

L'ESECUZIONE IN SICUREZZA DELLE PROVE DI PRESSIONE CONDOTTE SU ATTREZZATURE IN ESERCIZIO

INAIL

2020

COLLANA RICERCHE



L'ESECUZIONE IN SICUREZZA DELLE PROVE DI PRESSIONE CONDOTTE SU ATTREZZATURE IN ESERCIZIO

INAIL

2020

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici

Autori

Canio Mennuti¹, Giuseppe Augugliaro¹

Collaborazioni

Fabio Brini¹, Domenico Di Fonzo², Gaetano Gorrino³, Daniele Lazzaro¹, Elisa Pichini¹,
Paolo Quaresima¹, Federico Di Rocco⁴, Fabio Rossetti⁵, Paolo Sofia², Giovanni Vaccaro²

¹ Inail, Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici

² Inail, Uot Palermo

³ Inail, Uot Alessandria

⁴ Inail, Uot Verona

⁵ Inail, Uot Brescia

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

© 2020 Inail

ISBN 978-88-7484-648-1

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, 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.

Premessa

Nell'ambito dei controlli previsti dalla legislazione vigente relativa alla fabbricazione e all'esercizio delle attrezzature a pressione è molto frequente il ricorso all'esecuzione di prove di pressione di collaudo o di tenuta finalizzate alla omologazione o all'accertamento dell'integrità strutturale e dello stato di conservazione delle stesse attrezzature.

Durante l'esecuzione della prova di pressione esiste sempre la possibilità di accadimento di un evento, che può essere anche catastrofico, innescato dalla possibile rottura di parti o componenti in pressione. Ciò è ancor più vero per le prove di pressione condotte su attrezzature in esercizio dove molto spesso la pressurizzazione viene realizzata con lo stesso fluido di processo che può possedere caratteristiche di pericolosità intrinseche (fluidi facilmente infiammabili, esplosivi, tossici o comburenti).

Il documento può rappresentare un utile strumento per i soggetti coinvolti nel processo di verifica dell'integrità delle attrezzature a pressione, dal datore di lavoro all'RSPP e ai soggetti preposti, al fine della corretta individuazione e valutazione dei rischi derivanti dall'esecuzione delle prove di pressione.

Carlo De Petris
*Direttore del Dipartimento innovazioni
tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici*

Indice

1	Premessa	7
2	Scopo e campo di applicazione	8
3	Riferimenti normativi	9
4	Termini e definizioni	10
5	Generalità	11
6	Condizioni generali di sicurezza	12
7	Scelta del fluido di prova	13
7.1	Prova idraulica	13
7.2	Prova pneumatica	13
7.3	Temperatura del fluido di prova	13
7.4	Pressione di prova	14
8	Misure di prevenzione e protezione	15
8.1	Raccomandazioni di carattere generale	16
8.2	Precauzioni specifiche per la prova idraulica	17
8.3	Precauzioni specifiche per la prova pneumatica	17
9	Personale	19
9.1	Supervisore della sicurezza	19
10	Procedura di prova	21
	Appendice A - Esempio di checklist di controllo per l'esecuzione in sicurezza della prova di pressione	23
	Appendice B - Esempio di dimensionamento delle barriere di protezione	25
	Bibliografia	28

1. Premessa

Tutti i principali codici nazionali e internazionali considerano la scelta della prova di pressione idrostatica quale tecnica di «prima scelta» nell'esecuzione di un test di questo tipo. Nella quasi totalità delle prove di pressione condotte in sede di costruzione tale raccomandazione può essere facilmente soddisfatta in quanto l'attrezzatura può essere predisposta senza particolari difficoltà e con gli opportuni accorgimenti alla prova di pressione che, generalmente, viene condotta con acqua a temperatura ambiente.

Tuttavia, in sede di esercizio l'allestimento di una prova idraulica può essere estremamente problematico in quanto, preliminarmente alla prova di pressione, è necessario valutare l'idoneità e la stabilità delle strutture di supporto rispetto al peso dell'acqua di riempimento, svuotare e bonificare l'attrezzatura; successivamente alla prova sarà inoltre necessario smaltire il fluido utilizzato, eliminare l'umidità residua per evitare l'innescare di fenomeni di corrosione, ecc.

Tali problematiche tendono a divenire sempre più critiche con l'aumentare della capacità dell'attrezzatura. Per queste ragioni, in sede di esercizio, è molto frequente optare per una prova di pressione con gas (o pneumatica) utilizzando, se possibile, lo stesso fluido contenuto nell'attrezzatura. In tal modo si evitano la maggior parte dei rischi prima menzionati ma, per contro, se ne introducono di nuovi quali ad esempio la maggiore pericolosità di questo tipo di test (energia potenziale notevolmente superiore rispetto alla prova di pressione idrostatica a parità di temperatura e pressione, possibile fuoriuscita di fluidi tossici, esplosivi, infiammabili, comburenti) unitamente alla necessità di monitoraggio con altri metodi di Controllo Non Distruttivo (CND) al fine di migliorarne il grado di affidabilità.

2. Scopo e campo di applicazione

La presente linea guida ha lo scopo di fornire criteri e metodi di carattere generale per l'esecuzione in sicurezza di prove di pressione su attrezzature in esercizio. Per attrezzature a pressione si intendono recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza e accessori a pressione. Il documento non è da intendersi come raccolta di prescrizioni operative o specifiche tecniche ma ha l'obiettivo di fornire principi di base sugli aspetti pratici. Più in particolare esso ha lo scopo di fornire raccomandazioni in merito alla:

- scelta del fluido di pressurizzazione;
- predisposizione delle misure di prevenzione e protezione;
- esecuzione della prova.

3. Riferimenti normativi

UNI EN 13445-5:2015 Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 5: Controllo e prove

CEN/TS 764-8:2016 Attrezzature e insiemi a pressione - Parte 8: Prova a pressione
UNI/TR 11667:2017 Verifiche d'integrità di attrezzature /insiemi a pressione - Prove a pressione

DM 329/2004 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. Termini e definizioni

Attrezzatura a pressione: recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza ed accessori a pressione.

Datore di lavoro: soggetto titolare del rapporto di lavoro con il lavoratore o che dirige l'unità produttiva in quanto esercita i poteri decisionali.

Fluido di prova: fluido impiegato per la prova di pressione (liquido o gas).

Luogo sicuro: posizione sicura, lontana da potenziali pericoli e comprendente tutte le attrezzature necessarie per eseguire la prova a pressione e/o per osservare gli oggetti sottoposti a prova in conformità con le norme e i regolamenti applicabili.

Pressione massima ammissibile o di progetto (PS): pressione massima per la quale l'attrezzatura è progettata, specificata dal fabbricante.

Pressione di prova: pressione massima a cui deve essere sottoposta l'attrezzatura, specificata nella procedura.

Procedura di prova: documento scritto che descrive tutti i parametri essenziali e le precauzioni da osservare per uno specifico esame o controllo.

Prova idraulica: prova a pressione eseguita con fluido allo stato liquido (acqua o altri liquidi).

Prova pneumatica: prova a pressione eseguita con fluido allo stato gassoso (aria o gas inerte, o in alcuni casi, lo stesso fluido contenuto nell'attrezzatura).

Proprietario: soggetto che possiede l'attrezzatura a pressione.

Supervisore della sicurezza: persona in possesso di adeguate conoscenze tecniche incaricata dal datore di lavoro per la verifica delle condizioni di sicurezza prima, durante ed al termine della prova di pressione.

Temperatura di prova: temperatura del fluido di prova.

Temperatura di transizione duttile-fragile: temperatura alla quale, per il materiale in esame, si verifica il passaggio da un fenomeno di frattura duttile a un fenomeno di frattura fragile.

5. Generalità

In generale la prova a pressione viene condotta impiegando un fluido allo stato liquido (prova idraulica). Tuttavia in alcuni casi il riempimento con liquido può arrecare pregiudizio alla stabilità o all'esercizio dell'attrezzatura, oppure può introdurre ulteriori rischi non eliminabili (ad esempio la vicinanza di linee ad alta tensione). Pertanto la prova idraulica può essere sostituita con prova pneumatica mediante l'utilizzo di un fluido allo stato gassoso. In ogni caso, per l'esecuzione della prova, occorre prendere in considerazione eventuali indicazioni presenti sul manuale d'uso e manutenzione dell'attrezzatura.

6. Condizioni generali di sicurezza

Il principale pericolo derivante da una prova di pressione è rappresentato dall'improvviso e involontario rilascio dell'energia immagazzinata nell'attrezzatura sottoposta a test. Durante l'esecuzione del test il rischio connesso aumenta con l'aumentare della pressione che può causare la possibile fuoriuscita di fluido da giunti, raccordi, flange, valvole e altri accessori, con eventuale proiezione di parti o frammenti di tali componenti.

Idonee barriere e segnali di pericolo devono essere correttamente posizionati nei luoghi di lavoro in cui sono in corso prove di pressione.

Il personale addetto all'esecuzione del test deve essere formato e addestrato e deve attenersi alla specifica procedura di prova messa a punto a cura del datore di lavoro.

È raccomandato designare la figura del Supervisore della sicurezza fra gli addetti all'esecuzione della prova di pressione.

7. Scelta del fluido di prova

7.1 Prova idraulica

In genere la prova idraulica viene eseguita con acqua avendo cura di non arrecare danno (ad esempio problemi di corrosione innescati da eventuali residui di umidità) ai materiali costituenti l'attrezzatura da testare. Quando si utilizza un fluido diverso dall'acqua devono essere prese opportune misure di sicurezza aggiuntive in relazione alle caratteristiche del fluido (combustibile, infiammabile, tossico, ecc.).

7.2 Prova pneumatica

La prova pneumatica viene eseguita utilizzando di norma aria o gas inerte (ad esempio azoto). Il Supervisore della sicurezza deve essere consapevole e comprendere i rischi aggiuntivi connessi con la prova pneumatica e, in particolare, quello relativo all'energia immagazzinata disponibile in caso di rottura catastrofica dell'elemento pressurizzato che potrebbe provocare lesioni o morte da onde d'urto, nonché la proiezione di pezzi o parti di materiale che possono comportarsi come proiettili. In alcuni casi è ammesso l'utilizzo dello stesso fluido contenuto nell'attrezzatura a pressione: in questo caso dovrebbero essere stabilite le precauzioni aggiuntive da adottare al fine di ridurre i rischi aggiuntivi (ad esempio quelli dovuti all'utilizzo di un fluido combustibile, comburente o tossico).

7.3 Temperatura del fluido di prova

La temperatura del fluido di prova deve essere compatibile con i limiti di temperatura fissati dal fabbricante dell'attrezzatura a pressione e riportati nel manuale d'uso e manutenzione. Nel caso di prova idraulica è raccomandato mantenere la temperatura dell'acqua ad una temperatura non inferiore ai 5 °C e non superiore a 90 °C. Nel caso di prova pneumatica è raccomandato mantenere la temperatura del fluido in un intervallo compreso tra 15 °C e 40 °C.

In ogni caso la temperatura del fluido di prova deve essere tale da non portare il materiale al disotto della temperatura di transizione duttile-fragile.

7.4 Pressione di prova

I valori della pressione di prova idraulica e pneumatica sono, in genere, stabiliti da norme e/o dispositivi di legge. Il DM 329/2004 stabilisce che la prova idraulica sia effettuata sottoponendo l'attrezzatura alla pressione di $1,125 \times PS$, valore che diventa $1,1 \times PS$ per la prova pneumatica.

8. Misure di prevenzione e protezione

Qualsiasi attrezzatura da assoggettare a prova di pressione ha il potenziale di causare lesioni gravi o addirittura la morte in caso di un cedimento catastrofico. Pertanto dovrebbe essere effettuata un'adeguata valutazione del rischio considerando gli elementi di prova, l'attrezzatura, il fluido, la procedura e le condizioni ambientali. La valutazione del rischio è finalizzata alla predisposizione di idonee misure di prevenzione e protezione che dovrebbero essere riportate nella procedura di prova o nelle procedure operative a essa allegate. In ogni caso durante la fase di pressurizzazione nessuno dovrebbe avvicinarsi all'attrezzatura sottoposta a prova.

Nello specifico, a puro titolo esemplificativo, di seguito si riportano i principali aspetti che dovrebbero essere presi in considerazione [1], [2], [6]:

- onda d'urto e spostamento d'aria provocata dal gas inerte utilizzato in una prova pneumatica;
- proiezione di valvole, tappi di chiusura, flange e raccordi;
- proiezione di frammenti di tubazioni, raccordi, valvole o altri componenti;
- allagamento di aree in cui sono presenti elementi sotto tensione.

Le cause più comuni che possono provocare un cedimento dell'attrezzatura sottoposta a prova sono di seguito elencate:

- sovrappressione;
- sistema di pressurizzazione inadeguato o improprio;
- attrezzatura a pressione danneggiata o con difetti di fabbricazione/riparazione o errori progettuali;
- errori operativi nel corso della prova di pressione;
- inadeguato o improprio isolamento delle eventuali parti o componenti dell'attrezzatura a pressione che non devono essere sottoposte a prova (ad esempio tubazioni o elementi di collegamento con altre attrezzature o componenti).

Il livello di rischio derivante da una prova di pressione dipende da una serie di fattori, tra cui, a titolo esemplificativo ma non esaustivo:

- la pressione nell'attrezzatura;
- il tipo di fluido, liquido o gas e le sue proprietà chimico-fisiche;
- l'idoneità dell'attrezzatura e delle tubazioni di collegamento a resistere alla pressione di prova;
- l'età e le condizioni dell'attrezzatura;
- la complessità e il controllo del suo funzionamento;

- le condizioni prevalenti (ad esempio un processo eseguito ad alta temperatura);
- le competenze e le conoscenze delle persone che progettano, fabbricano, installano, mantengono il sistema, eseguono il test e utilizzano le attrezzature e i sistemi a pressione.

8.1 Raccomandazioni di carattere generale

Dal punto di vista della sicurezza di una prova di pressione l'obiettivo è, se possibile, eliminare i pericoli ovvero di mitigarne il rischio associato. A tale scopo, e a puro titolo indicativo, di seguito si forniscono alcune raccomandazioni di carattere generale:

- è opportuno che la prova a pressione sia condotta in un luogo sicuro, idoneo allo scopo. Le dimensioni del luogo sicuro o della zona di sicurezza dipendono dal tipo di test e dalle pressioni coinvolte;
- nel caso in cui non sia possibile proteggere la postazione di lavoro con barriere, gabbie o altri mezzi adeguati occorre verificare che la procedura di prova faccia riferimento ai rischi specifici del caso e alle relative misure da intraprendere per la loro eliminazione o mitigazione;
- quando la prova prevede valori elevati di pressurizzazione tali da non poter individuare un luogo sicuro nelle immediate vicinanze dell'attrezzatura stessa, la prova dovrebbe essere monitorata da una postazione remota con adeguati strumenti di registrazione del tempo e della pressione;
- la pressione di prova deve essere applicata gradualmente per evitare shock all'attrezzatura sottoposta a prova; il manometro di controllo della pressione dovrebbe essere visibile dalla postazione dell'operatore addetto alla pressurizzazione;
- non sottoporre a urti l'attrezzatura durante la prova di pressione (ad esempio colpendola con un martello);
- la temperatura del fluido di prova non deve essere inferiore a quella specificata nella procedura per evitare la possibilità di rottura fragile;
- la procedura di prova deve specificare le precauzioni da adottare per la salvaguardia dai rischi derivanti dalla possibile espansione del fluido di prova durante il test. In particolare se la pressione di prova deve essere mantenuta per un determinato periodo di tempo dovrebbero essere prese precauzioni aggiuntive per evitare una sovrappressione eccessiva dovuta all'espansione del fluido (ad esempio installando sull'attrezzatura da provare dei dispositivi di sicurezza contro la sovrappressione);
- l'ispezione visiva ravvicinata dell'attrezzatura deve essere eseguita solo quando la pressione non supera il livello di pressione di progetto; per i test di pressione pneumatica la pressione deve essere ridotta al livello del test di tenuta (stabilito dalla norma e/o standard di riferimento);
- i giunti e le connessioni dei tubi flessibili soggetti alla pressione devono essere adeguatamente fissati per evitare lesioni dovute a scuotimenti in caso di guasto;

- quando viene rilevata una perdita nei giunti o nei raccordi, oppure sull'attrezzatura sottoposta a test o sull'apparecchiatura di prova stessa, la pressione deve essere ridotta alla pressione atmosferica prima di qualsiasi intervento correttivo;
- quando la prova di pressione viene svolta per verificare la pressione di taratura di valvole di sicurezza, lo scarico e le eventuali tubazioni di convogliamento devono essere preventivamente esaminate per individuare possibili ostruzioni o situazioni di pericolo;
- i necessari dispositivi di protezione individuale, se applicabili, devono essere indossati dall'ispettore e da tutti gli addetti all'esecuzione del test che lavorano all'interno dell'area di prova.

Oltre alle precauzioni generali sopra citate, è necessario prendere in considerazione i seguenti punti.

8.2 Precauzioni specifiche per la prova idraulica

- Quando l'acqua viene utilizzata come fluido di prova, la temperatura durante il test non deve essere inferiore a 7 °C per evitare la possibilità di danni provocati dalla bassa temperatura. Quando si esegue una prova di pressione con acqua a una temperatura ambiente inferiore a 0 °C, è necessario verificare che il fluido di prova, i manometri e le linee di collegamento non possano congelare;
- attrezzatura sottoposta a prova deve essere completamente riempita con il fluido da utilizzare come mezzo di prova. Laddove, a causa della progettazione dell'attrezzatura in prova, non sia possibile eliminare tutte le sacche di aria/gas occorre prendere in considerazione le precauzioni aggiuntive indicate di seguito per le prove pneumatiche;
- l'effetto del peso del fluido di prova sull'attrezzatura sottoposta a test e qualsiasi struttura o fondazione di sostegno devono essere presi in considerazione in modo particolare;
- se come fluido di prova si utilizza un liquido diverso dall'acqua, ad es. un combustibile, dovrebbero essere considerati anche i pericoli specifici di quel fluido.

8.3 Precauzioni specifiche per la prova pneumatica

- A causa del potenziale dovuto agli alti livelli di energia immagazzinata, il volume interno di tutti i componenti da sottoporre a test pneumatici deve essere ridotto al minimo isolando determinate sezioni o testando i componenti singolarmente. In alternativa, si deve prendere in considerazione l'uso di un fluido non comprimibile;
- quando l'attrezzatura sottoposta a prova ha un volume considerevole, è necessario prendere in considerazione gli effetti delle onde d'urto e della proiezione

di parti o frammenti di attrezzatura o suoi accessori in caso di guasto catastrofico. La procedura di prova dovrebbe specificare una zona limitata opportunamente dimensionata come luogo sicuro per il personale a qualunque titolo coinvolto nel test;

- il riempimento e lo svuotamento delle parti o dei componenti dell'attrezzatura sottoposta a test deve essere controllato per evitare la possibilità di frattura fragile locale a causa del raffreddamento da efflusso. Ciò può essere ottenuto, ad esempio, mantenendo le portate costanti attraverso gli ingressi o gli ugelli di scarico utilizzando valvole di controllo del flusso.

9. Personale

Il personale che partecipa a qualunque titolo alle prove di pressione (addetti al sistema di pressurizzazione, operatori, ispettori, ecc.) deve essere formato sugli aspetti e i requisiti di sicurezza per tali attività, secondo le procedure interne del Proprietario/Datore di lavoro e i regolamenti applicabili.

La formazione dovrebbe includere:

- nozioni di base sui sistemi in pressione;
- riconoscimento, valutazione e gestione dei pericoli e dei rischi associati alla gestione dei sistemi di pressione e dei test di pressione;
- strumenti di misurazione della pressione, loro selezione e calibrazione, compresi gli eventuali strumenti situati in remoto;
- uso di mezzi di protezione individuale e di mitigazione del rischio, come dispositivi barriera, protezioni, posizione isolata/remota;
- ruolo del Proprietario/Datore di lavoro e della persona competente (Supervisore della sicurezza).

La competenza e l'addestramento del personale dovrebbe essere periodicamente valutata e registrata.

Il personale deve essere dotato dei dispositivi di protezione individuale specifici per l'attività di prova. Di seguito si riporta, a titolo esemplificativo, un elenco dei principali dispositivi:

- occhiali di sicurezza;
- protezione per l'udito, quando richiesto;
- protezione delle mani;
- scarpe di sicurezza;
- casco di sicurezza;
- grembiule o altro dispositivo di protezione del corpo, quando richiesto;
- rilevatore multigas, quando richiesto;
- torcia di sicurezza;
- protezione per il viso, quando richiesto;
- DPI (Dispositivi di Protezione Individuali) speciali aggiuntivi, quando richiesto.

9.1 Supervisore della sicurezza

Il Supervisore della sicurezza dovrebbe essere designato dal Proprietario/Datore di lavoro e dovrebbe possedere specifiche competenze tecniche nonché la neces-

saria formazione e qualificazione in relazione all'attività connessa con la prova di pressione. Il Supervisore della sicurezza, con la collaborazione degli operatori in campo, ha il compito di assicurare che siano state prese tutte le precauzioni di sicurezza sul luogo di lavoro, prima, durante e a conclusione della prova di pressione.

Il Supervisore della sicurezza dovrebbe verificare che:

- il personale coinvolto sia stato informato e addestrato sui rischi specifici dell'attività di prova;
- il personale coinvolto nell'attività di prova sia stato dotato dei necessari DPI in relazione ai pericoli individuati.

Al fine di mitigare i rischi connessi con l'attività di prova, il Supervisore della sicurezza dovrebbe:

- suddividere la prova di pressione in più fasi;
- individuare e registrare i pericoli associati a ciascuna fase,
- sviluppare le procedure operative per eseguire in sicurezza ciascuna fase con l'indicazione degli operatori coinvolti.

Prima dell'esecuzione della prova di pressione, il Supervisore della sicurezza dovrebbe eseguire un test preliminare con lo scopo di verificare che:

- tutti i pericoli siano stati trattati nell'analisi di rischio;
- revisionare le procedure operative tenendo conto delle eventuali modifiche apportate e che possono generare fattori di rischio non considerati in precedenza;
- siano disponibili tutti i DPI necessari;
- tutti gli operatori coinvolti nell'attività di prova siano stati edotti sui pericoli e dei relativi rischi associati alla prova di pressione.

10. Procedura di prova

La procedura di prova, oltre a descrivere nel dettaglio tutte le fasi operative, dovrebbe fare riferimento alle misure di sicurezza da adottare in relazione ai pericoli specifici e ai rischi pertinenti derivanti dall'attività.

Le procedure di prova possono variare in modo significativo: da una procedura base, che copre una sola operazione di prova, a documenti completi che possono dettagliare molti tipi di test. Tali procedure dovrebbero essere esaminate dal Supervisore della sicurezza per i rischi previsti e le relative misure di contenimento. Se tali procedure appaiono carenti (ad esempio, non riescono a identificare eventuali pericoli), il Supervisore della sicurezza deve documentare i suoi risultati, le sue osservazioni o le condizioni non sicure identificate e dovrebbe indicare le modifiche e correzioni da apportare alla procedura prima di assistere allo svolgimento del test.

Come già evidenziato in precedenza, prima di eseguire la prova di pressione occorre verificare la resistenza e la stabilità delle strutture di supporto dell'attrezzatura al carico aggiuntivo indotto dal fluido di prova. Nel caso si debba eseguire una prova pneumatica è di fondamentale importanza accertarsi che siano stati eseguiti opportuni controlli non distruttivi finalizzati alla verifica dell'integrità strutturale dell'attrezzatura da testare.

Le istruzioni operative da seguire per la conduzione della prova di pressione devono essere indicate in una procedura scritta. Una procedura tipica dovrebbe contenere riferimenti almeno ai seguenti argomenti, [3], [4]:

1. Scopo
2. Campo di applicazione
3. Responsabilità e qualificazione del personale
 - a. Supervisore della sicurezza;
 - b. operatore di prova;
 - c. ispettore;
 - d. altre figure.
4. Pericoli specifici derivanti dalla prova di pressione e misure di contenimento e controllo
 - a. Attrezzatura da sottoporre a pressione e suoi componenti (raccordi, flange, passi d'uomo, ecc.);
 - b. modalità di chiusura di passi d'uomo, flange o altre aperture;
 - c. modalità di serraggio dei tiranti (sequenza operativa e coppia di serraggio);
 - d. modalità di apertura degli sfiati nella parte superiore dell'attrezzatura per consentire la fuoriuscita di possibili sacche d'aria che possono formarsi durante la fase di riempimento;

- e. modalità di isolamento/intercettazione delle eventuali parti o componenti dell'attrezzatura che non devono essere pressurizzati;
 - f. modalità di isolamento di eventuali componenti sotto tensione;
 - g. strutture di supporto e/o ancoraggio dell'attrezzatura a pressione;
 - h. sistema di pressurizzazione e relative tubazioni di collegamento;
 - i. delimitazione e marcatura dell'area di prova e altri mezzi appropriati per limitare l'accesso al momento della pressurizzazione, durante il processo di prova e la depressurizzazione.
5. Procedura di prova
- a. Diagramma di flusso (P&I) dell'attrezzatura da sottoporre a prova di pressione;
 - b. posizione delle valvole di sicurezza e altri mezzi di rilascio della pressione;
 - c. sistema di pressurizzazione;
 - d. posizione delle valvole di intercettazione e linea di alimentazione del fluido di prova;
 - e. sequenza delle valvole di sfiato di apertura e chiusura;
 - f. pressione di prova, rampa di carico e/o gradiente di pressurizzazione/depressurizzazione, tempo di permanenza della pressione di prova;
 - g. strumentazione per la registrazione dei tempi e della pressione in particolare quando il test viene controllato da remoto;
 - h. metodo per l'individuazione di perdite in caso di prova pneumatica (ad es. utilizzo di gas traccianti o liquidi saponati);
 - i. Dispositivi di Protezione Individuale richiesti.
6. Criteri di accettabilità.
7. Rapporto di prova.
8. Altri riferimenti (documenti o fonti di informazione pertinenti al test, comprese le disposizioni temporanee).

Appendice A

Esempio di checklist di controllo per l'esecuzione in sicurezza della prova di pressione

A puro titolo indicativo si riporta di seguito un elenco dei riscontri suggeriti per l'effettuazione in sicurezza di una prova di pressione su una generica attrezzatura. L'elenco non è esaustivo.

Riferimento n.:			
Stabilimento/Impianto			
Dati attrezzatura (Matricola/ Numero di Fabbrica)			
.....			
Luogo e Data della prova			
Attività 1 - Esame visivo preliminare dell'attrezzatura a pressione e delle tubazioni connesse, controllo documentale	SI	NO	NA
1. L'attrezzatura a pressione ha una targa saldamente connessa ad essa con le seguenti informazioni?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
a. Numero di fabbrica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Pressione massima ammissibile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Fluido contenuto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Range di temperatura di esercizio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e. Data di fabbricazione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f. Organismo che ha effettuato l'omologazione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Le caratteristiche geometriche e meccaniche dell'attrezzatura e le tubazioni ad essa collegate corrispondono ai disegni progettuali?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. L'attrezzatura e le tubazioni ad essa collegate sono prive di segni di deformazione, rigonfiamento, danneggiamento o corrosione?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. L'attrezzatura è dotata di una valvola (o dispositivo) di sicurezza per la sovrappressione?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. La valvola di sicurezza agisce alla pressione richiesta?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Lo scarico della valvola di sicurezza è convogliato?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Lo scarico della valvola di sicurezza, se convogliato, è libero da intercettazioni ed è correttamente configurato?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	SI	NO	NA
8. Lo scarico della valvola di sicurezza è posizionato in modo da non arrecare danni alle persone o alle cose?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Tutti i raccordi e i dispositivi di tenuta sono ben serrati?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. La strumentazione prevista per monitorare le condizioni di esercizio dell'attrezzatura è appropriata e include almeno un indicatore di pressione, temperatura e livello?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Esiste documentazione attestante che l'attrezzatura sia stata sottoposta a prova di pressione negli ultimi 10 anni?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Attività 2 - Esecuzione della prova di pressione			
12. Esiste una procedura di prova scritta da persona competente?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. La prova è effettuata in accordo con la procedura scritta?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. La prova è effettuata in un luogo sicuro opportunamente individuato e delimitato?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. La prova è eseguita da personale qualificato e addestrato?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16. Fra gli operatori addetti alla prova è stato designato il Supervisore della sicurezza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17. Il Supervisore della sicurezza ha eseguito un test preliminare allo scopo di individuare eventuali criticità?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18. L'attrezzatura e le tubazioni da verificare sono state schermate per minimizzare il rischio per il personale in caso di danneggiamento o rottura improvvisa?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19. Tutto il personale estraneo all'attività di prova è stato allontanato dall'area prima di iniziare la prova?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20. Sono stati posti dei segnali indicanti "PERICOLO - PROVA DI PRESSIONE IN CORSO - TENERSI LONTANO" o similari?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21. L'attrezzatura a pressione e le tubazioni ad essa collegate sono state depressurizzate prima di iniziare l'esame visivo finale?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22. Il personale che effettua la prova per la ricerca delle perdite usa strumentazione idonea in relazione al fluido di prova?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23. L'attrezzatura a pressione e le tubazioni ad essa collegate sono state depressurizzate prima di iniziare un eventuale intervento di eliminazione delle perdite?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24. Al termine della prova, esistono delle misure o riferimenti per confermare che il serbatoio non si sia deformato plasticamente?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25. Al termine della prova è stato redatto un rapporto di prova?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Appendice B

Esempio di dimensionamento delle barriere di protezione

Il danno causato da un cedimento di un serbatoio a pressione è fortemente correlato con la quantità di energia immagazzinata nel momento del cedimento. In assenza di reazioni chimiche, la principale sorgente di energia è quella di espansione del fluido, E_x . Questo rilascio di energia si può stimare ipotizzando che il processo di espansione sia termodinamicamente reversibile e sufficientemente rapido per poter trascurare il trasferimento di calore verso l'esterno (trasformazione adiabatica). Il processo è quindi isoentropico, e vale la relazione:

$$E_x = -\Delta U \quad (1)$$

dove ΔU è la variazione di energia interna

Le figure 1 e 2 mostrano la correlazione di E_x con la pressione per l'azoto e per vari liquidi ipotizzando che il processo di espansione prosegua fino al raggiungimento della pressione atmosferica [5]. Dalle figure si evince come sia contenuta molta più energia in un serbatoio pressurizzato con gas rispetto a uno pressurizzato con liquido.

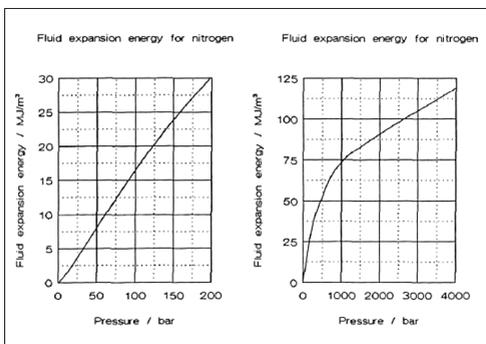


Figura 1 - Energia di espansione per l'azoto

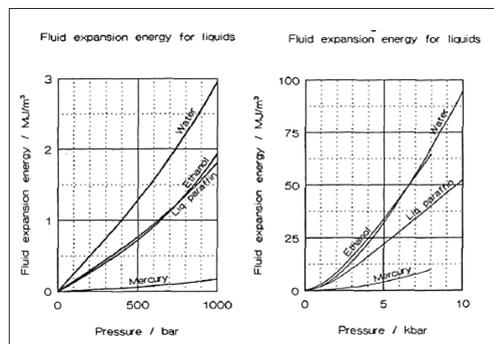


Figura 2 - Energia di espansione per alcuni liquidi

La grandezza e la velocità iniziale dei frammenti che si possono formare da un cedimento di un serbatoio a pressione dipendono dal tipo di evento:

- frammentazione completa dovuta a rottura fragile, solitamente in un grande numero di parti;

- completa distruzione del serbatoio in modo duttile, solitamente in un piccolo numero di parti anche di grandi dimensioni;
- cedimento e distacco di una sezione del serbatoio in maniera duttile, per esempio il cedimento di una saldatura circonferenziale tra la virola e il fondo;
- proiezione di un tappo o di un passo d'uomo o di un elemento che chiude un'apertura (passo di mano o passo di testa).

I frammenti prodotti dal cedimento di un sistema in pressione tendono ad avere velocità che raramente superano i 500 m/s, mentre i proiettili hanno velocità che superano i 500 m/s. Il meccanismo di penetrazione e perforazione a minori velocità (qualche centinaia di m/s) non è lo stesso quando ci si avvicina a 1000 m/s; questo determina una certa soglia di incertezza nell'estrapolazione dei dati relativi alle velocità più basse che caratterizza i frammenti (intesi come proiettili).

B.1 Protezione realizzata in acciaio

Esistono delle correlazioni empiriche sulla penetrazione e perforazione dell'acciaio da proiettili. Una delle correlazioni più utilizzate è la seguente [5]:

$$t = 4.9 \cdot 10^{-7} (M \cdot V^2)^{0.667} / d \quad (2)$$

dove:

- t è lo spessore dello scudo che viene perforato dal 50% dei frammenti (m)
- M è la massa del frammento (kg)
- V è la velocità del frammento (m/s)
- D è il diametro del frammento (m)

Si consiglia di aumentare del 25% lo spessore determinato con la (2). Lo spessore minimo dello schermo di protezione non dovrebbe essere inferiore a 3 mm.

B.2 Protezione realizzata in calcestruzzo armato

Anche per il calcestruzzo esistono delle correlazioni empiriche sulla penetrazione e perforazione. La seguente correlazione è funzione del rapporto x/d [5]:

$$G_{(x/d)} = 2.55 \cdot 10^{-9} \cdot K \cdot N \cdot M \cdot V^{1.8} / d^{2.8} \quad (3)$$

Si pone:

- $G_{(x/d)} = (x/2 \cdot d)^2$ se $G_{(x/d)} \leq 1$
- $G_{(x/d)} = (x/d) - 1$ se $G_{(x/d)} > 1$

con: $K = 15000/f_{ck}^{0.5}$

- N è il fattore di forma; è suggerito imporre $N=1$;
- M è la massa del frammento (kg);
- V è la velocità del frammento (m/s);
- D è il diametro del frammento (m)
- f_{ck} è la resistenza caratteristica cubica del calcestruzzo (Pa).

Dalla (3) è quindi possibile ricavare il valore di x (m) che rappresenta la profondità di penetrazione del frammento in un blocco di calcestruzzo di spessore infinito.

Lo spessore s (m) che resiste alla perforazione del frammento è dato da:

$$s/d = 7.91*(x/d) - 5.06*(x/d)^2 \quad \text{se } x/d \leq 0.65$$

$$s/d = 2.12 + 1.36*(x/d) \quad \text{se } x/d > 0.65$$

Bibliografia

- [1] National Institute of Standards and Technology (NIST) - Guidelines for Pressure vessel Safety. <https://www.nist.gov/>
- [2] Health and Safety Executive (HSE) - Safety requirements for pressure testing. <http://www.hse.gov.uk>
- [3] Health and Safety Authority Ireland (HSA) – Guide to the Safety, Health and Welfare at Work. <https://www.hsa.ie/eng/>
- [4] Mechanical Contractors Association of America (MCAAA) – Guide to Pressure Testing Safety. <https://www.mcaa.org/>
- [5] Safety in pressure testing – G. Saville, B. Skillerne de Bristowe, S.M. Richardson, Department of Chemical Engineering – Imperial College London. Icheme Symposium Series N. 141.
- [6] Alberta Boilers Safety Association (ABSA) – Standard Pneumatic Test Procedure Requirements for Piping Systems. <http://www.absa.ca/>