

PROCEDURE PER L'ANALISI DEGLI EFFETTI DOMINO INNESCATI DAL LANCIO DI MISSILI

David Fabi

GNDRCIE – Gruppo Nazionale Difesa dal Rischio Chimico-Industriale ed Ecologico, C.N.R., Roma
c/o Dipartimento della Protezione Civile - Via Ulpiano 11, 00194, Roma
Tel. 06-68202389; Fax. 06-68202246; E-mail: industriale@protezionecivile.it

Anche se l'esistenza di effetti domino è nota da lungo tempo, come mostrano numerosi e gravi incidenti verificatisi nel passato (ad esempio: raffineria di Texas City - 1978, impianto GPL di Mexico City - 1984, impianto polietilene di Pasadena -1989), di essi si fa per la prima volta menzione in ambito normativo solo nella direttiva europea 96/82/CE "Seveso II" che impone al gestore di un impianto a rischio di incidente rilevante di adottare delle misure per prevenire questa tipologia di incidenti. Tali misure possono concretizzarsi nella riduzione delle probabilità di accadimento e/o nella limitazione della gravità delle conseguenze attese. In questo lavoro si presenta un approccio complessivo per la stima dell'occorrenza degli effetti domino innescati dal lancio di missili a seguito dello scoppio di un recipiente in pressione contenente un liquido o un gas infiammabile. Tale evento deve essere tenuto nel debito conto da parte di chi è preposto alla gestione del rischio soprattutto in un'ottica di pianificazione territoriale.

1. INTRODUZIONE

Lo scopo del presente lavoro è quello di definire una procedura per la valutazione degli effetti in termini di lancio di frammenti che si verificano a seguito dell'esplosione fisica di un recipiente contenente un fluido sotto pressione che ceda catastroficamente. Inoltre, qualora la sostanza sia un liquido infiammabile con elevata tendenza a sviluppare rapidamente vapori (gas liquefatto o liquido surriscaldato), in caso di innesco immediato dei vapori si può generare un fireball (palla di fuoco). Per comprendere le conseguenti che un effetto domino originato da un'esplosione fisica può arrecare all'interno di un impianto e soprattutto nell'ambiente circostante si portano due esempi storici di notevole interesse.

Il primo è il tristemente famoso incidente di Mexico City del 1984 in cui un gran numero di persone morirono o ne rimasero ferite. Da quanto riportato dal TNO [1], nelle prime ore di lunedì 19 Novembre 1984, a San Juan Ixhuatepec, Mexico City, una sequenza di eventi, verificatisi in un centro di distribuzione e stoccaggio di Gpl, portò alla distruzione del sito provocando 500 morti e 7000 feriti nella vicina area residenziale. Va sottolineato che, quando furono costruiti i depositi di Gpl, non vi erano costruzioni civili nelle vicinanze in quanto il sobborgo si sviluppò solo durante gli ultimi 20 anni precedenti il disastro. Tuttavia, l'area più affollata di palazzi era situata a soli 140 metri circa dalla zona di stoccaggio.

Il disastro fu causato da un incendio di vaste dimensioni seguito da una serie di violente esplosioni che provocarono la completa distruzione dell'unità di stoccaggio. Si è accertato che la causa primaria dell'incidente è stata la formazione di una nube di Gpl, successivamente innescata. Questa ipotesi è avvalorata dall'odore che molti avvertirono, ed anche gli incendi che seguirono fanno indirizzare le ipotesi decisamente all'ignizione di una nube di vapori infiammabili a dar luogo ad una VCE (Vapor Cloud Explosion). L'intensità di tale esplosione (come pure delle successive) fu tale che esse furono registrate dai sismografi dell'Università del Messico. A seguito di questa prima VCE, dopo 1 minuto e 9 secondi, è avvenuta una seconda esplosione, molto più grande della prima, sviluppatasi poi in uno o più eventi di BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) di vari serbatoi in brevissimo tempo. Questa seconda esplosione è stata la più grave di tutta la sequenza ed alcuni testimoni affermano che a seguito di essa si è avvertito quasi come un terremoto che ha distrutto numerose case. Tra gli effetti disastrosi di questa esplosione si è avuta un'onda d'urto che, oltre a sventrare delle case, ha spostato parecchi serbatoi dai loro supporti, causandone il cedimento e quindi la fuoriuscita di altro gas che ha alimentato l'incendio. Durante i successivi 68 minuti sono esplosi altri serbatoi generando 4 eventi BLEVE. Ancora più tardi una ulteriore esplosione causata dal cedimento di due serbatoi sferici ha generato un altro BLEVE.

L'osservazione dei punti di ricaduta dei frammenti originati dall'esplosione dei serbatoi indica come la disposizione dei serbatoi all'interno dell'area (lay-out) ha avuto un effetto rilevante per ciò che riguarda i danni all'impianto stesso e al tessuto urbano circostante. In particolare, quattro serbatoi sferici di piccola capacità (F1-F4, in [1]) si sono completamente frammentati, proiettando un gran numero di pezzi metallici tutt'intorno, la maggior parte dei quali, piuttosto pesanti, sono finiti sulle case e sulle prospicienti unità di stoccaggio. Al contrario, i serbatoi sferici più grandi sono rimasti intatti senza esplodere, sebbene a causa dell'indebolimento delle zampe di sostegno siano caduti al suolo: per effetto di tale caduta, uno dei serbatoi si è rotto nella parte superiore. Per quanto riguarda i serbatoi cilindrici, presenti in numero di 48, numerosi di

essi furono ritrovati danneggiati all'interno del sito, 12 furono scagliati a distanza considerevole ed i rimanenti esplosero disintegrandosi in frammenti molto piccoli.

All'esterno anche le società private che si approvvigionavano di gas subirono diversi danni, come la distruzione degli uffici da parte di un frammento e l'incendio (e l'esplosione) di una stazione con circa 100 autocarri, sempre innescato da un frammento. Tuttavia, l'area di stoccaggio di un'azienda vicina, la Gasomatico, è rimasta illesa, probabilmente in quanto un buon sistema di raffreddamento ha protetto i serbatoi. Le abitazioni di legno sono state distrutte fino a 500 metri dal luogo dell'incidente e danni gravi alle abitazioni si sono riscontrati fino ad una distanza di 1 200 metri.

Un altro incidente, avvenuto a Colleferro (RM) nel 1981, seppure assai meno catastrofico, mostra i possibili effetti provocati dall'esplosione di apparecchiature impiegate nell'industria di processo. In questo caso è stato interessato un impianto di produzione di anidride maleica che sorgeva in prossimità del centro urbano di Colleferro [2]. La fase finale del processo prevedeva la purificazione dell'anidride dalle impurità presenti e attraverso una disidratazione in caldaia, seguita da un ciclo di distillazione discontinua da effettuarsi in una colonna di distillazione. Le cause dell'incidente si sono trovate nell'accidentale immissione di acqua all'interno della colonna di distillazione: l'aumento di temperatura e di pressione nella colonna dovuto alla vaporizzazione dell'acqua ha provocato l'esplosione della colonna, che si è suddivisa in tre frammenti principali, e lo squarcio della caldaia. A causa dello scoppio e del successivo incendio alcuni capannoni limitrofi, appartenenti ad altre aziende, sono stati distrutti. I frammenti della colonna di distillazione sono stati scagliati in un raggio di diverse centinaia di metri; in particolare, uno dei frammenti principali, del peso di alcune tonnellate, è stato ritrovato a circa 400 m dalla sua collocazione originaria, all'interno di un campo da bocce. In queste circostanze solo il caso ha voluto che il bilancio in termini di distruzione sia stato modesto e non ci siano state vittime.

Il primo esempio indica come la proiezione di frammenti sia stata causa di un'escalation della sequenza incidentale con conseguente gran numero di morti e danni materiali; il secondo esempio mostra conseguenze gravi di un'esplosione che, solo per cause fortuite, non hanno comportato l'escalation di cui sopra. In entrambi i casi si evidenzia come una non controllata crescita dei tessuti urbani costituisca un fattore di aggravio notevole del rischio associato a determinati impianti.

A seguito di quanto esposto appare quindi importante stabilire una procedura che consenta di tenere conto del lancio dei frammenti che si originano dall'esplosione fisica di apparecchiature, e valutarne gli effetti. Questo lavoro è indirizzato a quanto sopra, con l'ottica di illustrare una metodologia semplificata e relativamente agevole da applicare, in grado di fornire **risultati più affidabili rispetto** alle stime meramente empiriche spesso adottate nelle analisi di rischio.

2. ESPLOSIONE FISICA

L'esplosione fisica è quella che si verifica all'interno di un sistema chiuso (apparecchiatura, reattore, ecc.); tale esplosione viene denominata BLEVE quando interessa un liquido che sta bollendo ed un vapore che si va espandendo, ossia, in buona sostanza, se si ha il cedimento di un recipiente che contenga un gas liquefatto ovvero un liquido surriscaldato. Gli effetti principali di un'esplosione fisica sono la formazione di un'onda d'urto ed il lancio di frammenti.

Le cause che sono alla base di un'esplosione fisica sono molteplici, come mostra la Tabella 1.

Tabella 1. Possibili cause di un'esplosione fisica [3]

| | |
|--|---|
| Sovrapressione fisica | Guasto dei sistemi di regolazione o sfiato della pressione |
| Riduzione dello spessore del recipiente | Corrosione |
| | Erosione |
| | Attacco chimico |
| Riduzione della resistenza del serbatoio | Surriscaldamento |
| | Difetti del materiale con conseguente sviluppo della frattura |
| | Attacco chimico |
| | Fatica che induce un indebolimento del serbatoio |
| Reazioni fuggitive | Overcharging dei reagenti |
| | Errato controllo della temperatura |
| | Guasto del sistema di raffreddamento del reattore |
| Ogni altro processo che origini una perdita di contenimento | |

2.1 BLEVE

Una delle principali cause di incidente che provoca il lancio di frammenti è il BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, che si verifica quando si ha una improvvisa perdita di contenimento di un recipiente contenente liquido surriscaldato o gas liquefatto. La causa primaria un'esplosione BLEVE è usualmente una radiazione termica (come quella causata da un incendio all'esterno del serbatoio, ma anche più semplicemente da un getto incendiato) diretta verso la parete del recipiente nella zona situata al di sopra del livello del liquido. In questo caso, la modesta capacità di trasmissione termica della fase gassosa fa sì che la temperatura della parete aumenti progressivamente: ciò causa una riduzione nella capacità di resistenza del materiale, indebolendo la struttura del recipiente che alla fine cede istantaneamente con una rottura catastrofica. A titolo di esempio si possono citare i serbatoi che contengono propano in forma di gas liquefatto, di norma costruiti per lavorare a circa 17 atm (1 700 kPa) e, a temperatura ambiente, la pressione a cui si verifica l'esplosione del serbatoio raggiunge le 68 atm (6 800 kPa). Un BLEVE si verifica invece in corrispondenza di una pressione di circa 20-27 atm (2 000 – 2 700 kPa) in presenza di un incendio che interessa lo spazio vapore al di sopra del pelo del liquido e indebolisce il materiale [3].

Un BLEVE può avvenire anche per altre cause che comportino il cedimento improvviso del recipiente, quali impatto di oggetti, corrosione, difetti di fabbrica, ecc. Per le tipologie di fluidi considerati, l'improvvisa perdita di contenimento produce un flash della sostanza, ossia una sua vaporizzazione pressoché istantanea, con un aumento di volume fino a 200 volte rispetto a quello originario. Questa espansione esplica inoltre un effetto di trascinarsi su una parte del liquido rimanente, che viene trascinato in forma di goccioline finissime (aerosolizzazione). Nel caso in cui la nube gassosa che si forma per effetto della perdita di contenimento sia costituita da un prodotto infiammabile, in presenza di un innesco, quale potrebbe essere, ad esempio, l'incendio che ha originato il BLEVE, si può verificare un fireball, come accade frequentemente nel caso di esplosioni BLEVE di serbatoi di stoccaggio di Gpl in pressione.

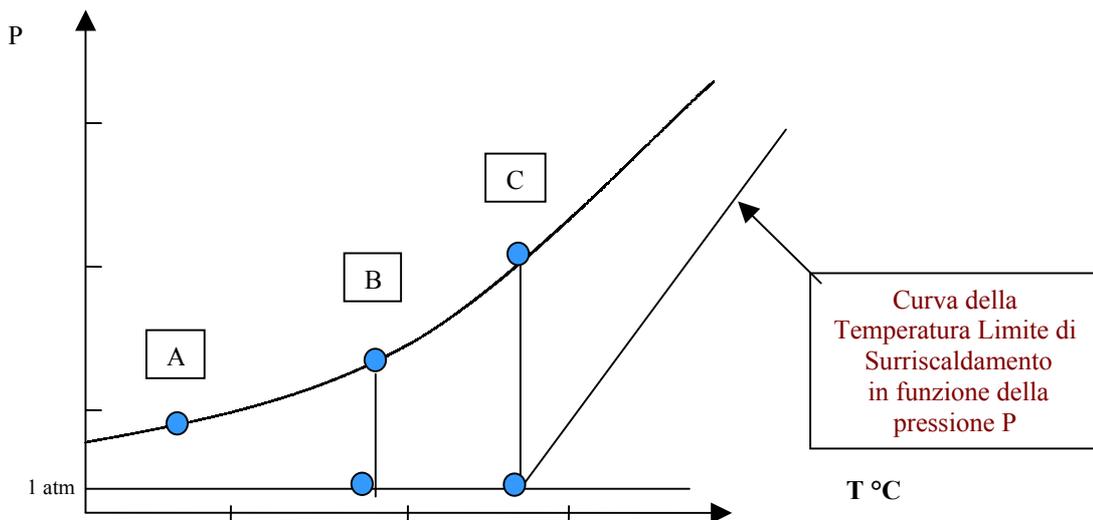


Figura 1 Curva di saturazione e temperatura limite di surriscaldamento per il propano.

La fenomenologia del BLEVE è tipica dei gas liquefatti e dei liquidi surriscaldati e si esplica a seguito di un fenomeno di formazione spontanea di un gran numero di nuclei di ebollizione (nucleazione) con conseguente evaporazione rapidissima del liquido. L'inizio di tale processo richiede, di norma, la presenza di nuclei iniziatori dell'ebollizione, la cui comparsa avviene solo in corrispondenza di certi valori di temperatura e pressione. Esiste tuttavia un limite di temperatura superato il quale la nucleazione avviene anche in assenza di tali nuclei iniziatori. Reid [4] ha proposto una relazione che consente di determinare tale temperatura limite di surriscaldamento, T_l , in funzione della temperatura critica, T_c :

$$T_l = \alpha \cdot T_c \quad (1)$$

Per una vasta gamma di prodotti la temperatura limite di surriscaldamento è compresa fra $0.85 T_c$ e $0.9 T_c$; in particolare, per il propano il valore del coefficiente di proporzionalità, α , risulta pari a 0.895.

Il grafico riportato in Figura 1 riporta la curva di saturazione del propano e la temperatura limite di surriscaldamento per differenti condizioni di temperatura e pressione.

3. LANCIO DI MISSILI

3.1 Missili

I frammenti che si generano a causa dell'esplosione all'interno di un sistema chiuso (apparecchiatura, reattore, ecc.) sono generalmente denominati "missili" e sono usualmente classificati come primari e secondari. I missili primari sono quelli direttamente prodotti dall'esplosione di un serbatoio, o di un contenimento in generale, in modo che l'energia è conferita ai frammenti prodotti che vengono appunto scagliati a distanza come missili. I missili secondari sono invece quelli causati dal passaggio dell'onda d'urto che fornisce energia agli oggetti che incontra, scagliandoli a distanza e trasformandoli quindi in missili.

Tutti i frammenti che si originano dalla parete di contenimento a seguito di un'esplosione fisica sono considerati primari. Per quel che riguarda i missili primari originati dall'esplosione di un recipiente si distinguono abitualmente tre casi:

- scoppio del recipiente con formazione di un gran numero di frammenti di piccole dimensioni (disintegrazione del recipiente);
- suddivisione del recipiente in frammenti grandi, ad esempio la parte terminale ed il fondo (end-tube);
- lancio di singole parti del recipiente, come valvole, bocchelli, ecc.

3.2 Metodologia per la valutazione del lancio di missili

La modellizzazione del fenomeno del lancio dei missili a seguito di un'esplosione fisica è molto complicata, a causa della complessità dei fenomeni coinvolti, ma anche per la casualità con cui avviene la frammentazione. Ne consegue che sono stati proposti numerosi modelli empirici per descrivere questa tipologia di eventi, ma essi, tuttavia, forniscono stime piuttosto approssimate. Per questa ragione nelle stime di rischio si assumono spesso direttamente dei valori empirici suggeriti da importanti enti internazionali o dalle normative in vigore (per l'Italia il D.M. 15/5/96 -Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto-, fornisce delle distanze di sicurezza a cui distanziare serbatoi sferici e cilindrici e da parchi bombole).

Il Centre for Chemical Process Safety (CCPS) dell'AIChE (American Institution of Chemical Engineering) ha proposto [3] una metodologia per la valutazione del lancio dei missili originati da un'esplosione fisica, riassunta schematicamente in Figura 2.



Figura 2. Metodologia di valutazione CCPS per il lancio dei missili.

Secondo questa metodologia, la stima degli effetti causati dal lancio di frammenti parte dallo stabilire l'energia dell'esplosione; in seguito viene ipotizzato il numero di frammenti in cui può suddividersi il serbatoio; attraverso il valore dell'energia dell'esplosione e noto il peso e il numero dei frammenti si ottiene la velocità iniziale dei frammenti; dalla velocità si risale alla traiettoria del frammento tenendo conto della sua aerodinamicità, e infine si risale alla distanza percorsa. A questo punto si può valutare la possibilità che si verifichino effetti domino, in presenza di altre apparecchiature all'interno della possibile zona di impatto.

I risultati che si ottengono applicando questa metodologia, che sarà descritta e discussa in maggior dettaglio nel prossimo paragrafo, sono tuttavia anch'essi afflitti da incertezze legate a fattori che è difficile prevedere per la loro casualità, quali i seguenti:

- Posizione in cui ha luogo la frammentazione del serbatoio
- Aerodinamicità del frammento
- Numero di frammenti
- Traiettorie seguite

A conferma dell'incertezza di cui sopra, si può ricordare come in un caso di esplosione di un serbatoio verticale cilindrico, la sua parte finale (end-tube), è stata proiettata ad una distanza tale dal luogo dell'esplosione da non poter essere spiegata sulla base dell'energia fornita al frammento dalla rottura del serbatoio. In questo caso, come riportato da Marsili [5], un'ipotesi accreditata afferma come si sia formata una sacca di vapori nell'end-tube che abbia svolto un ruolo di propellente per il pezzo.

Nei punti che seguono verrà esaminata in dettaglio la procedura semplificata suggerita per determinare l'energia di esplosione, il numero di frammenti, la loro velocità iniziale ed il range di distanze raggiunte.

3.3 Energia di esplosione

Nell'esplosione fisica di un recipiente viene rilasciata una quantità di energia: tale energia può essere valutata in vario modo. L'espressione più semplice (valida nel caso di esplosioni da gas) è quella proposta da Baum (riportata in [6]) che considera che l'energia di esplosione sia pari a quella necessaria per innalzare la pressione del gas in esame (supposto ideale) dalla pressione atmosferica a quella del gas all'interno del serbatoio (espansione adiabatica):

$$E = k \frac{(P - P_0)}{\gamma - 1} V \quad (2)$$

in cui E è l'energia di esplosione (J), P_0 è la pressione atmosferica, P è la pressione del gas al momento dello scoppio (Pa), P_c la pressione atmosferica (Pa), V è il volume della fase gas nel recipiente γ è il rapporto dei calori specifici a pressione ed a volume costante del gas e k è dato dalla seguente espressione:

$$k = \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + (\gamma - 1) \frac{P_1}{P_0} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{-1}{\gamma}} \right] \quad (3)$$

Il valore di k viene considerato da Baum come una grandezza da valutare, il cui valore, basandosi su dati sperimentali riportati in letteratura, dovrebbe oscillare nell'intervallo fra 0.2-0.5. Su queste basi il CCPS [7] suggerisce di utilizzare per una prima grossolana valutazione il valore di 0.2.

La pressione P_1 assume valori diversi dipendentemente dalla tipologia dell'incidente:

- Quando l'esplosione è dovuta ad un aumento della pressione interna, come accade ad esempio a causa di un sovrariempimento, P_1 deve essere quella di prova idraulica dell'apparecchiatura, proporzionale alla pressione di esercizio del serbatoio con costanti di proporzionalità dipendenti dalla pressione di esercizio del recipiente;
- se la rottura avviene per cedimento catastrofico del recipiente, per esempio dovuto a corrosione, il valore della pressione P_1 è pari a quella di esercizio del serbatoio;
- se l'esplosione avviene per il cedimento del recipiente dovuto a surriscaldamento, come nel caso in cui la radiazione termica dovuta ad un incendio colpisce le pareti del serbatoio, per la pressione P_1 si assume un valore intermedio fra la pressione di prova idraulica e quella operativa.

Una volta valutata l'energia rilasciata nell'esplosione del recipiente occorre tenere presente che essa si ripartisce in quattro termini:

- energia cinetica dei frammenti;

- energia dell'onda d'urto;
- energia dissipata (principalmente nel riscaldamento dell'aria circostante)
- energia potenziale dei frammenti (principalmente energia di deformazione plastica dei frammenti)

Tra questi quattro termini i primi due sono largamente preponderanti rispetto agli altri, tuttavia la distribuzione percentuale tra di essi può essere molto variabili. Infatti, viene proposto [3], [6] di considerare che il 40-80% dell'energia di esplosione si dissipi nella forma di onda di pressione, mentre la rimanente va sotto forma di lancio di frammenti.

3.4 Numero dei frammenti

La predizione del numero di frammenti che si formano in un'esplosione BLEVE è stata oggetto di studi specifici da parte dell'Association of American Railroad (AAR) [7] e da Golden e Reeves, come riportato in [3]. L'AAR riporta che, su un campione di 113 rotture rilevanti di serbatoi cilindrici orizzontali in situazioni di incendio, ben l'80% di esse è evoluta in una proiezione di frammenti, mentre dagli studi di Holden e Reeves emerge che l'80% dei frammenti cade in un range di 300 m.

Il numero totale di frammenti è stato quindi valutato come funzione del volume del serbatoio:

$$N_{fram} = -3.77 + 0.0096 \cdot Vol \quad (4)$$

dove N_{fram} è il numero di frammenti e Vol è il volume del recipiente in metri cubi. Questa relazione si basa sull'esame di un numero modesto di casi e vale per recipienti di dimensioni comprese tra 700 e 2 500 m³.

Delvosalle [8] ha studiato la frammentazione di recipienti ed ha proposto di considerare che una percentuale fissa di missili ricada all'interno di un determinato range di distanze, studiando il comportamento di recipienti per Gpl, cloruro di vinile, ammoniaca e ossido di etilene. Si sono considerate come differenti i comportamenti dei serbatoi cilindrici e sferici, osservando che per i primi si ottiene per una rottura a caldo un numero medio di 6 frammenti e per una rottura a freddo di 4. Per quanto riguarda le distanze percorse per il Gpl l'80% dei frammenti cade all'interno di un range di 400 m, per il cloruro di vinile all'interno di 300 m circa e per l'ossido di etilene di circa 600 m. Per i recipienti sferici si fa riferimento ai risultati di Holden e Reeves per il Gpl: l'80% dei frammenti è in un raggio di 300 m.

3.5 Velocità iniziale dei frammenti

Per quanto la stima della velocità iniziale dei frammenti, per calcoli di prima approssimazione si può utilizzare l'espressione suggerita da Moore e riportata in [3]. In questo caso è stato sviluppato un metodo semplificato valido per l'esplosione fisica di serbatoi in pressione:

$$u_i = 392 \sqrt{\frac{PD^3}{W_f}} \quad (5)$$

dove u_i è la velocità iniziale (m/s), P la pressione di rottura del frammento (atm), D il diametro medio del frammento (m) e W_f il peso del frammento (kg). Altri metodi che si possono utilizzare per stimare questa velocità iniziale sono quelli proposti da Baum e da Baker e riportati in [6]

3.6 Range di distanza raggiunta dai frammenti

Una volta nota la velocità iniziale del frammento si può passare alla stima della distanza massima a cui esso può giungere. E' noto dalla fisica che un oggetto raggiunge la sua massima distanza se parte con un'angolatura di 45° e dall'equazione del moto si ottiene che tale massima distanza è data da:

$$r_{max} = \frac{u_i^2}{g} \quad (6)$$

dove r_{max} è la distanza massima orizzontale raggiunta, u_i la velocità iniziale e g l'accelerazione di gravità.

Per valutare il range delle distanze effettivamente percorse dai frammenti si può utilizzare il metodo proposto da Baker et al., riportato in [3]. Questi autori hanno reso disponibili in forma grafica le soluzioni di un set di equazioni differenziali che incorpora l'effetto delle forze fluidodinamiche sul frammento in volo. In

base a tale approccio un frammento in volo è soggetto a due forze legate agli attriti del pezzo con l'aria, una diretta in direzione perpendicolare alla traiettoria, ed una lungo la traiettoria.

La forza di attrito in direzione perpendicolare alla traiettoria (o longitudinale), F_L , si valuta dalla relazione:

$$F_L = \frac{C_L A_L \rho_0 v^2}{2} \quad (7)$$

in cui C_L è il coefficiente di attrito del frammento (in direzione longitudinale), A_L è l'area esposta dal frammento nel piano della traiettoria, ρ_0 è la densità dell'aria ambiente ed v è la velocità del frammento in quell'istante.

$$F_D = \frac{C_D A_D \rho_0 v^2}{2} \quad (8)$$

in cui C_D è il coefficiente di attrito del frammento (in direzione trasversale), A_D è l'area esposta dal frammento nel piano perpendicolare alla traiettoria, e gli altri simboli assumono lo stesso significato di quelli dell'eq. (7).

La procedura prospettata in [3] prevede l'utilizzo di un grafico (vedi Figura 3) in cui viene riportato l'andamento del gruppo adimensionale distanza scalata:

$$\bar{R} = \frac{\rho_0 C_D A_D R}{M_f} \quad (9)$$

in cui compare la distanza R percorsa e la massa M_f del frammento in funzione del gruppo adimensionale velocità scalata, :

$$\bar{u} = \frac{\rho_0 C_D A_D u^2}{M_f g} \quad (10)$$

in cui compare la velocità iniziale del frammento u (le altre grandezze sono state già definite).

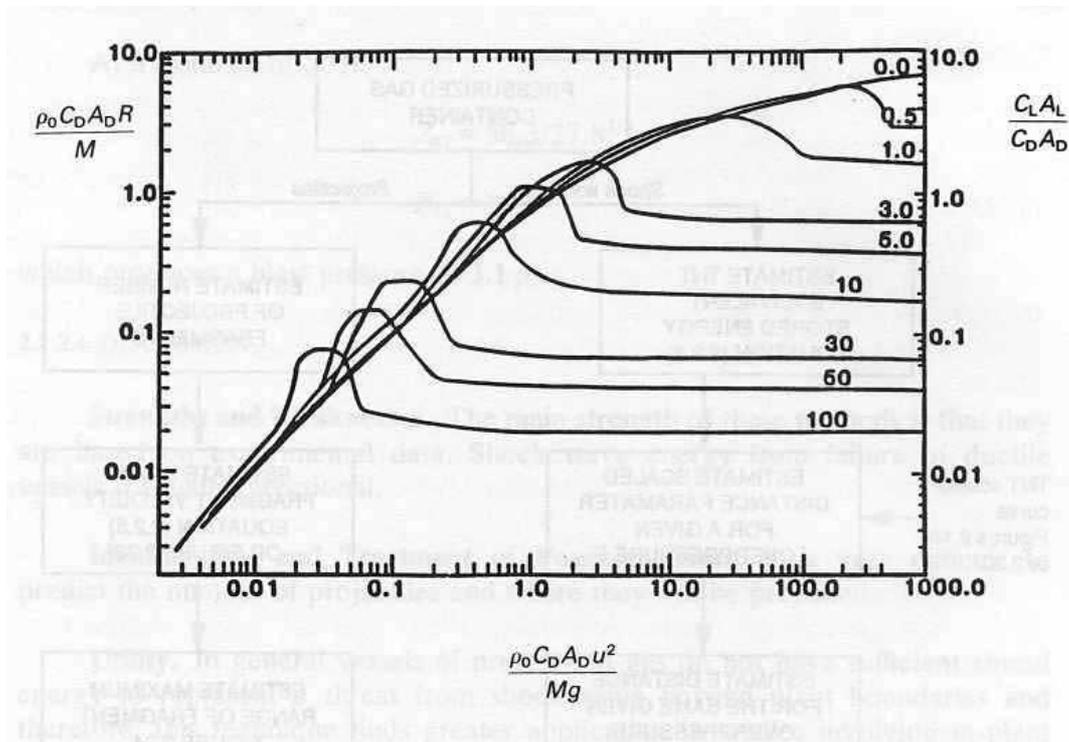


Figura 3. Distanza scalata in funzione della velocità scalata.

Le curve hanno come parametro il rapporto:

$$\frac{C_L A_L}{C_D A_D} \quad (11)$$

che tiene conto della forma del frammento.

I valori dei coefficienti di attrito C_D e C_L sono riportati in grafici e tabelle (vedi ad esempio [7] CCPS) e variano tra poco meno di 0.5, per corpi sferici, a circa 2 per strisce rettangolari di piccolo spessore. Per calcoli di prima approssimazione si può porre il rapporto $C_L A_L / C_D A_D$ pari a zero: ciò infatti non comporta errori rilevanti in tutti i casi di frammenti solidi, pesanti e spessi [3].

Per applicare la procedura di valutazione del range di distanza percorsa dai frammenti occorre conoscere il numero di frammenti, la loro massa, la loro velocità iniziale ed i loro coefficienti di attrito, nonché la densità dell'aria ambiente: per ogni frammento si calcola quindi la velocità scalata, corrispondente all'ascissa de grafico di Figura 3, ci si muove lungo la verticale fino ad incontrare la curva relativa al rapporto $C_L A_L / C_D A_D$ caratteristico del frammento, e quindi lungo l'orizzontale fino a determinare il valore della distanza scalata, da cui si ricava quello della distanza R effettivamente percorsa dal frammento.

In alternativa a questo approccio, se ne può utilizzare uno estremamente semplificato, proposto da Kinney e Graham e riportato in [3], che stima la distanza di sicurezza, nel caso dell'esplosione di una bomba, come:

$$r = 120 W^3 \quad (12)$$

dove r è la distanza di sicurezza e w è la massa di TNT in kg.

Tale approccio si può utilizzare anche per le esplosioni fisiche, una volta stimata la massa di TNT equivalente all'esplosione, ad esempio con le metodologie riportate nel testo del CCPS [7] che portano alla relazione seguente, valida nell'ipotesi di esplosione di un recipiente contenente un gas ideale che subisca un'espansione isoterma:

$$W = k V \left(\frac{P_1}{P_2} \right) R_g T_0 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (13)$$

dove W è la massa di TNT (kg), V il volume gas compresso (m^3), P_0 la pressione di riferimento (1 atm), T_0 la temperatura di riferimento (273 K), T_1 la temperatura assoluta del gas compresso (K), P_1 e P_2 i valori di pressione iniziale e finale del gas compresso (atm), R è la costante dei gas, 8.314 J/g mol K e $k = 9.7 \times 10^{-6}$ un fattore di conversione.

3.7 Valutazione dell'effetto domino

Sulla base dei passi riportati nei paragrafi precedenti è possibile stimare massa e distanza percorsa dai frammenti derivanti dall'esplosione fisica di recipienti cilindrici e sferici. Una volta determinata la distanza di ricaduta dei frammenti è quindi possibile valutare se esista o meno la possibilità che essi impattino con altre parti dell'impianto, o con altri impianti o insediamenti nel territorio circostante il sito industriale. Sulla base della massa dei frammenti si potrà quindi valutare la probabilità che l'impatto abbia esiti significativi in termini di perdita di contenimento delle apparecchiature colpite, con possibile escalation dell'incidente iniziale.

Questa parte di analisi, che coinvolge calcoli più o meno complicati, va quindi integrata con l'analisi dei lay-out dell'impianto o della sezione oggetto di studio sulla base della pericolosità delle sostanze impiegate e delle condizioni in cui queste vengono lavorate o stoccate. Gli scenari incidentali innescati dagli effetti domino vanno infatti valutati sia in termini di probabilità di occorrenza, che in termini di conseguenze provocate, andando a determinare gli eventi possibili a valle della perdita di contenimento del recipiente e le relative aree di impatto.

Infine, per avere un quadro esaustivo dell'analisi di rischio di un impianto per quello che riguarda l'accadimento di effetti domino, occorre tenere conto anche degli effetti domino innescati da radiazione termica ed onda d'urto. Questi non sono stati considerati nel presente lavoro poiché esiste una maggiore disponibilità di modelli di calcolo, sufficiente accurati, che consentono la stima della probabilità di collasso

di apparecchi sulla base del livello di radiazione termica e del tempo di esposizione al fuoco, nel caso di incendi, e sulla base del picco di sovrappressione, nel caso di un'onda d'urto dovuta ad un'esplosione.

4. ESEMPIO APPLICATIVO: ESPLOSIONE DI UN SERBATOIO SFERICO PER PROPANO

Come esempio di applicazione della metodologia illustrata in precedenza, si considera un serbatoio sferico da 1500 m³ contenente propano liquefatto. La scelta di un serbatoio di stoccaggio per questo prodotto è giustificata dal fatto che circa il 70% degli impianti a rischio di incidente rilevante sono costituiti da depositi di GPL (miscela di cui il propano è uno dei costituenti principali).

Nella tabella seguente sono riportate le informazioni chimico-fisiche sul prodotto stoccato e le condizioni di stoccaggio:

Tabella 2. Dati relativi all'esempio applicativo.

| | |
|--|-------------------------|
| Densità del propano | 505 kg/m ³ |
| Peso molecolare del propano | 44.1 |
| $\Gamma = C_p/C_v$ per il propano | 1.15 |
| Volume del serbatoio | 1 500 m ³ |
| Diametro del serbatoio | 14.2 m |
| Spessore della parete | 60 mm |
| Densità del materiale (acciaio) | 7 800 kg/m ³ |
| Stato fisico del propano in condizioni di stoccaggio | Liquido |
| Pressione di stoccaggio | 7.3 atm (730 kPa) |
| Temperatura di stoccaggio | 20°C |
| Grado di riempimento del serbatoio | 60% |
| Quantità totale di propano nel serbatoio in m ³ | 900 m ³ |
| Quantità totale di propano nel serbatoio in kg | 454 000 kg |

Si ipotizza che il recipiente sferico ceda, esplodendo, ad una pressione pari a 8.3 atm (830 kPa), per esempio per la presenza di fenomeni corrosione localizzata. Lo spessore della lastra è stato calcolato pari a 60 mm comprensivo del sovrappessore di corrosione.

Dall'eq.4 si può valutare il numero di frammenti, che risulta pari a 10.63, valore che viene arrotondato ad 11 frammenti. Dato il peso complessivo del recipiente, ipotizzando che tutti i frammenti abbiano le stesse dimensioni, si può stimare il peso medio di ogni frammento, pari a circa 27000 kg. Si può ora applicare l'espressione semplificata di Moore (eq. 5) per stimare la velocità iniziale dei frammenti. Il diametro equivalente del frammento medio è stato stimato ipotizzando che la superficie totale della sfera si ripartisca in parti uguali tra gli 11 frammenti, ottenendo quindi un valore di circa 58 m², da cui si ottiene un diametro equivalente di 4.28 m. La velocità iniziale del frammento medio risulta pari a circa 58 m/s.

Si può quindi procedere nel calcolo del range di distanza percorsa dai frammenti assumendo la densità dell'aria pari a 1,19 kg/m³. Per il coefficiente di attrito C_D , data la forma dei frammenti, si può assumere il valore 1.17. Si valuta quindi la velocità scalata (eq. 9) che risulta pari a 1.26. Dal grafico di Figura 3, assumendo per semplicità che il rapporto $C_L A_L / C_D A_D$ sia pari a zero si ottiene un valore di distanza scalata pari a circa 0.88, da cui, tramite l'equazione 10, si ottiene una distanza percorsa dai frammenti pari a 240 m. I calcoli sono stati effettuati utilizzando i fogli elettronici in allegato al volume del CCPS "Guidelines for chemical process quantitative risk analysis" [3].

A questo punto può essere interessante confrontare questa distanza con le distanze di impatto che possono essere valutate sulla base di valori di soglia individuati dalla normativa o suggeriti nella letteratura per una valutazione dei possibili effetti domino dovuti a cause diverse dal lancio dei frammenti nell'esplosione del recipiente, come ad esempio da un incendio.

Per il recipiente in esame, a seguito di un'esplosione fisica di tipo BLEVE, può, ad esempio, verificarsi un fireball, poiché il propano, stoccato come gas liquefatto, è altamente infiammabile. Tale evento può essere simulato con uno dei numerosi software di analisi delle conseguenze presenti in commercio, valutando i campi di radiazione termica. Nel nostro caso si è utilizzato il software Phast 6.0 della DNV Technica, ottenendo, in corrispondenza di un valore di soglia assunto pari a 37.5 kW/m², una distanza di 466 m dal centro del fireball, che è dello stesso ordine di grandezza di quella ottenuta in precedenza per il lancio dei frammenti.

Le distanze sopra indicate richiamano l'attenzione di chi è preposto all'analisi di rischio sulla possibilità che un incidente primario, in questo caso il BLEVE di un'unità di stoccaggio, coinvolga altre unità di impianto presenti all'interno dell'area di impatto degli scenari individuati dalla simulazione.

Ovviamente per stabilire l'effettiva possibilità che si inneschino effetti domino occorre tenere conto del lay-out delle apparecchiature presenti all'interno della zona di impatto, sia dei frammenti che per l'irraggiamento termico, e della presenza di eventuali direzioni preferenziali, barriere ed ostacoli, ecc.

5. CONCLUSIONI

La metodologia proposta fornisce delle prime indicazioni da tenere in considerazione per la verifica del lay-out dell'impianto sia in condizioni di impianto preesistente che di nuovo impianto. Tuttavia, la conoscenza degli effetti domino richiede ulteriori approfondimenti, riguardo, ad esempio, ai punti seguenti:

- accurata determinazione dell'esatto valore dell'energia di esplosione attraverso applicazioni sia teoriche che pratiche individuando la tipologia di trasformazione più corretta per ogni tipologia di fluido;
- approfondimento dell'approccio statistico andando a valutare quanto riportato nelle numerose banche dati esistenti;
- valutazione della probabilità di insorgenza di effetti domino;
- individuazione delle procedure più rigorose da seguire per l'analisi degli impianti esistenti o di nuova costruzione;
- utilizzo dell'High Performance Calculation Network, reti di calcolatori presso il centro ricerche dell'ENEA alla Casaccia (RM) in grado di effettuare un elevatissimo numero di operazioni al secondo in grado quindi di risolvere l'elevato numero di equazioni che descrivono il comportamento del materiale di cui è composto il recipiente sottoposto a pressione in caso di esplosione.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Prof. B. Mazzarotta per l'utile discussione sui temi affrontati in questo lavoro.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] TNO, Analysis of the LPG incident in San Juan Ixhuapetec, Mexico City, 19 November 1984, -TNO, 1985
- [2] Min.Interno – Direzione generale della protezione civile e dei servizi antincendio-, Rassegna comparata di incidenti di notevole entità, ROMA –1984
- [3] Centre for Chemical Process Safety, CCPS, Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, AIChE, New York, 2000
- [4] R.C. Reid, Science, 203 (1979) 1263
- [5] Marsili G., Analisi del rischio di incidente rilevante- Sicurezza e Impresa, IPSOA, Roma, 1995
- [6] F. P. Lees, Loss prevention in the process industry, Butterworths, London 1995
- [7] Association of American Railroad, AAR, Analysis of tank car, Report R146, Washington DC, AAR (1973)
- [8] C. Delvosalle, DominXL 2.0- Manuel technique-Annexe 6: calcul de distance d'effets pour les explosions avec ejection de missiles, Université Polytechnique de Mons, Belgium, 2001
- [9] U. Hauptmans, A procedure for analyzing the flight of missiles from explosion of cylindrical vessels, *Journal of Loss Prevention*, 14, 395-402 (2001)
- [10] A.M. Birk, Hazards from propane BLEVE's: an update and proposal for emergency responder, *Journal of Loss Prevention*, 9, 173-181 (1996)