

IL CORRETTO DIMENSIONAMENTO DEL TUBO DI QUENCH

PREMESSA

Le apparecchiature a risonanza magnetica (RM) con magnete superconduttore, a esclusione di quelle a basso contenuto di elio (BCE), hanno al loro interno una consistente¹ quantità di elio liquido, la cui funzione criogenica

è indispensabile all'effetto della superconduzione. L'elio è liquido a temperature inferiori a circa -268,9 °C, mentre al di sopra si trova in fase gassosa; un aumento di temperatura anche molto contenuto può determinare il passaggio di stato del criogeno da liquido a gassoso, determinando un incremento notevole della pressione all'interno del sistema, poiché ogni litro di elio in fase liquida sviluppa circa 750 litri di elio in fase gassosa.

Moderati aumenti di pressione vengono attenuati dalle valvole di *boil-off*, che consentono di abbassare la pressione facendo confluire una parte dell'elio gassoso in un circuito di liquefazione, per essere poi reintrodotta nel sistema.

Per evitare, invece, che elevati e repentini aumenti di pressione possano ingenerare scenari di rischio ben più gravi, le apparecchiature RM non BCE sono dotate di una valvola di sicurezza, costituita da un disco in grafite, chiamato *burst disk*, di spessore opportunamente dimensionato al fine di rompersi ad un determinato livello di pressione, permettendo il passaggio dell'elio gassoso in un camino di evacuazione chiamato tubo di quench.

Quest'ultimo consente di convogliare all'esterno il criogeno in sicurezza in una zona non accessibile al pubblico², rispettando altresì gli approcci di cautela raccomandati nelle Indicazioni Operative dell'Inail³.

Il tubo di quench è un dispositivo di sicurezza che deve essere progettato per sopportare sia l'improvviso stress meccanico dovuto alla pressione esercitata dall'enorme volume di elio gassoso sprigionato durante un quenching, che lo shock termico dovuto alla bassissima temperatura del criogeno.

Gli elementi garanti della sua capacità di tenuta vengono indicati dalle specifiche tecniche rilasciate dal costruttore del tomografo, che definiscono solitamente: il materiale idoneo per la fabbricazione (il materiale tipicamente utilizzato è l'acciaio AISI 304 o l'acciaio AISI 316: si tratta, in entrambi i casi, di leghe di acciaio non ferromagnetiche, resistenti alla corrosione) e lo spessore minimo; la tipologia di connessioni ammesse fra

i vari elementi che costituiscono il tubo (le connessioni tipiche sono la flangiatura e la saldatura/brasatura; eventuali altri sistemi devono garantire che la corretta prassi costruttiva adottata assicuri la tenuta nelle condizioni di esercizio in cui la tubazione viene sollecitata - bassissime temperature e improvvisa spinta dinamica - per un ciclo di vita utile, come previsto dalla Direttiva PED per questo tipo di attrezzature - non marcate CE - e collegate a impianti a pressione); l'ancoraggio che deve avere il tubo lungo il percorso: tutta la tubazione deve essere ben ancorata all'interno della gabbia di Faraday, in particolare nel primo tratto, ove è spesso presente una curva a 90°, che riceve la maggiore sollecitazione durante un quenching (l'ancoraggio deve altresì essere garantito al soffitto della gabbia, che a sua volta deve essere ben ancorata al soffitto della sala); il rapporto minimo fra il raggio di curvatura e il diametro; il corretto dimensionamento - in termini di diametro, lunghezza e tortuosità - capace di sopportare una massima caduta di pressione ammissibile predefinita.

La rispondenza alle specifiche costruttive, al progetto, ai materiali da utilizzare e al corretto dimensionamento, deve essere certificata dall'impresa installatrice attraverso la dichiarazione di conformità alla regola dell'arte rilasciata ai sensi del d.m. 37/08 e s.m.i. al termine dell'installazione.

Scopo di questa pubblicazione è evidenziare ai progettisti come applicare i tre diversi approcci indicati dai costruttori dei tomografi per un corretto dimensionamento del tubo. Sono altresì trattati i requisiti delle camere di espansione eventualmente installate per espellere con maggiore sicurezza il criogeno nei casi di quenching⁴.

PRIMO APPROCCIO: LA MASSIMA PERDITA DI CARICO AMMESSA

In questo primo approccio i costruttori di apparecchiature RM definiscono la massima perdita di carico ammessa lungo il tubo di quench, dal punto di consegna, che è il punto di connessione tra il tratto del tubo di quench legato all'apparecchiatura e coperto da marcatura CE la restante parte di tubazione certificata alla regola dell'arte dall'installatore, fino al terminale. Deve essere pertanto calcolata la caduta barica complessiva lungo la tubazione sommando le perdite di carico dei vari tratti della linea di evacuazione: ogni elemento, lineare o curvo, contribuirà al calcolo complessivo con una sua specifica perdita di carico, frequentemente rappresentata in una tabella di riferimento.

¹ Il volume di elio liquido contenuto nei tomografi a superconduttore è di diverse centinaia di litri, mentre quello contenuto nei tre tipi di tomografo BCE attualmente installati in Italia da 0,5 T, 1,5 T e 0,55 T è rispettivamente pari a 30 l di elio gassoso, 7 l e 0,7 l di elio liquido. Alla data del 28/02/2025 le apparecchiature BCE rappresentano il 6,8% di tutte le apparecchiature RM a superconduttore installate nel territorio nazionale (Fonte: Data Base Inail).

² Cfr. Allegato al d.m. salute 14/01/2021, par. B.12.A.

³ Cfr. Indicazioni Operative dell'Inail per la gestione della sicurezza e della qualità in Risonanza Magnetica, pagg. 41 - 44.

⁴ Il repentino passaggio di stato dell'elio da liquido a gassoso determina il quenching, ovvero la sua fuoriuscita in forma gassosa dall'apparecchiatura; esso può essere spontaneo o indotto (quenching pilotato), quest'ultimo attuato quando si ha necessità di azzerare il campo magnetico statico.

Per calcolare le perdite di carico di ogni singolo tratto costituente la tubazione, le specifiche tecniche stabiliscono - per diversi diametri - la perdita di carico unitaria, ovvero la caduta di pressione per ogni metro lineare e per ogni singola curva a seconda dell'angolo di curvatura. Solitamente la perdita di carico unitaria dei tratti curvilinei è definita per range di angoli, per es. fino a 45°, da 45° a 90°, ecc.

Evidentemente, a parità di lunghezza, diametri inferiori e tratti maggiormente curvilinei del tubo hanno perdite di carico più elevate rispetto a diametri maggiori e a tratti con angoli di curvatura inferiori; ne consegue che, per rispettare la perdita di carico massima ammissibile, linee di evacuazione particolarmente lunghe e tortuose aumentano in sezione lungo il loro percorso. I tubi di quench realizzati con tale approccio, salvo tubi molto corti caratterizzati da diametro costante, si presentano in generale con sezioni di diametro crescenti. Due limitazioni, in grado di tradursi in potenziali criticità, si riscontrano sovente nelle specifiche tecniche fornite dal costruttore del tomografo.

La prima è data da un numero ridotto di diametri contemplati, l'attenersi pedissequamente ai quali significherebbe il più delle volte sovradimensionare il tubo, con aumento dei costi. In tali casi si assiste spesso all'utilizzo di tubi di diametro intermedio fra i diametri stabiliti dalle specifiche tecniche, di cui non è nota la perdita di carico unitaria.

La seconda limitazione riscontrata è l'assenza di riferimenti di perdite di carico unitarie per elementi a forma di tronco di cono, che collegano tratti di tubo di diametro crescente lungo la direzione di evacuazione. Ciò potrebbe portare a sottostimare la perdita di carico complessiva, ove non si inserisca nel calcolo la perdita dovuta ai tratti troncoconici in quanto non nota o ritenuta erroneamente superflua.

In entrambi i casi, è pertanto consigliato utilizzare la perdita di carico unitaria nota del tubo di diametro immediatamente inferiore a quello utilizzato (che nel tratto troncoconico potrebbe coincidere con il diametro della sua base inferiore), così sovrastimando cautelativamente la perdita di carico complessiva.

Tuttavia, se la perdita di carico complessiva calcolata in questo modo superasse la perdita di carico massima ammessa, il tubo non potrà considerarsi a norma, salvo una valutazione tecnica del costruttore del tomografo che attesti il contrario, fornendo le opportune argomentazioni tecniche.

Tale attestazione, rilasciata in forma scritta, deve essere parte integrante della documentazione tecnica inerente all'impianto di espulsione del gas criogeno e deve essere trasmessa all'Inail nella comunicazione di avvenuta installazione di cui all'art.3 del d.m. salute 14/01/2021.

È importante infine segnalare che per alcuni tomografi RM le specifiche tecniche stabiliscono - a parità del diametro della tubazione - valori di perdita di carico unitaria validi all'interno di un determinato range di

lunghezza del tubo, e valori via via crescenti per i successivi range di lunghezza. In questi casi occorre che nel calcolo si tenga conto della perdita di carico unitaria per ogni tratto di tubo ricadente nel rispettivo range.

SECONDO APPROCCIO: UN UNICO DIAMETRO DEL TUBO DI QUENCH

Le specifiche tecniche di alcuni fabbricanti di apparecchiature RM non definiscono la massima perdita di carico consentita, ma indicano - per possibili diversi diametri della tubazione - la lunghezza massima che la linea di evacuazione può avere, tenuto conto del numero e della tipologia di tratti curvilinei presenti, affinché l'impianto possa sopportare il quenching in sicurezza. Il tubo di quench realizzato avrà quindi un unico diametro, costante lungo tutto il suo sviluppo; la verifica del corretto dimensionamento consisterà nel riscontrare che detto diametro rientri nella classe consentita dalle specifiche tecniche per lunghezza e numero di curve.

Talvolta il numero esiguo di diametri contemplati nelle specifiche può indurre il progettista all'utilizzo di diametri intermedi, giustificando la loro bontà sulla base di stime arbitrarie che, non essendo state previste dal fabbricante del tomografo, necessitano - alla stregua del verificarsi di analoga situazione nel primo approccio - di una validazione da parte di questi.

TERZO APPROCCIO: UN DIAMETRO MINIMO CALCOLATO

Il metodo del calcolo di un diametro minimo prevede l'utilizzo di una formula fornita dal costruttore del tomografo che prevede l'inserimento di due parametri: la lunghezza relativa al tratto lineare e il numero di curve (entro un certo angolo di curvatura).

Il risultato del calcolo è un valore in riferimento al quale la tubazione deve essere realizzata con un diametro non inferiore, costante in tutto il suo percorso. Anche in questo caso non c'è flessibilità nel poter prevedere aumenti di sezione lungo la linea.

VALUTAZIONI PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE CAMERE DI ESPANSIONE

La camera, detta anche cassa, di espansione è un contenitore dove viene fatto sfociare il terminale del tubo di quench, scopo della quale è attenuare la pressione dell'elio gassoso durante un quenching e orientare la sua fuoriuscita verso una direzione preferenziale, permettendo anche, ove possibile, una riduzione delle distanze di sicurezza di cui alle Indicazioni Operative Inail del 2015⁵, che non contemplavano l'esistenza stessa delle camere di espansione, in quanto all'epoca non disponibili allo stato dell'arte.

La camera di espansione, essendo parte integrante della linea di evacuazione, se presente già in fase di realizzazione della tubazione dovrà essere citata nella dichiarazione di conformità e indicata nel progetto; viceversa, se realizzata successivamente all'impianto in questione, dovrà essere dotata di una propria dichiara-

⁵ Vedi nota 3.

razione di conformità, avallata dal costruttore del tomografo, che espliciti la compatibilità tecnica con l'impianto preesistente tenuto conto della sicurezza e della funzionalità dell'intero impianto.

Affinché la camera di espansione svolga correttamente la sua funzione è necessario che essa sia correttamente progettata e realizzata, ovvero sia costruita con materiali e spessori in grado di sopportare lo stress meccanico e termico del getto gassoso sulle pareti, nonché dimensionata - compatibilmente con lo spazio a disposizione - in modo di poter accogliere un volume consistente di criogeno gassoso e avere una sezione di uscita sufficientemente ampia.

Una camera troppo piccola e ravvicinata al terminale potrebbe fungere da tappo, inibendo la libera diffusione del gas e ingenerando una situazione di pericolo. La camera deve inoltre essere ben ancorata e dotata di rete anti-intrusione per insetti e animali nel lato di diffusione.

L'ESPERTO RESPONSABILE DELLA SICUREZZA E LA VALUTAZIONE DEL TUBO DI QUENCH

L'Esperto Responsabile della sicurezza in RM (ER) è la figura preposta alla gestione di tutti gli aspetti di sicurezza correlati al funzionamento dell'apparecchiatura RM e degli impianti a essa asserviti. Relativamente al tubo di quench le attribuzioni dell'ER sono:

- approvazione del progetto definitivo ai fini della conformità ai requisiti di sicurezza;
- verifica della corrispondenza tra il progetto approvato e quello realizzato;

- acquisizione, al termine dei lavori, della dichiarazione di conformità di installazione alla regola dell'arte⁶.

È inoltre raccomandato che l'ER codifichi un sistema di verifica periodica⁷ della tubazione, che riguardi diversi aspetti relativi al corretto funzionamento nel tempo:

- controllo della tenuta delle connessioni;
- controllo dell'ancoraggio delle staffe di sostegno;
- verifica dell'integrità e dello stato di ossidazione;
- controllo della presenza di eventuali ostruzioni nel terminale di uscita.

CONCLUSIONI

Sono stati passati in rassegna gli approcci per il dimensionamento della linea di evacuazione dell'elio proposti dai costruttori dei tomografi, che, se correttamente attuati consentono di garantire la tenuta della tubazione durante le fasi di un quenching, purché la stessa sia stata realizzata a regola d'arte dall'installatore nel rispetto delle specifiche tecniche date e/o della validazione del progetto da parte del costruttore medesimo.

Per realizzare la tubazione l'installatore deve avere a disposizione attrezzature idonee e maestranze professionalmente adeguate, quali saldatori patentati. La certificazione di installazione a regola d'arte, completa di dimensionamento, schema di linea e materiali utilizzati, costituisce atto formale di garanzia che il soggetto installatore abbia realizzato l'impianto nel rispetto delle specifiche richieste dal costruttore del tomografo, delle normative e delle norme di buona tecnica di settore.

⁶ È buona norma che la dichiarazione di conformità alla regola dell'arte, di cui al d.m. sviluppo economico 37/08 e s.m.i. rilasciata secondo i modelli di cui agli allegati I o II del d.m. sviluppo economico 19/05/2010, indichi il *ciclo di vita utile del tubo* (es. un determinato periodo di tempo e/o eventi di quenching), superato il quale risulta necessario effettuare una revisione (o la sostituzione) al fine di garantire l'idoneità alla funzione.

⁷ La modalità e le periodicità previste per le verifiche di sicurezza e qualità devono essere contenute nel regolamento di sicurezza. Cfr. par. D.1 dell'Allegato al d.m. salute 14/01/2021.

RIFERIMENTI NORMATIVI

D.m. salute del 14 gennaio 2021

Determinazione degli standard di sicurezza e impiego per le apparecchiature a risonanza magnetica fino a 4 tesla. (G.U. n. 65 del 16 marzo 2021).

D.m. sviluppo economico del 22 gennaio 2008, n. 37 e s.m.i.

Disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici. (G.U. n. 61 del 12 marzo 2008).

PER ULTERIORI INFORMAZIONI

Contatti: ma.diluigi@inail.it

BIBLIOGRAFIA

Indicazioni operative dell'Inail per la gestione della sicurezza e della qualità in Risonanza Magnetica. Inail – Dimeila; 2015.

La comunicazione di avvenuta installazione da inviare all'Inail. Inail – Dimeila; 2018.

Obbligo di comunicazione di avvenuta installazione delle apparecchiature a risonanza magnetica: aggiornamento ai sensi del DM salute 14/01/2021 e indicazioni all'utenza. Inail – Dimeila; 2022.

PAROLE CHIAVE

Tubo di quench, Impianto per l'espulsione del gas criogeno, Risonanza magnetica (RM), Cassa di espansione