

Analisi di esplosioni gassose in depositi di GPL.

Ciambelli P.¹, Andreozzi R.¹, Bucciero A.¹, Maremonti M.², Salzano E.³

¹ *Dipartimento di Ingegneria Chimica e Alimentare, Università di Salerno, Via Ponte Don Melillo, 84084 Fisciano (SA).*

² *CNR – IRC, P.le Tecchio 80, 80125 Napoli.*

³ *CNR – GNDRCIE, P.le Tecchio 80, 80125 Napoli.*

1. Introduzione.

Uno dei principali rischi presenti nelle installazioni industriali che prevedono lo stoccaggio, la lavorazione ed il trasporto di sostanze infiammabili, è rappresentato dall'esplosione di nubi di vapore generatesi a seguito di rilasci accidentali di combustibili liquidi o gassosi (Vapour Cloud Explosion, VCE) [1]. Tali esplosioni possono comportare, in presenza di particolari condizioni di confinamento e di congestionamento, lo sviluppo di un'onda d'urto con caratteristiche fisiche (pressione di picco, impulso) tali da provocare un impatto devastante sia all'interno del sito industriale che sull'ambiente circostante, con conseguenze anche catastrofiche, nel caso in cui l'evento avvenga in prossimità di centri abitati.

Lo studio delle esplosioni gassose è pertanto di grande interesse in relazione alle problematiche della sicurezza civile ed industriale, ed una descrizione dettagliata di questo tipo di fenomeno risulta indispensabile ai fini di prevedere e, per quanto possibile, mitigare, le conseguenze di esplosioni gassose derivanti da rilasci accidentali da siti industriali.

A tale scopo si rende necessaria un'analisi delle conseguenze derivanti da un incidente rilevante (*top event*) provocato da un guasto o malfunzionamento all'interno di un'area industriale.

La valutazione delle conseguenze di esplosioni di nuvole di vapore è generalmente effettuata ricorrendo a metodologie di calcolo semplificate quali i metodi TNT-equivalente e Multi-Energy (multienergetico). Questi ultimi forniscono però spesso risultati troppo approssimati perché siano utilizzati in fase di progetto degli impianti. Al contrario, una valida alternativa è rappresentata dai

codici di calcolo fluidodinamici CFD che, risolvendo le equazioni di trasporto in tre dimensioni, consentono di analizzare in modo accurato l'evoluzione dell'esplosione, una volta specificati opportuni modelli di combustione e di turbolenza.

Il presente lavoro è stato dedicato alla simulazione numerica dell'esplosione di una nuvola di propano generatasi accidentalmente all'interno di un tipico deposito di GPL. La simulazione è stata effettuata utilizzando diversi codici di calcolo tra i quali il codice CFD AutoReaGas, sviluppato dal TNO (Olanda) in collaborazione con Century Dynamics Ltd. (Inghilterra), e TRACE, prodotto dalla SAFER SYSTEM Inc.

2. I codici numerici utilizzati.

Il codice TRACE.

Il codice TRACE è un programma di calcolo di tipo “multipurpose”, cioè studiato per la modellazione di un determinato scenario incidentale a partire dalle caratteristiche della sorgente di rilascio fino all'analisi delle conseguenze dell'incidente. In particolare tale codice è in grado di fornire la distribuzione delle concentrazioni di combustibile all'interno della nuvola, a vari istanti (modello di dispersione) [2], di eseguire l'analisi dettagliata delle condizioni di rilascio alla sorgente e di fornire le sovrappressioni generate dall'esplosione attraverso metodi semplificati quali il TNT-equivalente, il Multi-Energy ed il metodo Baker-Strehlow. In questo lavoro si esamineranno i risultati ottenuti con il metodo multienergetico.

Il codice CFD AutoReaGas (ARG).

Il programma AutoReaGas è un codice di calcolo fluidodinamico (CFD) per la simulazione numerica di esplosioni gassose in aree industriali. Il codice, grazie ad un database grafico di tipo CAD, permette infatti la definizione di un qualunque dominio fisico complesso, consentendo una riproduzione fedele di diversi scenari reali. Esso consente inoltre il posizionamento di misuratori virtuali di pressione, temperatura, e di altre variabili di interesse, che consentono di seguire l'evoluzione temporale del fenomeno esplosivo.

Il programma opera attraverso la risoluzione numerica tridimensionale delle equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia, adottando un metodo ai volumi finiti [3].

Il codice è integrato con il modello k-ε [4] per la descrizione della turbolenza e con equazioni che tengano conto delle reazioni chimiche presenti. La combustione è considerata come una reazione a singolo processo di conversione da reagenti a prodotti, con una velocità (R_c) espressa in accordo con il modello della “eddy dissipation” [5]:

$$R_c = C_t \rho \frac{S_t}{\delta} x_{lim} \quad (1)$$

dove C_t è una costante di modello, ρ è la densità della miscela combustibile, S_t è la velocità di fiamma turbolenta, δ lo spessore di fiamma e x_{lim} è la funzione di minimo tra le frazioni di massa dei reagenti e prodotti. Il codice consente di seguire la propagazione del fronte di fiamma all'interno dell'area di interesse e di determinare, in vari punti del sistema esaminato, le sovrappressioni generate dall'esplosione. Esso è inoltre dotato di un processore che permette di analizzare l'evoluzione dell'onda di pressione anche a notevoli distanze dall'ignizione.

3. Lo scenario dell'esplosione.

Nel presente lavoro è stata analizzata un'esplosione gassosa generata all'interno di un tipico deposito di stoccaggio di Gas di Petrolio Liquefatto (GPL), schematizzato in Figura 1.

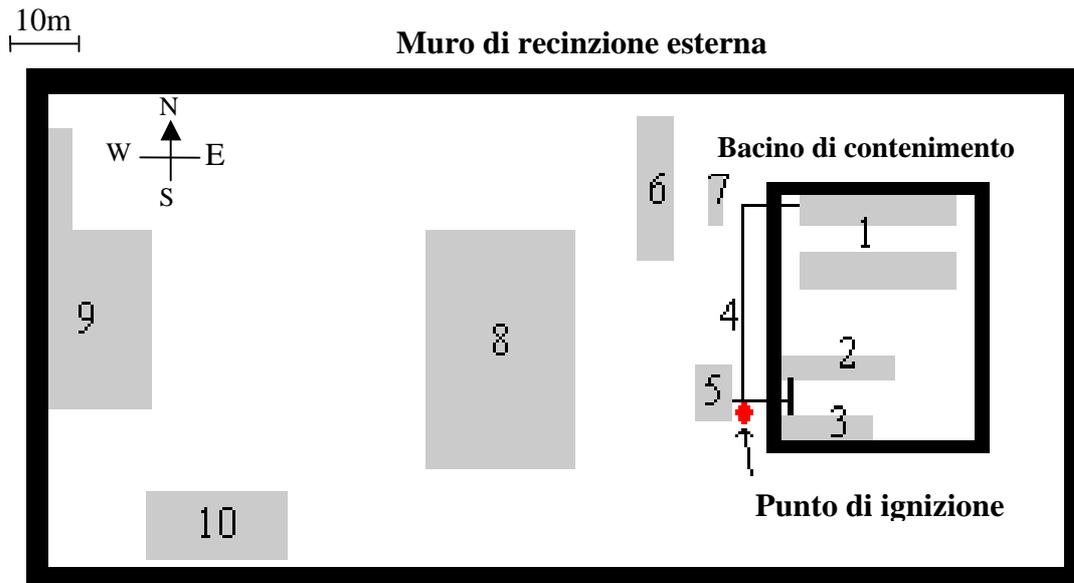


Figura 1. Schema in pianta del deposito di stoccaggio di GPL. 1) Due serbatoi da 50m^3 ; 2) Serbatoio da 35m^3 ; 3) Serbatoio da 15m^3 ; 4) Condotta di collegamento alla stazione di pompaggio (ID = 5cm); 5) Stazione di pompaggio; 6-7) Punto di travaso; 8) Rampa di imbottigliamento; 9-10) Uffici.

Esso è costituito da due serbatoi cilindrici orizzontali contenenti ciascuno 50 m^3 di GPL ed altri due serbatoi di capacità inferiore pari rispettivamente a 35 m^3 e 15 m^3 .

Un bacino di contenimento di altezza pari a 2,5 m e con pareti di 1 m di spessore recinta i serbatoi, che sono collegati alla stazione di pompaggio attraverso condotte di carico-scarico di 5 cm di diametro interno. Si è inoltre ipotizzato che ciascun serbatoio presenta un grado di riempimento pari all'80%. Sono stati inoltre considerati nello schema le aree relative al punto di travaso, alla rampa di imbottigliamento ed agli uffici.

Il *top event* analizzato è rappresentato da una fuoriuscita accidentale di propano da uno dei serbatoi di 50 m^3 , durante la fase di carico o scarico del prodotto; una delle operazioni più frequentemente soggette ad incidenti [6]. Le caratteristiche della sorgente di rilascio sono riportate nella tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche della sorgente di rilascio.

Volume del serbatoio (m ³)	50
Lunghezza del serbatoio (m)	13,3
Diametro del serbatoio (m)	2,65
Quantità stoccata (t)	21
Tipo di foro	Circolare
Diametro del foro (m)	0,050
Altezza del foro (m)	0,300

Le dimensioni del foro sono state definite considerando le proprietà geometriche tipiche di condotte di collegamento e di carico-scarico (sezione circolare, ID=5 cm; altezza pari a 30 cm dal suolo).

Le caratteristiche meteorologiche, necessarie per lo studio della fase di dispersione del propano successiva al rilascio e precedente all'ignizione, sono state determinate mediando opportunamente i dati sperimentali registrati dalle stazioni di riferimento presenti nell'area mediterranea. E' stata quindi considerata una classe di stabilità di Pasquill di tipo D (atmosfera neutrale) con velocità del vento di 3m/s a 10m di quota. La fonte di innesco della nuvola di vapore è stata localizzata in prossimità della stazione di pompaggio.

4. Risultati e Discussione.

La fase di rilascio e la successiva fase di dispersione della nuvola di propano sono state simulate utilizzando il codice TRACE. Nelle figure 2 e 3 sono presentate le immagini della nuvola lungo la direzione sottovento, rispettivamente in sezione orizzontale (quota 1m) e verticale. In particolare sono raffigurate le aree di iso-concentrazione secondo tre livelli di composizione pari al limite inferiore di infiammabilità (20000 ppm), alla composizione stechiometrica (45000 ppm) ed al limite superiore di infiammabilità (95000 ppm). Le immagini si riferiscono ad un tempo pari a 60 s

dall'inizio del rilascio, scelto come ritardo all'ignizione. La quantità calcolata di propano fuoriuscita in questo intervallo di tempo è risultata pari a circa 1500 kg.

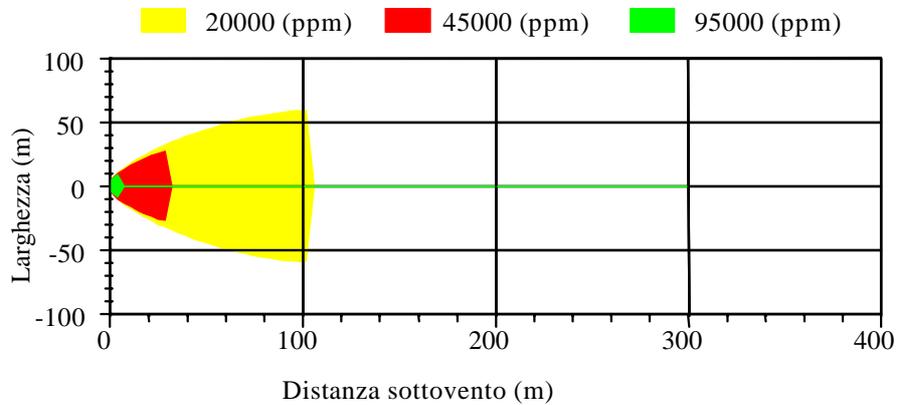


Figura 2. Immagine della nuvola in sezione trasversale alla quota di 1 m, a 60 s dall'inizio del rilascio.

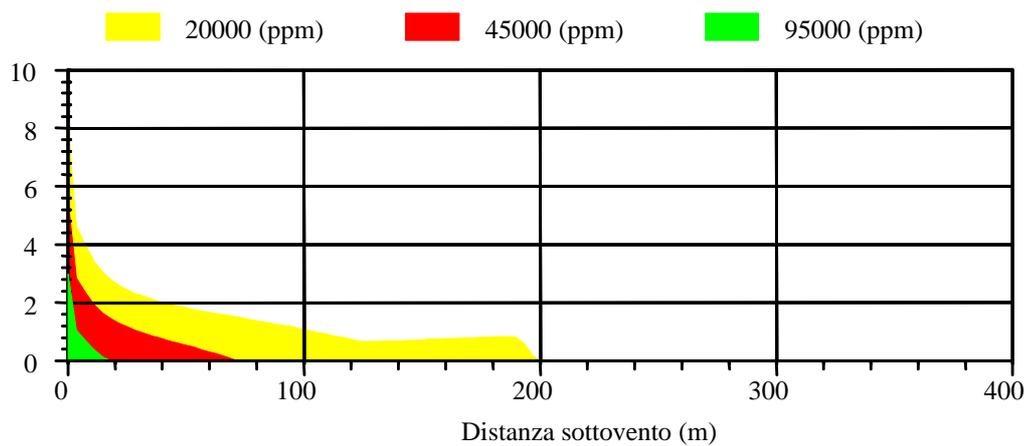


Figura 3. Immagine della nuvola in sezione verticale, a 60 s dall'inizio del rilascio.

Il metodo multienergetico (ME)

La valutazione delle conseguenze dell'esplosione in termini di sovrappressioni generate è stata effettuata inizialmente attraverso il metodo multienergetico.

Tale metodo è basato sul concetto che affinché la combustione di una miscela aria-combustibile evolva in modo esplosivo è necessario che la velocità di propagazione di fiamma sia di tipo turbolento per effetto della presenza di ostacoli. Aree particolarmente ostruite, infatti, possono dar

luogo alla formazione di vortici con conseguente turbolenza e forte accelerazione del fronte di fiamma. In tali condizioni, la velocità di combustione aumenta notevolmente, e l'energia rilasciata per unità di tempo genera un effetto pistone sull'ambiente circostante. Si ha quindi la formazione di un'onda d'urto capace di produrre danni considerevoli anche a notevole distanza dall'ignizione. Secondo tale modello le aree caratterizzate dal maggiore grado di ostruzione e congestionamento sono quelle che regolano l'intero processo esplosivo essendo responsabili delle sovrappressioni più alte. Applicando tale metodo, quindi, l'area d'interesse è stata divisa in due sotto-regioni in funzione del livello di ostruzione, ed a ciascuna di esse è stata assegnata una massa di combustibile reagente equivalente ed un fattore di forza dell'esplosione (F). Tale fattore è stato calcolato secondo opportune relazioni semiempiriche, che mettono in relazione le sovrappressioni generate in corrispondenza del punto di ignizione e le caratteristiche geometriche dell'area [7]. E' stato quindi calcolato un valore di F pari a 5 per la regione più ostruita ed un valore trascurabile per l'altra zona. I risultati sono riportati nella tabella 2 in alcuni punti di interesse all'interno ed all'esterno del deposito.

Il codice AutoReaGas (ARG).

La porzione di nuvola infiammabile, così come valutata con il codice TRACE, è stata assunta come nuvola di vapore iniziale per l'analisi dell'esplosione mediante il codice CFD AutoReaGas. E' stata ipotizzata una composizione stechiometrica (4%) per l'intera massa infiammabile, corrispondente ad un volume di circa $2 \cdot 10^4 \text{ m}^3$, in maniera tale da valutare le conseguenze relative alla situazione di maggiore rischio. Il dominio di calcolo è stato suddiviso lungo le tre direzioni prevedendo circa 70000 celle numeriche. I risultati sono riportati nella tabella 2 in termini di sovrappressioni di picco (P_{\max}) ed impulsi (I^+), in corrispondenza degli stessi punti presi in considerazione con il metodo multienergetico.

Tabella 2. Risultati delle simulazioni condotte con TRACE e con AutoReaGas in differenti punti dell'area.

Punto esaminato (Fig,1)	Distanza dall'ignizione (m)	TRACE		ARG	
		P_{max} (Kpa)	I^+ (KPa s)	P_{max} (Kpa)	I^+ (KPa s)
Ignizione	0	27	2,5	1,7	0,43
Bacino di contenimento	10	24	2,0	1,3	0,34
Parete Sud	20	21	1,6	1,8	0,30
Parete Est	30	18	1,3	1,0	0,21
Ufficio 10	40	15	1,0	4,3	0,24
Ufficio 9	60	12	0,8	3,7	0,12
Zona esterna 1	80	9,0	0,6	1,5	0,061
Zona esterna 2	100	7,5	0,5	1,4	0,040

Dal confronto dei risultati delle simulazioni condotte con i due metodi di calcolo si evince che le sovrappressioni ottenute applicando il metodo multienergetico sono generalmente più alte di quelle valutate con il codice CFD. Queste ultime sono comunque da considerare più attendibili essendo più vicine ai valori sperimentali riportati in letteratura e riferiti ad esplosioni gassose in ambienti parzialmente confinati [8].

La maggiore accuratezza delle previsioni fornite con il codice CFD è da attribuire alla capacità del programma di descrivere accuratamente la propagazione del fronte di fiamma in ambienti congestionati o ostruiti da ostacoli attraverso la valutazione della turbolenza indotta dagli stessi. Il modello di turbolenza consente infatti di valutare le velocità effettivamente presenti sul fronte di fiamma e quindi di simulare in maniera più fedele l'evoluzione esplosiva del processo di combustione. In Figura 4 sono raffigurate le immagini della propagazione del fronte di fiamma a vari istanti ottenute dal codice CFD, in vista laterale e dall'alto. Dalla figura 4b si evidenzia come l'espansione verso l'alto dei gas caldi prodotti dalla combustione riduca il fenomeno della turbolenza generata in quanto il sistema, non essendo costretto a propagarsi in una regione

totalmente confinata, produce minori effetti di vorticità con conseguente riduzione delle velocità e delle sovrappressioni.

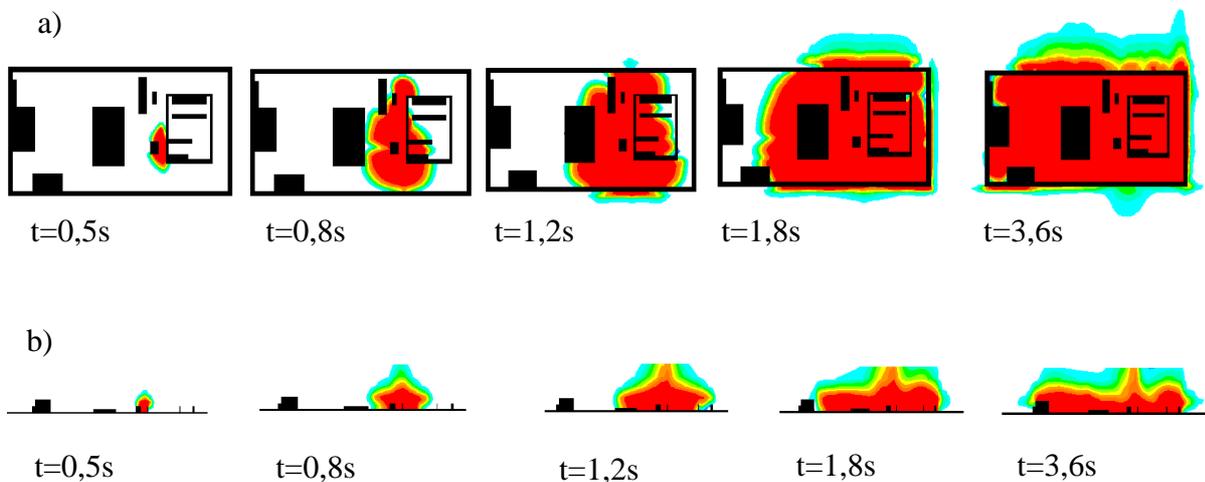


Figura 4. Immagini della propagazione del fronte di fiamma a vari istanti calcolate con il codice CFD AutoReaGas: a) vista dall'alto; b) vista laterale sul piano dell'ignizione.

Tali effetti non sono previsti dal metodo multienergetico che, assumendo una rappresentazione sferica dell'onda di pressione, sovrastima gli effetti di sovrappressione ed impulso generati dall'esplosione nella zona più vicina al punto di ignizione (*near field*).

5. Conclusioni.

L'esplosione gassosa descritta è stata simulata utilizzando due metodologie di calcolo differenti attraverso due codici numerici: TRACE e AutoReaGas. Il primo consente di descrivere in maniera dettagliata le fasi precedenti all'ignizione relative alla fase di rilascio del combustibile e di dispersione dello stesso e di giungere alla valutazione della massa di vapore infiammabile che si determina dopo un certo ritardo all'innesco.

Le sovrappressioni calcolate con il metodo multienergetico risultano maggiori di quelle tipiche registrate per esplosioni gassose in ambienti confinati e/o parzialmente confinati. Il codice CFD,

invece, consentendo una più dettagliata descrizione dell'esplosione conduce ad una stima più accurata delle sovrappressioni ed impulsi generati.

Bibliografia.

1. J.A. Davenport, J. Haz. Mat., 20 (1988) 3-19.
2. TRACE 8.0, User manual, Safer System Inc. 1997.
3. S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor and Francis, Minnesota, 1980
4. B.E. Launder, D.B. Spalding, Mathematical models of turbulence, Academic Press, London, 1972.
5. B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, 16th Symp. (Int.) on Combustion, 719-729, The Combustion Institute, Pittsburgh (PA), 1976.
6. F.P. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth, New York, 1996.
7. W.P.M. Mercx, A.C. van den Berg, Proc. Saf. Progr., 16 (1997) 152-159.
8. J.P. Zeeuwen, C.J.M. van Wingerden, R.M. Dauwe, IChemE Symp. Series n.80 (1983) D20-D29.