

# La gestione del rischio nelle prove in pressione: un caso di studio

O. Borgia\*, L. Schoepflin\*

\*SAIPEX S.r.l. Servizi per apparecchiature ed impianti in pressione ed atmosfere esplosive

## Sommario

Esiste sempre il rischio di un possibile guasto catastrofico durante una prova idraulica o pneumatica, specialmente se ad alta pressione. Inoltre, talvolta in concomitanza di una rottura catastrofica che si dovesse manifestare durante un test in pressione può accadere che dall'apparecchiatura siano emessi dei proiettili o parti di essa ad alta energia.

Con riferimento a queste problematiche, le norme e gli standard nazionali ed internazionali non forniscono un quadro ben strutturato e completo dei requisiti essenziali di sicurezza da soddisfare per l'esecuzione della prova né le migliori pratiche da mettere in atto.

D'altro canto, la letteratura scientifica è ricca di studi teorici e sperimentali che affrontano la prova in pressione, cercando di quantificarne il rischio attraverso il calcolo dell'energia di rilascio associabile ad un evento catastrofico. Tali studi, che si focalizzano su aspetti sperimentali di tipo correlativo, hanno come fine ultimo il dimensionamento dei sistemi di protezione, come barriere o dispositivi di protezione individuale.

Questo articolo descrive come si è affrontata la gestione del rischio derivante dall'esecuzione delle prove in pressione in un caso di studio specifico.

L'attività di prova è stata scomposta in tutte le sue fasi più elementari e tramite un'analisi FMEA per ciascun *step* della prova sono stati individuati i possibili modi di guasto, le relative cause, le possibili conseguenze e le azioni protettive e preventive da poter metter in atto per la mitigazione del rischio.

## 1. Introduzione

Tutte le apparecchiature che operano a pressioni superiori a quella dell'ambiente, devono essere testate prima dell'uso, al fine di validare le precedenti fasi di progettazione e fabbricazione. Uno dei momenti di maggiore importanza della verifica finale a cui tali attrezzature è la prova in pressione. I pericoli che una prova in pressione pone sono dati dalla combinazione di due principali fattori: l'energia accumulata dal fluido in pressione all'interno dell'apparecchiatura ed il grado di ignoranza circa l'idoneità delle apparecchiature per contenere tale pressione.

Lo scopo di questo studio è quello di riprogettare sia dal punto di vista *hardware* che procedurale, la fase del processo produttivo di un'attrezzatura soggetta alla prova in pressione. L'obiettivo principale del progetto sono il miglioramento delle prestazioni dei processi di produzione, tenendo conto, non solo della conformità alla leggi vigenti, ma anche dei requisiti di sicurezza più avanzati per la gestione ed esecuzione dell'attività dei test in pressione.

Il primo passo del progetto è stata una revisione degli standard e della letteratura scientifica in merito all'argomento. Tale approfondimento è descritto nel paragrafo 3 del presente elaborato.

Gli standard internazionali si concentrano sui requisiti legati alle prestazioni tecniche che la prova in pressione deve manifestare relativamente alle capacità di contenimento e tenuta strutturale dell'attrezzatura, senza fornire requisiti o specifiche tecniche ben

strutturate ed esaustive relativamente ai rischi delle prove in pressioni ed alle relative misure di sicurezza da adottare.

Inoltre, la letteratura scientifica propone molti studi teorici e sperimentali che affrontano la prova di pressione, cercando di quantificare il rischio attraverso l'analisi energetica, sfociando così spesso nello studio delle traiettorie di volo dei potenziali frammenti che si sviluppano durante un'esplosione dovuta alla perdita di contenimento dell'attrezzatura durante la prova. In base a questi problemi, molti studi si concentrano sul dimensionamento dei sistemi di protezione, come barriere o dispositivi di protezione individuale per gli operatori, trascurando l'approccio preventivo.

L'obiettivo principale della fase preliminare di analisi della letteratura è stata l'identificazione delle misure di sicurezza che dovevano essere attuate nel caso di studio che presenteremo nel paragrafo 2, al fine di ridurre il livello di rischio.

L'analisi delle normative internazionali e della letteratura scientifica è stato un utile strumento di supporto all'analisi dei rischi che è stata affrontata e dettagliata tramite l'approccio FMEA. Un team specifico di esperti, composto da operatori del processo produttivo, manager e specialisti di attività di analisi dei rischi ha analizzato l'attività dei test in pressione con lo scopo di identificare e valutare i rischi presenti nel processo produttivo. In un secondo momento sono state definite le azioni di sicurezza preventive e protettive al fine di eliminare o ridurre i rischi ritenuti non appropriati al contesto di analisi. L'approccio FMEA adottato per l'analisi dei rischi sarà presentato nel dettaglio nel paragrafo 4.

Il paragrafo 5 descrive le principali misure di sicurezza adottate quali ad esempio la completa riprogettazione dei banchi prova dove vengono effettuati i test e la nuova procedura operativa per le prove in pressione.

Il paragrafo è stato suddiviso in due parti a seconda se le misure di sicurezza agiscono sulla frequenza di rischio (preventive) o sulle conseguenze del rischio (di protezione).

La discussione finale, al paragrafo 6, contiene le conclusioni del progetto, mettendo in evidenza le carenze in termini di requisiti di sicurezza e specifiche tecniche delle normative vigenti e degli standard internazionali. Inoltre si evidenzierà come nella gestione dei rischi, le misure di prevenzione possano essere, in molti casi, più efficaci ed efficienti rispetto al classico approccio legato all'azione di protezione.

## **2. Il caso di studio**

Il caso di studio oggetto del presente articolo è caratterizzato da una elevata importanza della prova in pressione relativa all'attrezzatura, in quanto rappresenta una verifica necessaria ed essenziale della qualità del prodotto.

Tale attività, che si svolge in un'area dedicata dello stabilimento produttivo, può essere suddivisa nelle seguenti macro-fasi:

- I. Montaggio dell'attrezzatura nell'area di prova;
- II. Riempimento;
- III. Pressurizzazione;
- IV. Ispezione;
- V. Depressurizzazione;
- VI. Scarico;
- VII. Smontaggio dell'attrezzatura.

La priorità è quella di eseguire il test in condizioni di sicurezza, senza causare alcun infortunio alle persone coinvolte nell'attività o per chiunque altro nelle vicinanze. In seconda battuta si cerca di limitare l'eventuale perdita economica dovuta alla rottura o al

danneggiamento di un'attrezzatura in prova come conseguenza di un evento catastrofico durante lo svolgimento del test.

Partendo quindi da un approccio vicino ai principi del *Lean Manufacturing*, uno dei dati di input più importanti per la riprogettazione del layout è stato il tasso di domanda del cliente, tradotto in pianificazione della produzione. L'analisi ha visto il raggruppamento delle apparecchiature in alcune famiglie con caratteristiche simili come dimensioni, peso, pressione di prova, ecc. Questo approccio ha permesso di sviluppare un banco di prova specifico e dedicato per ogni famiglia di apparecchiature, prendendo in considerazione la sicurezza, la qualità dei prodotti ed i tempi di consegna di ciascuna tipologia di prodotto.

### **3. Stato dell'arte**

L'analisi degli standard internazionali e della letteratura scientifica ha avuto come obiettivo principale l'individuazione delle *best practices* in relazione alle azioni di protezione e di prevenzione per eliminare o ridurre i rischi delle prove in pressione.

#### **3.1. Gli Standard internazionali**

La prima parte della revisione si è concentrata sulle norme tecniche relative alle specifiche di sicurezza per applicazioni a pressione. Al momento non ci sono norme specifiche, ma solo alcune indicazioni riportate in pochi paragrafi dei codici di progettazione e costruzione delle attrezzature a pressione. La prova di pressione è una fase specifica del processo di produzione di un apparecchio a pressione. Lo scopo di questa fase è quello di garantire la tenuta del materiale e la bontà di fabbricazione.

Nella nostra recensione abbiamo analizzato i principali codici di progettazione delle attrezzature a pressione che sono considerati un valido riferimento della comunità internazionale: EN13445 (UE) [1], ASME VIII Div. 1 (USA) [2], BS5500 (Regno Unito) [3], CODAP (Francia) [4], VSR Rev. '95 Raccolta E (IT) [5], AD2000-Merkblatt (Germania) [6].

Tutti gli standard, nello stesso capitolo o paragrafo in cui essi definiscono la prova di pressione, riportano anche alcune informazioni sulla procedura di prova e alcuni suggerimenti sulle misure di sicurezza da adottare.

Analizzando le norme è evidente che le indicazioni in merito alle misure di sicurezza non sono ben strutturate e organizzate, ma sono viste solo come informazioni di supporto allo svolgimento della prova, infatti non sono presenti paragrafi o capitoli dedicati. Questa carenza rileva una certa mancanza di sensibilità ai rischi delle prove in pressione che potrebbe anche essere interpretata come una carenza culturale.

In questo articolo, per evitare una discussione troppo lunga ci accingiamo a presentare una sintesi delle principali misure di sicurezza riportate sugli standard internazionali senza analizzarli uno per uno.

Prima di tutto, le norme internazionali concordano nel considerare la prova in pressione pneumatica più pericolosa rispetto a quella idraulica [1-6]. Ciò è dovuto alla maggiore energia potenziale che può essere rilasciata in caso di esplosione. Per questo motivo tutti gli standard consigliano di effettuare la prova pneumatica solo quando è strettamente necessaria per evitare danni per le attrezzature a pressione, o quando il fluido liquido può influire sulle condizioni di funzionamento.

La scelta di una prova pneumatica dovrebbe generare un aumento delle misure di sicurezza. Sono infatti consigliate barriere o aree confinate intorno all'apparecchio così come la riduzione massima degli operatori coinvolti nell'attività. In ogni caso, la prova pneumatica implica la necessità di innalzare la percentuale dei controlli non distruttivi sulle attrezzature per garantire con maggiore affidabilità la qualità di fabbricazione dell'apparecchiatura.

Un altro elemento importante per la pressione di prova è la scelta del fluido per eseguire la pressurizzazione. Per una prova idraulica, l'acqua è preferibile come, aria o azoto per la

prova pneumatica. In ogni caso, il fluido deve essere assolutamente inerte, per evitare fenomeni di corrosione o erosivi. A volte qualche additivo può essere utilizzato per scopi speciali, come processo di passivazione di generatori di calore.

Oltre alle caratteristiche chimiche, ci sono anche alcune considerazioni importanti per le condizioni fisiche. In particolare la temperatura del fluido deve essere contenuta entro un intervallo che dovrebbe considerare i limiti ammissibili dell'apparecchiatura e le temperature di variazione di stato del fluido di prova. In ogni caso la temperatura di prova non deve superare i 50°C o essere inferiore a 7°C, sebbene non tutti gli standard concordino su questo *range* di temperatura.

Alcuni standard [1-4] consigliano di prestare attenzione durante il processo di pressurizzazione. Tutte le fasi caratterizzate da una variazione di pressione sono considerate potenzialmente critiche. Quindi l'aumento di pressione deve essere gestito da una procedura passo passo, in cui il primo *step* di pressurizzazione è pari al 50% del valore di prova di pressione per poi procedere con n°5 *step* successivi del 10% con i quali si raggiunge il valore di pressione finale [1-3]. Inoltre, tra due *step* del processo di pressurizzazione dovrebbe essere presente un intervallo sufficientemente lungo per garantire la stabilizzazione della pressione.

La stessa importanza in termini di rischi potenziali caratterizza la fase di depressurizzazione in cui una variazione di pressione violenta può causare una frattura fragile o un collasso del sistema sottoposto a prova [4].

Durante una prova di pressione vi è la possibilità di effettuare un controllo visivo delle attrezzature a pressione per identificare alcune perdite. Questa fase è considerata molto critica perché gli operatori sono molto vicino all'apparecchio mentre si trova a pressione massima di prova. Per questa ragione alcuni standard [1,3,6] propongono una riduzione della pressione in questa fase di prova, prima che gli operatori inizino l'ispezione visiva in prossimità dell'apparecchiatura. I valori di riduzione sono diversi in ogni standard, per esempio [2] consiglia di adottare un valore di pressione pari al valore massimo di prova in pressione diviso per 1,3. [1,3] suggeriscono di ridurre il valore di pressione alla pressione di progetto dell'apparecchiatura; alternativamente l'ispezione visuale può essere eseguita solo se la pressione viene ridotta almeno del 10% del valore massimo di pressione di prova.

In ogni caso questa misura preventiva può essere considerata come un fattore di sicurezza che può essere adottato nella procedura di prova di pressione.

Per quanto riguarda i dispositivi e gli accessori di prova da adottare, non tutti gli standard suggeriscono specifiche misure. [4] evidenzia come la pressione massima consentita del sistema di collaudo deve essere superiore almeno del 10% rispetto al valore del test di pressione. L'adeguatezza dei dispositivi, per quanto riguarda le specifiche di pressione, sono menzionati anche in [1-3]. Solo per alcuni dispositivi speciali come manometri e valvola di sicurezza sono presenti alcuni specifici suggerimenti.

[1,4,5] suggeriscono un valore di fondo scala specifico per il manometro di prova, inoltre [2] sottolinea come l'uso di n°2 manometri sia preferibile per assicurare una ridondanza di misurazione del principale fattore di rischio: la pressione.

Solo lo standard USA [2] indica la possibilità di adottare una valvola limitatrice di pressione, tarata al massimo al valore di 1,3 della pressione di prova idraulica o di 1,1 per quella pneumatica per evitare che durante l'attività di prova si raggiungano pressioni superiori.

Generalmente nessun standard identifica tutti i potenziali rischi, perciò spesso non sono presenti neanche paragrafi dedicati. Ad esempio il rischio della presenza di tasche di gas durante una prova idraulica viene considerato solo negli standard [1,2], i quali

suggeriscono semplicemente di provvedere all'installazione di appositi *venting* nei punti più alti delle apparecchiature.

Inoltre, solo [1,6] suggeriscono specifici limiti di pressione e temperatura per eseguire il test in una area libera, senza particolari precauzioni di accesso o distanze di rispetto. Questi standard considerano una pressione di 100barg e una temperatura di 50°C come due soglie di rischio. Un test di pressione che supera questi valori richiede specifiche misure di sicurezza, come una zona ad accesso limitato, con particolari misure di contenimento.

### 3.2. La letteratura scientifica

La letteratura scientifica evidenzia come la maggior parte degli studi riguardanti prova a pressione sono focalizzati sulla modellazione esplosione sotto il punto di vista fisico ed in particolare si concentrano sulla definizione dell'energia rilasciata durante l'evento.

Questi obiettivi sono stati perseguiti attraverso un approccio sperimentale relativamente a test di laboratorio, trascurando la possibilità di eseguire un'analisi dei rischi preliminare per affrontare il problema sotto tutti i punti di vista.

I pericoli principali di una prova in pressione sono la creazione di proiettili e la generazione di un'onda d'urto. Espraza et al.[7] evidenziano attraverso prove sperimentali, che solo in caso di prova pneumatica vi è una onda d'urto, mentre la prova idraulica genera solo un'onda sonora. Al contrario in entrambi i casi c'è il pericolo della generazione di proiettili. In questo caso la differenza è dovuta all'energia rilasciata durante l'esplosione che è la causa della forza che agisce sul proiettile.

Moore [8] nel suo articolo propone un metodo semplificato per definire l'accelerazione che agisce sul proiettile espulso dall'apparecchiatura in pressione. Egli afferma che l'accelerazione agisce sul proiettile per una distanza pari al diametro del foro sull'apparecchiatura. Questa distanza viene dimezzata quando la prova di pressione è da eseguire con un fluido allo stato liquido perché la diminuzione di pressione all'interno dell'apparecchiatura è molto più rapida nel caso di liquido che di gas.

Nel caso in cui il proiettile sia molto piccolo rispetto all'attrezzatura, Baum [9] propone un approccio in cui la pressione agisce sul frammento per una distanza pari al doppio del diametro del frammento stesso.

Un'analisi molto ampia al fine di definire la forza che agisce sul proiettile o frammento è stata proposta da Saville et al. [10]. Partendo da un gran numero di esperimenti, la velocità del frammento è definita dai seguenti parametri: pressione espulsione, pressione ambiente, peso e diametro del proiettile, fluido tipo pressurizzazione, temperatura di prova e dimensioni attrezzature.

Saville et al. [10] affrontano anche il problema che un'esplosione durante una prova in pressione può provocare due diversi tipi di rottura: fragile o duttile. Nel primo caso gli effetti dell'esplosione sono molto simili alla detonazione di un esplosivo militare con un gran numero di proiettili che hanno dimensioni generalmente non molto grandi. Al contrario, nel caso di rottura duttile i proiettili non sono così numerosi, ma la dimensione può essere rilevante. Inoltre, gli effetti di una frattura fragile possono essere maggiore per una rottura duttile poiché l'energia rilasciata nell'unità di tempo è maggiore.

Per questo motivo suggeriscono un approccio conservativo considerando rottura duttile come un caso particolare di una frattura fragile in cui la dimensione del proiettile può essere rilevante.

Questo studio [10] è considerato un riferimento per la valutazione dei rischi delle prove in pressione poiché riassume i risultati di molti studi per quanto riguarda anche la progettazione delle barriere di protezione.

La letteratura scientifica è ricca di studi sperimentali, come per esempio Brown [11] che propone una correlazione sperimentale tra lo spessore di una barriera in materiale duttile (acciaio al carbonio) e le caratteristiche del proiettile: velocità, peso e diametro.

Uno studio molto simile dal punto di vista sperimentale è stato eseguito in [12], dove le barriere sono fatte di cemento armato e la correlazione è stata arricchita da alcuni fattori come la forma del proiettile e la sua capacità di penetrazione.

Smith et al. [13] hanno studiato la possibilità di utilizzare policarbonato o un argine di terra come materiali per le barriere protettive. Entrambi i materiali sono stati testati attraverso un approccio sperimentale per definire le correlazioni per lo spessore delle barriere.

In questi articoli si può notare anche l'opportunità di usare una barriera composta da un mix di materiali di cui sopra ma il problema è che in questo caso non ci sono studi specifici sperimentali o correlazioni, quindi è necessario procedere con un approccio conservativo.

In tutti gli studi di cui sopra l'energia, potenzialmente rilasciata durante una prova di pressione, è sempre espressa come l'energia equivalente di una sostanza esplosiva chiamata TNT. Questo approccio è necessario per ottenere risultati omogenei e comparabili. Per questo motivo, se vogliamo comprendere quali possano essere gli effetti di un'esplosione su una struttura di contenimento protettiva è possibile estendere i risultati di Ayvazyan et al. [14]. Questi ultimi autori hanno eseguito un test molto interessante su delle camere di forma cubica per valutare i seguenti effetti di esplosione: onda d'urto, picco di pressione e di impatto del proiettile.

Sebbene la letteratura scientifica sia ricca di studi sperimentali per l'analisi dinamica delle esplosioni, la conoscenza degli effetti di un'esplosione di una attrezzatura in pressione è ancora inadeguata, in quanto dipende da così tanti fattori che gli studi sperimentali non possono essere del tutto esaurienti. Pertanto gli articoli [7,10,15], per valutare le conseguenze sulle persone di una esplosione, suggeriscono di utilizzare comunque una soluzione ingegneristica basata sui diagrammi delle curve di danno.

#### **4. L'analisi e la valutazione dei rischi**

Per affrontare correttamente il processo di miglioramento, il punto di partenza è una visione completa ed il più possibile dettagliata del processo produttivo legato alle prove in pressione.

La necessità di un'analisi dei rischi molto dettagliata ha guidato la scelta dei componenti del team con competenze specifiche molto spiccate. Il gruppo di studio è stato così composto: operatori di produzione, responsabili del processo, specialisti di analisi dei rischi ed un esperto di *Lean Manufacturing*.

Lo studio dell'attività di prova è stato effettuato direttamente in campo, all'interno dell'area dove vengono eseguite le prove in pressione. Questo approccio ha permesso di identificare i pericoli specifici per ogni singola operazione poiché il team ha avuto la possibilità di confrontare le proprie considerazioni e valutazioni con l'attività operativa.

I rischi identificati sono stati valutati usando lo strumento dell'analisi FMEA. L'FMEA è stata strutturata secondo tutte le singole fasi dell'attività di prova (n°109) che in un secondo momento sono state raggruppate in n°7 macro-fasi del processo (i-vii), come descritto nel paragrafo 2.

Al fine di avere una più ampia identificazione dei rischi che potrebbero essere presenti durante una prova in pressione, il gruppo di lavoro:

- era a conoscenza di un elenco degli infortuni avvenuti in ambito internazionale durante alcune prove in pressione [18]. Queste informazioni hanno aiutato il team ad identificare i rischi specifici per ciascuna macro fase del processo (ii-v);

- ha considerato nel dettaglio tutte le fasi di montaggio dell'attrezzatura e di predisposizione dell'impianto di prova, che risultano esseri precedenti all'attività di vera e propria pressurizzazione ma che costituiscono in ogni caso la fonte di molti rischi che tendono a manifestarsi nelle fasi successive della prova in pressione.
- La figura 1 mostra la tabella FMEA utilizzata e per ogni campo vi è la descrizione del contenuto.

											1				2						
Macro Process Step	ID Step	Process Step	Potential Safety Failure Modes	Potential Effects of Failure	Severity	Potential Causes of Failure	Occurrence	Current Process Controls	Detectability	RPN	Recommended Action	Action Results - Preventive Actions				Action Results - Protection Actions					
												Actions Taken	Severity	Occurrence	Detectability	Actions Taken	Severity	Occurrence	Detectability	RPN	
																					Severity
Macro Step (1-vii)	ID# (1-109)	What are the process steps?	In what ways can the process step go wrong?	What is the impact of the Failure Mode on the customer?	How severe is the effect on the customer?	What are the causes of the Failure Mode?	How often does the Cause or Failure Mode occur?	What are the existing controls/procedures that prevent Cause or Failure Mode?	How well can you detect the Cause or Failure Mode?	Severity x Occurrence x Detectability	What are the actions for reducing the occurrence, decreasing severity or improving detection?	What are the Preventive Safety Actions?	How severe is the effect on the customer?	How often does the Cause or Failure Mode occur?	How well can you detect the Cause or Failure Mode?	Severity x Occurrence x Detectability	What are the Protection Safety Actions?	How severe is the effect on the customer?	How often does the Cause or Failure Mode occur?	How well can you detect the Cause or Failure Mode?	Severity x Occurrence x Detectability

Figura 1: La tabella FMEA

L'analisi FMEA e la metodologia è stata seguita come precedentemente descritto e riportato in [19].

Il piano di miglioramento ha puntato sull'identificazione delle misure di prevenzione e sulla riduzione del verificarsi delle cause, oltre a cercare di aumentare la rilevabilità di qualsiasi eventuale criticità. Questo in accordo ai contributi tratti dagli standard internazionali [1-6] e dalla letteratura scientifica come descritto nel precedente paragrafo.

Questa fase di analisi è stata condotta secondo la metodologia 7 Ways [20], che si è basata sul disegno e sulla simulazione delle soluzioni con il coinvolgimento diretto degli operatori.

La fase di identificazione delle misure di sicurezza è stata caratterizzata da due momenti: il primo, denominato "sicurezza preventiva", si è basato su un approccio preventivo e sul suo impatto per quanto riguarda il valore della probabilità di accadimento dell'evento (colonna 1 in Figura 1) contenuto nel RPN (*Risk Priority Number*). Tale indice rappresenta il parametro di riferimento per la misura del rischio associabile ad un evento di guasto per un'analisi FMEA.

In un secondo momento ci si è concentrati sui rischi residui caratterizzati da un valore di RPN che era ancora sopra la soglia di rischio valutato accettabile. Questa fase è stata denominata "sicurezza protettiva", perché ha agito sulle conseguenze di un'eventuale fatalità (colonna 2 in Figura 1). In questo caso le misure di miglioramento si sono focalizzate sulla protezione del personale, delle attrezzature e dell'impianto di prova.

## 5. Le misure di sicurezza

Partendo dalle criticità evidenziate nell'analisi dei rischi ed in accordo con gli standard internazionali e gli studi scientifici analizzati, un numero consistente di misure di sicurezza per eliminare o ridurre il livello di rischio.

Nel seguente paragrafo le principali misure di sicurezza saranno descritte in modo sintetico, venendo classificate a seconda del loro approccio: preventivo o protettivo.

### 5.1. Misure preventive

La prima azione implementata è stata il miglioramento delle disposizioni interne di sicurezza relativamente alle attività di prove in pressione. Questo documento è il riferimento per ogni reparto aziendale che intende eseguire un test in pressione.

Lo scopo del documento è quello di riferire in modo strutturato e più trasparente possibile, tutti i possibili rischi e le relative misure di sicurezza che possono essere adottate in una prova in pressione.

Nella figura seguente è riportato l'approccio adottato. Come si può vedere, sono stati identificati i rischi specifici sia per la prova di pressione idraulica che pneumatica.

Step ID	Step Description	Fluid	Risk	Preventive safety measure	Protective safety measure
		Gas			
		Liquid			
		Gas			
		Liquid			

Figura 4: Lo schema seguito per le disposizioni interne di sicurezza

Il risultato è un documento ben strutturato e sintetico che può essere considerata la base per sviluppare un nuovo progetto per un impianto per le prove in pressione o il riferimento per redigere una specifica istruzione operativa di una attività di test in pressione.

In parallelo è stato studiato uno speciale sistema di pressurizzazione che sarà in grado di attuare la maggior parte delle misure preventive che sono suggerite dagli standard internazionali. Il sistema, basato su un controllore logico programmabile, sarà caratterizzato da un processo con elevata automazione. La ragione di questo approccio è di evitare un errore umano a causa della gestione dei numerosi parametri di prova (tempo, pressione e valore di temperatura) delle diverse fasi del processo come il riempimento, la pressurizzazione, ecc.

D'altra parte un sistema automatizzato ha molti vantaggi poiché teoricamente non ci sono limiti in termini di controlli e verifiche implementabili. Ad esempio la temperatura del fluido sarà monitorata durante tutto il processo, in particolare dopo ogni componente dell'impianto come pompe, valvole, ecc che possono influenzare questa variabile. Inoltre anche la temperatura del metallo dell'apparecchiatura sarà monitorata oltre al più evidente e comune controllo della temperatura del fluido.

Un altro monitoraggio, ancora in esame, è un misuratore di portata all'ingresso dell'apparecchiatura per confrontare il volume di liquido in ingresso all'attrezzatura con il volume interno dell'apparecchiatura. Questa misurazione può essere considerata una importante misura di sicurezza preventiva per evitare la presenza di sacche di gas all'interno. Inoltre, per impedire la coagulazione delle bolle di gas durante il riempimento dell'apparecchiatura, saranno installati degli sfiati dedicati in punti specifici delle apparecchiature per facilitare l'uscita dell'aria gas.

Infine per ridurre questo rischio che spesso viene ignorato, sarà attuato il controllo della pompa di aspirazione per evitare il fenomeno della cavitazione.

L'installazione di un sistema automatizzato permette di implementare facilmente eventuali curve di pressurizzazione. In questo modo la pressione viene aumentata con un gradiente controllato come suggerito dagli standard più avanzati [1-3]. Inoltre, anche il processo di depressurizzazione può essere controllato per evitare diminuzioni violente.

Grazie a questo sistema, l'ispezione visiva ravvicinata delle apparecchiature potrebbe essere eseguita solo se la pressione dell'apparecchiatura fosse stata opportunamente diminuita e dopo averne verificato la stabilizzazione.



Infine, anche se solo lo standard [2] suggerisce questa misura, il sistema verrà fornito di valvole di scarico di sicurezza dedicate per ogni attrezzatura in prova.

## 5.2. Misure protettive

Le misure di sicurezza di protezione sono state attuate a due diversi livelli. Il primo livello è considerato il sistema in prova mentre il secondo si riferisce agli operatori.

Al fine di fornire le barriere giuste intorno all'apparecchio è stata eseguita una lunga e approfondita analisi. Il primo passo di questa analisi è stata la definizione delle caratteristiche dei possibili proiettili o frammenti. Quindi, a partire dall'analisi delle attrezzature tipiche che sono oggetto di prova, sono state identificate le eventuali parti o componenti candidate a divenire proiettili quali flange, tiranti, tappi, dadi, ecc. Poi per ogni tipologia di frammento è stata effettuata un'analisi specifica, che tenendo conto dei diversi livelli di pressione, delle caratteristiche (forma e peso) e della posizione sull'apparecchiatura dei potenziali frammenti, è stata in grado di definire lo spessore minimo delle barriere da adottare. Lo studio, grazie alle correlazioni sperimentali riportate in [10], è stato effettuato per diverse tipologie di materiali.

In questo articolo, per ragioni di riservatezza, si è deciso di non comunicare ulteriori informazioni sull'analisi di contenimento per la progettazioni delle pareti.

Il secondo livello di protezione è stato considerato direttamente l'operatore che esegue la prova in pressione. L'attrezzatura classica di protezione individuale, come caschi, occhiali, scarpe, ecc. sono ovviamente obbligatori per il personale che opera in prossimità dell'apparecchiatura e nei dintorni dei banchi prova. Inoltre, uno studio specifico è in corso per identificare possibili dispositivi "speciali" di protezione come giubbotto antiproiettile e casco per garantire un livello di protezione più elevato per il personale.

## **Conclusioni**

Questo articolo è il risultato di alcuni studi ed analisi che sono stati effettuati nel corso del progetto per la riprogettazione dei banchi prova per l'esecuzione delle prove in pressione sui prodotti di un'azienda del settore metalmeccanico. Il fabbricante delle apparecchiature ha deciso di effettuare un'analisi dei rischi di questa particolare fase del processo produttivo al fine di individuare e valutare tutti i potenziali rischi legati alla specificità delle attività svolte.

L'analisi è stata effettuata per ogni singola fase del processo di prova in pressione tramite l'approccio FMEA. Il gruppo di lavoro ha identificato tutti i rischi, le relative cause e gli effetti dei potenziali incidenti. Poi attraverso l'indice RPN ha valutato l'effettivo livello di rischio della configurazione "AS IS" ed ipotizzando le necessarie misure di sicurezza ha stimato la configurazione "TO BE".

Al fine di individuare le migliori misure di sicurezza è stata eseguita un'approfondita ricerca tramite gli standard internazionali e la letteratura scientifica a disposizione.

Lo studio ha evidenziato come al momento non è disponibile una norma tecnica esaustiva, contenente cioè tutti i requisiti di sicurezza di riferimento per lo svolgimento di una prova in pressione. Il miglior standard può essere considerato il codice europeo EN13445 che rappresenta una sintesi dei codici di calcolo nazionali BS5500 ed AD2000. Tali norme riportano il maggior numero di misure di sicurezza ed in molti casi dimostrano un approccio preventivo.

D'altra parte lo studio della letteratura suggerisce un gran numero di studi sperimentali sui sistemi di protezione contro l'esplosione. La modellazione di energia rilasciata durante un'esplosione è il punto di partenza di molti lavori che spesso riportano i risultati in termini di correlazione sperimentale per la progettazione dei muri di contenimento e delle barriere protettive. Si valuta quindi che la mancanza di studi in materia di analisi dei rischi della prova in pressione sia la ragione del deficit in termini di approccio preventivo.

È noto che una misura di sicurezza preventiva è più efficiente ed efficace rispetto ad una di tipo protettivo. Quindi, a partire dallo stato dell'arte sono state individuate le misure di sicurezza più adatte per il nostro caso di studio preferendo le azioni preventive. Tuttavia un importante studio sulle barriere è stato effettuato per eliminare i rischi residui dovuti al pericolo di esplosione.

## **Bibliografia**

- [1] EN13445:2009 – Unfired Pressure Vessels, EU.
- [2] 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels, ASME.
- [3] BS5500 – Specification for unfired, fusion welded pressure vessels, BSI.
- [4] CODAP2000 – Code français de construction des appareils à pression non soumis à l'action de la flamme.
- [5] VSR Rev.'95 and Raccolta E – Specificazioni tecniche applicative del D.M. 21.11.1972 per la verifica di stabilità dei recipienti a pressione.
- [6] AD2000-Merkblatt – Technical rule for pressure equipment.
- [7] Espraza E D , Baker W E. Measurement of blast waves from frangible spheres pressurized with flash evaporative vapour or liquid. NASA contractor report 2811. Contract NSG-3005, 1977.
- [8] Moore C V. The design of barricades for hazardous pressure system. Nuclear Engineering and Design. Vol. 5, 1967.
- [9] Baum M R. Velocity of a single small missile ejected from a vessel containing high pressure gas. Journal of Loss Prevention. Vol. 6, 1993.
- [10] Saville G, Richardson S M, Skillerne de Bristowe B J. Pressure test safety. HSE Contract Research Report 168. 1998.
- [11] Brown S J. Energy release protection for pressurized system. Part II. Review of studies into impact/terminal ballistics. Transaction ASME, Applied Mech. Rev., Vol. 39, 1986.
- [12] Kennedy R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact. Nuclear Engineering and Design. Vol. 37, 1976.
- [13] Smith P D, Hetherington T G. Blast and ballistic loading structures. Butterworth-Heinemann, 1994.
- [14] Ayvazyan H. Structures to resist the effects of accidental explosions. Volume II, blast, fragment and shock loads. Special publication ARLCD-SP-84001, US Army Armament Research, 1986.
- [15] Brown S J. Energy release protection for pressurized systems. Part I. Review of studies into blast and fragmentation. Transaction ASME, Applied Mech. Rev., Vol. 38, 1985.
- [16] Brown S J, Brown T J. Hazardous release protection: code and standard considerations for pressure systems. Process Safety Progress. Volume 14, Issue 4, pages 244–256, 1995.
- [17] Baker W E, Cox P A, Westine P S, Kulesz J J, Strehlow. Explosive hazards and evaluation. Elsevier, New York, 1983.
- [18] Gurnari G, Mulè G, Palumbo N. La valutazione del rischio nella prova a pressione di attrezzature metalliche. Proceedings. ISPESL Dipartimento di Brescia ed Udine.
- [19] MIL–STD–1629A. A procedure to perform a failure mode, effects and criticality analysis. Military Standard, 1988.
- [20] Womack J P, Jones D T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Revised and Updated. Simon&Schuster, New York, 2003.