochimica (Figura 1) che è costituita da: un anodo che cede elettroni al circuito di collegamento, forma ioni positivi che passano in soluzione e si corrode. Un catodo che riceve elettroni dall'anodo attraverso il circuito, gli elettroni si combinano con gli ioni al catodo depositandosi oppure generando prodotti di reazione. Molteplici sono le cause che possono creare una differenza di potenziale tra due punti di una struttura metallica immersa nell'acqua:

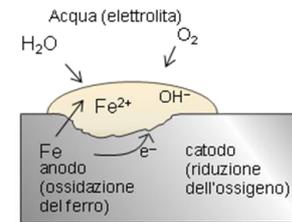


Fig. 1: Principio di corrosione da ossigeno

- presenza di due metalli diversi connessi tra loro (effetto pila);
- correnti vaganti di origine esterna;
- piccole disuniformità e impurezze in seno allo stesso metallo;
- differenze di temperatura e tensioni interne, che alterano l'equilibrio superficiale del metallo;
- concentrazioni differenti di sali e gas in seno all'acqua.

3. Trattamento dell'acqua

Il trattamento dell'acqua di alimento e dell'acqua di caldaia consente di misurare e migliorare le prestazioni del generatore. Nell'acqua che normalmente è disponibile per gli usi tecnologici, sono sempre presenti numerose sostanze sia disciolte che sotto forma di trascinamenti, sospensioni, sostanze colloidali, gas etc., che se utilizzate direttamente, senza trattamenti, possono avere effetti indesiderabili sulle apparecchiature. La qualità dell'acqua usata ha effetti molto profondi sull'efficienza e sul funzionamento in sicurezza della caldaia e del sistema di distribuzione. Il trattamento fisico-chimico cui deve essere sottoposta l'acqua di alimento dipende da un certo numero di fattori tra i quali:

- la durezza dell'acqua di reintegro e le impurità in essa contenute;
- la quantità delle condense ritornate in centrale per il riutilizzo e la sua qualità in termini di pH e di contenuto di sali disciolti;
- tipo di caldaia, conformazione e caratteristiche costruttive, e condizioni operative;
- uso a cui è destinato il vapore sull'impianto (industriale in apparecchiature di scambio termico, alimentare, sanitario, farmaceutico, ecc.).

La qualità dell'acqua di alimento sarà adeguata al tipo di caldaia servito ed ai suoi parametri di pressione e temperatura di generazione assicurando:

1. Assenza di depositi, incrostazioni, scaglie e fanghi;
2. Assenza di processi corrosivi.

L'acqua di caldaia viene opportunamente trattata con il preciso intento di:

1. evitare la formazione di depositi in tutti i circuiti dedicati all'acqua;
2. minimizzare le corrosioni in caldaia, nel sistema di distribuzione vapore ed in quello di ritorno condense;
3. minimizzare la produzione di schiume e trascinamenti dell'acqua di caldaia nel vapore assicurando la miglior qualità del vapore.

La durezza dell'acqua

Con il termine di durezza si indica la quantità di sali di calcio e magnesio, disciolti nell'acqua. L'unità di misura è il grado francese (°F) che corrisponde a $10 \text{ mg/l} = 10 \text{ ppm}$ di carbonato di calcio (CaCO_3) o d'altri sali incrostanti. I sali di calcio e magnesio in caldaia, per azione del calore, si trasformano in carbonati e ad una temperatura di 100°C circa

precipitano ed incrostano o formano fanghi. La durezza totale è quella dell'acqua grezza; la durezza permanente è quella che precipita ad una temperatura superiore ai 100°C; la durezza temporanea è la differenza tra la permanente e la totale, cioè i bicarbonati di calcio e magnesio per effetto del calore si trasformano nei rispettivi carbonati precipitando a 100°C circa. I sali di durezza temporanea sono: bicarbonato di calcio e di magnesio; quelli di durezza permanente sono: solfati e cloruri di calcio e magnesio. Tra i Sali incrostanti troviamo anche la silice la quale provoca incrostazioni e con il magnesio cementifica.

Salinità Totale dell'acqua

Si definisce come Salinità Totale dell'acqua o TDS (Total Dissolved Solids) la somma di tutti gli elementi che nell'acqua sono in soluzione od in sospensione comprendendovi tutti i sali classificati come:

- Sali di durezza, sottoclassificati in:
 - durezza temporanea, carbonati e bicarbonati di calcio e magnesio
 - durezza permanente, solfati e cloruri di calcio e magnesio e silice
- Sali non incrostanti o non titolabili come durezza: carbonati, bicarbonati, solfati, cloruri ed idrati di sodio nonché bicarbonato di ferro.

La Salinità Totale o TDS è un parametro molto importante per la conduzione della caldaia perché con l'evaporazione la concentrazione dei sali presenti in caldaia aumenta come funzione del processo evaporativo e del reintegro effettuato sulle acque di alimento: il livello di concentrazione deve essere attentamente mantenuto entro termini dettati sia dai parametri di generazione, pressione, temperatura, potenzialità, sia dalla conformazione e caratteristiche costruttive della caldaia utilizzata. Disattenzione ed errori di conduzione in questo campo ed insufficienza degli spurghi necessari e prescritti, portano a problemi seri quali l'incrostazione delle superfici di scambio termico della caldaia con il conseguente surriscaldamento e danneggiamento delle parti interessate. I sali di durezza sono di gran lunga i più temibili e dannosi per la caldaia e le acque, in base al loro contenuto, si definiscono acque "dure" o "dolci". Le acque dure contengono un eccesso di sali di durezza che hanno elevata tendenza a separarsi ed a precipitare formando incrostazioni dure ed isolanti alla trasmissione termica mentre nelle acque dolci questa categoria di sali ha una presenza minima o risulta inesistente.

Il valore del pH

La misura del pH ha un importante peso sia nei processi di depurazione che nella conduzione della caldaia. Il valore del pH ci da una immediata lettura del grado di acidità o di alcalinità della soluzione andando a determinare la presenza prevalente degli ioni di idrogeno libero [H⁺] in una data soluzione rispetto gli ossidrili (OH⁻) liberi. Piuttosto che esprimere la [H⁺] con numeri molto piccoli conviene descriverla in termini di pH, definito come il logaritmo decimale della concentrazione di ioni idrogeno cambiato di segno:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+] \quad \text{da cui} \quad [\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

Il pH è il cologaritmo (- logaritmo) della concentrazione molare degli ioni H⁺; $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$

Valore pH	Concentrazione ioni idrogeno H ⁺	Concentrazione ioni ossidrilici OH ⁻	Natura
0	100	10 ⁻¹⁴	Acida
7	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	Neutra
14	10 ⁻¹⁴	100	Alcalina
Temperatura di riferimento = 25°C $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$			

Fig. 2 - Scala dei valori di pH

Per pH elevati si hanno pochi idrogenioni. Se si aumenta di una unità il valore del pH, la concentrazione $[H^+]$ diminuisce 10 volte.

Le dissociazioni, degli acidi e delle basi, sono tutte in ambiente acquose ed hanno la caratteristica di variare la concentrazione degli ioni presenti nell'acqua, pertanto la misura dell'acidità o della basicità di una sostanza può essere determinata attraverso la variazione della concentrazione dello ione idronio $[H_3O^+]$ presente nella dissociazione dell'acqua stessa: $H_2O + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$; $[H_3O^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14} \text{ Moli}^2/\text{litri}^2 \rightarrow$
 $pH + pOH = 14$

La concentrazione di H_3O^+ determina caratteristiche importanti delle soluzioni acquose. L'acqua pura ha $pH = 7$, quindi $[H_3O^+] = 10^{-7}$

Nell'intervallo $pH = 0 \div 7$ si hanno "Ioni di Idrogeno" in proporzione inversa al numero indicativo e nel campo $pH = 7 \div 14$, zona alcalina, il numero degli "Ossidrilioni OH^- " sarà maggiore con l'aumento del numero indicativo, come riportato in figura 2.

L'anidride carbonica come tale (o trasformata in acido carbonico), l'idrogeno e l'ossigeno abbassano il pH dell'acqua.

L'alcalinità aumenta con la concentrazione degli Alcali in modo più o meno rilevante a seconda dell'acqua immessa in caldaia, quindi quella a forte durezza carbonatica (o temporanea), cioè la presenza di Calcio e di Magnesio, elementi alcalino-terrosi, e di Sodio e Potassio, alcali forti tali da ionizzarsi facilmente in soluzioni acquose, daranno un ambiente fortemente basico.

All'interno della caldaia il pH è ancora più importante perché i pH troppo bassi causano corrosioni generalizzate per aggressione acida, mentre quelli troppo alti causano corrosione nei punti di tensione del metallo (stress corrosion). Il pH in caldaia dovrebbe essere mantenuto in un intervallo tra 8,5 e 10,5 in funzione della pressione di lavoro, del tipo di caldaia, della natura dei sali presenti, dei condizionanti impiegati e della temperatura.

Valori di alcalinità più elevati devono essere assolutamente evitati per non incorrere nei pericolosi fenomeni di corrosione alcalina, denominato anche "fragilità caustica", che attacca profondamente ed in modo veloce i metalli in corrispondenza di punti soggetti a tensioni interne, che può causare rotture anche in tempi molto brevi o addirittura scoppi. Questo fenomeno di corrosione dell'acciaio che si può verificare nelle caldaie sottoposte ad elevate sollecitazioni meccaniche: $Fe + 2 OH^- \rightarrow FeO_2^{2-} + H_2 \rightarrow$ l'idrogeno migra nell'acciaio favorendo l'infragilimento. La gestione del pH dell'acqua di caldaia è uno dei punti fondamentali di una corretta conduzione e richiede un buon equilibrio tra il condizionamento chimico e la gestione degli spurghi.

4. Anomalie nei generatori di vapore

Per i generatori di vapore ed in generale per le apparecchiature soggette a riscaldamento, sono stati riscontrati le seguenti cause che possono dare origine ad anomalie:

- trattamenti dell'acqua di alimentazione e di caldaia;
- variazioni di combustibile;
- surriscaldamenti;
- dilatazioni termiche.

L'acqua di alimentazione e di caldaia negli impianti termici può dare origine a due tipi di inconvenienti: incrostazioni e corrosioni, è pertanto necessario eseguire con molta cura quando riportato nel manuale d'uso e dalle norme vigenti in materia. Il fenomeno della corrosione, imputabile ad un errato trattamento dell'acqua d'alimento, è causa spesso di formazione di cricche nelle saldature tra fasciame e piastra tubiera. Inoltre, contribuiscono alla formazione e propagazione di tali cricche i difetti originari del materiale.

I trattamenti dell'acqua dei generatori di vapore, sono necessari per evitare incrostazioni e corrosioni e si possono dividere in due grandi categorie: i trattamenti esterni effettuati con

impianti, ed i trattamenti interni effettuati con additivi chimici, tenendo sempre presente che un trattamento completo delle acque, prevede sia un trattamento esterno che uno interno. Il trattamento esterno di norma opera sui sali presenti per evitare fenomeni di incrostazione, mentre il trattamento interno opera sull'acqua o sul metallo dell'impianto per impedire fenomeni incrostativi e corrosivi. Per evitare le corrosioni i sistemi fondamentali sono due: l'uno prevede la correzione chimica o chimico-fisica dell'acqua, l'altro prevede l'impiego di sostanze che isolano il metallo dall'acqua rendendo impossibile l'innescarsi delle pile di corrosione. Le incrostazioni riducono il coefficiente di trasmissione del calore con conseguente diminuzione del rendimento termico ed aumento della temperatura dei tubi con conseguente surriscaldamento, la resistenza meccanica del ferro diminuisce, mentre la pellicola di magnetite si trasforma in ossido di ferro non assicurando più la protezione e favorendo pertanto la corrosione. Quando l'impianto di trattamento dell'acqua non funziona correttamente oltre al verificarsi di fenomeni di incrostazioni e corrosione si possono verificare anche fenomeni di fragilità caustica particolarmente pericolose perché possono essere causa di cedimenti improvvisi delle membrane. La presenza di durezza nell'impianto è indice di anomalie nella depurazione o inquinamenti nelle condense.

Manutenzione, analisi e controlli è necessario eseguirli regolarmente per verificare la regolarità di gestione delle attrezzature ed in particolare per i generatori di vapore e per le linee di vapore e di condensa. Consentono di controllare i valori dei parametri chimici che possono influenzare la conservazione dell'impianto, ad esempio, provocare corrosione ed incrostazioni con riduzione dello scambio termico e conseguente deterioramento delle caratteristiche meccaniche delle varie membrane. Fondamentale, durante le operazioni di manutenzione ordinaria è la pulizia del generatore, al fine di evitare fonti di surriscaldamento localizzato delle lamiere, dei tubi e dei giunti saldati a causa della formazione di depositi. In questi casi, infatti, sorgono tensioni interne dovute ad un eccessivo aumento locale della temperatura di parete la quale, per effetto di un ridotto scambio termico, può superare anche sensibilmente quella di progetto.

I surriscaldamenti oltre al pericolo di cricche nelle saldature di unione tra i tubi e piastre tubiere o nei tubi stessi, possono generare aumenti localizzati della temperatura di parete delle piastre tubiere.

Le dilatazioni termiche sono particolarmente pericolose per i generatori a tubi di fumo di grande potenzialità (quindi dotati di una grande superficie di riscaldamento e di notevoli dimensioni), in quanto le dilatazioni sono direttamente proporzionali alla lunghezza delle membrane. Le conseguenze meno gravi per la sicurezza, ma rilevanti dal punto di vista economico per l'utente, consistono nella perdita di tenuta con trafile d'acqua sulla mandrinatura dei tubi in corrispondenza del primo giro dei fumi.

La presenza di cricche passanti che interessano sia i lembi dei tubi che la piastra tubiera stessa è una delle anomalie più frequenti che si registrano durante le verifiche interne dei generatori di vapore. Le possibili cause che determinano la nascita delle differenti tipologie di cricche e fessurazioni sono numerose ma sono riconducibili, sostanzialmente, ai fenomeni della corrosione, fragilità caustica, e all'eccessivo surriscaldamento localizzato:

- l'elevato carico termico che si registra sulla piastra tubiera e sui tubi è da attribuire ad una singola o alla concomitanza di diverse cause quali la non corretta taratura del bruciatore, il cambiamento del combustibile utilizzato (esempio da olio combustibile a metano);
- al deterioramento della guarnizione di tenuta del portello del focolare;
- per i tubi sporgenti oltre la piastra, l'insufficiente raffreddamento per conduzione dell'acqua interna del generatore.

5. La manutenzione per una corretta gestione dei generatori di vapore

Programmando le operazioni di pulizia, controllo (ispezioni, prove e sostituzioni preventive di componenti), ripristino (sostituzione dei componenti o dell'unità avariata), ecc. si ottengono molti vantaggi e precisamente:

- Sotto il profilo economico, si contiene il costo di esercizio riducendo al minimo il consumo di combustibile per effetto dell'imbrattamento e dei depositi. Risparmi variabili da 0,50% e 3,50% sono realizzabili in relazione alle dimensioni, alle caratteristiche impiantistiche dei generatori, al tipo di combustibile, ecc., soprattutto se, per queste valutazioni, è possibile avvalersi di correlazioni sperimentali specifiche.
- Sotto il profilo operativo, si può immediatamente stabilire, in relazione alle scadenze dell'Ente di controllo, un piano di interventi predeterminati che con largo anticipo di tempo armonizzi le esigenze delle utenze con quelle della manutenzione (ore/uomo, eventuali imprese esterne e/o noleggio di attrezzature speciali, orari di lavoro, ecc.). Si possono poi definire compiutamente le risorse di manutenzione necessarie e le modalità di esecuzione degli interventi ripetitivi che diventano «standard operativi».
- Sotto il profilo tecnologico, si migliora la conservazione delle parti interne del generatore (preriscaldatore, economizzatore, ecc.), poiché gli interventi manutentivi conseguono non solo il «ripristino», ma esercitano contemporaneamente anche un effetto preservante dai fenomeni corrosivi che di fatto aumenta la vita utile dell'attrezzatura.
- Sotto il profilo ecologico, si mantiene agevolmente il tasso di ossidi di zolfo e degli altri elementi inquinanti presenti nei gas di scarico entro i limiti stabiliti dalle disposizioni di legge, praticamente la qualità della combustione e la tipologia delle emissioni è in relazione alla sicurezza ambientale.
- Sotto il profilo della sicurezza sul lavoro, si riducono sensibilmente sia le probabilità di guasto casuale che di guasto per usura, ottenendo così un aumento del grado di «prevenzione infortuni», in relazione alla sicurezza dagli incidenti, grazie ad ispezioni più frequenti e ad azioni di mantenimento preventivo più tempestive.

6. Periodi di fermata

Le corrosioni più gravi, per il generatore, hanno origine spesso durante i periodi di fermata. Le operazioni da compiere per garantire una corretta conservazione del generatore dipendono essenzialmente dalla durata della fermata, nonché dai motivi che la inducono. Quando il generatore deve rimanere fermo per lunghi periodi o deve subire operazioni di manutenzione che ne richiedono lo svuotamento, può essere fatta una conservazione a secco. Quando le fermate sono per brevi periodi o quando il generatore svolge funzione di riserva all'interno di un impianto complesso e deve poter entrare in funzione in breve tempo può essere fatta una conservazione a umido.

In entrambi i casi le operazioni descritte di seguito tendono a eliminare le cause di possibili corrosioni.

Conservazione a secco

È necessario vuotare e asciugare accuratamente il generatore, immettendo successivamente nel corpo cilindrico una sostanza igroscopica (ad esempio calce viva, gel di silice ecc.). Una precauzione assai opportuna è quella di riempire il generatore con gas inerte in leggera pressione (gas azoto). Dal lato fumi occorre effettuare un'accurata pulizia, eliminando i depositi contenenti composti dello zolfo; anche qui sarà necessario porre una sostanza igroscopica, da controllare ed eventualmente sostituire frequentemente.

Conservazione a umido

La conservazione a umido risulta più semplice ma richiede un controllo periodico durante il periodo di sosta.

La conservazione a umido infatti si esegue allagando completamente il generatore, le reti vapore e le reti condense e successivamente addizionando all'acqua prodotti conservanti di tipo poliamminico filmante o neutralizzante dell'ossigeno e alcalinizzante (in questo secondo caso è opportuno operare a caldo). L'impianto va successivamente sigillato effettuando solo piccoli prelievi nel corso della conservazione per verificare che la concentrazione dei prodotti protettivi sia ancora quella ottimale.

La prassi può essere ulteriormente semplificata utilizzando sovradosaggi di prodotti protettivi che rendono superfluo il controllo periodico.

Dal lato fumi è ancora indispensabile l'eliminazione dei depositi contenenti composti dello zolfo. Per evitare spiacevoli inconvenienti è buona norma effettuare periodicamente dei controlli per accertare che non si siano originate condizioni che possano provocare corrosioni. Occorrerà infine tenere presente la possibilità che l'acqua geli, durante il periodo invernale.

7. Conclusione

Funzione prioritaria del servizio di manutenzione non può essere solo quello di garantire la massima produttività ma diventa essenziale l'aspetto del mantenimento in piena efficienza dei generatori di vapore per limitare gli incidenti che possono derivare dal malfunzionamento o dai guasti. La qualità e la fornitura dell'acqua di alimentazione sono essenziali per la sicurezza, l'efficienza e la durata funzionale della caldaia. I fattori che influenzano il degrado dei materiali nei generatori di vapore sono vari, tra cui la chimica dell'acqua, la manutenzione, le caratteristiche dei materiali utilizzati e la modalità di utilizzo. Con una adeguata pianificazione di gestione, si possono assicurare enormi vantaggi in termini di:

1. eliminazione dei fenomeni di corrosione;
2. miglioramento dello scambio termico con risparmio energetico, le incrostazioni sulle pareti riducono la capacità di scambio termico in quanto sono un buon isolante e pertanto riducono il trasferimento termico dai fumi di combustione all'acqua;
3. miglioramento del ciclo di vita dell'apparecchiatura.

8. Bibliografia

- [1] Andreini Pierangelo, Pierini Fernando. La conduzione dei generatori di vapore. Hoepli.
- [2] Manuale d'uso e manutenzione generatore di vapore Sixen ICI Caldaie SpA
- [3] <https://www.cannonbonoenergia.com/>
- [4] N. Birbilis, R.G. Buchheit, Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science 39A, 2008.

Il processo di sicurezza comportamentale applicato alla sorveglianza dei generatori di vapore

F. Taurasi¹

¹ Inail - Uot di Campobasso

1. Sommario

Diversi studi sulla sicurezza indicano che molti incidenti sono dovuti ad un comportamento o ad una serie di comportamenti scorretti tenuti dai lavoratori, Nel presente lavoro viene esaminata l'applicabilità di uno strumento che tiene conto dei comportamenti (Behavior Analysis) ad una categoria di lavoratori preposti alla conduzione dei generatori di vapore. Come caldaia si definisce la struttura in pressione comprendente il focolare ove possono crearsi pericoli di surriscaldamento, mentre il generatore è "l'insieme" composto dalla caldaia e dagli organi di controllo e sicurezza, garantiti come unica macchina dal costruttore. Sebbene in commercio vi siano molteplici sistemi di regolazione basati su unità distinte per la regolazione dei singoli loop che caratterizzano il controllo, c'è tuttavia una carenza di un sistema unico integrato, in grado di gestire dinamicamente il processo di controllo di una caldaia.

Nell'analisi di un evento incidentale, è importante capirne le cause in modo da agire a monte dell'evento stesso al fine di evitarlo e, molte ricerche, hanno dimostrato che il comportamento insicuro è, in molti casi, la causa che dà origine all'evento indesiderato. Lo studio è stato condotto tramite la registrazione dei comportamenti di sicurezza e la definizione di una linea di base dei comportamenti.

1. Introduzione

Per Conduttore Patentato si definisce quella figura tecnica nata come "fuochista", con requisiti stabiliti in prima istanza dalla definizione del vecchio Regio Decreto 824 del 12.05.1927, evolvendosi poi dal d.m. 01.03.1974 e successive modifiche del 07.02.1979. Per ottenere il certificato di abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore bisogna effettuare un tirocinio pratico ed un esame presso un'apposita commissione di esperti incaricati dall'Ispettorato Nazionale Lavoro. Quest'ultimo ha una validità di 5 anni rinnovabile fino al compimento del sessantacinquesimo anno di età. La funzione del Conduttore spesso può risultare indispensabile per il ciclo di produzione industriale, sia come supporto per la sicurezza della centrale e delle aree connesse (reparto trattamento dell'acqua di alimento, sala compressori, sala controlli remoti, ecc.) sia per la gestione dei consumi energetici.

In ogni attività, nonostante si facciano sforzi per azzerare il livello di rischio, ne resta ostinatamente sempre un valore minimo, generato dai comportamenti non sicuri profondamente radicati negli operatori. Per questo sono necessarie attività per abbassare il livello di rischio, anche riferendosi alle Best Practice, note a livello internazionale e riferibili all'applicazione delle scienze del comportamento (e specificamente della Behavior Analysis).

Guardando a una varietà di aziende per un periodo di alcuni anni, si riscontra che nella stragrande maggioranza dei casi la causa effettiva dell'evento incidentale è l'interazione fra il lavoratore e le attrezzature di lavoro, interazione che possiamo definire "l'interfaccia di lavoro" oppure interfaccia uomo-macchina. Il miglioramento nella sicurezza consiste nel migliorare sistematicamente questa importante e critica interfaccia. È importante comprendere cosa costituisce un sistema efficace, continuare ad evolverlo conservando le caratteristiche e affrontando le debolezze percepite.

2. Gestione dei generatori di vapore

La gestione completa di un moderno generatore di vapore attraverso un unico sistema di controllo integrato è ormai l'esigenza di un mercato che cerca innovazione attraverso moderni sistemi elettronici, questo grazie allo sviluppo dell'elettronica nei processi industriali. Tali apparecchi non possono essere considerati come isolati dal resto dell'impianto ma vanno considerati integrati nella realtà industriale. Il vantaggio tecnico ed economico dei sistemi di gestione integrata, al momento mostra il suo maggior interesse prevalentemente per le apparecchiature di maggiore potenza, mentre per i piccoli generatori al momento l'impatto economico di tali sistemi risulta più sensibile e quindi ancora poco apprezzato. Gli alti livelli di automazione raggiunti ad oggi nei moderni generatori di vapore, ha portato la normativa a distinguere tra conduzione dell'apparecchio, nei casi di funzionamento non automatico, e sorveglianza, laddove invece lo stesso può funzionare in modo automatico.

La sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata può essere effettuata in due modi:

- ✓ Con assistenza continua, che può attuarsi:
 - con la presenza continua, in centrale termica, di persona addetta;
 - con la presenza continua, in sala controllo, di persona addetta che provvede alla sorveglianza del/dei generatore/i durante il loro funzionamento (la persona addetta può controllare più generatori, installati in un unico locale o in più locali anche non contigui) assicurando, in ogni caso, una presenza continua davanti al quadro di controllo e comando. Tutte le apparecchiature ausiliarie del generatore devono essere automatiche e le indicazioni dei dispositivi di controllo e la visualizzazione degli interventi di ciascun accessorio di sicurezza con azione di blocco devono essere riportate in tale locale.
- ✓ Senza assistenza continua, che può attuarsi:
 - senza assistenza continua fino ad un massimo di 24 h;
 - senza assistenza continua oltre le 24 h e fino ad un massimo di 72 h.

La sorveglianza si applica a tutti i generatori marcati CE come insiemi secondo PED, progettati, costruiti e sottoposti a valutazione di conformità per un esercizio senza assistenza continua di persona addetta. Il "manuale d'uso e manutenzione" deve esplicitamente indicare che il generatore è stato progettato ed accessorizzato per operare con questa modalità.

Tale modalità richiede comunque nella centrale termica la presenza di persona addetta:

- in fase di accensione oppure riaccensione del generatore;
- durante i sopralluoghi periodici per la verifica del funzionamento degli accessori.

La reperibilità della persona addetta, tra un sopralluogo ed il successivo, è subordinata alla valutazione dell'utilizzatore in funzione della necessità di esercizio dell'impianto che utilizza il vapore. Durante il funzionamento la persona addetta deve accertare entro un'ora da ogni accensione o riaccensione ed almeno una volta ogni periodicità di sorveglianza (ogni 24h, ogni 72h) le buone condizioni di esercizio del generatore e dei suoi accessori.

In caso di guasto dei dispositivi di regolazione e di controllo, il generatore può essere gestito in condizioni di sicurezza con sorveglianza continua manuale, se tale modalità è prevista nel manuale d'uso, fino a che il guasto non è stato riparato.

La UNI/TS 11325-3 definisce le modalità di sorveglianza delle attrezzature a pressione, a focolare con rischio di surriscaldamento, destinate alla produzione di vapore d'acqua e/o di acqua surriscaldata rientranti nel campo di applicazione del D.M. 329/2004.

Il 22 febbraio 2018 è stata rilasciata la UNI/TS 11325-3:2018 - Parte 3: Sorveglianza dei generatori di vapore e/o acqua surriscaldata, in sostituzione della precedente, risalente al 2010, e ascrivibile alla raccolta di specifiche tecniche a supporto dell'art. 3 del d.m. n.329/2004.

La specifica stabilisce le modalità di sorveglianza delle attrezzature a pressione a rischio di surriscaldamento e destinate alla generazione di vapore d'acqua e/o acqua surriscaldata a temperatura maggiore di 110° C, con pressione massima ammissibile maggiore di 0,5 bar, fornisce indicazioni necessarie alla conduzione dei generatori sia con assistenza continua di un operatore, sia senza assistenza continua, quindi in regime di esonero fuochista, fino ad un massimo di 72 ore.

La conduzione con assistenza continua di persona addetta comporta tra i vari adempimenti che vengono eseguiti almeno una volta al giorno, il controllo dell'efficienza dei livellostati di sicurezza, delle caratteristiche dell'acqua di alimento e di quelle dell'acqua di caldaia, lo spurgo degli indicatori di livello regolamentari, dei barilotti intermedi e/o dei contenitori. Inoltre, una volta alla settimana devono essere eseguite le verifiche sull'efficienza di pressostati e termostati di blocco.

La sorveglianza senza assistenza continua

Il punto 6 della UNI/TS 11325-3:2018 tratta casi e modalità della sorveglianza senza assistenza continua, che viene applicata ai generatori a funzionamento automatico dotati di adeguati sistemi di sicurezza per un esercizio senza assistenza continua di persona addetta. Il sistema accessorio, certificato CE da parte di Organismo Notificato in conformità alla Direttiva PED, consta di una serie di apparecchiature assemblate e collaudate. Nell'eventualità in cui dovesse verificarsi un guasto di tali dispositivi, il generatore dovrà prevedere la possibilità di essere gestito manualmente da una persona addetta fino alla completa riparazione del danno, o fino a quando non sarà trascorso un adeguato periodo di tempo per garantire, previo controllo del dispositivo, che il generatore e l'intero impianto funzionino correttamente.

Non rientrano nel campo di applicazione della seguente specifica i seguenti tipi di generatori:

- Generatori a sorgente termica diversa dal fuoco.
- Generatori ad attraversamento meccanico di limitata potenzialità aventi $PS \times V \leq 3000$ bar x litri e $PS \leq 12$ bar.
- Generatori di vapore a bassa pressione aventi $PS \leq 1$ bar, Superficie di riscaldamento ≤ 100 m² e Potenzialità ≤ 2 ton/h.
- Generatori di acqua surriscaldata a bassa pressione aventi $PS \leq 5$ bar, Temperatura massima dell'acqua ≤ 120 °C, Superficie di riscaldamento ≤ 100 m² e Potenzialità ≤ 2 ton/h, considerando convenzionalmente la potenza di 0,69 kW (600 kCal/h) di acqua surriscaldata equivalente alla producibilità di 1 kg/h di vapore d'acqua.
- Generatori aventi volume $V \leq 5$ l indipendentemente dal valore di PS.

3. L'interfaccia lavorativa

Diversi studi sulla sicurezza indicano che la stragrande maggioranza degli incidenti è dovuto ad un comportamento o ad una serie di comportamenti scorretti tenuti dai lavoratori e, in rari casi, a condizioni strutturali o tecniche. Ogni volta che trasgrediamo un'istruzione o una procedura senza subire danni perdiamo una parte della percezione del pericolo e siamo più inclini ad accettare condizioni di scarsa sicurezza. L'obiettivo, quindi, deve essere quello di riuscire a ottenere l'emissione dei comportamenti sicuri da parte dei lavoratori e non avere lavoratori perfettamente consci dei rischi a cui si espongono senza che questo si rifletta sul loro modo di agire. Al fine di ridurre il ripetersi degli eventi incidentali e dei near miss, oltre ad agire sulla sicurezza di macchine, ambienti di lavoro, è necessario realizzare interventi che tendano a neutralizzare o a ridurre al minimo il verificarsi di comportamenti caratterizzati da inosservanza di norme operative o regolamentari, o dal porre in essere comportamenti non conformi alle comuni pratiche di sicurezza.

Nel corso degli ultimi anni è stata sviluppata una metodologia per il miglioramento della sicurezza, integrando la scienza del comportamento e lo sviluppo dei principi dell'organizzazione e della qualità con la gestione della sicurezza per ridurre gli infortuni nell'industria. Nella costante ricerca di procedure sempre più sofisticate, alcune aziende hanno applicato il protocollo per la prevenzione degli infortuni sul lavoro tipico delle realtà anglosassoni, la BBS (Behavior-Based Safety), un sistema per correggere eventuali comportamenti non idonei che potrebbero provocare incidenti. L'obiettivo di tale sistema è la creazione di una cultura della sicurezza condivisa che mira ad azzerare il numero di infortuni e incidenti.

Lo studio e la modifica del comportamento umano, in relazione alle specifiche caratteristiche dell'ambiente lavorativo in cui il soggetto opera, permette di ridurre in maniera evidente il numero degli incidenti sui luoghi di lavoro. Essa si fonda sulla condivisione da parte dei lavoratori dei valori relativi alla sicurezza. Le modifiche dei comportamenti del lavoratore sono definite con l'obiettivo di ottenere una loro completa congruenza, di contenuto e di contesto, determinando una riduzione del numero e della gravità degli errori umani che possono portare al verificarsi di infortuni.

Il comportamento, non va considerato esclusivamente come modo di agire di un singolo, ma va ricondotto, in un'analisi approfondita, al contesto (ovvero all'insieme dei fattori organizzativi, procedurali, ergonomici, ...) in cui il comportamento si inserisce.

È importante comprendere cosa costituisce un sistema efficace, continuare ad evolvere conservando le caratteristiche e affrontando le debolezze percepite.

L'idea di base del processo di sicurezza comportamentale non è quello di attribuire "colpe" a carico dei lavoratori, limitando contestualmente le necessarie azioni sulla sicurezza di macchine e impianti. Oltre ad assumere un atteggiamento di non condanna per i lavoratori, integra e non sostituisce le necessarie attività previste dalla normativa in tema di salute e sicurezza dei luoghi di lavoro prevedendo inoltre uno specifico ruolo proattivo dei singoli lavoratori che sono gli attori principali del processo di sicurezza.

4. La prevenzione basata sui comportamenti

La BBS (Behavior-Based Safety) attraverso lo studio e la modifica del comportamento umano, in relazione alle specifiche caratteristiche dell'ambiente lavorativo in cui il soggetto opera, permette di ridurre in maniera evidente il numero degli incidenti sui luoghi di lavoro. Essa si fonda sulla condivisione da parte dei lavoratori dei valori relativi alla sicurezza. Le modifiche dei comportamenti del lavoratore sono definite con l'obiettivo di ottenere una loro completa congruenza, di contenuto e di contesto, determinando una riduzione del numero e della gravità degli errori umani che possono portare al verificarsi di infortuni. In sintesi, un intervento di BBS si basa sui seguenti momenti fondamentali:

1. identificazione, elencazione e classificazione di comportamenti critici - comportamenti che, se svolti in maniera insicura, possono determinare un infortunio;
2. rilevazione dei comportamenti sul posto di lavoro, con riferimento alla frequenza di tali atti;
3. identificazione del comportamento critico da affrontare, analisi delle sue cause in termini di antecedenti e conseguenze e definizione delle azioni correttive;
4. applicazione delle azioni correttive necessarie per migliorare il comportamento.

I quattro momenti si ripetono in maniera ciclica in modo da ottenere un miglioramento continuo del comportamento sul posto di lavoro. Il denominatore comune di queste quattro fasi è costituito da una intensa attività formativa, di consultazione e di partecipazione senza la quale non è possibile garantire il successo dell'iniziativa. Quindi, al fine di ridurre il ripetersi degli eventi incidentali e dei mancati infortuni (near miss), oltre ad agire sulla sicurezza di macchine e degli ambienti di lavoro, è necessario realizzare interventi che tendano a neutralizzare o a ridurre al minimo il verificarsi di comportamenti caratterizzati da inosservanza di norme operative o regolamentari, o dal porre in essere

comportamenti non conformi alle comuni pratiche di sicurezza. Questo è possibile attraverso l'adozione della BBS, tenuto conto che le sue metodiche applicative partono dal presupposto che, tutti i comportamenti sul lavoro, (mettere gli occhiali durante una operazione a rischio, utilizzare correttamente i guanti, indossare scarpe e indumenti idonei, ecc.) sono evocati da stimoli fisici immediatamente "antecedenti" responsabili dell'attivazione dei comportamenti (ad es.: cartelli ammonitori e/o segnali ottico/acustici o di allarme) e sono tuttavia modificati dagli stimoli immediatamente "conseguenti" all'attivazione del comportamento (ad es.: il richiamo verbale fatto dal preposto, ecc.). La triade formata da Antecedenti (Antecedents), Comportamento (Behaviour) e Conseguenze (Consequences) costituisce quindi il paradigma del condizionamento operante, o modello a tre contingenze, secondo il quale il comportamento umano (B) è evocato da stimoli antecedenti (A) e modificato da stimoli conseguenti (C) successivi al comportamento e da questo discendono tutte le tecniche di intervento.

Il modello A-B-C, o modello interazionista, Figura 1, opera una distinzione netta tra gli effetti degli antecedenti, che forniscono soltanto l'occasione di esibire i comportamenti, e l'effetto delle conseguenze, che sono le uniche responsabili del mantenimento in forza di quei comportamenti nel tempo.

Gli stimoli antecedenti sono stimoli esterni, eventi di varia natura, più o meno complessi in grado di evocare un comportamento, ad esempio, indossare i DPI rappresentati dalla segnaletica di sicurezza. Per comportamento s'intende: qualsiasi cosa che una persona dice o fa.

Gli stimoli conseguenti, per modificare la probabilità di emissione di un comportamento da parte di un soggetto, ci si può avvalere di quattro differenti tipologie di conseguenze. Il rinforzatore positivo ed il rinforzo negativo aumentano la frequenza di emissione del comportamento, mentre punizione e l'estinzione lo inibiscono. Il rinforzatore positivo è gratificante e produce un effetto piacevole su chi lo riceve (agisce da ricompensa) e permette di ottenere la migliore performance possibile, soprattutto se fornito immediatamente dopo l'azione, stimolando il soggetto a dare il meglio di sé. Il rinforzo negativo aumenta la probabilità di emissione di un determinato comportamento eliminando l'effetto negativo che si otterrebbe altrimenti, senza lasciare spazio a qualsiasi premio o ricompensa. L'estinzione, o punizione negativa, consiste nel togliere qualsiasi tipo di conseguenza (positiva o negativa) al comportamento emesso dal soggetto, riducendo così la probabilità di emissione del comportamento. La punizione positiva, o semplicemente punizione, consiste invece nel fornire una conseguenza spiacevole al comportamento, in modo da inibire il comportamento errato nel minor tempo possibile (es. rimprovero verbale per un comportamento sbagliato).

Attraverso una visione innovativa e sistemica della sicurezza, la BBS sposta l'attenzione verso la condivisione diffusa dei valori della sicurezza intesi come specifici comportamenti verbali tra lavoratori e verso l'attivazione di "comportamenti" di sicurezza misurati su parametri oggettivi come ampiezza e completezza delle azioni dei singoli. Per spiegare come agisce la BBS, occorre far riferimento al grafico di Figura 2.

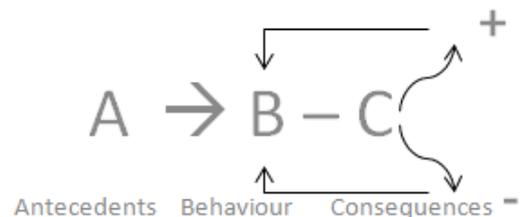


Figura 1. Schematizzazione del modello A-B-C



Figura 2. Piramide o triangolo della sicurezza

Per spiegare come agisce la BBS,

Lo schema indicato come piramide della sicurezza correla gli eventi mortali, gli infortuni (infortuni INAIL, eventi che comportano l'assenza dal lavoro), i mancati infortuni (o "near miss") e i comportamenti non sicuri o condizioni non sicure, indicandone i rapporti proporzionali. L'obiettivo di diminuzione degli infortuni mortali o che comportano assenza dal lavoro deve essere perseguito tenendo in considerazione l'importanza primaria di agire alla base della piramide della sicurezza, riducendo la probabilità che si verifichi l'incidente. La BBS infatti prevede l'utilizzo di feedback positivi, pianificati e forniti che diventano stimoli appropriati e mirati per incentivare determinate risposte comportamentali. La BBS costituisce lo strumento più efficace per la trasformazione delle conoscenze in valori condivisi, consente di discriminare con immediatezza i comportamenti corretti da quelli non corretti ed in forza del continuo processo di osservazione di attribuire immediatamente i conseguenti stimoli sociali a sostegno delle azioni svolte in sicurezza.

5. Conclusioni

Nell'ambito della salute e sicurezza sul luogo di lavoro, devono essere prese in considerazione tutte le componenti che fanno parte del "sistema" aziendale (ambienti, macchine, sostanze, ecc.), senza peraltro trascurare il fattore umano. Il vantaggio di cominciare con l'identificazione dei comportamenti critici è che essi rappresentano l'esposizione. E' l'interazione del lavoratore con la tecnologia a costituire l'esposizione all'infortunio. Ogni metodologia di miglioramento ha come obiettivo il miglioramento di come il lavoro viene svolto, la grande difficoltà della maggior parte delle iniziative di miglioramento è che non arrivano al livello comportamentale. Il fine e il senso del metodo, non è la punizione successiva alle osservazioni o auto-osservazioni dei comportamenti non sicuri, ma è la registrazione dei dati veritieri utili per l'effettuazione di un'analisi che permetta di descrivere il quadro della sicurezza aziendale e il conseguente miglioramento dei comportamenti di sicurezza. Quindi, al fine di ridurre il ripetersi degli eventi incidentali e dei mancati infortuni (near miss), oltre ad agire sulla sicurezza di macchine e degli ambienti di lavoro, è necessario realizzare interventi che tendano a neutralizzare o a ridurre al minimo il verificarsi di comportamenti caratterizzati da inosservanza di norme operative o regolamentari, o dal porre in essere comportamenti non conformi alle comuni pratiche di sicurezza. Sulla base dei dati raccolti e delle verifiche effettuate, si può quindi affermare che, in accordo con quanto riportato in letteratura, i dati relativi alle auto-osservazioni possono essere considerati veritieri e rispecchiano in modo effettivo il livello di comportamenti sicuri raggiunto nel processo di sicurezza comportamentale.

6. Bibliografia

- [1] Manuale tecnico generatori di vapore esonerati da sorveglianza continua fino a 72 ore - ICI Caldaie SpA Ed. 6-05/2017
- [2] Manuale tecnico sistema di comando e controllo generatori di vapore esonerati da sorveglianza continua - ICI Caldaie SpA Rev 1.1 8-11-17
- [3] De Leonardis, A., I limiti delle BBS - La sicurezza sul lavoro nelle organizzazioni. Rivista Ambiente e Lavoro, 2008. 7 (9): p. 11-16.
- [4] <https://www.cannonbonoenergia.com/>
- [5] Terry E. Mc Sween, Scienza & Sicurezza sul lavoro: Costruire comportamenti per ottenere risultati – Ed. italiana a cura di Fabio Tosolin, Adriano Bacchetta, A.A.R.B.A.
- [6] Tosolin, F., M. Gatti, and E. Algarotti, BBS - Behavior Based Safety: costruire comportamenti per ottenere risultati. Ambiente e Sicurezza - Il sole 24 ore, 2008.

Verifica quarantacinquennale su generatore di vapore installato presso lo stabilimento FCA di Verrone (Biella)

G. Calvano¹, S. Vacquer², L. Rossero³, C. Botta⁴, M. Ferro¹

¹ S.T.I.G.C. Srl

² Inail - Uot di Biella

³ Edison Fenice SpA

⁴ EDF (Fenice SpA Italy)

Sommario

Nel seguito si esporrà il caso reale di una verifica quarantacinquennale su un generatore di vapore industriale a tubi d'acqua, di particolare rilievo vista la rarità, la vetustà dell'apparecchiatura e le procedure applicative. L'intervento rientra tra quelli resi necessari per poter adempiere agli adeguamenti certificativi della direttiva PED (*Pressure Equipment Directive-2014/68/UE*) e ai piani di controllo attuativi previsti dal *d.m.329/04*, oltre che dalla circolare *ISPESL 60 del 1997* dove sono dettagliati i contenuti minimi dei controlli da svolgere sui generatori di vapore che abbiano superato il 45° anno di età.

Oggetto dell'intervento

L'attività svolta dai tecnici incaricati, al fine di verificarne lo stato di conservazione ed efficienza, ha riguardato una serie di controlli non distruttivi sul generatore di vapore prodotto da RUTHS e attualmente installato presso l'unità operativa *Edison Fenice* dello stabilimento *FCA* di Verrone (Biella). A valle di tali controlli il GV è stato poi posto a verifica quarantacinquennale da parte di Inail. L'attrezzatura oggetto dell'intervento e alcuni dati identificativi sono mostrati a seguire:

GENERATORE A TUBI D'ACQUA – RUTHS		
	Anno:	1973
	N.F.:	2530/8
	Corpo Principale:	6650 litri
	Surriscaldatore:	1850 litri
	Capacità totale:	8500 litri
	Matricola:	45425 GE
	PS (bar):	15,8
	TS (°C):	203
	Gruppo:	2
	Vds presenti totali:	3

Figura 1

1. Attività propedeutiche

- Redazione e approvazione da parte di Inail del piano dei controlli non distruttivi (CND) su generatore di vapore;
- Cronoprogramma e documentazioni necessaria allo svolgimento delle attività nelle aree dello stabilimento FCA di Verrone (Bi);

2. Esecuzione dell'esame visivo e dei controlli non distruttivi

- Indagine endoscopica - esame visivo - ultrasuoni - liquidi penetranti - durometrie - repliche metallografiche;

Complessivamente le attività sul campo effettuate ai fini della verifica quarantacinquennale sul generatore di vapore in questione, installato presso lo stabilimento FCA (Verrone), esente da scorrimento viscoso, si sono svolte in tre fasi:

I FASE: Controlli Spessimetrici - Controlli con liquidi penetranti - Indagine endoscopica;
II FASE: Prove durometriche - Repliche metallografiche - Analisi chimiche su campione;
III FASE: Prova idraulica a 17,55 bar;

Nel seguito si espone una breve sintesi delle procedure operative relative ai controlli effettuati.

— Indagine endoscopica

La video-ispezione o endoscopia è una tecnica di controllo visivo a distanza che sfrutta l'impiego di telecamere e fibre ottiche, utilizzata nel settore industriale, metalmeccanico ed edile per superfici inaccessibili; gli endoscopi a fibre ottiche non sono altro che piccole telecamere (in alcuni casi non raggiungono il diametro di cinque millimetri), rigide o flessibili che permettono di accedere anche all'interno di particolari geometricamente complessi. La video-ispezione ha consentito di controllare l'impianto del generatore di vapore e programmare la manutenzione dello stesso per assicurare programmi di pulizia e di mantenimento efficaci; l'ispezione è stata possibile grazie alla presenza di piccole cavità già presenti nella struttura della caldaia.

— Esame visivo

È il metodo di base dei CND e permette il controllo di semilavorati nelle fasi intermedie del ciclo di produzione o anche del prodotto, durante il collaudo finale o nelle verifiche periodiche previste dalla legge. L'indagine ha quindi lo scopo di individuare difetti superficiali, valutare se l'oggetto abbia o meno le caratteristiche richieste e verificarne l'idoneità ad eventuali modifiche, con esperienza e conoscenza dei materiali, delle lavorazioni industriali e dei difetti superficiali.

Nell'attività svolta sul generatore installato in FCA i nostri tecnici hanno quindi valutato, in ordine temporale:

- Tipologia di prodotto da sottoporre a prova, posizionamento, accessibilità e geometria;
- Estensione dell'area di prova;
- Condizioni della superficie;
- Illuminazione;

Risulta indispensabile chiarire che per questa tipologia d'esame la grande esperienza del personale addetto ai controlli (in possesso di certificazione UNI EN ISO 9712:2012, ex UNI EN 473) è stata essenziale, in quanto l'affidabilità del risultato dipende totalmente dalla conoscenza dei materiali in esame e dai parametri di accettabilità imposti dalla procedura di collaudo.



Figura 2. Operatore durante l'esame visivo del generatore RUTH e misura di un difetto superficiale riscontrato.

— Controlli spessimetrici mediante ultrasuoni

Per questo tipo di esame si sono utilizzati diversi modelli di spessimetro digitale ad ultrasuoni, certamente il miglior strumento per la misura di spessori quando sia accessibile una sola faccia del pezzo da misurare;

Il cuore dello strumento è la sonda, il piccolo oggetto che viene posto a contatto del pezzo da misurare. La parte attiva della sonda è il cristallo, una sottile lamina di materiale piezoelettrico alla quale viene applicato, tramite gli elettrodi metallici applicati su due facce parallele, un breve impulso elettrico detto segnale di eccitazione (ampiezza $100 \div 600$ V, durata: alcuni nanosecondi). Per effetto della tensione il cristallo si deforma e torna alla forma originale oscillando ad alta frequenza ($2 \div 4$ MHz). Le deformazioni si trasmettono nel pezzo attraverso il blocco di accoppiamento come onde elastiche di pari frequenza (ultrasuoni) e si propagano in linea retta nel materiale finché non incontrano la faccia opposta. Quando il fronte di onde elastiche raggiunge la faccia opposta del pezzo incontra un'interfaccia tra due materiali a diversa impedenza acustica e gran parte di esse viene riflessa. Le onde elastiche riflesse rientrano in parte nella sonda e provocano una serie di deformazioni del cristallo. L'effetto piezoelettrico è reversibile, pertanto le deformazioni generano una tensione elettrica sulle facce opposte del cristallo detto segnale di ritorno ($0,1 \div 0,5$ mV). All'interno dello strumento vero e proprio è posto (oltre al circuito di eccitazione e all'amplificatore del segnale di ritorno) un circuito per il conteggio del tempo intercorrente tra l'emissione della tensione di eccitazione e la ricezione del segnale di ritorno. Poiché la velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni materiale è nota e costante, è facile risalire dall'intervallo di tempo allo spessore del pezzo.



Figura 3. Operatore che esegue rilievi con uno strumento spessimetrico in camera di combustione e corpo cilindrico.

Il tecnico che ha eseguito questo tipo di rilievi ha, in primo luogo, provveduto ad una corretta calibrazione dello strumento che consentisse di evitare errori nella definizione della specifica velocità di propagazione del suono nei materiali di cui è composto il generatore di vapore (per i metalli può variare tra 1500-6000 m/sec). Ha poi verificato che vi fossero le possibilità di un appoggio perfetto della sonda sulla superficie; in alcuni casi si è provveduto alla pulizia di queste ultime, poichè molto rugosa o coperta di ossidi e in ogni caso si è interposto un velo di gel per ultrasuoni tra sonda e superficie di contatto. Va detto che le competenze e conoscenze dell'operatore consentono anche una stima di eventuali spessori delle vernici, che possono falsare le misure.

— Liquidi Penetranti

La tecnica di indagine usata per controllare le saldature longitudinali e circonferenziali del corpo cilindrico superiore e inferiore del generatore di vapore Ruths, ha previsto l'utilizzo di metodica PT (liquidi penetranti). L'ispezione con liquidi penetranti è un metodo particolarmente idoneo per evidenziare e localizzare discontinuità superficiali, quali cricche, porosità, ripiegature, in modo veloce e con grande accuratezza. Prima di procedere al vero e proprio controllo, si è proceduto all'apertura dei passi d'uomo e al posizionamento di un adeguato estrattore fumi sui corpi cilindrici.

La prova, eseguita in uno *spazio confinato*, si è svolta secondo una successione di fasi elencate nel seguito:

1. PULIZIA PRELIMINARE E PREPARAZIONE DELLA SUPERFICIE;
2. APPLICAZIONE DEL PENETRANTE: Il penetrante è stato applicato sulla superficie da ispezionare tramite spruzzatura. Tutte le superfici sono state completamente bagnate affinché il penetrante possa essere risucchiato nelle discontinuità per effetto capillare. Il tempo richiesto per un'ottima penetrazione è stato di 10-30min come consigliato da tabelle specifiche.



Figura 4. Particolari dell'esame PT sulle saldature longitudinali e circonferenziali del c.c. inferiore del generatore di vapore RUTH

3. RIMOZIONE DEL PENETRANTE IN ECCESSO: Il penetrante utilizzato nell'indagine è Ardrex 907 PB lavabile con acqua. Il penetrante in eccesso è stato eliminato dalla superficie spruzzando con acqua a bassa pressione (non oltre 280 kPa) e temperatura fra +10° e +50° C.
4. ASCIUGATURA: Le parti devono essere ben asciugate prima di applicare lo sviluppatore. L'asciugatura è avvenuta prima naturalmente in aria libera e poi accelerata mediante stracci puliti e asciutti.
5. APPLICAZIONE DELLO SVILUPPATORE BIANCO: La funzione dello sviluppatore è quella di assorbire ed attirare verso la superficie il penetrante rimasto nelle discontinuità dopo il lavaggio e di espanderlo in superficie con conseguente ingrandimento anche delle indicazioni relative a piccolissime discontinuità. E' stato utilizzato per l'indagine uno sviluppatore a rapida evaporazione Ardrex NQ1.
6. ISPEZIONE: Trascorso il prefissato tempo di sviluppo, le saldature interessate all'indagine sono state valutate ed esaminate. Come si evince dal report non sono stati riscontranti nessun tipo di difetto superficiale.

— Repliche metallografiche

La replica metallografica è un metodo non distruttivo che consente di imprimere e conservare la struttura metallografica di un oggetto o di un campione su un supporto di acetato di cellulosa o un film plastico. Il tecnico incaricato si è occupato di una prima fase relativa alla preparazione della superficie, impiegando una procedura di tipo "BUEHLER". Le zone di prelievo della repliche sono state quelle in corrispondenza delle saldature, generalmente ritenute le zone più critiche, in modo che la replica possa comprendere l'esame del materiale base (MB), della zona termicamente alterata (ZTA) e della zona fusa (ZF). La preparazione della superficie metallica è realizzata impiegando una strumentazione portatile dotata di una testa rotante, a velocità di giri variabile, su cui poter applicare piccoli dischi di carta abrasiva a granulometria decrescente. Sulla stessa testa rotante sono poi applicati dei panni per la lucidatura, impiegando sospensioni diamantate a granulometria decrescente. Ad ogni passaggio delle carte o dei panni la superficie è opportunamente lavata con alcool e/o acetone. Le piazzole di prelievo, una volta lucidate,

sono attaccate chimicamente con una soluzione di Nital al 2%. Senza dilungarsi troppo su questo tipo di esame, durante l'intervento sulla caldaia Ruth, l'operatore ha provveduto alla realizzazione di repliche in acetato che riproducono fedelmente la microstruttura dei materiali del generatore, con un procedimento standard. Esso prevedeva di bagnare con acetone la superficie metallica di interesse e velocemente adagiandovi la pellicola di acetato, senza esercitare alcuna pressione; dopo aver atteso alcuni minuti fino a completa essiccazione la pellicola, afferrare con una pinzetta in corrispondenza del bordo, è staccare con movimento regolare e continuo. Le repliche sono poi state inviate ad un laboratorio (abilitato a questo tipo di analisi) che ha stabilito l'adeguatezza del materiale di cui il generatore è composto, con gli utilizzi attuali e i carichi attuali.

— Prove durometriche

La durezza è una proprietà dei materiali, una grandezza meccanica non facile da definire e l'operatore incaricato, anche a seguito di esperienze pregresse, ha dovuto dimostrare in primis una buona conoscenza del materiale in esame: la struttura del grano, la durezza approssimativa e le proprietà interne. La prova in se consiste nell'applicare una forza iniziale nota al penetratore (a sfera o a cono di diamante) per assestarlo sulla superficie del pezzo in prova e stabilire il livello iniziale del penetratore o livello di zero di riferimento che non risulta quindi influenzato dallo stato della superficie del pezzo. Successivamente si applica al penetratore una forza addizionale nota per un definito intervallo di tempo e la si rimuove per eliminare la deformazione elastica ad essa dovuta. Infine lo strumento restituisce i valori di durezza richiesti in base alla scala impostata, da cui è possibile ricavare la forza di carico, se necessaria.



Figura 5. Operatore che esegue la prova durometrica

3. Verifica strumentazione di sicurezza

- Taratura Valvole di sicurezza al banco:

Questo tipo di verifica è stata attuata sul banco di prova certificato. Le valvole di sicurezza PSV sono state smontate dall'impianto e montate a banco per la verifica; quindi ove possibile, come in questo caso, la produzione deve essere interrotta fino alla riconsegna delle valvole.

- Verifica funzionamento Livellostati: la caldaia è stata svuotata al fine di verificare il bassissimo livello, provocando il corretto spegnimento del bruciatore al raggiungimento di tale livello;
- Verifica funzionamento Pressostati: è stato verificato il corretto funzionamento del sistema di sicurezza al raggiungimento del valore di altissima pressione;

4. Calcolo della vita residua (cvr) dei componenti esaminati

Tra la documentazione prodotta dall'azienda incaricata, consegnata al cliente e ad Inail, hanno importanza fondamentale i report riguardanti il calcolo della vita residua del generatore di vapore; la procedura utilizzata per ottenere i risultati mostrati nel seguito è quella normata dalle norme *API* e supportata dalla guida alle procedure di verifica Inail.

Dai risultati ottenuti risulta che:

- VITA RESIDUA DEL GENERATORE DI VAPORE: 3 ANNI;
- VITA RESIDUA CORPO CILINDRICO SINISTRO: 2 ANNI;
- VITA RESIDUA CORPO CILINDRICO DESTRO: 2 ANNI;

5. Verifica in campo e della documentazione prodotta, con riscontro dell'ispettore inail incaricato

Sono state analizzate prove e calcoli sia con tecniche che con verifiche sul GV da parte del funzionario Inail.

6. Prove di funzionamento ed integrità, con riscontro Inail

A seguito delle attività effettuate, in particolare il calcolo dei CVR, l'ispettore Inail ha emesso regolare certificazione di effettuata verifica di integrità quarantacinquennale. Parallelamente ha effettuato la prova di funzionamento a caldo sui componenti del generatore, con particolare interesse verso la strumentazione di sicurezza, intrinseca e non, installata sulla macchina in questione; inoltre è stata eseguita prova idraulica con pressione 1,11 volte alla pressione di bollo (quindi a 17,55 bar).

7. Prescrizioni e conclusioni

Visti, nel complesso, i risultati ottenuti durante le diverse attività svolte, noti i carichi di lavoro medi e la vetustà del generatore oggetto dell'intervento, la società STIGC ha prescritto e previsto un nuovo piano di controlli da svolgersi nell'anno 2019.

Dai controlli spessimetrici, i valori rilevati in caldaia ed internamente ai corpi cilindrici, sono costanti e con spessori residui prossimi a quelli minimi di stabilità; i risultati del calcolo vita residua sono stati esposti nel paragrafo 4), come da direttiva Inail di riferimento.

I controlli non distruttivi di tipo **liquidi penetranti**, effettuati internamente ai corpi cilindrici Superiore ed inferiore, hanno avuto esito positivo, non evidenziando alcun difetto sulle saldature.

L'**esame visivo** ha rivelato invece, su mantello dei due corpi cilindrici, la presenza nella parte centrale di aree soggette a "corrosione diffusa" con "crateri superficiali" e "distacchi di frammenti metallici"; inoltre in corrispondenza dei fondi è stato possibile notare fenomeni di "tensocorrosione" e "tubercoli di corrosione" sparsi.

Dalle **indagini endoscopiche** effettuate internamente ai fasci tubieri, non risultano anomalie eccetto residui di materiale non identificato depositatosi sulle superfici interne; si è consigliato al cliente un lavaggio chimico a basse dosi.

Nella III fase è stata effettuata, in presenza dell'ispettore Inail di Biella, una **prova idraulica** della caldaia a 17,55 bar; l'esame ha dato esito positivo.

Dall'analisi effettuata, le criticità evidenziate sono imputabili alla vetustà del generatore, amplificata da lunghi periodi di fermo intervallate da rare ripartenze con rapide salite.

Attualmente il GV ispezionato può esercitare in sicurezza per altri due anni, con l'obbligo di svolgere i piani di controllo prescritti che verifichino il corretto andamento degli stati di usura di cui si è descritto in questa memoria.

8. Bibliografia

[1]Pressure Equipment Directive-2014/68/UE

[2]Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004

[3]Procedura ISPESI 60/1997

[4]Norma UNI EN 10029

[5]Analisi e determinazione della vita residua di attrezzature in pressione-Ed.2013, Tipografia Inail-Milano,giugno 2013

[6]Inail, Esame visivo e Spettimetria – Procedura sperimentale di verifica delle attrezzature a pressione, Edizione 2012