

CORTE D'APPELLO DI ROMA

PROCEDIMENTO N. 6944 / 2010 R.G.

PREMESSA

Questa relazione ha il precipuo scopo di rispondere al quesito posto nell'ordinanza emessa in data 1 marzo 2013 dalla Corte di Appello di Roma, *Sezione Terza Civile – Presidente Dott. Antonio Azara*, in relazione alla causa civile di appello iscritta al numero 6944 del ruolo generale dell'anno 2010:

“Dica il c.t.u., esaminati gli atti del presente giudizio e del giudizio penale e, se occorra, svolti tutti gli accertamenti che riterrà del caso: se l'autoclave n. 5 per cui è processo ebbe a scoppiare - nell'accezione di repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna – e, in caso affermativo, per quali cause, se la pressione interna abbia superato il limite previsto (pressione di esercizio), che il c.t.u. vorrà descrivere e illustrare, per il macchinario per cui è processo; - quale pressione interna era necessaria e sufficiente per provocare lo scoppio dell'autoclave e se la detta pressione era superiore, e in che termini, assoluti e percentuali rispetto alla pressione di esercizio; - quale intervallo di tempo intercorse tra l'aumento della pressione interna e l'ipotizzato scoppio; - se tale intervallo di tempo poteva essere rilevato e registrato con precisione dal sistema computerizzato di controllo della cottura del calcestruzzo all'interno dell'autoclave; - se l'acciaio della flangia di sicurezza dell'autoclave aveva spessore e composizione chimica idonei agli sforzi da sopportare e/o fossero presenti vizi strutturali; - quantifichi il danno subito da Italgasbeton.”

A tal fine la relazione sarà organizzata secondo il seguente impianto logico:

1. In via preliminare chiariremo, sia sulla base di quanto largamente diffuso ed accettato nella letteratura tecnica che, soprattutto, in riferimento alla definizione di scoppio posta nel quesito e cioè *“repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna”* cosa debba intendersi per *“scoppio”* di un recipiente in pressione, anche in relazione alle sostanze in esso contenute.
2. Sulla base di una pubblicazione scientifica di fonte altamente specialistica e qualificata dettaglieremo le fasi tipiche che caratterizzano lo scoppio di recipienti in pressione nei quali, come nel nostro caso, sia presente, in opportuna quantità, una sostanza (acqua nel caso in questione) nelle due fasi liquida e vapore anche, eventualmente, in contemporanea presenza di altre sostanze in fase solida.
3. Faremo un breve cenno ai processi industriali basati sulla tecnologia *“steam explosion”* che hanno una precisa attinenza con il fenomeno di scoppio di cui stiamo trattando.
4. Sulla base delle consolidate conoscenze della termodinamica e della fluidodinamica, forniremo su basi scientifiche una risposta alle parti quantitative del quesito.
5. Concluderemo fornendo risposte puntuali al complesso quesito posto dal Collegio Giudicante.

Senza alcun dubbio, in ogni caso, l'analisi dimostra che l'autoclave n. 5, per cui è processo, ebbe a scoppiare - nell'accezione di repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna creatasi per l'istantanea autovaporizzazione (flashing) della enorme massa di acqua liquida presente all'interno dell'autoclave non appena è avvenuto il contatto con l'ambiente.

FENOMENOLOGIA DELLO SCOPPIO DI UN RECIPIENTE IN PRESSIONE

Lo scoppio di cui si tratta è già sinteticamente, ma con assoluta precisione scientifica, definito nel quesito:

“..... se l'autoclave n. 5 per cui è processo ebbe a scoppiare - nell'accezione di repentinamente dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna -”

Lo scoppio di un recipiente si concretizza infatti nel dirompersi dello stesso con conseguente proiezione a distanza di parti più o meno consistenti del suo mantello e del contenuto; allo scoppio è associato un fenomeno acustico dovuto alle onde di pressione che si propagano nell'ambiente con percezione uditiva simile a quella dovuta a una esplosione. Senza proiezione a distanza di parti meccaniche non c'è scoppio ma, al più, rottura del recipiente con eventuale fuoriuscita di parte o tutto del suo contenuto.

Si contemplano diversi casi, in funzione del contenuto e delle cause che determinano l'evento.

In merito al contenuto, omettendo la presenza di eventuali sostanze inerti, la casistica comprende:

1. Presenza di un liquido;
2. Presenza di un gas;
3. Presenza di sostanza bifase (liquido e vapore).

Le cause che innescano lo scoppio possono essere molteplici:

- a. La formazione di una apertura nell'involucro verso l'esterno per qualunque motivo (corrosione con conseguente riduzione della sezione resistente, cedimento di una parte più o meno consistente per qualsivoglia motivo,);
- b. L' aumento della pressione interna per qualsiasi causa;
- c. L'apporto improvviso di grandi quantità di calore.

In definitiva l'innescò di uno scoppio, se si escludono le trasformazioni chimiche caratterizzanti le esplosioni, è sempre dovuto alla formazione di una via primaria di comunicazione tra l'ambiente interno e quello esterno qualunque sia la causa del cedimento iniziale del guscio contenitore.

Comunque in relazione all'argomento di cui si tratta, in considerazione della dinamica del fenomeno, delle caratteristiche del sistema di alimentazione di vapore e di quanto conosciamo dal sistema di monitoraggio, possiamo individuare la causa a. (cedimento strutturale che creò una via di comunicazione verso l'esterno) come quella scatenante lo scoppio.

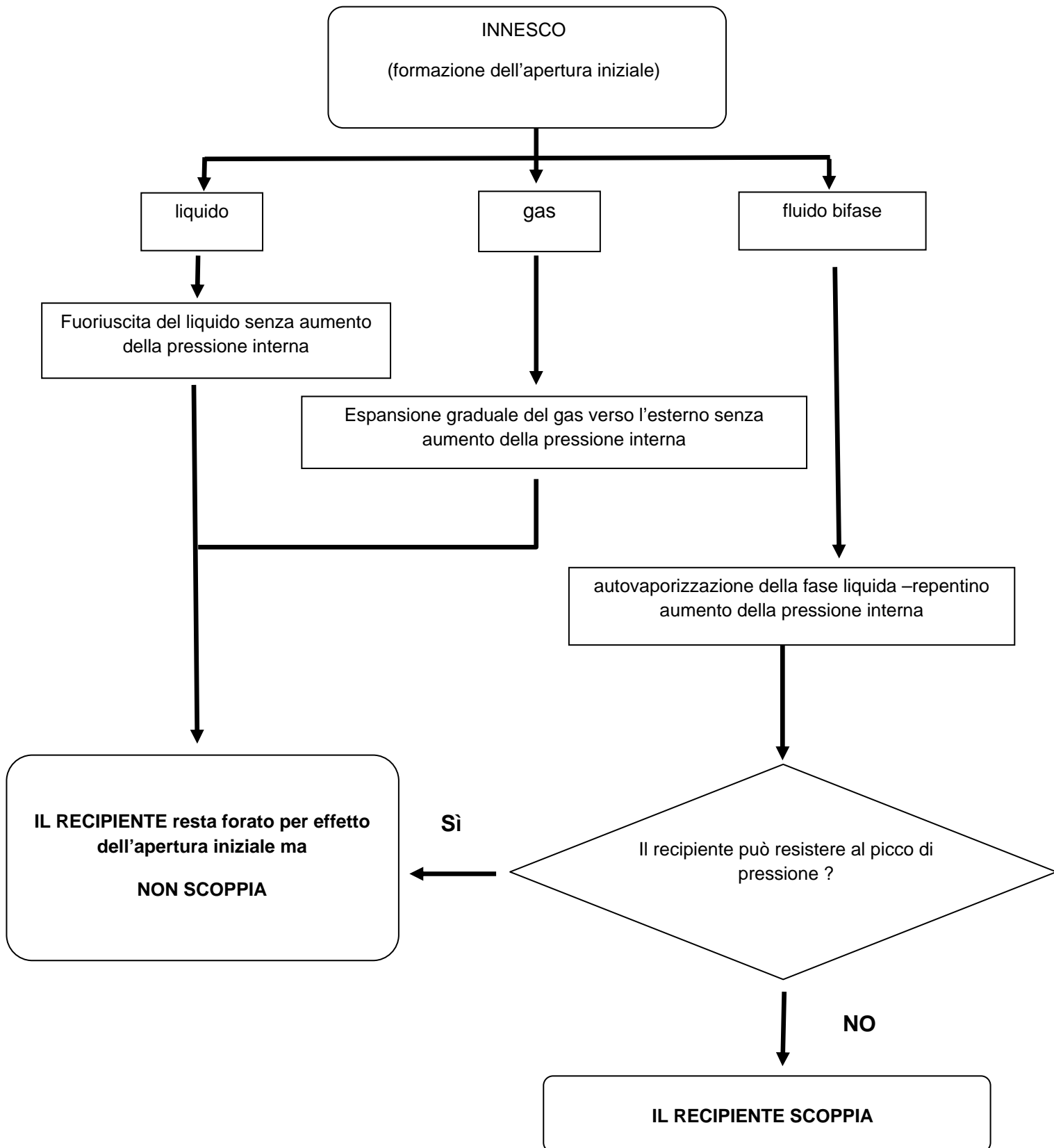
Si ricordano gli esiti catastrofici dell'evento:

1. proiezione a grande distanza degli spezzoni in cui si frantumò l'autoclave:
 - a. coperchio di chiusura (1 tonnellata – scagliato a 40 m di distanza),
 - b. corpo autoclave (165 tonnellate, materiale compreso, scagliato a circa 80 metri di distanza),
 - c. fasce di chiusura ed altre parti meno consistenti sparse in un raggio di circa 100 m.
2. rottura degli ancoraggi e delle tubazioni di alimentazione e drenaggio;
3. ingenti danni al capannone ed all'impianto di produzione;
4. distruzione di cataste di materiale accantonato in attesa di spedizione;
5. decesso di un dipendente.

Quanto elencato è indubbiamente testimonianza di uno scoppio di elevatissima intensità, sia secondo l'accezione comune che sulla base di precise catalogazioni scientifiche. Interpretando alla lettera il quesito, si tratta di stabilire se la distruzione del recipiente con gli esiti catastrofici descritti fu o meno provocata da un consistente aumento della pressione interna.

Abbiamo già chiarito che il prodromo dello scoppio di un recipiente in pressione è necessariamente il crearsi di una apertura, per qualunque causa, nel guscio dello stesso. La formazione di questa apertura iniziale può

però determinare esiti finali assai diversi, come schematizziamo nel diagramma di flusso sottostante a seconda della resistenza strutturale del recipiente e delle sostanze contenute. L'intensità dell'evento dipende ovviamente anche dall'energia potenziale di pressione e termica immagazzinata nel fluido presente all'interno.



L'autovaporizzazione (flashing nella letteratura scientifica anglosassone) è un fenomeno termodinamico ben noto. Questo fenomeno avviene in un liquido mantenuto all'interno di un contenitore nel quale sia presente una pressione superiore a quella esterna. In tali condizioni il liquido ha temperatura di ebollizione più elevata di quella a cui bollirebbe alla pressione ambiente (analogamente a quanto avviene in una pentola a pressione). Se improvvisamente, per qualunque ragione, la pressione interna viene fatta bruscamente diminuire (ad es. per una prima apertura verso l'esterno) il liquido, non più in equilibrio termodinamico, (l'entalpia attuale è maggiore di quella finale), vaporizza pressoché istantaneamente in cospicua parte dipendente dalla caduta di pressione con effetti che possono risultare micidiali. Si tenga ad esempio conto che in relazione alle condizioni presenti nell'autoclave al momento dello scoppio il volume specifico del vapore d'acqua è circa 1700 volte superiore a quello dell'acqua in fase liquida: in termini elementari una massa di una tonnellata di acqua che in fase liquida occupa 1 metro cubo di contenitore, sotto forma di vapore deve occupare 1700 metri cubi dello stesso contenitore. Inoltre la trasformazione è pressoché istantanea.

Nel caso in esame all'interno dell'autoclave era presente, come vedremo, una consistente quantità di acqua in fase liquida (circa 19 tonnellate) insieme al vapore di alimentazione dell'autoclave. Una apertura iniziale, individuata nell'indagine penale nel cedimento del sistema di blocco del portellone di servizio, provocò, in una prima fase una caduta della pressione interna fino all'innescò del flashing dell'acqua in vapore. Il flashing determinò un picco di pressione interna che sollecitò la struttura dell'autoclave al di sopra della resistenza del suo elemento strutturalmente più debole (il sistema di chiusura del portellone) provocando lo scoppio catastrofico. Le fasi dell'evento, che dettaglieremo e quantificheremo nel seguito della relazione, sono così ricostruibili:

- a. Cedimento delle asole di blocco del sistema di chiusura (vedi relazione del CTU incaricato dal PM nel corso dell'indagine penale);
- b. Formazione di una apertura iniziale tra corpo e portellone testimoniata dallo svergolamento della flangia solidale al portellone stesso – a tale apertura contribuì non poco anche la perdita della guarnizione non più pressata in posizione dal portellone non perfettamente chiuso;
- c. Caduta di pressione interna;
- d. Flashing;
- e. Elevatissimo aumento della pressione interna conseguente al flashing;
- f. Scoppio con proiezione a distanza del portellone e del corpo autoclave con effetti disastrosi anche sulle strutture industriali (impianti e capannone).

Quanto sopra premesso è acclarato in una copiosa messe di pubblicazioni scientifiche. Tra la documentazione reperibile in Testi e Riviste specializzate e in siti Internet sull'argomento riteniamo di interesse particolare:

→ la relazione di *Richard E. Jagger, NBBI – National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors* (Consiglio Nazionale degli Ispettori delle caldaie e dei recipienti in pressione) al 53° General Meeting, Charlotte, North Carolina, 24/04/1984 <http://www.hsengco.com/nbexplosion/>

→ la relazione di *William Axtman – National Board Inspections Code Bulletin*, inverno 1996.

→ l'articolo *Compression and Decompression Waves in Steam-Water Systems* di *Miyazaki e altri*, Università di Osaka, 1972

La relazione di Jagger è allegata alla presente memoria, Allegato n. 1

INTRODUZIONE

Ricordiamo che nella lingua inglese per l'evento in oggetto non è disponibile la distinzione tra i due termini *scoppio* ed *esplosione*, presente nella lingua italiana secondo cui lo *scoppio* è *dovuto solo a cause fisiche* mentre nell'esplosione sono coinvolte *reazioni chimiche*.

In entrambi i casi, comunque, il contenitore interessato viene distrutto e parti di esso, più o meno grandi, sono proiettate a distanza con danni consistenti, come ben documentato, all'edificio che lo alloggia e alle persone eventualmente presenti anche a distanza.

Secondo Jagger ci si riferisce a uno *scoppio* (*explosion* nel testo originale) quando si verifica un improvviso e casuale dirompersi di un contenitore in conseguenza di un fenomeno espansivo di massa caratterizzato da grandissima velocità cui è associato un fenomeno acustico di carattere impulsivo provocato da onde di pressione tanto che da lontano può essere confuso con la deflagrazione di una bomba.

Esistono diversi meccanismi di innesco degli scoppi ma l'autore si sofferma su quelli noti come "vapor explosion", tipici dei *Generatori di vapore a tubi di fumo*, (N.d.R.) e dei recipienti a pressione contenenti grande massa di acqua, (N.d.R. - come nel caso dell'autoclave Italgasbeton).

Secondo Jagger: "*A vapor explosion occurs when a liquid phase transforms quickly into a gas phase, causing a rapid explosive pressure increase*" e cioè un'esplosione (scoppio, N.d.R.) di vapore accade quando una massa liquida passa repentinamente allo stato gassoso, provocando un improvviso ed esplosivo aumento della pressione.

Jagger individua due cause di innesco di tali esplosioni, di diversa natura fisica, e cioè :

1. *Presenza di liquido surriscaldato sotto pressione (è il caso Italgasbeton);*
2. *Surriscaldamento dovuto a un rapido trasferimento di calore.*

Secondo Axtman, una *steam explosion* è una violenta vaporizzazione (flashing di acqua liquida in vapore) che avviene se il liquido si trova ad essere surriscaldato, oppure riscaldato rapidamente per interazione con metalli fusi (negli impianti nucleari) o per eventi più rari (impurezze calde).

Il passaggio di stato liquido-gas è estremamente rapido (**ordine di 1 / 100 ÷ 1 / 1000 di secondo**) ed è caratterizzato da enormi aumenti di volume in quanto l'aeriforme generato ha volume specifico *anche migliaia di volte superiore a quello del liquido che lo genera.*

Per tali proprietà *il flashing somiglia ad una esplosione (per i suoi effetti): l'effetto del flashing è una violenta proiezione di masse liquide e gassose e di materia solida presente per riscaldamento internamente al contenitore in tutte le direzioni sulle pareti di questo.*

I contenitori di acqua in pressione sono sedi potenziali di "steam explosion".

Altre sedi sono le tubazioni in cui *si è accumulato condensato in quantità rilevante quando in esse la pressione scende rapidamente.*

Jagger analizza quindi il caso 1, in cui il liquido si trova in un recipiente chiuso e riscaldato per effetto della pressione ad una temperatura superiore a quella di ebollizione alla pressione esterna.

Se una parte del contenitore *cede* (Jagger indica tra le cause un aumento della pressione interna, ma il fenomeno che segue è lo stesso qualunque sia la causa di rottura iniziale del recipiente, NdR) si registra in una prima fase una caduta della pressione interna che avviene in un brevissimo intervallo di

tempo determinando così uno squilibrio tra la temperatura del liquido presente all'interno e quella corrispondente alla nuova pressione cui si è portato.

Il liquido si trova quindi in uno stato di surriscaldamento con un'energia entalpica in eccesso che viene impegnata da una autovaporizzazione pressoché istantanea. A questa può essere attribuito l'inizio della fase "esplosiva" del fenomeno.

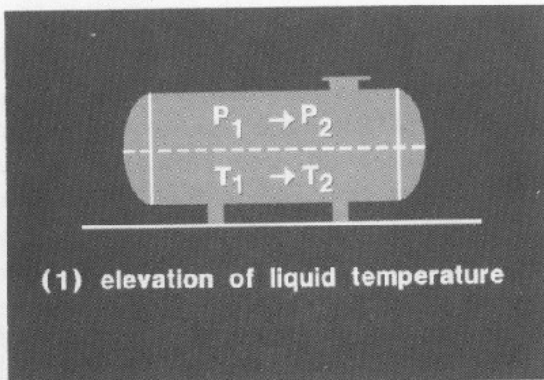
La dinamica di tale esplosione (più propriamente scoppio, nella lingua italiana, poiché non intervengono reazioni chimiche ma solo fenomeni termo fisici - NdR) evolve in un insieme di fenomeni fluidodinamici consistenti nella formazione di una serie di onde di pressione che si propagano e si riflettono alla velocità dell'ordine di quella del suono scaricando i loro effetti meccanici sulle pareti del contenitore che confina l'evento; come conseguenza, secondo Jagger, il recipiente si disgrega frammentandosi in modo casuale (random).

A parere degli scriventi è esattamente questo il fenomeno che ha distrutto l'autoclave n. 5

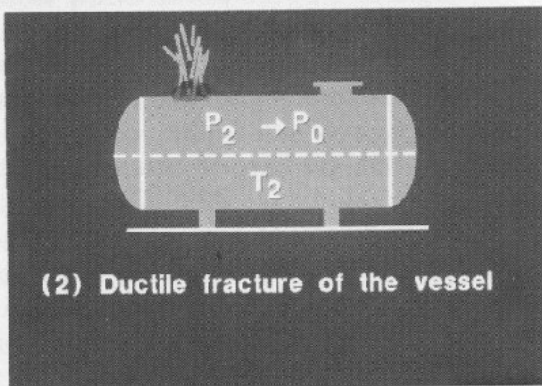
I frammenti nel nostro caso non sono stati pezzi di piccole dimensioni ma il corpo stesso dell'autoclave (proiettato a distanza), il portellone di chiusura lato ingresso (anch'esso proiettato a distanza) e le ganasce di chiusura di esso (proiettate a distanza).

Fasi dello scoppio

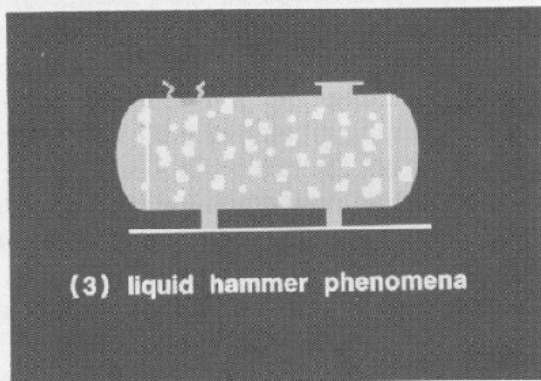
Jagger illustra le fasi dello scoppio di un recipiente in pressione contenente acqua in fase liquida e aeriforme con una serie di 10 figure (slide) che commentiamo nel seguito, secondo le indicazioni dell'autore, e riferendo le fasi descritte a quanto accaduto in relazione all'autoclave di cui si tratta.



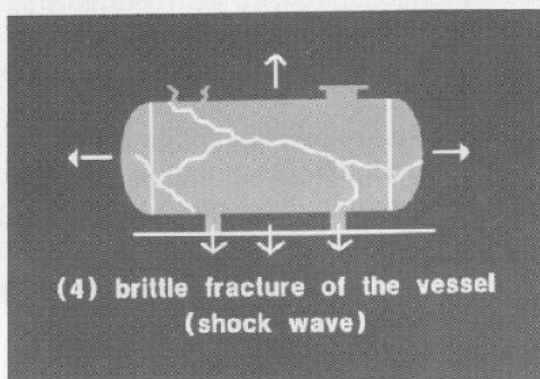
Slide 1



Slide 2

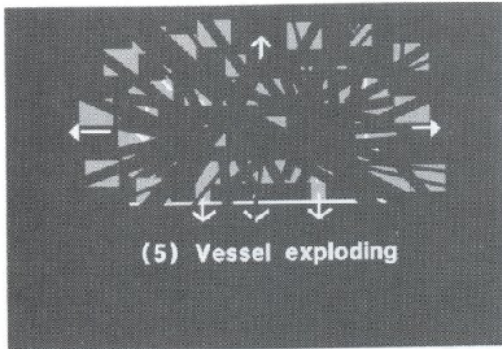


Slide 3

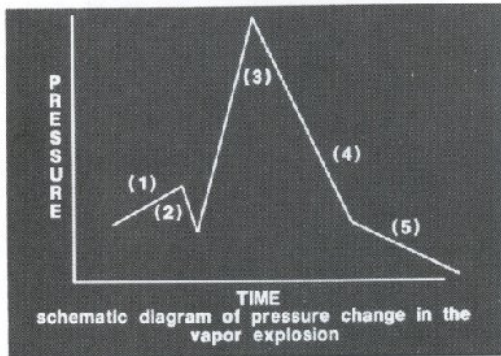


Slide 4

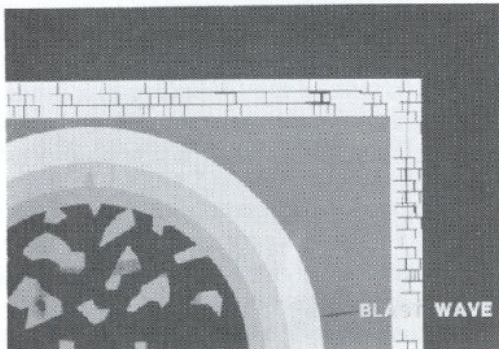
(continued)



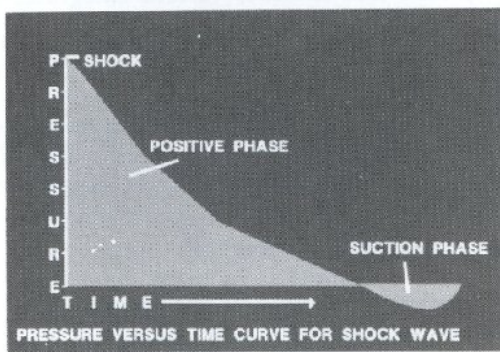
Slide 5



Slide 6



Slide 7



Slide 8

(continued)

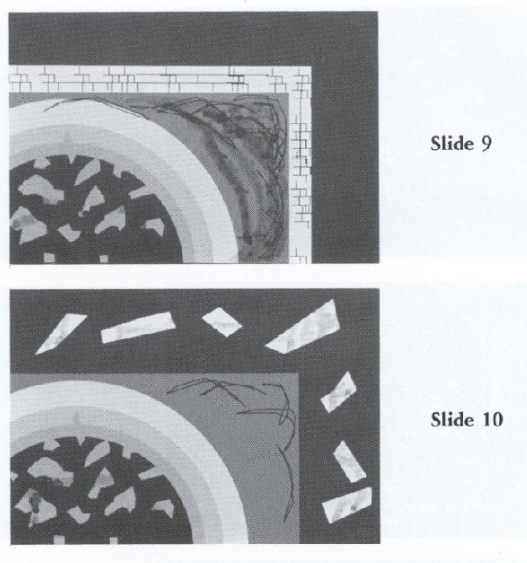


Figura 1 – Le fasi che caratterizzano lo scoppio per auto vaporizzazione secondo Jagger

Commento, fase per fase, della presentazione di Jagger

Figura (Slide) 1. Riguarda la fase di messa in pressione dell'autoclave. Fornendo calore la temperatura dell'acqua presente all'interno cresce da T_1 a T_2 e contemporaneamente, nel vapore si registra un incremento della pressione da p_1 a p_2 . Nei grafici 1 e 2 sono riportati con curve in celeste gli andamenti di T e p registrati ogni 10 min dal sistema di monitoraggio computerizzato dell'impianto all'interno dell'autoclave n. 5 durante il processo seguito dallo scoppio. Le curve in rosso rappresentano i valori impostati come valori di regime. Si constata che al momento dell'ultima registrazione effettuata alle ore 5:52, quindi 88 minuti dopo l'inizio del processo, all'interno dell'autoclave non erano ancora state raggiunte le condizioni di regime impostate.

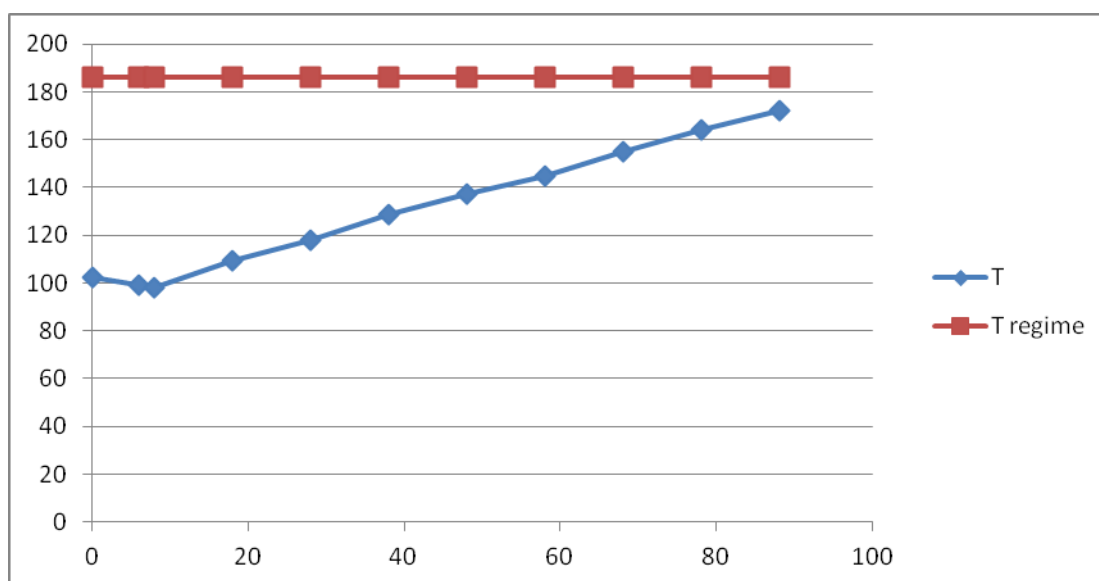


Grafico 1 – registrazione della temperatura del processo (°C – min)

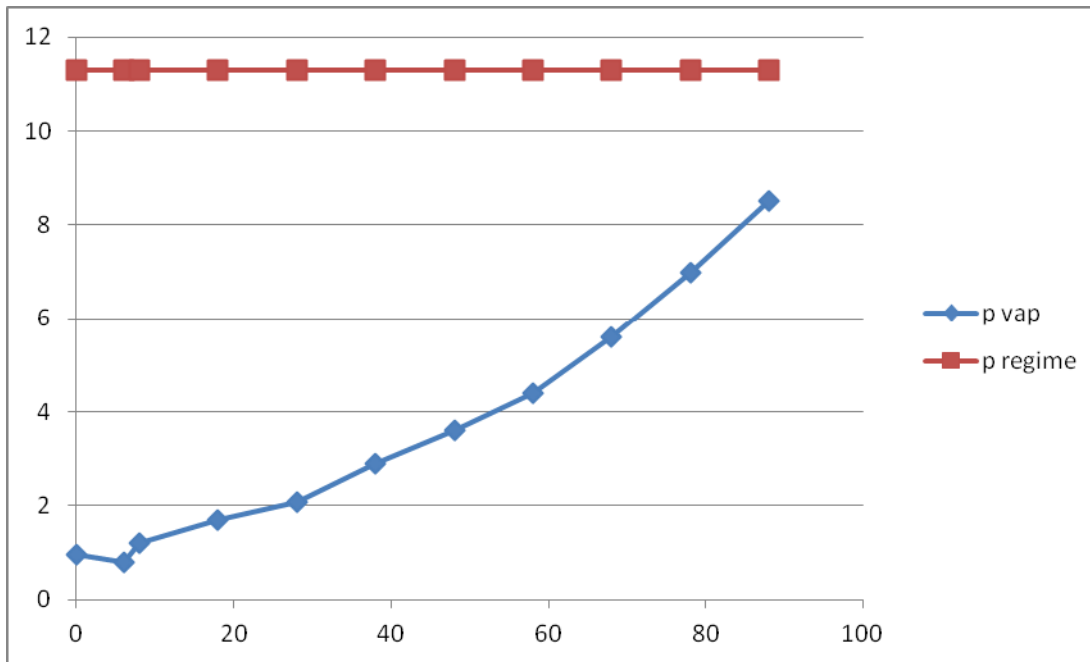


Grafico 2 – registrazione della pressione del processo (bar – min)

Figura (Slide) 2. Per un qualunque motivo si genera un’apertura nel contenitore, da considerarsi “ampia” (e non una fessura), per cui la pressione interna cade rapidamente dal valore p_2 al valore p_0 (pressione ambiente = p_0) mentre la temperatura resta al valore T_2 .

Figura (Slide) 3. Il sistema bifase non è più in equilibrio poiché a p_0 la fase liquida a T_2 è surriscaldata. E’ presente uno squilibrio entalpico che viene utilizzato per una evaporazione repentina di una parte rilevante del liquido – fenomeno noto come flashing – che avviene in pochi millisecondi con formazione di un volume enorme perché il vapore prodottosi alla pressione ambiente occupa un volume circa 1700 volte superiore a quello originariamente occupato dalla corrispondente fase liquida.

Ne nasce una serie di violente onde di decompressione-compressione nel contenitore. Il risultato è uno shock meccanico per la superficie interna del mantello, (noto come steam hammer). Parte del liquido si proietta verso le pareti anche sotto forma di gocce e particelle.

Figura (Slide) 4. Il colpo d’ariete “*steam hammer*” fa sentire i suoi effetti sul recipiente predisponendolo a fratturarsi per eccesso di sollecitazione interna. Nel nostro caso cederà la parte più debole di tutta la struttura e cioè il sistema di chiusura e bloccaggio del portellone lato ingresso. Si osserva del resto che lo stesso Jagger nella parte introduttiva afferma che la morfologia della disgregazione del contenitore è casuale (random – NdR)

Figura (Slide) 5. Il risultato è la completa distruzione del contenitore con la generazione di onde di pressione esterne che possono avere effetti letali. Il fenomeno esterno è anch’esso provocato dal flashing, cioè dalla repentina vaporizzazione della fase liquida non più in equilibrio con le condizioni assicurate dal recipiente integro.

Figura (Slide) 6. È la più significativa per l'interpretazione del fenomeno: Jagger delinea un grafico che sintetizza l'andamento della pressione interna durante le fasi del fenomeno prima descritte. In pratica viene presentato l'andamento tipico della pressione interna durante la successione di fasi che caratterizza lo scoppio. Il grafico riporta infatti l'andamento della pressione in funzione del tempo. Per comodità di lettura il grafico è ripreso ingrandito nella figura n. 2 sottostante.

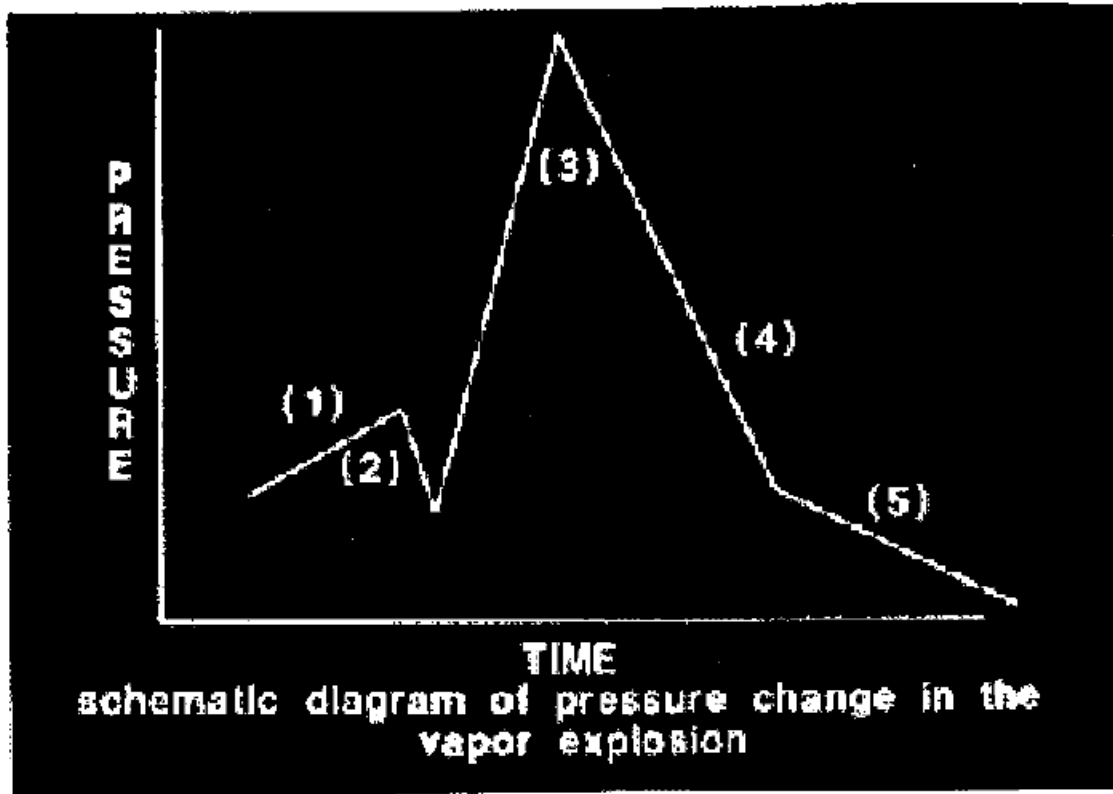


Figura n. 2 (slide 6) - *Variazione della pressione all'interno del recipiente (secondo Jagger)*

Il grafico è puramente schematico, con l'asse dei tempi in certe fasi espanso ed in altre compresso, avendo solo lo scopo di evidenziare i diversi fenomeni senza valutazioni di carattere quantitativo.

- Il tratto (1) rappresenta l'incremento di pressione nella fase di riscaldamento del contenitore (da T_1 a T_2 , rif. slide n. 1)
- Il tratto (2) rappresenta il calo rapidissimo (ordine di millisecondi secondo l'autore) della pressione per effetto della apertura "ampia" (prima fase di rottura dell'involucro – NdR) che ha innescato il flashing
- Il tratto (3) rappresenta il repentino incremento della pressione fino al suo picco massimo in seguito alle onde generate dal flashing
- Il tratto (4) rappresenta la subitanea caduta di pressione conseguente alla rottura totale del contenitore
- Il tratto (5) rappresenta la fase di estinzione del fenomeno.

Indipendentemente dalle cause, tutti gli scoppi sono caratterizzati da un'onda d'urto che si genera immediatamente percorrendo il mezzo (gassoso o liquido) in cui avviene. La velocità dell'onda d'urto è strettamente dipendente dalla velocità del suono (circa 470 m/s per vapore d'acqua a 100°C).

La salita di pressione è talmente veloce da generare una serie di onde di pressione di carattere impulsivo. La velocità di queste onde dipende dalla sovrappressione che si forma sul fronte d'onda; inizialmente è sempre superiore alla velocità del suono ma poi diminuisce portandosi alla sonica quando l'intensità dello scoppio si attenua.

Tali onde hanno un periodo di ~ 3 millisecondi, con un'intensità che può arrivare a 2100 bar.

Figura (Slide) 7. Gran parte dell'energia dello scoppio si concentra nell'onda d'urto, soprattutto sotto forma di lavoro di compressione e di energia cinetica dello spostamento d'aria conseguente al flashing. Parte consistente dell'energia dell'onda d'urto è trasferita ai successivi strati d'aria via via che il fronte d'urto avanza. L'area frontale interessata al fenomeno aumenta con il quadrato della distanza, permettendo all'energia di diffondersi capillarmente nello spazio circostante.

Figura (Slide) 8. L'aria interessata al fronte dello shock prende forza e avanza mentre viene compressa. Lo spostamento d'aria avviene con velocità correlabile alla pressione dell'aria stessa. La regione con pressione positiva situata dietro il fronte di avanzamento dell'onda d'urto dura solo pochi millesimi di secondo. In direzione trasversale rispetto all'avanzamento dell'onda d'urto si genera una zona con pressione inferiore a quella atmosferica che provoca uno spostamento d'aria in direzione opposta. Questo causa danni minori. Pertanto la maggior parte degli effetti distruttivi sono attribuibili all'onda d'urto.

Figura (Slide) 9. All'interno di un fabbricato l'onda d'urto si riflette sulle pareti, sulle quali si genera localmente una sovrappressione che può essere anche otto volte maggiore della pressione originaria.

Figura (Slide) 10. In ambiente confinato i danni possono essere più consistenti e interessare tutte le parti strutturali prima che la pressione ambiente si riequilibri.

RIFERIMENTO ALL'AUTOCLAVE N. 5 DELLA ITALGASBETON

Lo scoppio dell'autoclave n. 5 dello stabilimento Italgasbeton di Anagni ha seguito una dinamica del tutto simile, appresso descritta.

Fase 1. All'interno dell'autoclave è presente, insieme al materiale solido, una massa d'acqua liquida valutabile in oltre 19,5 t, per gran parte (19,2 ton) contenuta nel materiale in maturazione, parte (0,5 ton) raccolta sul fondo del contenitore. Dopo 88 min dall'avvio del processo di riscaldamento, lo scoppio è avvenuto innescandosi, dopo che il processo di cottura del materiale aveva raggiunto la fine del tratto (1) di figura 2 – quando la pressione e la temperatura avevano i valori $p_2 = 9,7$ bar e $T_2 = 179,4$ °C (vedi relazione del CTU del procedimento penale).

Fase 2. Per le cause tecniche già appurate nel procedimento penale (senza profili di responsabilità imputabili a Italgasbeton) si forma una apertura verso l'esterno localizzata nella periferia del portellone lato ingresso ceduto, testimoniata dallo strappamento dei fori su cui era impegnato il perno di blocco delle fasce

di chiusura. In linea puramente teorica le fasce, data la forma della loro sezione e nell'ipotesi di geometria perfetta, potrebbero effettuare la loro azione di chiusura anche solo grazie all'attrito presente tra le facce interne del profilato a C da cui sono ricavate e le superfici laterali esterne delle flange presenti sul portellone e sul corpo dell'autoclave.

Nella realtà sono presenti inevitabili giochi e leggere deformazioni che non rendono possibile il contatto su tutta la porzione di superficie anulare disponibile in una geometria perfetta.

Nel corso dell'indagine penale, lo scrivente prof. Toni ipotizzò e verificò diverse cause alla base del cedimento strutturale riscontrato; la più probabile o comunque quella che sollecitava maggiormente il componente rotto consisteva nella dilatazione termica associata alla fase transitoria iniziale di riscaldamento. La fasciatura dell'autoclave lavora alla stregua di una cintura nella quale la fibbia rappresenta il perno che si incunea nei due fori dei lamierini sagomati e saldati sulle fasce. Ovviamente se la pancia si dilata, la cintura viene messa in tensione finché la sua parte più debole (la "fibbia") cede di schianto.

Questo potenziale meccanismo di rottura fu ben evidenziato e validato dalla presenza dell'impronta delle flange sul fondo interno profilato a C delle fasce.

In una corretta geometria (vedi disegni) a fascia bloccata deve restare un gioco radiale che consenta la dilatazione delle flange senza che esse tocchino il fondo delle fasce.

Tale ipotesi di cedimento è assai plausibile anche perché la rottura si verificò verso la fine della fase di riscaldamento quando la dilatazione termica aveva determinato i suoi massimi effetti.

Non fu possibile effettuare verifiche metrologiche attendibili a causa delle deformazioni subite dai diversi componenti in seguito allo scoppio.

Può sorgere la domanda del perché la rottura di schianto dell'asola sia avvenuta proprio in quella cottura e non nei precedenti 1600 cicli circa a cui era stata sottoposta l'autoclave.

Il dubbio può essere superato per le incertezze di posizionamento (anche solo di un / due millimetri) della fascia di chiusura derivanti da una progettazione mal eseguita e/o da una costruzione che non assicurava in tutti gli aspetti funzionali (termici e meccanici) adeguata sicurezza strutturale del sistema di chiusura.

In definitiva, qualunque sia stata la causa della rottura delle asole, il loro cedimento di schianto (vedi perizia del prof. Jacoviello) generò un contraccolpo che alterò l'equilibrio delle fasce che tenevano bloccato il portellone sul corpo dell'autoclave.

Si generò così uno scorrimento tra fasce e flange che, anche per effetto dei giochi e delle deformazioni, creò una via di comunicazione tra interno autoclave ed esterno.

Nella slide 2 di figura 1 Jagger ipotizza una prima rottura duttile localizzata del mantello del contenitore (che non ha portelloni) come adeguata via di comunicazione tra interno ed esterno per provocare la caduta di pressione che fa da innesco al flashing.

Nel nostro caso la via di comunicazione si è generata associata al cedimento dell'asola di sicurezza del meccanismo di blocco del portellone; infatti le due fasce di chiusura, non più bloccate dal perno che attraversava le due asole, si sono mosse anche per l'impulso conferito dalla "schianto" della rottura indebolendo fatalmente il sistema di chiusura del portellone.

La prova di ciò è evidenziata dallo svergolamento subito della flangia del portellone mentre essa si sfilava gradualmente dalle due fasce di chiusura con sezione a C, liberate dal cedimento dell'asola prima ricordato.

Probabilmente a determinare questa prima fatale via di comunicazione verso l'interno dell'autoclave ha contribuito anche il cedimento delle guarnizioni dovuto alla perdita della corretta geometria di posa conseguente al cedimento meccanico del sistema di blocco.

In sintesi, non appena le dimensioni dell'apertura sono state tali da ridurre la pressione interna alla pressione atmosferica, si è innescata la sequenza di fasi con cui Jagger ha catalogato lo scoppio fino a culminare nel *flashing* con le relative conseguenze catastrofiche.

Le deformazioni meccaniche descritte sono visibili sul portellone che presenta la flangia visibilmente svergolata (vedi foto di figura n. 3).

Tale deformazione è stata provocata dal graduale sfilamento della flangia dalle fasce di serraggio che la bloccavano all'altra flangia presente sul corpo dell'autoclave: se la deformazione fosse dovuta agli urti conseguenti la proiezione a distanza, invece di presentare uno svergolamento continuo, avrebbe deformazioni di carattere localizzato in direzione prevalentemente radiale.



Fig. n. 3 – La flangia del portellone svergolata

Fase 3. L'iniziale caduta di pressione interna – tratto (2) della figura n. 2 – ha una durata dell'ordine dei millisecondi e non è pertanto registrabile con il sistema di misura diagnostica dell'autoclave.

Fase 4. Avviene la vaporizzazione istantanea delle oltre 19 ton di acqua presenti nell'autoclave e la pressione sale pressoché istantaneamente a valori elevati al punto tale da generare l'espulsione del portellone posteriore tranciandone la cerniera che lo vincola al corpo dell'autoclave. Gli effetti del sistema di onde di rarefazione e compressione sono devastanti:

- a) Proiezione del portellone (massa = 1.000 kg) a 40 m di distanza con distruzione per urto di parti consistenti del capannone (pilastri, travi e pareti presenti sulla traiettoria).

- b) Tranciatura delle 20 culle di fissaggio dell'autoclave e delle tubazioni di servizio ad essa, proiezione della stessa 80 m oltre la sua postazione originale con distruzione di parti strutturali del capannone e sbriciolamento di tonnellate di blocchi già finiti, impaccati e pronto per la spedizione presenti all'esterno del capannone sulla traiettoria dell'autoclave.
- c) L'onda d'urto associata allo scoppio produce i suoi effetti sulle pareti del fabbricato anche ad oltre 160 m di distanza, (vedi pareti di fondo della zona della torre di miscelazione), (vedi foto)

Abbiamo così dimostrato sulla base delle conoscenze scientifiche specialistiche che l'autoclave n. 5 è scoppiata con un comportamento perfettamente assimilabile a quello di contenitori che si dirompono repentinamente per eccesso di pressione interna.

Un processo industriale che sfrutta l'autovaporizzazione:

la tecnologia "STEAM EXPLOSION"

È interessante far presente che oggi si stanno affermando processi tecnologici e impianti pilota che sfruttano il flashing acqua – vapore per ottenere processi industriali più competitivi nel settore energetico e tessile. Partendo da un materiale grezzo costituito da biomasse, fibre tessili vegetali (canapa in particolare) se ne estrae il prodotto finito (pellets, fibre pronte per la filatura) con un primo trattamento che consiste nell'immettere il materiale in un autoclave dove viene imbibito di vapore a pressione e temperatura simile a quella utilizzata nel ciclo Italgasbeton. Ad un tempo predeterminato, azionando opportune valvole, si riduce adeguatamente la pressione del contenitore e si provoca una "steam explosion" controllata che sfibra il prodotto che, alla fine del processo, si presenta assai diverso da quello introdotto:

- si separa il legno nel caso di biomasse, per avviarlo poi al processo di pellettizzazione,
- si estrae immediatamente le fibre dalla canapa per avviarla al processo finale di filatura - il procedimento è più economico e veloce di quello tradizionale che consiste nell'immersione della canapa per lunghi periodi in vasche d'acqua dette "marcite"- a fine marcitura si separavano meccanicamente le fibre dalla parte amorfa.

Se si osserva attentamente la foto dell'interno dell'autoclave scattata subito dopo lo scoppio, si vede che i blocchi base calce presenti nell'autoclave hanno subito una sorta di processo di steam explosion: di 62 ton di materiale rimangono pochissimi residui polverizzati sul fondo dell'autoclave, il resto risulta pruzzato ovunque all'interno del capannone distrutto.



Fig. n. 4 – *interno dell'autoclave dopo lo scoppio con i pochi residui rimasti delle 62 tonnellate di materiale trattato*



Fig. 5 – *una delle due fasce di chiusura che hanno ceduto con i residui di materiale trafilato per effetto del fenomeno di steam explosion*

Bibliografia

- 1] C. Gracia-Jaldon, D. DupeyreInt., M.R.Vignon, – “*Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment*”, Biomass and Bioenergy. . vol. 14 , n. 3 , 1998
- 2] R. Avella, E. Sconditi – “*The italian steam explosion program at ENEA*”, Biomass and Bioenergy. . vol. 14 , n. 3 , 1998
- 3] K. Jedvert, A. Saltberg, M. Lindstroem, H. Theliander – “*Mild steam explosion and chemical pre-treatment oh Norway spruce*”, BioResources, 7(2), pp. 2051-2074, 2012
- 4] K.M. Nebel – “*Nuove strategie di lavorazione della canapa*”, J. Of the International hemp associationan (tradotto al sito web <http://www.usidellacanapa.it/usi/tessile/nuovestrategie.html>)

VALUTAZIONI NUMERICHE

Premessa - Studi accurati del fenomeno di cedimento di recipienti in pressione contenenti liquido surriscaldato sono diffusi, particolarmente nel settore dell'ingegneria nucleare, nella simulazione di incidenti catastrofici. Si utilizzano complessi codici di calcolo che combinano la modellazione strutturale del recipiente con quella dei fenomeni fisici e termodinamici che caratterizzano i fluidi coinvolti nell'incidente ipotizzato. Si citano ad esempio:

- T.G. Theofanous – *The study of steam explosions in nuclear systems* - Nuclear Engineering Design,155 (1995), 1-26
- M. Ursic, M. Leskovar – *Analysis of Ex-Vessel Steam Explosion Pressure Loads* – Journal of Mechanical Engineering 56(2010), 368.376

In particolare nel secondo lavoro, assai più recente, si sviluppano complesse simulazioni che dimostrano l'elevata dinamica della pressione all'interno del fluido con picchi che **si manifestano in tempi dell'ordine del millesimo di secondo o poco più**, mentre sulle pareti del contenitore gli impulsi di pressione presentano una dinamica meno accentuata, **dell'ordine di 1 decimo di secondo**.

Riteniamo ampiamente sufficiente sviluppare le nostre valutazioni quantitative del fenomeno con modelli più semplici, comunque significativi ed assolutamente esaustivi per rispondere ai quesiti del Magistrato.

1 – Luce (falla) piccola, (caso di guarnizione che perde - trafileamento)

Come stato iniziale si assume $p_1=9,7$ bar e $T_1= 179$ °C (451 K).

Inizialmente, la luce di comunicazione interno-esterno è piccola e in tal caso si presenta una espulsione di massa con velocità sonica essendo il rapporto di pressioni interno-esterno $\beta=p_1/p_2=9,7/1 >$ del rapporto di pressioni *critico* $\beta_c=p_1/p_c$.

Come noto, infatti, il rapporto termico critico (in condizioni *soniche*) è, dall'equazione dell'energia :

$$T_c = T_1 \frac{2}{\gamma + 1}$$

In cui T_1 è la temperatura iniziale mentre γ è l'esponente dell'isentropica.

Per vapore saturo può assumersi $\gamma=1,293$.

Si ha dunque $T_c=0,873 \times 451=394 \text{ K} \rightarrow 121 \text{ °C}$.

Ne segue che la pressione critica vale, per espansione isentropica :

$$p_c = p_1 \left(\frac{T_c}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 9,7 \times \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 5,3 \text{ bar}$$

per cui $\beta_c = p_1/p_c = 1,83 < 9,7$ (10,5) ($p_0/p_1 = 0,547$) .

Nella condizione critica la densità del fluido risulta, dall'equazione di stato :

$$\rho_c = \frac{p_c}{RT_c} = \frac{5,3 \cdot 10^5}{462 \times 394} = 2,91 \text{ kg / m}^3$$

e la velocità critica (del suono) è :

$$C_s = \sqrt{\gamma RT_c} = \sqrt{1,293 \times 462 \times 394} = 485 \text{ m / s}$$

La portata uscente vale, indicando con A l'area della luce:

$$\dot{m} = \rho_c C_s A$$

Se inizialmente l'area d'uscita fosse $30 \text{ cm}^2 = 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (p.es: sfilamento della flangia del portellone dalle flange di blocco e/o cedimento delle guarnizioni) si otterrebbe $2,91 \times 485 \times 0,0030 = 4,23 \text{ kg / s}$.

Se il fenomeno proseguisse con tali caratteri si avrebbe una continua perdita di massa che avverrebbe con caduta progressiva della pressione interna; finché questa rimane $> 1,82$ l'uscita rimane sonica, successivamente l'uscita è subsonica ed è governata dalla legge dell'espansione.

La massa contenuta inizialmente, valutando un volume a disposizione di $\sim 130 \text{ m}^3$ (nei 200 m^3 dell'autoclave ci sono $69,5 \text{ m}^3$ occupati dal materiale in maturazione) ed essendo la densità del vapore saturo a 9,7 bar pari a $5,05 \text{ kg/m}^3$, ammonta a $M = V \rho_1 = 130 \times 5,05 = 656 \text{ kg}$ per cui il tempo di uscita con le caratteristiche termodinamiche iniziali risulterebbe pari a 155 s (2,6 min).

In realtà, con l'abbassamento della pressione e temperatura interne si avrebbe, da un lato, una diminuzione della densità del vapore e della velocità di uscita, dall'altro, una autoproduzione modesta ma continua di vapore per squilibrio della massa liquida, sicché il tempo di uscita aumenterebbe.

L'evento occorso non rientra in tale ipotesi, perché altrimenti l'operatore (deceduto perché colpito dal corpo dell'autoclave proiettata a distanza in seguito allo scoppio) avrebbe sentito il fischio del vapore e/o il fischio del sistema di allarme incorporato all'impianto che opera entro i 60 secondi. Se avesse avuto il tempo per allarmarsi avrebbe operato un tentativo di fuga; invece egli è stato colpito alla nuca mentre stava osservando lo sgancio di un carro nell'interspazio tra le autoclavi 4 e 5; ciò dimostra – a detta degli ispettori intervenuti sul posto - che non ha avuto neanche il tempo di girarsi!

* * *

2 – Luce (falla) ampia

Allorché la comunicazione interno-esterno diviene “ampia” (a portellone divolto) la pressione interna si porta a 1 bar. Nella caduta della pressione da 9,7 bar a 1 bar - praticamente istantanea - vanno considerati due fatti, inizialmente compresenti:

- l'aumento istantaneo di volume del vapore interno inizialmente presente
- la produzione istantanea di vapore per autoevaporazione (flashing) del liquido saturo presente.

→ Il volume specifico del vapore presente aumenta dal valore iniziale $v_1=0,198 \text{ m}^3/\text{kg}$ al valore finale $v_2=1,67 \text{ m}^3/\text{kg}$ crescendo quindi di ~8,4 volte; se tale aumento di pressione avvenisse in un contenitore chiuso produrrebbe un aumento di pressione pari a $8,3^{1,293} \cong 15,4$.

La massa di vapore contenuta nell'autoclave – se non si considera la fuoriuscita prima descritta – è stata valutata $M=656 \text{ kg}$.

Nello stato finale il volume totale da essa occupato vale $V_2=Mv_2=656 \times 1,67=1096 \text{ m}^3$.

Se l'eccesso di volume $V_2-V_1=1096-130=966 \text{ m}^3$ uscisse in 0,1 s verrebbe a crearsi una spinta :

$$F = \dot{m} \times C_s = (V_2 \rho_2 / 0,1) \times C_s = (966 \times 0,6 / 0,1) \times 485 = 2805450 \text{ N}$$

I calcoli riportati prescindono dalla variazione di massa del materiale espulso, (che aumenta notevolmente la densità del fluido composto), e sono svolti ragionando solo sulla densità dell'acqua.

Secondo il teorema della conservazione della quantità di moto, tale spinta imprimerebbe all'autoclave, ammettendo una massa totale a pieno carico pari a 165000 kg, una velocità iniziale di spostamento di 17 m/s.

Autovaporizzazione

Il contenuto totale di acqua liquida, somma della condensa sul basso dell'autoclave e del contenuto nel prodotto che sta maturando all'interno, ammonta in totale a ~19,5 t.

Infatti, la prima è valutabile in 0,550 t (550 l) mentre alla seconda (19,23 ton) si può risalire dai dati della descrizione del processo produttivo, (rif. descrizione del ciclo di produzione).

Allorché la pressione interna si porta a 1 bar per comunicazione “ampia” (a portellone divolto) con l'esterno, la fase liquida (liquido saturo) si viene a trovare in *equilibrio entalpico* rispetto alle nuove condizioni finali misurato dalla differenza di entalpia $\Delta h_L=h_{L1}-h_{L2}$ tra lo stato iniziale e quello finale.

Il raggiungimento dell'equilibrio si ha con l'estinzione del suddetto Δh_L a favore di una “autovaporizzazione” (flashing), la cui entità X_v per kg di liquido presente si ricava dalla relazione, indicando con λ il calore latente di vaporizzazione (medio nell'intervallo di pressione, per la precisione) :

$$X_v = \frac{\Delta h_L}{\lambda} = \frac{h_{L1} - h_{L2}}{\lambda}$$

Essendo a 9,7 bar $h_{L1}=758,7 \text{ kJ/kg}$ e a 1 bar $h_{L2}=417,5 \text{ kJ/kg}$, prendendo $\lambda=2100 \text{ kJ/kg}$ come valore medio, si ottiene :

$$X_v = \frac{758,7 - 417,5}{2100} = 0,16 \text{ kg(vap)} / \text{kg(liq)}$$

L'autovaporizzazione avviene in brevissimo tempo (**millisecondi misurati**) si da ritenersi praticamente "istantanea". Al vero, questo vale per la massa liquida in basso nell'autoclave e per quella superficiale del CCA mentre è presumibilmente una più lenta l'autoevaporazione del liquido di cui è intriso il CCA in profondità, (**decimi di secondi**).

Ammettiamo prudenzialmente che la vaporizzazione istantanea riguardi una massa $M_L=5$ t (~1/4 del totale). Si ha la formazione di $M_v=X_v \times M_L=0,16 \times 5000=800$ kg di vapore che avendo un volume specifico $v_A=1,67$ m³/kg occupa un volume $V_v=M_v \times v_A=800 \times 1,67=1336$ m³ che è ~10 volte il volume 130 m³ occupato dal vapore nell'autoclave.

In una visuale puramente statica è evidente un iniziale innalzamento di pressione prima che tale massa venga espulsa; in teoria il valore finale "statico" può valere :

$$p_3 = p_2 \times 10^{\gamma} = 19,6 \text{ bar}$$

In realtà, la pressione risale a valori ben maggiori per le onde che viaggiano nel liquido e in tempi che in esperimenti entro tubi sono risultati < 0,1 s.

Dal punto di vista energetico, rileviamo che l'energia entalpica in iniziale squilibrio ammonta a $\Delta h_L \times M_L=335 \times 5000 \times 1000=1,68 \times 10^9$ J; tradotta in energia potenziale meccanica essa determinerebbe, valutando in circa 165 t la massa dell'autoclave carica, con peso pari a 1618650 N, uno spostamento teorico pari a 1020 m

Sono valori enormi che seppur puramente teorici danno un'idea del potenziale distruttivo dell'evento. In realtà, la molteplicità degli assorbitori di tale energia – deformazioni, rotture, attriti – li abbassa in misura notevole.

Basta ricordare al riguardo lo storico incidente del 1906 in cui un generatore a tubi di fumo andò soggetto ad un evento simile, e dopo aver sfondato cinque soffitti passò, con una traiettoria impazzita, a distruggere un area industriale prima di fermarsi dopo con cinque solai sfondati

Quando tale forza si scatena in un locale l'onda d'urto che ne deriva trascina, in frazioni di secondo, detriti, terra, scardina soffitti e tubazioni, provoca uno sconquasso e provoca incendi in tutte le direzioni seminando distruzioni e morte in adiacenze anche non immediate.

I risultati ottenuti sono da considerare dei minimi in quanto la reale massa interessata dal flashing è certamente superiore a 5 t. Rifacendo quindi i calcoli per i casi reali possibili, si ottiene:

- a) Con flashing di 10 ton di liquido: **p3 pari a circa 50 bar**
- b) Con flashing di 15 ton di liquido: **p3 pari a circa 80 bar**
- c) Con flashing di 19 ton di liquido: **p3 pari a circa 115 bar**

Notiamo infine che, nel caso di flashing per 10 ton d'acqua, l'uscita in un decimo di secondo del vapore formatosi imprime all'autoclave (165 ton) la velocità di circa 45 m/s!

ONDE DI PRESSIONE

Come visto, il *flashing* nasce da un'onda di rarefazione che viaggia nel contenitore recipiente abbassando la pressione mentre una corrente veloce di aeriforme va verso la luce creatasi. Nasce per

risposta un'onda di compressione (simile al colpo d'ariete) che accelera il liquido mandandolo a premere con forza sulla parete del contenitore vicino all'uscita.

Le onde di pressione così formatesi si propagano con periodi cortissimi e velocità maggiori della sonica tendendo alla velocità sonica quando l'intensità si attenua. Gran parte dell'energia dell'onda è in forma di lavoro di compressione che si trasforma poi in energia cinetica. Nel bifase di una sostanza pura (acqua) le caratteristiche di propagazione delle onde di pressione presentano rilevanti non linearità dovute al trasporto di massa tra le due fasi.

Alle onde di compressione sono associati fenomeni di collasso di sacche di vapore (con ritorno di materia allo stato liquido) con conseguente formazione di onde di espansione che viaggiano nel volume riproponendo il flashing del liquido riformatosi, e così via.

Questo alternarsi di onde di compressione (collasso) e di espansione (flashing) si protrae attenuandosi fino ad estinzione dell'energia contenuta per cause varie tra cui importanti sono l'attrito, fenomeni di isteresi e d'anelastici e fuoriuscita di materia dal contenitore.

Le onde di compressione possono produrre aumenti di pressione assai ingenti pressoché istantanei, configurabili come vere e proprie onde d'urto (con effetti analoghi a quelli del colpo d'ariete idraulico), capaci di danneggiamenti anche devastanti per i contenitori del sistema bifase.

All'esterno la trasmissione passa agli strati d'aria investendo aree che vanno crescendo col quadrato della distanza.

In conclusione abbiamo trattato due diversi casi limite: efflusso "tranquillo" da una apertura di dimensioni limitate e effetto "esplosivo" di una apertura di grandi dimensioni. Il fenomeno è in realtà evoluto gradualmente, ma in tempi brevissimi – frazioni di secondo, dal primo al secondo caso:

1. Il cedimento di fazzoletti forati di blocco ha rotto l'equilibrio del sistema di chiusura del portellone;
2. Si è formata una prima apertura probabilmente dovuta alla perdita della guarnizione espulsa a distanza dal fiotto di vapore uscente non da tutta la periferia circolare del portellone ma da un settore limitato di esso;
3. L'apertura di cui sopra è cresciuta rapidamente (in tempi stimabili al massimo nell'ordine del secondo) mentre lo squilibrio dovuto alla rottura della simmetria dei carichi per effetto della fuoriuscita del vapore da un settore parziale del coperchio, deformava il portellone, svergolandolo;
4. L'apertura che inizialmente era piccola cresceva in pochi istanti a dimensioni tali da innescare il flashing con conseguente aumento della pressione interna che provocava la proiezione a distanza delle parti in cui risultò fragmentata l'autoclave (**scoppio**).

NOTE

Il NBBI (sito web <https://www.nationalboard.org>) è un organismo tecnico nato negli USA nel 1919, promosso in ambito ASME formato dagli ispettori capo dei diversi stati nazionali, con lo scopo di contribuire alla definizione e sviluppo delle norme relative alle caldaie e ai recipienti in pressione, nonché ad assicurare le attività ispettive connesse alla gestione della sicurezza. Essa presenta nel suo sito web un lungo elenco di indagini su scoppi di recipienti in pressione con aspetti riconducibili all'evento che ha interessato la Italgasbeton.

Descritto il fenomeno, cerchiamo ora di rispondere puntualmente al quesito posto dal Magistrato:

“Dica il c.t.u, esaminati gli atti del presente giudizio e del giudizio penale e, se occorre, svolti tutti gli accertamenti che riterrà del caso: - se l'autoclave n.5 per cui è processo ebbe a scoppiare - nell'eccezione del repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna – e, in caso affermativo, per quali cause; - se la pressione interna abbia superato il limite previsto (pressione di esercizio), che il c.t.u. vorrà descrivere ed illustrare, per il macchinario per cui è processo; - quale pressione interna era necessaria e sufficiente per provocare lo scoppio dell'autoclave e se la detta pressione era superiore, e in che termini, assoluti e percentuali, rispetto alla pressione di esercizio; - quale intervallo di tempo intercorse tra l'aumento della pressione interna e l'ipotizzato scoppio; -se tale intervallo di tempo poteva essere rilevato e registrato con precisione dal sistema computerizzato di controllo della cottura del calcestruzzo all'interno dell'autoclave; -se l'acciaio della flangia di sicurezza dell'autoclave aveva spessore e composizione chimica idonei agli sforzi da sopportare e/o fossero presenti vizi strutturali, - quantifichi il danno subito da Italgasbeton”

Quesito posto dal Magistrato

risposta secondo i dettami della scienza

<ul style="list-style-type: none">• se l'autoclave n. 5 per cui è processo ebbe a scoppiare - nell'eccezione del repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna• e, in caso affermativo, per quali cause• se la pressione interna abbia superato il limite previsto (pressione di esercizio)• <i>quale pressione interna era necessaria e sufficiente per provocare lo scoppio della autoclave e se la detta pressione</i>	<ul style="list-style-type: none">• <u>Affermativo! – l'autoclave n. 5 per cui è processo ebbe a scoppiare – nell'eccezione del repentino dirompersi di contenitori per eccesso di pressione interna</u>• per repentina formazione di un enorme volume di vapore per flashing di tutta o parte delle 19,5 ton di acqua liquida surriscaldata (179,4 °C e 9,7 bar) presente all'interno dell'autoclave.• Dal punto di vista puramente statico, per flashing, la pressione interna raggiunge il valore di circa: a) 50 bar nel caso di flashing di 10 ton di acqua b) 80 bar nel caso di flashing di 15 ton di acqua c) 115 bar nel caso di flashing di 19,5 ton di acqua L'aumento di pressione per effetti dinamici - onde di pressione, che l'esperienza indica come dominanti, ha comportato che la pressione possa aver superato il valore di 2100 bar. Quindi la pressione interna ha superato di gran lunga il limite previsto (sia la pressione di esercizio, sia la pressione di collaudo)• La risposta puntuale richiederebbe un calcolo strutturale assai complesso e molto fine nella modellazione di tutte le parti componenti. La pressione sufficiente a far scoppiare l'autoclave è quella che determina il cedimento meccanico
---	--

<p><i>era superiore, e in che termini, assoluti e percentuali, rispetto alla pressione di esercizio</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>quale intervallo di tempo intercorse tra l'aumento della pressione interna e l'ipotizzato scoppio</i> • <i>se tale intervallo di tempo poteva essere rilevato e registrato con precisione dal sistema computerizzato di controllo della cottura del calcestruzzo all'interno dell'autoclave</i> • <i>se l'acciaio della flangia di sicurezza dell'autoclave aveva spessore e composizione chimica idonei agli sforzi da sopportare e/o fossero presenti vizi strutturali</i> 	<p>dell'organo più debole che, nel nostro caso, si è dimostrato essere il meccanismo di chiusura del portellone anteriore. Si può comunque dare una risposta certa e convalidata sperimentalmente: la pressione necessaria a provocare lo scoppio era superiore a 19,7 bar pressione di collaudo Ispels. Occorre osservare che tale valore è quello a cui il contenitore può resistere in situazioni statiche, cioè di pressione costante ed applicata per un tempo anche infinito.</p> <p>I fenomeni termodinamici registrati sono invece caratterizzati da una dinamica elevatissima (millesimi - centesimi di secondo) e la pressione istantanea è stata indubbiamente molto più elevata di 80 bar</p> <ul style="list-style-type: none"> • alcuni millesimi di secondo, al massimo alcuni centesimi di secondo • non era possibile alcuna rilevazione, in quanto il sistema di rilevazione opera in termini di minuti ed il sistema di registrazione opera ogni 10 minuti • la flangia aveva spessore 10 mm contro 17 mm riscontrati su tutte le altre autoclavi. L'acciaio utilizzato (composizione chimica) della flangia non era idoneo all'impiego per recipienti a pressione, in difformità alla normativa vigente e con caratteristiche prestazionali inferiori rispetto a quelle previste dalla normativa. Questo risultato è quello accertato dalle risultanze tecniche dell'indagine penale e dalla perizia metallurgica. Malgrado ciò, si rimarca che l'autoclave n. 5 aveva subito tutte le verifiche e tutti i controlli da parte degli Enti preposti ed aveva conseguito tutte le autorizzazioni previste dalla Legge.
---	---

Prof. ing. Giovanni Molinari

Prof. ing. Paolo Toni

Roma 31 luglio 2013