

Valutazione dei rischi per serbatoi di stoccaggio in pressione di gas esplosivi: caso di studio

L. Schoepflin*, F. Boschi*

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

Sommario

Lo stoccaggio di gas in serbatoi pressurizzati è pratica comune nell'ambito industriale. Il presente lavoro si propone di valutare i rischi legati all'esercizio di serbatoi contenenti gas esplosivi. Tali rischi sono legati sia alla pressione di stoccaggio, sia alla natura esplosiva dei gas. In entrambi i casi l'approccio utilizzato è stato tratto dall'analisi della letteratura scientifica, ove sono presenti numerosi studi di tipo teorico e sperimentale che affrontano la problematica cercando di quantificare il rischio attraverso il calcolo dell'energia di rilascio associabile ad un evento catastrofico.

Si è proceduto quindi al dimensionamento di una parete di protezione dalle esplosioni, considerando lo scenario di un'esplosione di un serbatoio di stoccaggio di una miscela di gas contenente metano. Il dimensionamento è stato condotto considerando la sovrappressione che si genera a causa dell'esplosione.

In secondo luogo si è condotta un'analisi delle conseguenze dell'impatto dei frammenti dovuti ad esplosione fisica o chimica sulla parete. Si sono calcolate le traiettorie di tali frammenti nell'ipotesi che riescano a scavalcare la parete, ponendo l'attenzione sulla distanza massima raggiunta e sul valore di velocità con cui il frammento impatta col suolo. Infine, nel caso di esplosione chimica, è stato calcolato l'effetto di riduzione della sovrappressione dovuto alla parete stessa. Si è condotta infine una specifica valutazione tramite un'apposita matrice di rischio che fosse in grado di evidenziare il beneficio in termine di mitigazione del rischio ottenibile tramite l'installazione delle opportune barriere protettive e di ulteriori misure di mitigazione.

Il caso di studio

Il caso preso in esame per il presente lavoro riguarda lo stoccaggio a 18 bar di una miscela contenente metano al 78% (22% di gas inerte) in un serbatoio avente un volume di 150 m³. Sono stati analizzati anche altri casi (diverse composizioni della miscela, diverse pressioni di stoccaggio), con una metodologia del tutto analoga a quella qui mostrata. Si è calcolata la quantità di TNT equivalente, grandezza comunemente usata per la valutazione del potenziale esplosivo legato ad un data quantità di gas. Per far questo si considera il potere calorifico del tritolo E_{TNT} pari a 4520 kJ/kg e quello del metano E_m pari a 49845 kJ/kg. Data la massa di metano M_m contenuta nel serbatoio nelle diverse condizioni di stoccaggio, si ha:

$$W = \frac{M_m E_m}{E_{TNT}} \cdot \varepsilon$$

Dove ε è l'efficienza di esplosione posta pari al 7,5% [1]. Si ottiene quindi W , la quantità di TNT equivalente pari a 1277,86 kg.

Progettazione di una parete protettiva

Per quanto riguarda la progettazione di una parete protettiva, è stato necessario innanzitutto procedere al calcolo della sovrappressione generata dall'esplosione chimica della miscela. Per far ciò, si è utilizzato il metodo proposto in [1], che calcola le grandezze legate all'esplosione sulla base della distanza scalata Z definita come segue:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

Dove R è la distanza in metri dal centro dell'esplosione. Considerando la barriera posta alla distanza di 1 metro, è stato possibile ricavare Z per le diverse condizioni di stoccaggio e dunque la sovrappressione relativa attraverso il seguente grafico:

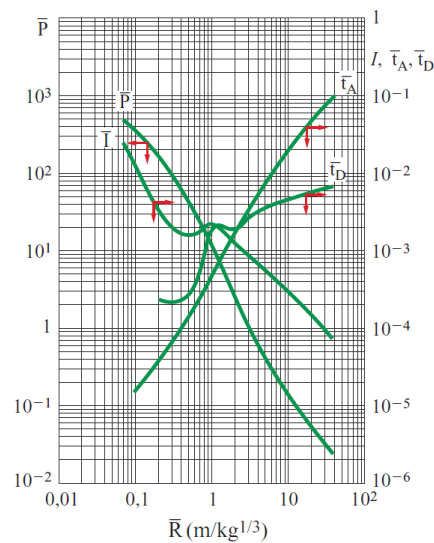


Figura 1: valori di sovrappressione P in funzione della distanza scalata [1]

Il valore di sovrappressione relativa che costituisce la sollecitazione a cui è sottoposta la parete protettiva posta ad 1 metro dall'esplosione è pari a 350.

Si è scelto di valutare lo spessore di una parete avente caratteristiche di resistenza al fuoco REI120. In Figura 2 si riporta sezione della barriera, armata con una doppia rete di $\phi 20/20$. Lo spessore calcolato risulta essere pari a 45 cm.

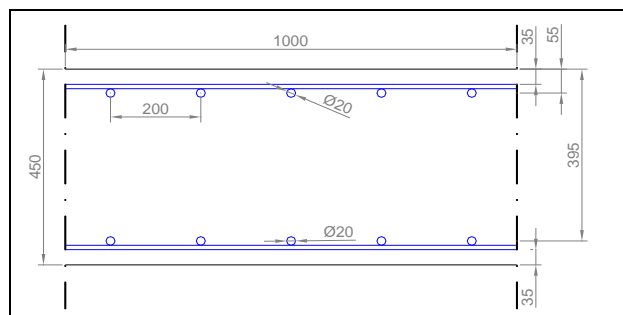


Figura 2: sezione tipo della parete protettiva

Valutazione della dinamica dei frammenti che si liberano a causa dell'esplosione

Sono state valutate le traiettorie dei frammenti del serbatoio che potrebbero essere proiettati durante l'esplosione e il loro effetto nel caso in cui si verifichi un impatto con la barriera di cemento precedentemente dimensionata.

Saranno valutate le dinamiche dei frammenti per due scenari:

- Esplosione fisica dovuta ad un cedimento strutturale e causata dalla pressione interna al serbatoio
- Esplosione chimica dovuta all'innesco del combustibile stoccato nel serbatoio

I due scenari si distinguono in modo particolare per il tipo di frammenti prodotti. Per lo scenario di esplosione fisica sono ipotizzabili rotture in corrispondenza di giunzioni saldate o bullonate.

Evento	ID	Descrizione frammento
Esplosione fisica (rottura duttile)	0	N.A.
Esplosione fisica (rottura fragile)	1	Fondo emisferico
	2	Calotta
	3	Porzione del fondo emisferico
	4	Frammento di diametro 10 mm
	5	Frammento di diametro 50 mm
	6	Frammento di diametro 100 mm
	7	Frammento di diametro 500 mm
Esplosione chimica	8	Frammento dovuto ad esplosione chimica

Tabella 1: frammenti considerati dovuti all'esplosione del serbatoio

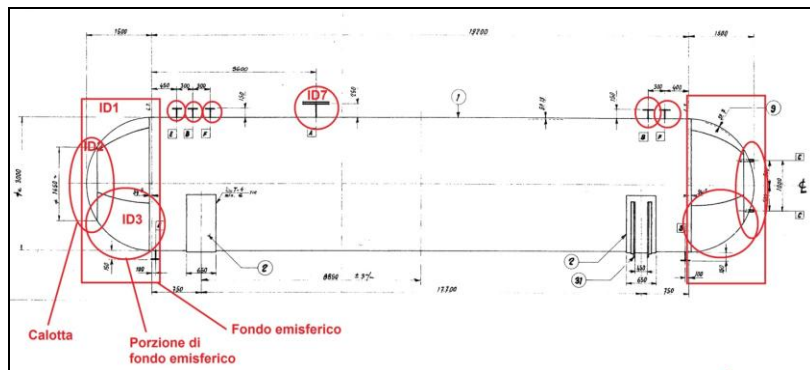


Figura 3: illustrazione dei possibili frammenti

Per lo scenario di esplosione chimica sono ipotizzabili frammenti dovuti alla totale rottura del serbatoio. Per un frammento di dimensioni rilevanti, si ipotizza che la pressione di stoccaggio agisca sul frammento fino all'istante in cui esso si trova alla distanza pari al diametro (o dimensione caratteristica) del frammento stesso. Per un frammento di dimensioni inferiori, si ipotizza che la pressione agisca sul frammento fino all'istante in cui esso si trova alla distanza pari a due volte il diametro (o dimensione caratteristica) del frammento stesso. Tali ipotesi si basano sul fatto che il decadimento della pressione interna al serbatoio è più rapido nel caso di perdita di un frammento di dimensioni maggiori [2]. Nel secondo caso le considerazioni sulla rottura del serbatoio del frammento vengono fatte in accordo a [3] e si basano su valutazioni statistiche che dipendono dalla massa e dallo spessore del serbatoio e dalla massa e dalle caratteristiche dell'esplosivo contenuto.

ID	1	2	3	-	identificativo frammento
D elemento	2986	1636	675	mm	diametro elemento proiettato
D elemento	2,986	1,636	0,675	m	diametro elemento proiettato
S	7,002	2,102	0,980	m ²	superficie elemento proiettato
F	13305252	3994019	1862247	N	forza agente sull'elemento
s elemento	0,007	0,007	0,007	m	spessore elemento
M elemento	1800	125,14	334,97	kg	massa elemento
a	7391,81	31916,21	5559,41	m/s ²	accelerazione elemento
d	2,986	1,636	1,11711	m	distanza fino a cui si applica a
t	0,028	0,010	0,020	s	tempo fino al quale agisce a
v	210,1	323,2	111,4	m/s	velocità dell'elemento

Tabella 2: frammenti di grandi dimensioni calcolati in accordo a [2] (esplosione fisica)

I frammenti considerati sono riportati in Tabella 1. I frammenti 4, 5 e 6 sono considerati rappresentativi di possibili distacchi di ausiliari e componenti secondari del sistema. Il range di dimensioni considerato (da 10mm a 100mm) consente di contemplare una ampia casistica in termini di velocità e massa dei frammenti. Si riportano i valori di massa e velocità per i singoli frammenti di seguito descritti in Tabella 2 e Tabella 3 e Tabella 4:

ID	4	5	6	7	-	identificativo frammento
D elemento	10	50	100	500	mm	diametro elemento proiettato
D elemento	0,01	0,05	0,1	0,5	m	diametro elemento proiettato
S	7,854E-05	0,0019635	0,00785	0,19635	m ²	superficie elemento proiettato
F	149,23	3730,64	14922,60	373064	N	forza agente sull'elemento
s elemento	0,00200	0,00800	0,00900	0,01300	m	spessore elemento
V elemento	1,57E-07	1,57E-05	7,07E-05	2,55E-03	m ³	volume elemento
M elemento	0,00123	0,12	0,55	19,91	kg	massa elemento
a	121795	30449	27066	18738	m/s ²	accelerazione elemento
d	0,02	0,1	0,2	1	m	distanza fino a cui si applica a
t	0,000573	0,002563	0,003844	0,010331	s	tempo fino al quale agisce a
v	69,8	78,0	104,0	193,6	m/s	velocità dell'elemento

Tabella 3: frammenti di piccole dimensioni calcolati in accordo a [2] (esplosione fisica)

ID	8	-	identificativo frammento
M elemento	1,42	kg	massa elemento
v	746,0	m/s	velocità dell'elemento

Tabella 4: frammenti calcolati in accordo a [3] (esplosione chimica)

Calcolo delle barriere di cemento per il contenimento dei frammenti

Per i frammenti ipotizzati nei precedenti paragrafi, si procede sulla base delle correlazioni suggerite in [2] al calcolo dello spessore che dovrebbe avere una parete di cemento per contenere i suddetti frammenti. Tale correlazione considera l'impatto di un proiettile su una parete. Nel caso in esame, i risultati ottenuti devono essere debitamente ricondotti agli scenari considerati. In particolare per gli scenari 1 e 2 è necessario procedere a valutazioni che tengano conto della reale forma del frammento che impatta sulla parete: si tratta di calotte sferiche, quindi soggette ad una propria deformazione che diminuisce in modo consistente la loro capacità di danneggiamento e penetrazione di una parete. Un altro importante fattore da considerare nella valutazione degli spessori è il numero di frammenti relativi al singolo scenario. Le correlazioni usate, infatti, si riferiscono ad un singolo frammento. Nel caso in esame, tale ipotesi non sempre risulta valida: ad esempio nello scenario 3 è ragionevole supporre che i frammenti considerati siano in numero pari o superiore a due, comportando così la necessità di incrementare lo spessore calcolato. Nello scenario 8, che riguarda l'esplosione chimica, è necessario considerare il numero elevato di proiettili che impattano sulla parete, la concomitante onda di pressione e il calore che si sviluppa. Quindi anche in questo caso lo spessore è stato opportunamente aumentato rispetto a quanto suggerito dalle correlazioni utilizzate. Infine per gli scenari 4, 5 e 6 si sono adottati spessori minimi ragionevoli, poiché i calcoli restituivano spessori molto sottili incompatibili con considerazioni strutturali. Come si nota in Tabella 5, si è proceduto al calcolo di due tipi di spessore: quello che non subisce danneggiamenti dalla parte opposta (s) dell'impatto e quello che invece ferma il frammento con proiezione di schegge di materiale dal lato opposto (t). Le considerazioni sopra esposte hanno suggerito

di procedere ad un calcolo degli spessori teorici (t_t e s_t) secondo le correlazioni proposte in [2], debitamente corretti con opportuni coefficienti (t_c e s_c).

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	identificativo frammento	-
M	1800,00	125,14	334,97	0,00123	0,12	0,55	19,91	1,42	massa	kg
v	210,1	323,2	111,4	69,8	78,0	104,0	193,6	746,0	velocità	m/s
D	2,99	1,64	0,68	0,01	0,05	0,10	0,50	0,13	dimensione	m
t_t	1,42	0,70	0,60	0,004	0,025	0,051	0,28	0,34	spessore t	m
t_c	0,47	0,43	0,90	0,17	0,17	0,17	0,28	1,70		
s_t	3,28	1,64	1,30	0,010	0,057	0,118	0,64	0,37	spessore s	m
s_c	1,10	1,00	1,95	0,20	0,20	0,20	0,64	1,85		

Tabella 5: calcolo degli spessori t ed s

Traiettorie dei frammenti

Nello studio delle traiettorie dei frammenti è necessario innanzitutto ipotizzare quali sono i frammenti che, una volta liberatisi a causa di una rottura del serbatoio, possono superare la barriera di cemento presente. Per fare questo è stato condotto uno studio delle traiettorie al variare dell'angolo di inclinazione con cui il frammento inizia il proprio moto.

I frammenti analizzati sono i seguenti: ID 3, ID 4, ID 5, ID 6, ID 7, ID 8. Si escludono i frammenti ID1 e ID2 poiché, con la parete posta alla distanza di 1 metro dal serbatoio, è ragionevole supporre che tali frammenti non riescano ad oltrepassarla (vedi Figura 3).

Per tutti i frammenti si ipotizza un coefficiente di resistenza (drag coefficient, Cd) al moto nell'aria pari a 0,5 e 1,5. Tali assunzioni consentono di evidenziare una forte dipendenza della traiettoria da detto coefficiente, il cui valore non è di facile valutazione per i frammenti. Il moto dei frammenti è stato calcolato sulla base del secondo principio della dinamica. Lungo la direzione orizzontale la forza applicata è stata considerata pari alla componente lungo la stessa direzione della forza di resistenza dell'aria, pari a:

$$F_{Dx} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot U^2$$

Dove ρ è la densità del mezzo in cui si muove il frammento (aria), A è la superficie frontale del frammento e U è la componente lungo la direzione orizzontale della velocità.

ID	3	4	5	6	7	8	identificativo frammento	-
α	55	30	30	30	30	30	angolo di partenza	°
X_{max}	425,8	45,9	127,3	167,1	308,7	479,8	distanza massima	m
Y_{max}	217,8	16,4	33,8	46,0	89,6	175,1	altezza massima	m
U_{im}	16,1	3,8	11,0	11,0	11,1	5,8	velocità impatto (comp. x)	m/s
V_{im}	-51,4	-12,3	-20,2	-22,8	-30,0	-34,4	velocità impatto (comp. y)	m/s
Mod_{im}	53,9	12,9	23,0	25,3	32,0	34,9	velocità impatto (modulo)	m/s

Tabella 6: distanze massime raggiunte dal frammento (Cd=1,5)

ID	3	4	5	6	7	8	identificativo frammento	-
α	55	30	30	30	30	30	angolo di partenza	°
X_{max}	714,3	99,7	239,5	335,6	676,8	1229,8	distanza massima	m
Y_{max}	312,4	27,4	51,3	75,4	168,3	411,4	altezza massima	m
U_{im}	31,2	9,4	22,8	23,5	24,8	13,4	velocità impatto (comp. x)	m/s
V_{im}	-68,7	-18,0	-27,1	-32,0	-45,0	-57,2	velocità impatto (comp. y)	m/s
Mod_{im}	75,5	20,3	35,4	39,7	51,4	58,7	velocità impatto (modulo)	m/s

Tabella 7: distanze massime raggiunte dal frammento (Cd=0,5)

Analogamente per la direzione verticale, lungo la quale agisce anche la forza di gravità. Si considera un sistema di riferimento con l'origine nel centro del serbatoio, con l'asse X orientata come l'asse del serbatoio e l'asse Y verso l'alto.

Si riportano in Tabella 6 e Tabella 7 le distanze massime che i frammenti possono raggiungere (X_{max} e Y_{max}) e le velocità di impatto al suolo (U_{im} , V_{im} e Mod_{im}).

Valutazione dei danni a cose o persone

Per la valutazione dei danni conseguenti all'esplosione di un serbatoio, si è proceduto individuando alcuni limiti di sovrappressione associabili ad effetti definiti su persone e strutture. Si possono utilizzare ai fini pratici i seguenti riferimenti per i danni osservabili:

ID	Danni osservati
E	Valore limite di sicurezza oltre il quale è attesa una probabilità del 95% di non sperimentare danni seri: valore limite per la proiezione dei frammenti; rottura del 10% dei vetri delle finestre; danni lievi ai tetti delle case
D	Valore limite per danni riparabili agli edifici
C	Danni limitati ad apparecchi industriali pesanti (dell'ordine dei 1500kg)
B	Distruzione totale degli edifici, apparecchiatura pesanti (dell'ordine dei 3000kg) spostate e gravemente danneggiate
A	Valore limite per danni diretti alle persone

Tabella 8: danni osservabili

In Tabella 9, a ciascun valore di sovrappressione legato ai danni si associa la distanza alla quale tale valore viene raggiunta in assenza di barriere protettive. La corrispondenza tra sovrappressione e distanza si può ricavare dal grafico di Figura 1.

ID	Sovrappressione [kPa]	Distanza D [m] fino alla quale si osserva il danno
E	2,07	≈ 400
D	10,0	≈ 115
C	20,7	≈ 70
B	68,9	≈ 35
A	100	≈ 28

Tabella 9: distanze e danni osservati

Alla presenza di barriere protettive, si associa una riduzione della sovrappressione registrata in un punto dello spazio a causa dell'esplosione. Tale riduzione è quantificabile calcolando gli opportuni fattori di riduzione (A_p), attraverso le relazioni proposte in [4]. Esse determinano un fattore moltiplicativo per il valore di sovrappressione in funzione della geometria del sistema in esame. In particolare le grandezze di interesse sono: altezza della barriera, distanza tra sorgente esplosiva e barriera, distanza tra barriera e punto in cui si valuta la sovrappressione, altezza della sorgente esplosiva da terra.

Nel presente lavoro si utilizza il valore di A_p così definito [6]:

$$A_p = \frac{P_{w,b}}{P_{w/o,b}}$$

Con $P_{w,b}$ e $P_{w/o,b}$ rispettivamente pressione in presenza di barriere e pressione in assenza di barriere. Risulta evidente che il valore di A_p è compreso tra 0 ed 1. La relazione proposta per il calcolo è:

$$A_p = -0,1359 + \left[0,3272 + 0,1995 \log_{10} \left(\frac{H}{D} \right) \right] \log_{10} R - 0,5626 \log_{10} \left(\frac{H}{D} \right) + 0,4666 \frac{L}{D}$$

Con H altezza della barriera, D distanza del punto in cui si valuta la sovrappressione dall'esplosione e L distanza della barriera dall'esplosione.

Si tenga presente che, poiché la barriera è alta 6 metri, ma l'esplosione è localizzata in un punto che non è a terra, si è posta una altezza pari a 4 metri per il calcolo di A_p . Si procede quindi poi alla valutazione del coefficiente di riduzione A_p all'aumentare della distanza. Il grafico riportato in Figura 4 illustra proprio l'andamento di A_p con la distanza dall'esplosione, mostrando come l'effetto di mitigazione dovuto alla presenza della barriera si riduca sensibilmente all'aumentare della distanza.

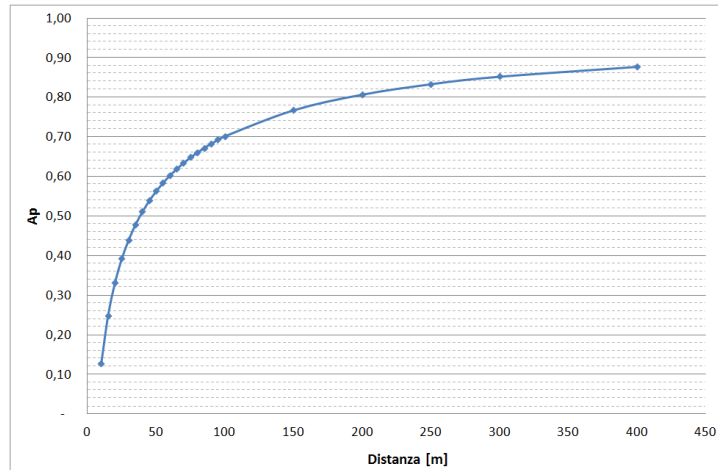


Figura 4: andamento del fattore di riduzione A_p in funzione della distanza dall'esplosione

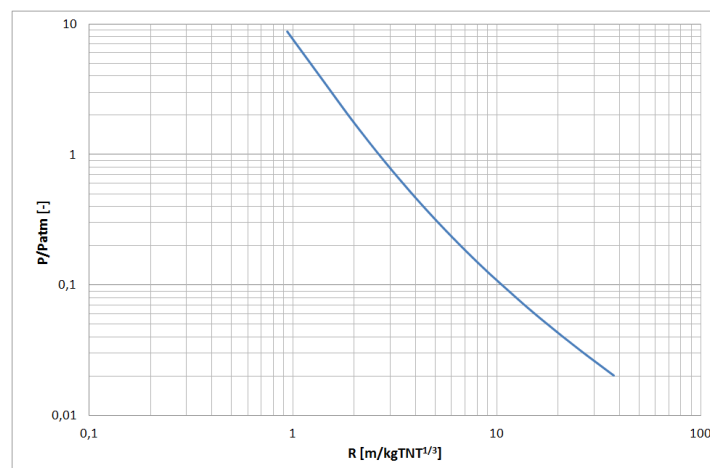


Figura 5: sovrappressione in funzione della distanza (grandezze normalizzate)

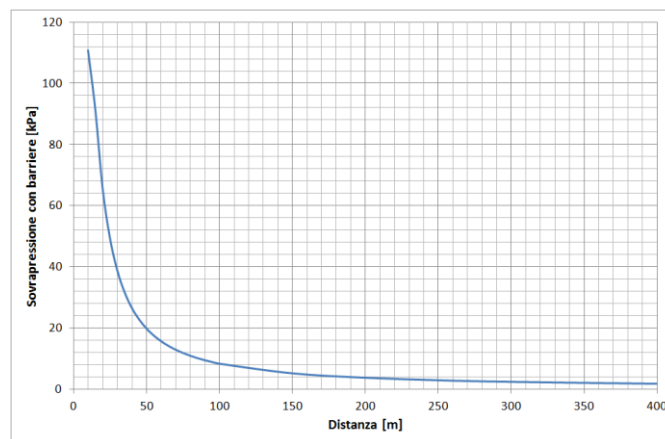


Figura 6: sovrappressione con barriere al variare della distanza dall'esplosione

Una volta valutato A_p in funzione della distanza dall'esplosione, è possibile procedere al calcolo della sovrappressione causata dall'esplosione al variare della distanza stessa.

Per fare ciò, si sono utilizzate espressioni analitiche presenti in [5], che consentono di calcolare la sovrappressione di esplosione in funzione della distanza normalizzata. L'andamento ricavato con tali espressioni è illustrato in Figura 5 e, come era lecito attendersi, riproduce quello di Figura 1.

A questo punto è possibile, noti gli andamenti di A_p e di P/P_{atm} in assenza di barriere, calcolare il valore della sovrappressione, in presenza delle barriere, in funzione della distanza. Per maggior semplicità di lettura si riporta tale andamento con le grandezze assolute: sovrappressione in kPa e distanza dall'esplosione in metri (Figura 6).

ID	Sovrappressione [kPa]	Distanza D [m] fino alla quale si osserva il danno (senza barriere)	Distanza D [m] fino alla quale si osserva il danno (con barriere)
E	2,07	≈ 400	≈ 350
D	10,0	≈ 115	≈ 87
C	20,7	≈ 70	≈ 47
B	68,9	≈ 35	≈ 19
A	100	≈ 28	≈ 13

Tabella 10: riduzione delle aree interessate dai danni dovuta alla presenza della parete

La Tabella 10 mostra come in presenza di barriere si verifichi una sensibile riduzione dell'ampiezza delle zone interessate da uno specifico danno.

Valutazione dei rischi

Una volta condotta la valutazione quantitativa delle conseguenze di eventi avversi, si procede nel presente capitolo alla valutazione dei rischi. Per ciascun evento avverso precedentemente descritto (si veda il paragrafo Scenari considerati e verifiche”) sarà condotta la valutazione dei rischi secondo la seguente tabella, in accordo alla norma UNI EN ISO 12100. Il valore di riferimento per la valutazione del rischio, sarà costituito da:

$$RK = G \cdot F \cdot P \cdot A$$

Con G, F, P ed A illustrati in Tabella 11.

ID	Grandezza	Valore	Valore numerico
G	Gravità del danno	Nessuna	0
		Leggera	1
		Seria	2
		Catastrofica	3
F	Frequenza di esposizione	Mai	0
		Raramente	1
		Frequentemente	2
		Continuamente	3
P	Probabilità che si verifichi il danno	Nessuna	0
		Bassa	1
		Media	2
		Alta	3
A	Possibilità di evitare il danno	Totale	0
		Possibile sempre	1
		Possibile in certi casi	2
		Impossibile	3

Tabella 11: tabella per la valutazione del rischio

Nel seguito si riportano i valori di RK in assenza di barriere protettive e di altre misure di prevenzione e protezione. RK è stato poi valutato considerando la presenza di barriere protettive e di altre misure di prevenzione e protezione presenti: in particolare nella valutazione del rischio legato all'esplosione fisica si considera la presenza della valvola di sicurezza sui serbatoi, mentre per l'esplosione chimica si tiene conto della zonizzazione effettuata secondo la direttiva Atex e della relativa installazione ed esercizio di apparecchiature volte ad evitare possibili inneschi.

Evento	Descrizione	G	F	P	A	RK	ID
Esplosione fisica (rottura duttile)		2	2	2	3	24	0
Esplosione fisica (rottura fragile)	Proiezione fondo emisferico	3	2	2	3	36	1
	Proiezione calotta	3	2	2	3	36	2
	Proiezione porzione del fondo emisferico	3	2	2	3	36	3
	Proiezione frammento di diametro 10 mm	3	2	2	3	36	4
	Proiezione frammento di diametro 50 mm	3	2	2	3	36	5
	Proiezione frammento di diametro 100 mm	3	2	2	3	36	6
	Proiezione frammento di diametro 500 mm	3	2	2	3	36	7
Esplosione chimica	Onda di pressione + proiezione frammenti	3	2	2	3	36	8

Tabella 12: valutazione del rischio per i diversi scenari di esplosione in assenza di barriere e di misure di mitigazione ulteriori

		G			
		0	1	2	3
FxPxA	0				
	2				
	4				
	6				
	8				
	9				
	12			ID0	ID1-ID8

Tabella 13: matrice di rischio relativa alla Tabella 12

Evento	Descrizione	G	F	P	A	RK	ID
Esplosione fisica (rottura duttile)		2	2	1	0	0	0
Esplosione fisica (rottura fragile)	Proiezione fondo emisferico	2	2	1	0	0	1
	Proiezione calotta	2	2	1	0	0	2
	Proiezione porzione del fondo emisferico	2	2	1	1	4	3
	Proiezione frammento di diametro 10 mm	2	2	1	2	8	4
	Proiezione frammento di diametro 50 mm	2	2	1	2	8	5
	Proiezione frammento di diametro 100 mm	2	2	1	2	8	6
	Proiezione frammento di diametro 500 mm	2	2	1	2	8	7
Esplosione chimica	Onda di pressione + proiezione frammenti	3	2	1	2	12	8

Tabella 14: valutazione del rischio per i diversi scenari di esplosione in presenza di barriere e di misure di mitigazione ulteriori

		G			
		0	1	2	3
F _x P _x A	0	ID0, ID1, ID2			
	2			ID3	
	4			ID4, ID5, ID6, ID7	ID8
	6				
	8				
	9				
	12				

Tabella 15: matrice di rischio relativa alla Tabella 14

Si nota come le misure di protezione e prevenzione adottate influiscano sulla possibilità di evitare il danno, mentre la barriera limiti l'entità della gravità del danno.

Conclusioni

Si è proceduto al dimensionamento di una parete di protezione dalle esplosioni, considerando lo scenario di un'esplosione di un serbatoio di 150 m³ contenente una miscela con metano al 78% a 18bar. La parete capace di resistere alla sovrappressione dell'esplosione risulta essere spessa 45 cm. Si è poi condotta un'analisi delle conseguenze dell'impatto dei frammenti dovuti ad esplosione fisica o chimica sulla parete. Si sono calcolate le traiettorie di tali frammenti nell'ipotesi che riescano a scavalcare la parete, ponendo l'attenzione sulla distanza massima raggiunta e sul valore di velocità con cui il frammento impatta col suolo. Infine è stato calcolato l'effetto di riduzione della sovrappressione causata dall'esplosione chimica dovuto alla parete stessa, che risulta essere fino al 50% per distanze dall'esplosioni non superiori a 50 metri e fino al 20% per distanze di 200 metri. Tale riduzione di pressione comporta una sensibile diminuzione dell'ampiezza delle zone interessate da danni specifici. Nel caso di impatto dei frammenti, la parete risulta avere un effetto considerevole di arresto nel caso di esplosione fisica, in dipendenza dei frammenti considerati e delle loro dimensioni, masse e velocità. Infine, procedendo alla valutazione dei rischi in accordo alla norma ISO 12100, si nota come l'implementazione di misure di prevenzione e protezione quali valvole di sicurezza, utilizzo di apparecchiature in accordo alla direttiva Atex e la eventuale installazione delle barriere di cemento, comporti una riduzione dell'indice di rischio.

Bibliografia

- [1]. Enciclopedia degli idrocarburi Treccani; Detonazioni ed esplosioni
- [2]. G. Gurnari, G. Mulè, N. Palumbo; La valutazione del rischio nella prova a pressione di attrezzature metalliche; Dipartimenti ISPEL di Udine e Brescia
- [3]. U.S. Army Corps Of Engineers; Structures to resist the effects of accidental explosions
- [4]. X.Q. Zhou, H. Hao; Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier; International Journal of Impact Engineering 35 (2008) 363–375
- [5]. Henrych, J.: The dynamics of Explosion and its use. Elsevier, Amsterdam (1979)