

MODELLAZIONE DI SCENARI INCIDENTALI DOVUTI ALLA PROIEZIONE DI FRAMMENTI

Gianfilippo Gubinelli*, Severino Zanelli*, Valerio Cozzani^

*Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali
Università degli Studi di Pisa
via Diotisalvi n.2, 56126 Pisa (Italy)

^Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali
Università degli Studi di Bologna
viale Risorgimento n.2, 40138 Bologna (Italy)
g.gubinelli@ing.unipi.it

SOMMARIO

Il presente studio ha riguardato lo sviluppo di un modello per la stima della probabilità di impatto di un frammento su un bersaglio secondario a seguito del cedimento di una apparecchiatura causato da esplosione interna. Il modello presentato sviluppato permette di quantificare la probabilità di impatto di un frammento su di un bersaglio di geometria e posizione nota in funzione della massa, della forma e della velocità iniziale del frammento, nonché della distanza del bersaglio. Lo sviluppo del modello è stato basato sulla definizione analitica della traiettoria dei frammenti e sull'analisi probabilistica delle direzioni di lancio iniziali dei frammenti. Il modello è stato validato sulla base di dati reperibili in letteratura ed è stato utilizzato per ottenere dei risultati indicativi utilizzabili per una prima definizione delle distanze di sicurezza da adottare per la proiezione di frammenti.

1. INTRODUZIONE

Numerosi incidenti nell'industria di processo sono stati causati dalla frammentazione di apparecchiature. Il cedimento meccanico di apparecchiature è normalmente causato da esplosione interna, di tipo chimico (esplosione confinata) o fisico (BLEVE). A seguito del superamento della massima tensione ammissibile, il fasciame dell'apparecchiatura si frammenta e l'energia dovuta alla pressione interna viene parzialmente convertita in energia cinetica che causa la proiezione dei frammenti. Tuttavia, il numero, la massa, la distanza a cui i frammenti vengono proiettati sono elementi di difficile previsione. In letteratura sono stati proposti vari approcci al problema. Non è però ancora disponibile una metodologia unitaria per la valutazione di questa tipologia di scenari incidentali, in particolare con riferimento al possibile danneggiamento di altre apparecchiature colpite dai frammenti proiettati.

La proiezione di frammenti è una delle cause principali di effetto domino [1-6] dato che i frammenti possono colpire e danneggiare apparecchiature che si trovano anche a considerevoli distanze dal punto in cui si trova l'apparecchiatura soggetta ad esplosione. Senza una attenta analisi del fenomeno, è difficile stabilire distanze di sicurezza e azioni preventive da applicare in questi casi [6]. La valutazione del rischio dovuto a questo tipo di incidenti può essere effettuata utilizzando l'approccio adottabile nell'ambito degli studi di rischio d'area per la valutazione quantitativa dell'effetto domino [7-9], basata sulla determinazione delle frequenze e delle conseguenze degli scenari incidentali. In questo ambito risulta necessario lo sviluppo di un modello generale per la valutazione della probabilità di impatto dei frammenti generati in una esplosione su possibili apparecchiature bersaglio. Alcuni autori hanno proposto modelli per la valutazione della probabilità di impatto dei frammenti basati su analisi statistiche di incidenti avvenuti nel passato [10,11]. Tali modelli sfruttano un numero limitato di eventi incidentali e, quindi, un loro utilizzo generalizzato potrebbe non essere opportuno senza una opportuna validazione. Hauptmanns [12,13], invece, propone un valido approccio probabilistico allo studio della frammentazione di apparecchiature, ma il suo lavoro è orientato più verso la predizione della distribuzione dei frammenti nel luogo circostante l'esplosione e non alla valutazione della probabilità di impatto su apparecchiature.

Un modello generale per la valutazione della probabilità di impatto di un frammento su di uno specifico bersaglio non è ancora disponibile in letteratura. Il presente lavoro è stato dedicato allo sviluppo di un modello di questo tipo. Da una attenta analisi del fenomeno fisico e sulla base di alcuni studi presenti in letteratura, riguardanti l'analisi delle traiettorie di proiettili, è risultato opportuno affrontare il problema utilizzando contemporaneamente sia un approccio di tipo deterministico, sia un approccio di tipo probabilistico. Semplici equazioni analitiche della traiettoria sono state definite utilizzando un modello balistico, calibrato su un modello più complesso ampiamente utilizzato in letteratura [14], che permettesse di tenere conto della presenza di forze di attrito e dell'azione della forza di gravità. La definizione di tali

equazioni ha reso possibile l'applicazione di un approccio probabilistico per la quantificazione della probabilità di impatto del frammento sul bersaglio mediante la definizione di opportune distribuzioni di probabilità per la direzione iniziale dei frammenti, modificabili a posteriori sulla base di ulteriori informazioni specifiche del sito eventualmente disponibili. Il modello è stato applicato ad alcuni casi di studio per poter valutare l'influenza dei parametri necessari alla sua implementazione ed è stato validato mediante l'utilizzo di dati su incidenti del passato [15]. Sulla base dei risultati ottenuti nell'analisi di sensitività e nella validazione è stato possibile definire una procedura di utilizzo del modello per l'ottenimento di risultati utilizzabili nella determinazione delle distanze di sicurezza per la proiezione dei frammenti. I risultati ottenuti costituiscono quindi un punto di partenza sia per valutazioni di massima della probabilità di effetti domino generati dalla frammentazione di apparecchiature, che per valutazioni di dettaglio della probabilità di impatto di frammenti su apparecchiature critiche presenti sull'impianto.

2. PROBABILITÀ DI EFFETTO DOMINO CAUSATO DA FRAMMENTI

La frequenza di un effetto domino causato dall'impatto di frammenti generati in un incidente primario su di una apparecchiatura bersaglio può essere quantificata nel seguente modo:

$$f_d = f_p \cdot P_d \quad (1)$$

dove f_p è la frequenza attesa dell'evento primario e P_d indica la probabilità che avvenga la seguente sequenza di eventi necessaria perché abbia luogo l'effetto domino:

- Generazione di più frammenti con data massa e forma;
- Proiezione dei frammenti con data velocità iniziali;
- Impatto di uno o più frammenti con un bersaglio;
- Perdita di contenimento del bersaglio a causa dell'impatto con i frammenti.

Ogni frammento generato nell'evento primario può essere causa di effetto domino con una frequenza pari a:

$$f_{d,F} = f_p \cdot P_{d,F} \quad (2)$$

dove $P_{d,F}$ è la probabilità di accadimento della sequenza descritta in precedenza riferita ad un determinato frammento. Tale probabilità risulta essere:

$$P_{d,F} = P_{gen,F} \cdot P_{imp,F} \cdot P_{dam,F} \quad (3)$$

dove:

- $P_{gen,F}$ è la probabilità con cui può essere generato un frammento F con determinata forma, massa e velocità iniziale;
- $P_{imp,F}$ è la probabilità che il frammento F vada ad impattare sul bersaglio,
- $P_{dam,F}$ è la probabilità di danneggiamento del bersaglio a causa dell'impatto con il frammento F.

Nell'ipotesi che sia sufficientemente bassa la probabilità che due frammenti vadano a colpire lo stesso bersaglio, ipotesi credibile dato che generalmente il numero di frammenti generati nella frammentazione delle apparecchiature è limitato, la frequenza attesa per l'effetto domino causato dall'impatto di uno dei possibili frammenti generabili nell'esplosione può essere determinata come segue:

$$f_d = \sum_F f_{d,F} = f_p \cdot \sum_F P_{d,F} \quad (4)$$

e, sfruttando l'eq. 1 la probabilità P_d diventa:

$$P_d = \sum_F P_{d,F} \quad (5)$$

Questo approccio mostra in maniera diretta che la probabilità di effetto domino causato dalla generazione di frammenti in un evento incidentale primario può essere quantificata qualora sia possibile determinare le

probabilità $P_{gen,F}$, $P_{imp,F}$, e $P_{dam,F}$ per ogni possibile frammento F generabile nella frammentazione dell'apparecchiatura primaria.

Il presente studio ha riguardato la quantificazione della probabilità di impatto ($P_{imp,F}$) di un frammento con determinata forma, massa e velocità iniziale su di un determinato bersaglio. Lo sviluppo di un modello per la valutazione della $P_{imp,F}$ è il primo passo per lo sviluppo di una corretta metodologia di analisi della probabilità di effetto domino da frammenti.

3. MODELLO PER LA VALUTAZIONE DELLA PROBABILITÀ DI IMPATTO DI UN FRAMMENTO

3.1 Sistema di riferimento e ipotesi iniziali

Come è ben noto il comportamento di un frammento in volo è influenzato dalla sua forma, dalla sua massa e dalla sua velocità a causa della complessa interazione tra forze gravitazionali ed attrito [1,14]. Nel seguito la traiettoria e la velocità del frammento verrà descritta utilizzando la traiettoria e la velocità del suo centro di massa.

In Fig.1-(a) si riporta una semplice schematizzazione di una possibile condizione di impatto di un frammento con una certa forma, massa e velocità iniziale $\mathbf{u}$ con un determinato bersaglio. Il punto O , punto di partenza della traiettoria del frammento (coincidente con la posizione dell'apparecchiatura soggetta ad esplosione), è stato considerato come centro del sistema di riferimento assoluto $x'y'z'$, dove $x'z'$ è il piano orizzontale e l'asse y' ha direzione opposta all'accelerazione gravitazionale $\mathbf{g}$. In questo sistema di riferimento è stato definito un vettore $\mathbf{d}$, di modulo unitario, per rappresentare la direzione di lancio iniziale del frammento. Utilizzando gli angoli direzionali θ and φ (vedi fig.1a) è possibile definire analiticamente il vettore nel seguente modo: $\mathbf{d} = [\cos(\theta)\cos(\varphi); \sin(\varphi); \sin(\theta)\cos(\varphi)]$

La velocità iniziale $\mathbf{u}$ può essere così definita come $\mathbf{u} = u\mathbf{d}$. E' stato quindi definito un secondo sistema di riferimento xyz , ottenuto ruotando il sistema $x'y'z'$ di un angolo θ intorno all'asse y' , tale che il piano xy coincidesse con il piano di sviluppo della traiettoria. Naturalmente questa esemplificazione è possibile se si trascurano gli effetti del vento e se si trascurano le possibili deviazioni dovute a movimenti rotazionali del frammento intorno al proprio baricentro. Queste ipotesi possono essere accettate se si tiene conto che, generalmente, le velocità dei frammenti sono di un ordine di grandezza superiori alla normale velocità del vento e che moti rotatori del frammento sono causa di deviazioni della traiettoria ininfluenti, da un punto di vista probabilistico, su quella che può essere definita come traiettoria media di volo.

Anche per quanto riguarda la definizione delle condizioni di impatto sono state fatte alcune ipotesi. Come rappresentato in fig.1-(b), si considera che l'impatto del frammento sul bersaglio avvenga se esiste un punto di intersezione I tra la traiettoria del centro di massa del frammento ed il profilo del bersaglio lungo il piano xy , il quale è generalmente funzione dell'angolo θ . Tale dipendenza è stata eliminata considerando per ogni piano xy un profilo del bersaglio rettangolare e costante (fig.1-(b)) definito mediante la massima altezza del bersaglio e la massima profondità in direzione x ottenuta considerando ogni piano xy . Nel caso di bersaglio cilindrico verticale questa profondità corrisponde con il diametro. Questa approssimazione viene compensata dal fatto che le dimensioni del frammento non vengono considerate nella definizione della condizione di impatto. Infatti, generalmente, i frammenti hanno dimensioni minori rispetto ai possibili bersagli di interesse (unità di processo o serbatoi contenenti quantità di sostanze rilevanti). E' necessario sottolineare, comunque, che le dimensioni del frammento vengono trascurate solo nella verifica delle condizioni di impatto.

3.2 Probabilità di impatto

Sulla base delle assunzioni introdotte nel precedente paragrafo, la probabilità di impatto di un frammento con determinata forma, massa e velocità iniziale su di un determinato bersaglio dipende esclusivamente dalla probabilità che il frammento stesso venga lanciato in una data direzione iniziale $\mathbf{d}$. Tale probabilità può essere espressa in funzione degli angoli direzionali θ and φ :

$$P_{F,d}(\theta, \varphi) = \wp(\theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (6)$$

dove $\wp(\theta, \varphi)$ è la distribuzione di probabilità della direzione $\mathbf{d}$. Definendo gli intervalli $\Delta\theta$ and $\Delta\varphi$ degli angoli θ e φ per i quali è verificata la condizione di impatto, come mostrato in figura 2, la probabilità di impatto del frammento può quindi essere definita nel seguente modo:

$$P_{\text{imp},F} = \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\varphi} \wp_{\text{dir}}(\theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (7)$$

3.3 Distribuzione di probabilità per la direzione iniziale del frammento

La direzione di lancio iniziale del frammento può dipendere da diversi fattori quali: tipologia dell'apparecchiatura che si frammenta, posizione delle tubazioni principali, le caratteristiche dell'esplosione, etc. In assenza di specifiche informazioni sull'evento incidentale che genera i frammenti è stata assunta una distribuzione di probabilità uniforme per la direzione di lancio iniziale del frammento. Questo approccio è corretto nel caso in cui si voglia applicare il modello in studi di rischio d'area su lay-out complessi. Nello studio di dettaglio di particolari eventi incidentali, la tipologia di distribuzione di probabilità ora considerata può essere facilmente modificabile sulla base di informazioni più precise. Come già fatto per la direzione iniziale $\mathbf{d}$ del frammento, anche la distribuzione di probabilità può essere espressa in funzione degli angoli direzionali φ and θ , (con φ compreso tra $-\pi/2$ and $\pi/2$ e θ compreso tra 0 and 2π). Considerando una sfera di raggio r con centro in O è possibile definire la distribuzione di probabilità uniforme per la direzione iniziale $\mathbf{d}$ come il rapporto tra una superficie infinitesima dA della sfera e la superficie totale della sfera stessa::

$$\wp(\theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot d\varphi = \frac{dA}{4\pi r^2} = \frac{\cos\varphi d\varphi d\theta}{4\pi} \quad (8)$$

L'eq (8) permette di riscrivere l'eq.(7) nel seguente modo:

$$P_{\text{imp},F} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\varphi} d\theta \cdot \cos(\varphi) d\varphi \quad (9)$$

Sulla base delle assunzioni fatte in precedenza (invarianza radiale del profilo del bersaglio), l'intervallo degli angoli φ che verificano la condizione di impatto è indipendente da θ e, quindi, è possibile scrivere:

$$P_{\text{imp},F} = \frac{\Delta\theta}{4\pi} \int_{\Delta\varphi} \cos(\varphi) d\varphi \quad (10)$$

Naturalmente, gli intervalli $\Delta\theta$ and $\Delta\varphi$ devono verificare le condizioni di impatto.

3.4 Equazioni della traiettoria del frammento

Da quanto esposto in precedenza risulta evidente la necessità di avere a disposizione equazioni che permettano di descrivere la traiettoria di un frammento. Vari modelli per la determinazione delle traiettorie dei frammenti sono disponibili in letteratura. Una valida rassegna viene riportata da Lees in [1]. Un modello molto usato è quello di Baker et al. [14]. Tale modello è basato sulla descrizione della traiettoria effettuata considerando l'accelerazione del centro di massa del frammento e tre tipi di forze agenti sul frammento stesso: forza gravitazionale, attrito e forza di galleggiamento. Le ultime due sono strettamente dipendenti dalla forma e della massa del frammento, nonché dalla sua velocità istantanea. L'utilizzo di questo modello presenta oerò alcuni problemi nell'ambito di questo studio:

- richiede la conoscenza di due parametri affetti da incertezza: la forma del frammento ed il suo orientamento rispetto allatraiettorria;
- richiede la risoluzione di equazioni differenziali mediante metodi numerici.

Nell'ambito degli studi di rischio d'area è necessario invece limitare il numero di parametri iniziali necessari per implementare il modello. Inoltre, nell'approccio probabilistico da noi definito è utile avere delle funzioni analitiche della traiettoria in modo da poter ottimizzare i tempi di calcolo per la definizione delle condizioni di impatto. Quindi anche in base all'approccio proposto da Hauptmanns [12,13], è stato utilizzato un modello semplificato per la definizione delle equazioni della traiettoria generalmente usato per la descrizione del volo di oggetti che viaggiano a velocità subsoniche (inferiori a circa 340 m/s). In questo modello, si utilizzano le seguenti equazioni differenziali semplificate:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + k \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (-1)^n k \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + g = 0 \quad (12)$$

dove x e y sono le coordinate del frammento all'istante t , g è l'accelerazione di gravità, k è un fattore di attrito e n è uguale a 1 nella parte discendente della traiettoria e uguale a 2 nella parte ascendente. I termini in k identificano le forze di attrito, che, in regimi subsonici, possono essere considerate proporzionali al quadrato delle velocità del frammento nelle due direzioni x ed y . Il fattore di proporzionalità k è funzione della forma e della massa del frammento. Queste equazioni possono essere applicate nel presente studio in quanto, sia l'applicazione dei metodi comunemente utilizzati per la determinazione delle velocità iniziali dei frammenti [10,16], sia valori sperimentali [16-19], forniscono, per scenari incidentali credibili, valori delle velocità iniziali inferiori a 200 m/s.

Il fattore di attrito k da utilizzare nel modello ora introdotto è stato definito mediante un confronto con i risultati ottenibili dall'applicazione del modello di Baker et al [14] a frammenti che non presentano forme appiattite o allungate, dato che generalmente, i frammenti generati nelle esplosioni non sono di questo tipo [12,14,16]. In questo caso il modello di riferimento necessita della definizione di un fattore di attrito DF:

$$DF = \frac{C_D A_D}{M} \quad (13)$$

dove C_D è un coefficiente di attrito, funzione della forma del frammento e della sua orientazione rispetto alla traiettoria, A_D è l'area della proiezione del frammento su di un piano perpendicolare alla traiettoria ed M è la massa del frammento.

Utilizzando k come parametro di fitting è stato possibile verificare che il modello adottato in questo lavoro fornisce le stesse distanze massime di proiezione dei frammenti, per ogni possibile velocità iniziale dei frammenti, se si usa la seguente correlazione tra il fattore k ed il fattore DF:

$$k = a \cdot DF - b \quad (14)$$

dove a e b sono costanti dimensionali ($a=0.69 \text{ kg/m}^3$ and $b=3.28 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$). Dato che non si vuole introdurre come ulteriore parametro l'orientamento del frammento rispetto alla traiettoria si propone di utilizzare nell'eq. (14) un valore medio del fattore di attrito DF:

$$DF_a = \frac{DF_{\max} + DF_{\min}}{2} \quad (15)$$

dove $DF_{\min}$ e $DF_{\max}$ sono rispettivamente il minimo ed il massimo dei valori di DF ottenuti considerando tutte le possibili orientazioni del frammento.

Una volta definito il fattore di attrito k , risolvendo le eq. (11) e (12) possono essere facilmente definite delle funzioni analitiche della traiettoria del frammento mediante le quali procedere alla determinazione degli intervalli $\Delta\theta$ e $\Delta\phi$ che verificano le condizioni di impatto descritte nel paragrafo 3.1. In particolare è stato sviluppato un programma di calcolo dedicato alla determinazione di tali intervalli.

3.5 Modello semplificato basato sulla 'Distanza Minima'

Il modello probabilistico introdotto nei paragrafi precedenti può essere ulteriormente semplificato se si trascura la possibilità che il frammento possa oltrepassare il bersaglio. Con riferimento alla fig.2-(b), questo equivale ad assumere che per ogni angolo maggiore di $\phi_{\min 1}$ la condizione di impatto viene verificata. In questo caso è stato possibile, trascurando effetti di rimbalzo del frammento sul terreno, ottenere la seguente espressione per la probabilità di impatto:

$$P_{\text{imp},F}(k, u) \cong \frac{\Delta\theta}{2\pi} [0.5 - PI] \quad (16)$$

$$PI = z_1 \cdot \frac{D_{\min}}{D_{\max}} + z_2 \cdot \left(\frac{D_{\min}}{D_{\max}} \right)^{20} + (0.5 - z_1 - z_2) \cdot \exp \left[z_3 \cdot \frac{D_{\min} - D_{\max}}{D_{\min}} \right] \quad (17)$$

dove $D_{\max}$ è la distanza massima raggiungibile dal frammento (dipendente dal fattore di attrito k e dalla velocità iniziale u), $D_{\min}$ è la distanza minima del bersaglio dalla sorgente dei frammenti (sul piano xy) e z_1 , z_2 e z_3 sono parametri funzione di k ed u .

Noti i valori di k ed u è possibile utilizzare le eq. (16) e (17) per quantificare la probabilità di impatto del frammento sullo specifico bersaglio.

Questo approccio può essere considerato valido nel caso di bersagli molto alti e posizionati vicino o ad una sufficiente distanza dal centro dell'esplosione. In generale, comunque, i valori delle probabilità ottenuti in questo caso sovrastimano la probabilità di impatto reale e possono essere considerati come valori indicativi della stessa.

4. RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 Definizione di casi di studio

Per analizzare i risultati ottenibili con il modello proposto è stato definito un insieme significativo di casi di studio. In particolare sono stati definiti frammenti di diversa forma, massa e velocità iniziale. In tabella 1 sono riportati i dati relativi alle geometrie dei frammenti scelti: fondi emisferici e curve di tubazioni. A queste due geometrie possono essere associati valori del fattore di attrito di diverso ordine di grandezza. Per ogni frammento sono state ipotizzate quattro velocità iniziali: 50m/s, 100m/s, 150m/s and 200m/s. Il modello sviluppato è stato quindi applicato alla valutazione della probabilità di impatto di ogni frammento su bersagli predefiniti in funzione della distanza del bersaglio dalla sorgente dell'esplosione. In tabella 2 si riportano le caratteristiche geometriche dei bersagli ipotizzati.

4.2 Applicazione del modello

La Figura 5-(a) mostra le probabilità di impatto in funzione della distanza del bersaglio dalla sorgente dei frammenti calcolate per il frammento F1 proiettato con una velocità iniziale pari a 50 m/s e per tutti i bersagli riportati in tabella 2. Risultati qualitativamente simili sono stati ottenuti per tutti gli altri casi di studio. La probabilità di impatto è risultata essere sempre inferiore a 10^{-1} per distanze credibili del bersaglio (cioè superiore a 20 m) e scende al di sotto di 10^{-2} per distanze dei bersagli superiori a 100 m. In figura 5-(a) è evidente come l'andamento della probabilità di impatto in funzione della distanza è simile per tutti i bersagli considerati. Tale probabilità decresce in modo quasi lineare in un diagramma log-log tranne che per valori delle distanze dei bersagli prossimi alla distanza massima raggiungibile dal frammento. In questo caso, infatti, la debole dipendenza tra la distanza di proiezione del frammento e l'angolo di proiezione ϕ causa un notevole incremento del $\Delta\phi$ che identifica tutte le traiettorie che intersecano il profilo del bersaglio (vedi eq.(10)). E' evidente, inoltre, l'influenza delle dimensioni del bersaglio sulla probabilità di impatto. Per bersagli di dimensioni maggiori si hanno ovviamente probabilità di impatto maggiori: si confrontino ad esempio le curve relative a T1 e T5 oppure T6 e T8. Si può notare anche che per distanze dei bersagli maggiori di 20 m si hanno probabilità di impatto simili per bersagli che presentano valori simili del prodotto dell'altezza per il raggio del bersaglio ($H_B \cdot R_B$), mentre il rapporto tra l'altezza ed il raggio del bersaglio (H_B/R_B) gioca un ruolo importante solo per distanze del bersaglio inferiore a 20 m.

La figura 5-(b) mostra le probabilità di impatto ottenute con il modello a 'Distanza minima' per gli stessi casi di studio riportati in figura 5-(a). come si può vedere questo modello semplificato fornisce valori della probabilità di impatto maggiori rispetto al modello più dettagliato. La differenza tra i due modelli può arrivare a circa un ordine di grandezza, anche se ciò accade nei casi in cui la probabilità di impatto scende sotto valori di 10^{-2} . La massima differenza assoluta tra le probabilità ottenute con i due modelli si ha nel caso di basse velocità (50 m/s) ed è risultata essere pari a $3 \cdot 10^{-2}$ in tutti i casi di studio. Si può concludere dunque che il modello semplificato con l'ipotesi della 'Distanza minima' fornisce valori più conservativi della probabilità di impatto, ma data la sua semplicità di implementazione, può essere utilizzato per una prima stima del limite superiore delle probabilità di impatto.

L'influenza del fattore di attrito sulla probabilità di impatto è ben evidenziato in figura 6-(b) nella quale si riportano le probabilità di impatto sul bersaglio T5 ottenute per i frammenti F4 e F5 proiettati con una

velocità iniziale pari a 100 m/s. Tali frammenti presentano rispettivamente il maggiore ed il minore dei valori dei fattori di attrito ottenuti per i frammenti considerati (vedi tabella 1). Le curve ottenute per gli altri frammenti sono comprese tra queste due curve. La massima differenza delle probabilità di impatto in funzione del fattore di attrito è risultata essere pari a $4 \cdot 10^{-3}$. La limitata influenza del fattore di attrito sulla probabilità di impatto è una conferma della validità dell'approccio proposto per il calcolo del fattore di attrito di un frammento. Come è possibile vedere dalla tabella 1, infatti, i valori minimi e massimi dei fattori di attrito ottenuti per ogni frammento in funzione dell'orientamento rispetto alla traiettoria sono dello stesso ordine di grandezza del valore medio considerato nelle simulazioni.

L'influenza della velocità iniziale è ben rappresentata in fig. 6-(a). Come si può vedere la probabilità di impatto è scarsamente influenzata dal valore della velocità iniziale, mentre la distanza massima di impatto del frammento è fortemente influenzata da questo parametro. La massima differenza delle probabilità di impatto in funzione della velocità iniziale è risultata essere pari a $3 \cdot 10^{-3}$. Con velocità iniziali maggiori si ottengono probabilità di impatto non nulle per distanze dalla sorgente maggiori. Si può concludere, quindi, che la velocità iniziale è un parametro critico nella determinazione della massima distanza di proiezione. Sulla base di queste osservazioni si suggerisce, per un approccio conservativo alla valutazione delle probabilità di impatto, di assumere la maggiore tra le velocità iniziali credibili.

5. VALORI SOGLIA PER LA PROIEZIONE DI FRAMMENTI

L'approccio probabilistico adottato nel presente lavoro è stato utilizzato, previa validazione mediante confronto con dati di esplosioni reali [15], per una valutazione preliminare della credibilità di danneggiamento di apparecchiature bersaglio o di effetti domino dovuti alla generazione di frammenti nell'esplosione di apparecchiature.

Sulla base dell'analisi di un significativo numero di tipologie di frammenti (fondi emisferici, curve di tubazione, serbatoi o parte di serbatoi cilindrici, dischi) di varie dimensioni è stato possibile identificare un range credibile per i valori dei fattori di attrito k dei frammenti generabili nell'esplosione di un serbatoio, Δk , che è risultato essere compreso tra 10^{-4} m^{-1} e 10^{-2} m^{-1} .

Le velocità iniziali massime dei frammenti sono state determinate considerando due possibili scenari primari: esplosione di un serbatoio contenente gas in pressione e BLEVE di serbatoi di gas liquefatto in pressione. Per la prima tipologia di scenari la velocità massima ipotizzabile è stata scelta sulla base della massima velocità ottenibile applicando i vari metodi proposti in [10] per la determinazione delle velocità iniziali di frammenti generati nell'esplosione di serbatoi in pressione di diversa volumetria. Per la seconda tipologia di scenari la velocità iniziale massima ipotizzabile per i frammenti è stata dedotta utilizzando i dati riportati in [15] per BLEVE di serbatoi di gas liquefatti in pressione di GPL. Le velocità iniziali massime sono risultate essere pari a 190 m/s nel primo caso e 120 m/s nel secondo caso. Tale differenza è accettabile sulla base delle differenze caratteristiche dei due fenomeni esplosivi.

Ipotizzando distribuzioni di probabilità uniformi per: i) direzione iniziale dei frammenti; ii) velocità iniziale dei frammenti (compresa tra 0 e la velocità iniziale massima precedentemente definita per ogni tipologia di scenario primario) e iii) fattori di attrito dei frammenti generabili ($k \in \Delta k$), è stato possibile utilizzare il modello semplificato basato sulla 'distanza minima del bersaglio' per determinare la probabilità di impatto medie dei frammenti su bersagli di diversa geometria:

$$\bar{P}_{\text{imp}} = \frac{1}{u_{\text{max}} \Delta k} \int_0^{u_{\text{max}}} \int_{10^{-4}}^{10^{-2}} P_{\text{imp}}(k, u) du dk \quad (20)$$

La P_{imp} media può essere così calcolata (mediante approssimazione numerica) in funzione della geometria del bersaglio e della distanza dello stesso dal centro dell'esplosione.

In figura 7 si riportano i risultati ottenuti considerando i bersagli T1-T5 (vedi tabella 2). Le probabilità riportate si riferiscono ad un singolo frammento, quindi, devono essere moltiplicate per il numero di frammenti che possono essere generati in ogni esplosione, generalmente inferiore a 10 [10,15]. E' possibile concludere che, anche moltiplicando per 10 le probabilità riportate in fig. 7, la probabilità di impatto dei frammenti è comunque inferiore a 10^{-2} per distanze maggiori di 500m e per una volumetria massima del bersaglio pari a 5000 m^3 .

6. CONCLUSIONI

E' stato sviluppato un modello per la determinazione della probabilità di impatto di un frammento generato nell'esplosione di una apparecchiatura su di un determinato bersaglio. Mediante la definizione di

distribuzioni di probabilità per la direzione di proiezione iniziale del frammento è stato possibile utilizzare espressioni analitiche delle traiettorie dei frammenti per determinare la probabilità di impatto.

Il modello sviluppato necessita di tre parametri: la massa, la forma e la velocità iniziale del frammento. L'analisi parametrica presentata in questo lavoro ha permesso di verificare che la forma e la massa del frammento, utili per la determinazione del fattore di attrito del frammento stesso, non hanno una influenza rilevante sulla probabilità di impatto. Anche la velocità iniziale ha una influenza limitata sui valori della probabilità di impatto mentre la distanza di proiezione massima del frammento è risultata essere fortemente dipendente da questo parametro. I risultati ottenuti hanno mostrato che valori conservativi della probabilità di impatto sul bersaglio in funzione della distanza dalla sorgente dei frammenti possono essere ottenuti utilizzando la massima velocità iniziale ipotizzabile sulla base dell'energia di esplosione.

Le probabilità di impatto di un singolo frammento calcolate in un numero significativo di casi di studio risultano essere sempre inferiori a 10^{-1} per distanze credibili del bersaglio. Tali probabilità scendono a valori inferiori a 10^{-2} per distanze maggiori di 50 m. I valori delle probabilità di impatto ottenute con il modello semplificato basato sulla 'Distanza Minima' del bersaglio risultano essere sempre conservativi. Nei casi di studio è stata registrata una differenza massima nella probabilità di impatto pari a $3 \cdot 10^{-2}$. Comunque, visto che tale modello semplificato permette una riduzione significativa dei tempi di calcolo, potrebbe essere utilmente utilizzato per la stima preliminare delle probabilità di impatto. Tale modello semplificato è stato inoltre utilizzato per l'ottenimento di dati che, mediante la definizione di opportuni cut-off probabilistici, possono essere utilizzati per la definizione di valori di soglia per la proiezione di frammenti.

Possiamo concludere che l'approccio presentato in questo lavoro può essere un valido punto di partenza per lo studio dell'effetto della proiezione di frammenti nell'ambito di analisi di rischio, permettendo sia l'identificazione di possibili effetti domino, sia la determinazione delle probabilità di impatto, che un primo approccio alla stima delle distanze di sicurezza per la proiezione di frammenti.

TABELLE

Tabella 1. Tipologie di frammenti considerati nei casi di studio.

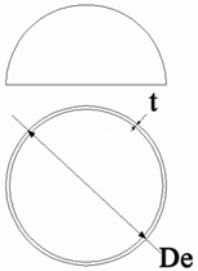
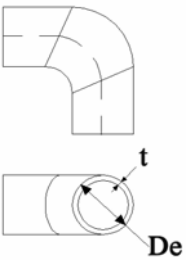
Tipo Frammento	ID	De (m)	t (m)	M (kg)	$k_{\min}$ (1/m)	$k_{\max}$ (1/m)	k (1/m)
1. Semisferico 	F1	1.6	0.015	480	$6.60 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$9.80 \cdot 10^{-4}$
	F2	1.6	0.025	810	$3.70 \cdot 10^{-4}$	$7.72 \cdot 10^{-4}$	$5.71 \cdot 10^{-4}$
	F3	2	0.02	1000	$4.76 \cdot 10^{-4}$	$9.84 \cdot 10^{-4}$	$7.30 \cdot 10^{-4}$
	F4	2	0.04	2040	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$4.67 \cdot 10^{-4}$	$3.42 \cdot 10^{-4}$
2. Curva di Tubazione 	F5	0.32	0.0071	40	$3.25 \cdot 10^{-3}$	$4.94 \cdot 10^{-3}$	$4.10 \cdot 10^{-3}$
	F6	0.61	0.0125	266	$1.80 \cdot 10^{-3}$	$2.73 \cdot 10^{-3}$	$2.26 \cdot 10^{-3}$

Tabella 2. Dimensioni dei bersagli (cilindri verticali).

Target ID	H_B (m)	R_B (m)	H/R_B	$H_B R_B$ (m ²)
T1 (Atm. Ves. 25m ³)	4.75	1.35	3.5	6.4
T2 (Atm. Ves. 100 m ³)	7.47	2.2	3.3	16.4
T3 (Atm. Ves.. 500 m ³)	11.6	3.9	3	45.2
T4 (Atm. Ves.. 1000 m ³)	6.9	7.5	0.92	51.7
T5 (Atm. Ves.. 5200 m ³)	12.3	12.5	0.98	153.7
T6 (column)	10	0.5	20	5
T7 (column)	20	1	20	20
T8 (column)	40	2	20	80

FIGURE

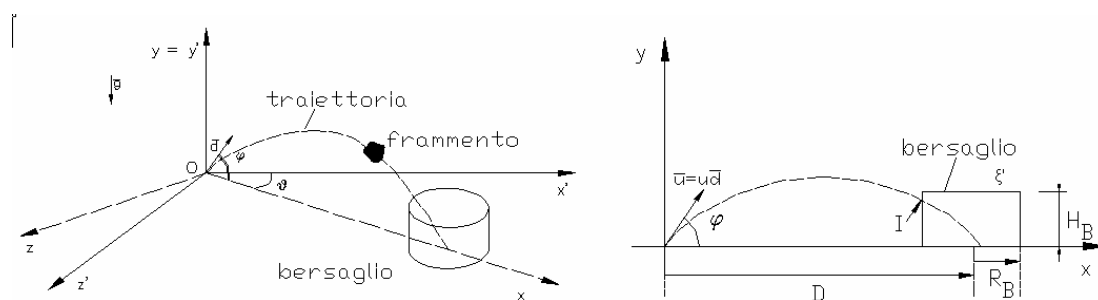


Figura 1: Schematizzazione adottata per analizzare l'impatto di un frammento su di un bersaglio. (a) sistemi di riferimento; (b) rappresentazione della condizione di impatto sul piano xy .

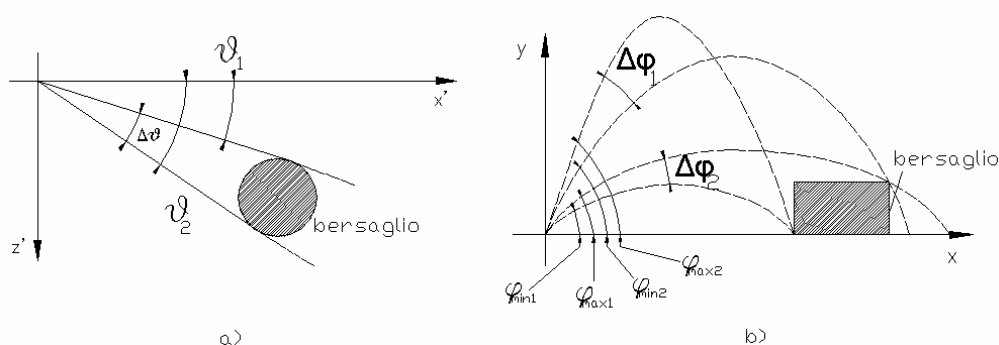


Figura 2: Angoli di impatto sul piano $x'z'$ (a) e sul piano xy (b).

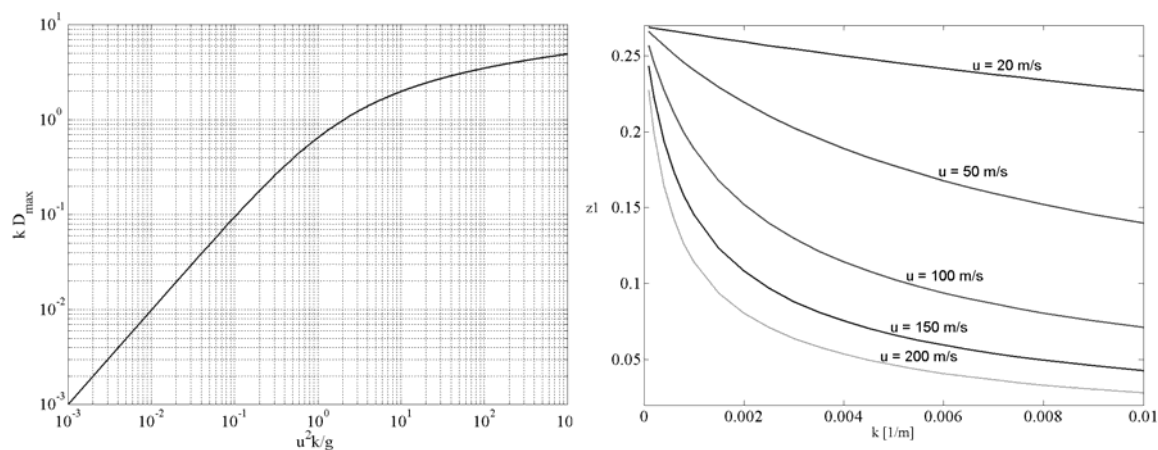


Figura 3. Valori dei parametri da utilizzare nell'eq (17).

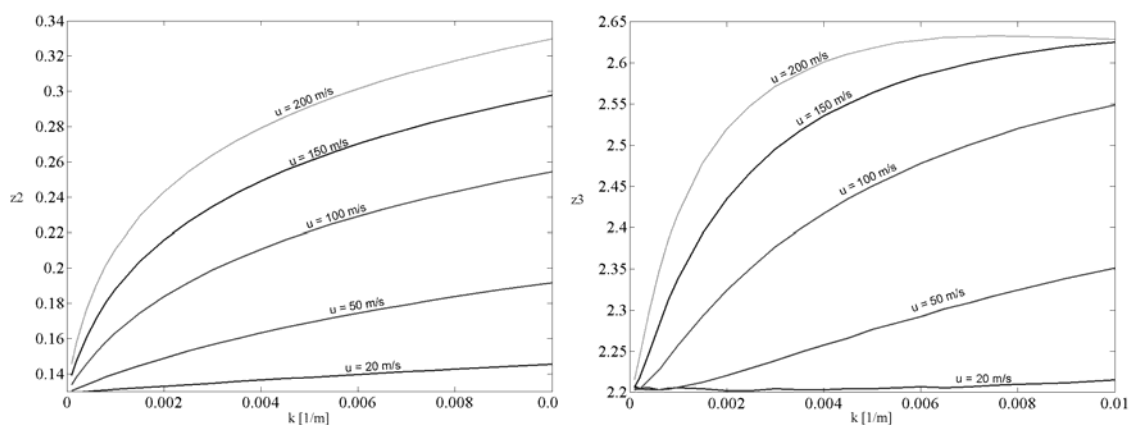


Figura 4. Valori dei parametri da utilizzare nell'eq (17).

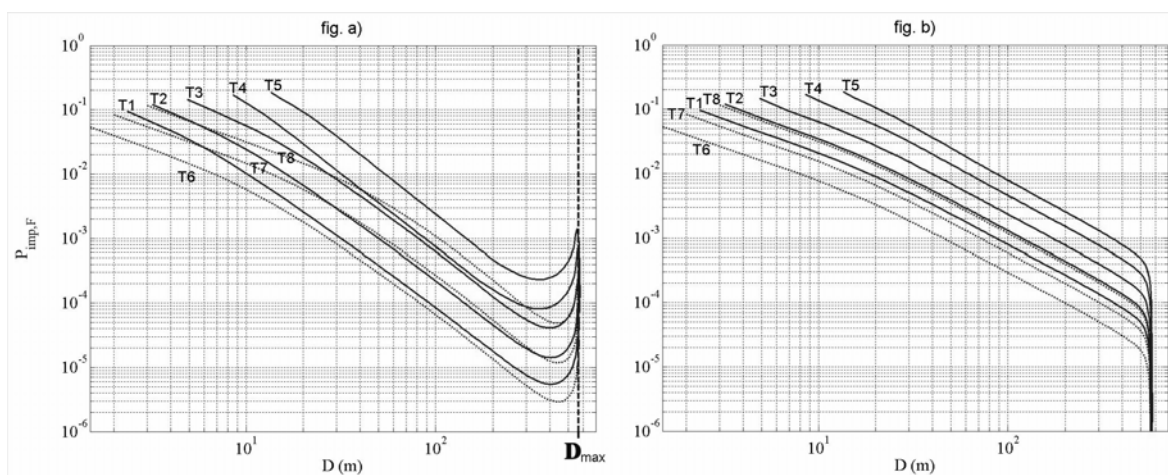


Figura 5. Probabilità di impatto di un frammento in funzione della distanza dei vari bersagli ottenute con i due modelli per: frammento F5, velocità iniziale 200m/s ($D_{max} = 567$ m).. (a) modello, (b) modello semplificato.

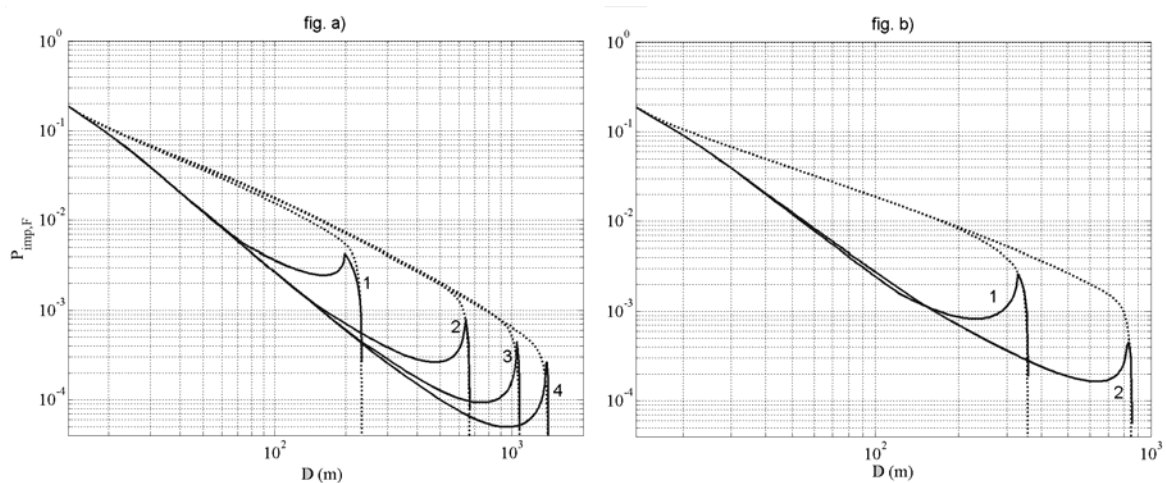


Figura 6. Probabilità di impatto su bersaglio T5 ottenute con il modello (linea solida) ed il modello semplificato (linea tratteggiata) fig. (a): Frammento F1, velocità iniziale 50m/s (1), 100 m/s (2), 150 m/s (3), 200 m/s (4); fig (b): Frammenti F5 (1) ed F4 (2), velocità iniziale 100 m/s.

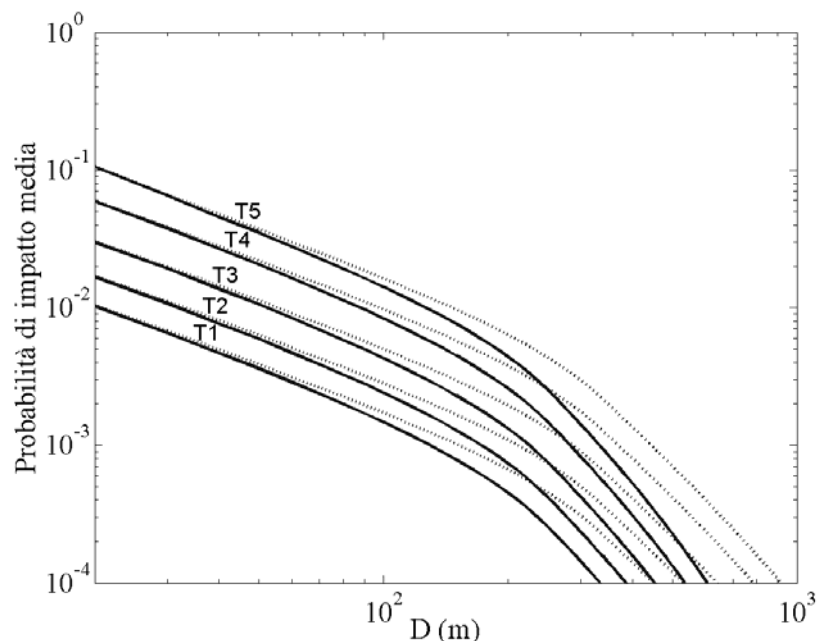


Figura 7. Probabilità di impatto media su bersagli cilindrici verticali. Linea continua: $u_{max} = 120\text{m/s}$ (BLEVEs); Linea tratteggiata: $u_{max} = 190\text{m/s}$ (esplosione di serbatoi di gas in pressione).

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici- per il supporto finanziario ricevuto.

ELENCO DEI SIMBOLI

A_D	: Area della proiezione del frammento su di un piano perpendicolare alla traiettoria
C_D	: Coefficiente di attrito adimensionale dipendente dalla forma del frammento
$\mathbf{d}$	: Direzione iniziale del frammento
D	: Distanza dal centro dell'esplosione dell'asse del cilindro circoscritto al bersaglio
D_e	: Diametro esterno
D_{max}	: Distanza massima raggiungibile da un frammento lanciato con una data velocità iniziale
D_{min}	: Distanza minima del bersaglio dal centro dell'esplosione
DF	: Fattore di attrito definito in Baker et al. [7]
f_d	: Frequenza dell'effetto domino
f_p	: Frequenza dell'evento primario dell'effetto domino
$f_{d,F}$	: Frequenza dell'effetto domino dovuto ad un determinato frammento
g	: Accelerazione di gravità
H_B	: Altezza del bersaglio
k	: Fattore di attrito definito nel presente lavoro
Δk	: intervallo credibile per i valori dei fattori di attrito k dei frammenti generabili in una esplosione.
k_F	: Fattore di attrito k per un determinato frammento F con determinata forma e massa.
M	: Massa del frammento
N_F	: Numero di frammenti generati in una esplosione
$P_{d,F}$	: Probabilità di effetto domino causato da un frammento, con determinata forma, massa e velocità iniziale, generato nell'esplosione
$P_{dam,F}$	: Probabilità di danneggiamento del bersaglio a causa dell'impatto con un frammento, con determinata forma, massa e velocità iniziale, generato nell'esplosione
$P_{gen,F}$	: Probabilità che un frammento, con determinata forma e velocità iniziale, venga generato nell'esplosione
$P_{imp,F}$	: Probabilità di impatto tra il bersaglio e un frammento con determinata forma, massa e velocità

	iniziale
$P_{F,d}$	: Probabilità che un frammento venga lanciato in una direzione $\mathbf{d}$
ϕ_{dir}	: Distribuzione di probabilità per la direzione di lancio iniziale di un frammento
R	: Valore massimo dell'intervallo di distanze raggiungibili da una percentuale F dei frammenti in una esplosione.
R_B	: Raggio del bersaglio.
θ	: Angolo direzionale del frammento nel sistema di riferimento assoluto
φ	: Angolo direzionale del frammento nel sistema di riferimento assoluto
t	: Spessore dei frammenti utilizzati nei casi di studio
$\mathbf{u}$	: Velocità iniziale del frammento
u	: Valore della velocità iniziale del frammento
u_F	: Velocità iniziale di uno specifico frammento
u_{max}	: Velocità iniziale massima con cui un frammento viene lanciato in una determinata esplosione

BIBLIOGRAFIA

- [1] F.P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, II Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), (1996).
- [2] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Ed., AIChE, New York, (2000).
- [3] G.N. Pettitt, R.R. Schumacher and L.A. Seeley, Evaluating the probability of major hazardous incidents as a result of escalation event, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.6, p.37 (1993).
- [4] D.F. Bagster, R.M. Pitblado, the estimation of domino incident frequencies- an approach, *Process Safety and Environmental Protection*, 69 (1991) 196.
- [5] F.I. Khan, S.A. Abbasi, Models for Domino Effect analysis in chemical process industries, *Process Safety Progress*, Vol. 17, p107 (1998).
- [6] J. Gledhill, I. Lines, Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites, CR Report 183, Health and Safety Executive, 1998
- [7] V. Cozzani, S. Zanelli. *Proc. 10th Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Elsevier, Amsterdam 2001; pp.1263-74.
- [8] V. Cozzani, E. Salzano, The quantitative assessment of domino effect caused by overpressure. Part I: probit models, *Journal of Hazardous Material*, 107 (2004) 67.
- [9] V. Cozzani, E. Salzano, The quantitative assessment of domino effect caused by overpressure. Part II: case-studies, *Journal of Hazardous Material*, 107 (2004) 81.
- [10] CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs*, AIChE, New York, (1994).
- [11] N.F. Scilly, J.H. Crowter, Methodology for Predicting Domino effects from Pressure Vessel Fragmentation, *International Conference on Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human reliability in Process Safety*, (1992) p.1.
- [12] U. Hauptmanns, A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 16, pp.307-312 (2001).
- [13] U. Hauptmanns, A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 14, pp 395-402 (2001).
- [14] W.E. Baker, P.A. Cox, P.S. Westine, J.J. Kulesz, R.A. Strehlow, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, Amsterdam, (1983).
- [15] P.L. Holden, A.B. Reeves, Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels, *IchemE Symposium Series No. 93* p.205 (1985).
- [16] C.J.H. Van Den Bosh, R.A.P.M. Weterings, *Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)*, III Ed., Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL), (1997).
- [17] M.R. Baum, Rupture of a gas pressurised cylindrical vessel: the velocity of a detached end-cap, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 8-3, pp 149-161 (1995).
- [18] M.R. Baum, Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: the velocity of and-cap and rocket missiles, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 12, pp137-145 (1999).
- [19] M.R. Baum, the velocity of large missiles resulting from axial rupture of gas pressurised cylindrical vessels, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 14, pp 199-203 (2001).