

Esperienze di applicazioni CFD nell'analisi del rischio di esplosioni derivante dal rilascio di sostanze infiammabili

E. Salzano¹, F.S. Marra², G. Russo³

¹CNR – GNDRCIE, P.le Tecchio 80, 80125 Napoli

²CNR-IRC, P.le Tecchio 80, 80125 Napoli

³Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università “Federico II”, Napoli

Introduzione

Negli ultimi anni le metodologie di fluidodinamica computazionale (CFD) stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante per l'analisi dei fenomeni connessi alla combustione di miscele gassose infiammabili in aria. L'utilizzo dei codici CFD è rimasto però confinato a studi teorici fondamentali o ad applicazioni su modelli di piccola scala (modelli di laboratorio, motori a combustione interna). I casi di applicazioni a modelli di grande scala, rilevanti per le applicazioni di sicurezza industriale, sono limitati a situazioni particolari in cui è possibile prefigurare con certezza lo scenario incidentale e il tipo di regime di propagazione dell'onda di combustione.

L'impiego di un modello sofisticato e di grande onere computazionale, basato sulla soluzione delle equazioni della fluidodinamica reagente su di una griglia di calcolo che ricopre tutto il dominio fisico, trova piena giustificazione solo nella possibilità di predizione di fenomeni altrimenti non valutabili, o valutabili solo con grande approssimazione. In tal senso, i codici CFD costituiscono uno strumento di analisi di elevata accuratezza e forniscono un'occasione di risparmio sia in termini economici che di sicurezza, consentendo di ridurre i notevoli costi legati alla sperimentazione e consentendo di identificare i punti critici dell'impianto dal punto di vista delle esplosioni accidentali.

In questo lavoro sono analizzati i risultati ottenuti mediante codici commerciali e codici accademici CFD. In particolare vengono evidenziati i contributi che essi possono fornire alla comprensione dei fenomeni esplosivi ed il loro grado di affidabilità nelle simulazioni di configurazioni di interesse pratico.

Ognuna delle applicazioni analizzate in questo lavoro rappresenta una classe di fenomeni caratterizzata da diversa scala sia rispetto alle dimensioni del dominio fisico che rispetto alle dimensioni caratteristiche dei vari fenomeni fisici che vi concorrono. Nel primo esempio riportato vi è una quasi omogeneità di scale tra quella del dominio e quelle che determinano l'evoluzione del fenomeno: la velocità del flusso è paragonabile alla velocità laminare di fiamma e la scala del corrugamento della fiamma corrisponde alla scala del dominio fisico. Quindi, è analizzato il caso dell'accelerazione di fiamma all'interno di tubazioni di varia forma e geometria e contenenti ostacoli disposti con regolarità. In questo caso i fenomeni turbolenti sono dominanti e le lunghezze di scala della turbolenza, che interagiscono con la propagazione del fronte di fiamma, sono determinate dalla geometria dell'apparecchiatura. Successivamente è stato analizzato il fenomeno esplosivo all'interno di recipienti interconnessi (*“pressure piling”*). In questo caso la complessità della simulazione è accresciuta per il fatto che non è possibile predeterminare con certezza la scala caratteristica dell'interazione tra la fluidodinamica e la reazione chimica. L'interesse risiede proprio nella determinazione dei rapporti di scala particolarmente critici per il fenomeno. Quindi, mentre i primi due esempi costituiscono una validazione dei codici CFD, il terzo rappresenta un esempio di studio in cui l'impiego di un codice CFD consente di ottenere indicazioni utili dal punto di vista pratico. Infine, viene presentato un caso di esplosione inconfinata in cui la scala del dominio, pari a quella di un impianto industriale, non è direttamente correlata con le scale della turbolenza che interagiscono con la reazione chimica determinandone l'intensità. Anche se affetti da un certo margine di incertezza, i

risultati che si possono ottenere per questo tipo di applicazione rappresentano sicuramente un avanzamento rispetto alle predizioni ottenute con i metodi semplificati.

I codici CFD

I programmi di fluidodinamica computazionale consistono nella risoluzione numerica delle equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia, scritte in forma discreta per ognuna delle celle in cui si immagina decomposta la regione di interesse.

Essi consentono la descrizione dettagliata, sia in termini di risoluzione spaziale che dell'interazione dei vari processi fisici, di un fenomeno esplosivo. Dei sottomodelli sono introdotti per descrivere fenomeni complessi quali la turbolenza, le reazioni chimiche e le interazioni tra la fluidodinamica e la combustione. Tali sottomodelli diventano necessari in quanto, per limitarne il numero totale, le celle sono scelte di dimensioni molto maggiori rispetto alle dimensioni caratteristiche di tali fenomeni. In tal modo le dimensioni totali del problema discreto risultano compatibili con lo stato attuale dello sviluppo della potenza dei calcolatori e la soluzione numerica richiede uno sforzo computazionale accettabile anche per applicazioni di tipo industriale. In questo lavoro sono descritte alcune applicazioni ottenute mediante due codici CFD commerciali (STAR-CD e AutoReagas) e un codice "accademico" sviluppato presso il CNR-IRC.

Il codice CFD AutoReagas

AutoReagas è un codice commerciale CFD ai volumi finiti specificatamente costruito per l'analisi di esplosioni (Van den Berg, 1995). La descrizione della turbolenza è ottenuta con il modello *k-ε* (Launder e Spalding, 1972). 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" (Magnussen e Hjertager, 1976):

$$R_c = C_t \rho \frac{S_t}{\delta} \text{MIN} \left[m_f, \frac{m_{O_2}}{s}, \frac{m_p}{1+s} \right] \quad (1)$$

dove C_t è una costante di modello, ρ è la densità della miscela combustibile, δ lo spessore di fiamma, s è il coefficiente stechiometrico, *MIN* è la funzione di minimo tra le frazioni di massa dei reagenti (m_f , m_{O_2}) e dei prodotti (m_p) e S_t è la velocità di fiamma turbolenta espressa secondo la relazione (Bray, 1990):

$$S_t = 1.8 u_t^{0.412} L_t^{0.196} S_l^{0.784} \nu^{-0.196} \quad (2)$$

dove u_t è l'intensità della turbolenza, L_t è la lunghezza caratteristica della turbolenza, S_l è la velocità di propagazione di fiamma teorica laminare e ν è la viscosità cinematica.

Un modello quasi-laminare (Bakke, 1986) è utilizzato per descrivere la combustione laminare. Gli effetti della pressione, della temperatura, e del "corrugamento" del fronte di fiamma sulla velocità di combustione laminare effettiva ($S_{l,eff}$) sono descritti attraverso un parametro di modello (F_s) che relaziona $S_{l,eff}$ al raggio di fiamma r :

$$S_{l,eff} = S_l (1 + F_s r) \quad (3)$$

La transizione della fiamma da laminare a turbolenta è definita mediante il confronto delle velocità di propagazione laminare e turbolenta fornite dalle equazioni appena descritte. Analisi di sensitività dei parametri di modello sono presentate in letteratura (Popat et al., 1996; Tufano et al., 1998).

Il codice STAR-CD

Il codice STAR-CD è un codice “multi-purpose” che consente di scegliere tra diversi metodi di soluzione e diversi modelli di turbolenza e di combustione (STAR-CD, 1999). Per le prove di simulazione descritte in questo lavoro è stato scelto il modello *k-e*. La velocità di combustione è stata ancora considerata come una reazione a singolo processo di conversione da reagenti a prodotti, ma il modello utilizzato è il modello Eddy – Break – Up (Spalding, 1977):

$$R_c = A\rho \frac{\varepsilon}{k} \text{MIN} \left[m_f, \frac{m_{O_2}}{s_o}, B \frac{m_p}{s_p} \right] \quad (4)$$

dove s_o e s_p sono i coefficienti stechiometrici relativi all’ossigeno e ai prodotti, k e ε sono l’energia cinetica turbolenta e la sua velocità di dissipazione, A e B sono costanti di modello. Alla luce delle analisi di sensitività e dei confronti con numerosi dati sperimentali (Barletta, 1999) l’espressione per la velocità di combustione è stata modificata introducendo una nuova funzione per la frazione di massa del prodotto all’interno della funzione di minimo:

$$R_c = A' \rho \frac{\varepsilon}{k} \text{MIN} \left[m_f, \frac{m_{O_2}}{s_o}, B' \frac{m_p}{s_p}, C e^{\frac{m_p}{m_p^o}} \right] \quad (5)$$

dove C è una costante di modello.

Il codice accademico

Il codice accademico è stato sviluppato nei laboratori del CNR – Istituto di Ricerche sulla Combustione (IRC). E’ un codice bidimensionale che risolve una forma particolare delle equazioni di conservazione valide nel limite di basso numero di Mach. Il metodo di soluzione è ancora ai volumi finiti. Non prevede sottomodelli per la turbolenza. La reazione di combustione è descritta mediante la legge di Arrhenius (Marra e Continillo, 1996).

Risultati

I codici CFD sono stati applicati a diverse configurazioni rappresentative sia di configurazioni sperimentali che di scenari incidentali di interesse per l’industria di processo, di seguito descritti.

La “tulip flame”

L’analisi della propagazione di fiamma all’interno di sistemi chiusi mostra la presenza di instabilità che derivano dall’interazione della fiamma con i fenomeni di origine idrodinamica.

Lo studio sperimentale preso come riferimento è la “tulip flame”, osservata da Ellis (1928). Si è quindi utilizzato il codice accademico per riprodurre la propagazione di



Fig. 4. Propagazione del fronte di fiamma con il codice accademico.

fiamma all'interno di un tubo cilindrico con raggio 17 mm e lunghezza 67mm, riempito con una miscela stechiometrica di metano in aria.

Un esempio dei risultati numerici è riportato in Figura 4. La parte sinistra mostra le immagini sperimentali ottenuti con tecnica fotografica mentre la parte destra mostra le curve numeriche che rappresentano la posizione della fiamma nel tempo in termini di isoconcentrazione della frazione di massa del combustibile (Marra e Continillo, 1996). I risultati mostrano un buon accordo con i dati sperimentali.

Lo studio di queste instabilità richiede l'uso di particolari tecniche numeriche in grado di garantire un'alta accuratezza della soluzione numerica, in genere non disponibili all'interno di codici CFD commerciali (Maremonti et al., 1998).

Quest'applicazione illustra che simulazioni di configurazioni per le quali è possibile descrivere tutti i fenomeni con un adeguato grado di dettaglio riproducono fedelmente i dati sperimentali disponibili e forniscono indicazioni utili per la comprensione dei meccanismi fisici della propagazione instazionaria di onde di combustione.

L'accelerazione del fronte di fiamma in presenza di ostacoli

La comprensione dei meccanismi fisici che regolano l'accelerazione del fronte di fiamma è di fondamentale importanza in relazione alle problematiche della sicurezza industriale. L'interazione della fiamma con l'ambiente circostante può provocare lo spegnimento della fiamma o innescare la transizione dall'iniziale regime laminare ad un regime deflagrativo fortemente turbolento o, in alcuni casi, ad un regime detonativo, fenomeno particolarmente distruttivo.

L'accelerazione di fiamma in regime turbolento è un fenomeno molto complesso e si hanno grandi incertezze anche nelle misure sperimentali effettuate con geometrie semplificate. Tuttavia, nel caso di tubi molto lunghi riempiti con ostacoli sono stati riconosciuti dei regimi stazionari per la velocità della fiamma ed è stato quindi possibile identificare dei trend di carattere generale (Lee et al., 1984).

A partire dal caso del regime di "quenching", ossia dello spegnimento di fiamma per l'elevato confinamento, il primo stato stazionario identificato corrisponde a velocità di fiamma dell'ordine delle centinaia di metri al secondo (regime deflagrativo, fiamma turbolenta). Aumentando la reattività della miscela, o utilizzando particolari geometrie, si osserva sperimentalmente che la fiamma raggiunge velocità stazionarie che corrispondono strettamente alla velocità del suono alla temperatura di fiamma dei prodotti, ossia circa 800 m/s, per la maggior parte degli idrocarburi.

Infine, velocità di fiamma costanti dell'ordine di 1200 m/s o di 2500 m/s sono osservate nel caso di regimi "quasi-detonativi" o per detonazioni pure di Chapman-Jouguet (CJ).

I codici CFD AutoReagas e STAR-CD sono stati utilizzati al fine di riprodurre la propagazione del fronte di fiamma osservata sperimentalmente all'interno di geometrie circolari (Figura 5) e rettangolari (Figura 6) di seguito descritte:

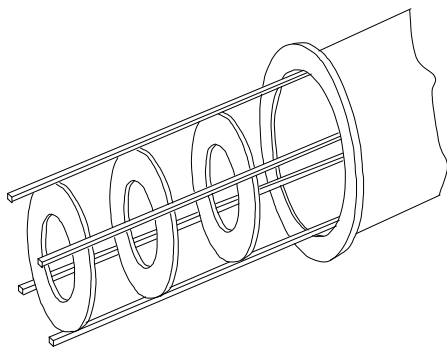


Figura 5. Geometria circolare

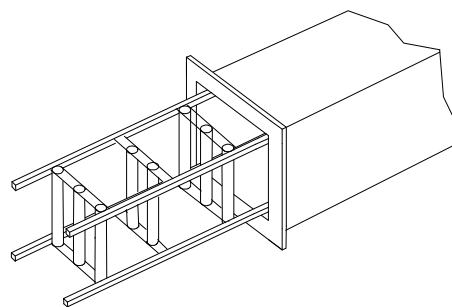


Figura 6. Geometria rettangolare

a) geometria circolare (Lee et al., 1984; Peraldi et al., 1986).

La geometria del sistema consiste di tubi cilindrici in acciaio, chiusi ad entrambe le estremità, con lunghezza pari a 11m e 18m, e diametri D pari a 0.05 m, 0.15 m e 0.30 m. L'ignizione ("spark ignition") è effettuata su uno dei lati chiusi del tubo. All'interno della tubazione sono stati posti anelli forati, spazati tra loro di una lunghezza pari al diametro della tubazione.

Il "blockage ratio" (definito come $BR = 1 - d^2/D^2$, dove d è il diametro del foro) identifica le dimensioni dell'ostacolo. Le prove sperimentali e numeriche sono state effettuate per BR pari a 0.44, 0.38 e 0.29, rispettivamente per i diametri di 0.05 m, 0.15 m e 0.3 m.

b) Geometria rettangolare (Chao et al., 1999)

La geometria consiste in un tubo di acciaio di sezione quadrata con lato 0.3 m e lunghezza 7 m. Gli ostacoli sono costituiti da cilindri verticali con diametro 3.4 cm e sono arrangiati come matrice 3x2. Ogni matrice ha la lunghezza di un diametro e ha un BR medio pari a 0.41. L'ignizione è effettuata su uno dei due lati chiusi del sistema.

Nella Tabella 1 vengono mostrati i risultati della velocità di fiamma calcolata dal CFD AutoReagas al variare della geometria del sistema, per concentrazioni stechiometriche di metano e propano.

Tabella 1. Velocità di fiamma calcolata ($S_{f,calc}$) e sperimentale ($S_{f,exp}$) per geometrie e miscele combustibili alla concentrazione stechiometrica.

Geometria					Metano		Propano	
BR	L, m	D, m	A/A°	a/a°	$S_{f,calc}$ ms^{-1}	$S_{f,exp}$ ms^{-1}	$S_{f,calc}$ ms^{-1}	$S_{f,exp}$ ms^{-1}
0.28	11	0.30	36	46	721	740	754	770
0.39	11	0.15	9	9.8	707	750	741	810
0.39	18	0.15	9	9.8	696	840	728	1300
0.41*	7	0.30	36	33	866	1064	879	1610
0.44	11	0.05	1	1	666	800	703	750
0.44	18	0.05	1	1	669	700	706	800
0.44	18	0.30	36	36	719	745	754	1440

*Geometria rettangolare

Dai dati mostrati in Tabella 1 si evince che i risultati delle simulazioni sono soddisfacenti nel caso in cui la velocità stazionaria del fronte di fiamma si stabilizza intorno alla velocità del suono alla temperatura dei gas combusti (regime "choking"). Il codice non riesce invece a riprodurre la transizione dal regime "choking" alla "quasi detonazione" passando da $D = 0.05$ m a $D = 0.3$ m, nel caso del propano.

Le Figure 7 – 8 mostrano le velocità di fiamma sperimentali e calcolate con i codici commerciali al variare del rapporto equivalente ϕ (rapporto tra la concentrazione in moli di combustibile per moli di aria e la concentrazione stechiometrica in moli di combustibile per moli di aria), per miscele di metano e propano in aria, rispettivamente all'interno di tubazioni a sezione cilindrica e a sezione quadrata.

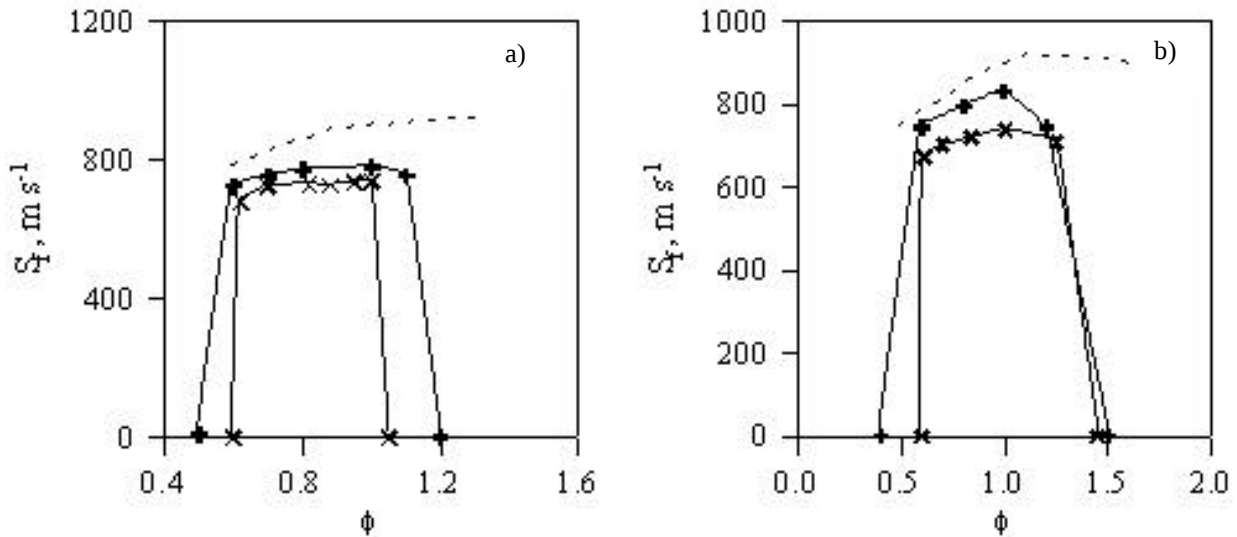


Figura 7. Velocità di fiamma per miscele metano-aria (a) e propano-aria (b) in funzione del rapporto equivalente ϕ per il tubo a sezione circolare con diametro pari a 0.05 m, lunghezza pari a 11 m e BR = 0.44. $\oplus$ calc. STAR-CD; $\odot$ sper. La linea tratteggiata rappresenta la velocità isobara del suono alla temperatura dei prodotti.

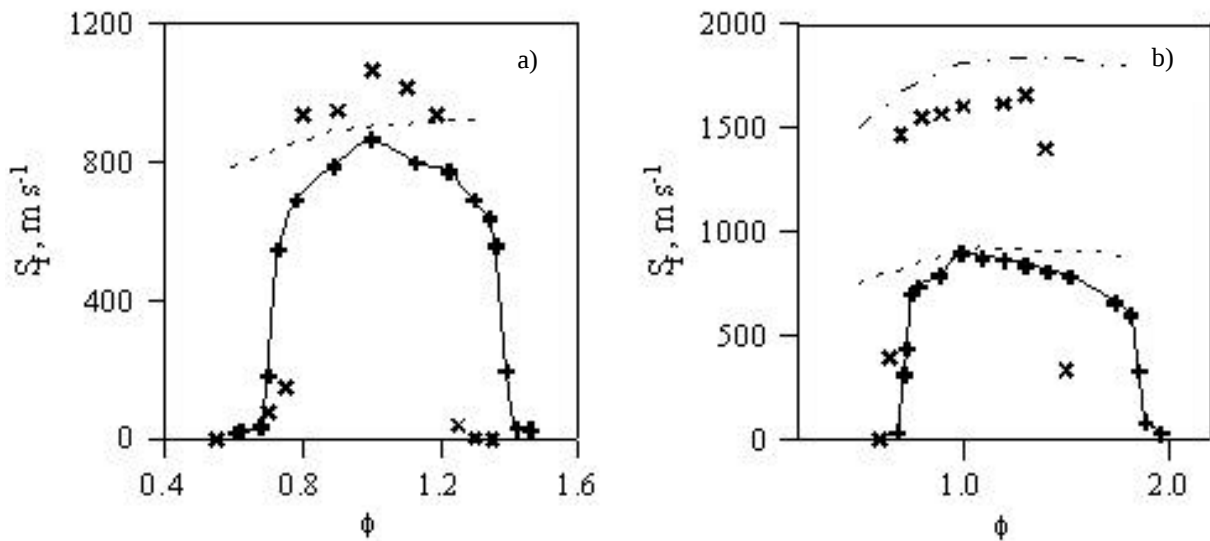


Figura 8. Velocità di fiamma per miscele metano-aria (a) e propano-aria (b) in funzione del rapporto equivalente ϕ per il tubo a sezione quadrata. $\oplus$ calc. AutoReagas; $\odot$ sper. La linea tratteggiata rappresenta la velocità isobara del suono alla temperatura dei prodotti; la linea punteggiata rappresenta la velocità di Chapman-Jouguet.

Anche in questo caso i risultati numerici sono soddisfacenti e consentono di riprodurre il fenomeno della variazione del regime di propagazione al variare della composizione della miscela infiammabile. Si sottolinea che tutte le simulazioni sono state effettuate senza variare le costanti empiriche che compaiono nei sottomodelli per la turbolenza e per la reazione chimica. Ciò indica una effettiva valenza predittiva delle simulazioni. La velocità della fiamma non è riprodotta solo quando è osservata sperimentalmente la transizione dal regime “*choking*” alla “quasi detonazione” o alla

detonazione CJ. Infatti, in tal caso avviene un ulteriore cambio di scala caratteristica della velocità di combustione che è così determinata da fenomeni non descrivibili con i sottomodelli adottati.

Il “pressure piling”

La combustione, in camere isolate, di miscele stechiometriche di aria e dei più comuni idrocarburi, inizialmente a pressione atmosferica e temperatura ambiente, produce normalmente pressioni pari a circa 800 kPa. Nel caso in cui la camera sia divisa in due o più compartimenti interconnessi attraverso tubi di piccolo diametro oppure collegati per mezzo di piccole aperture, quelle stesse miscele, esplodendo, riescono a generare pressioni ben più elevate (sperimentalmente sono state osservate pressioni massime di 3500 kPa).

Questo fenomeno è comunemente indicato con l’espressione “*pressure piling*” e la sua comprensione risulta di primaria importanza per la prevenzione di esplosioni all’interno di edifici dove sono possibili fuoriuscite accidentali di sostanze infiammabili, all’interno di apparecchiature industriali in presenza di venting convogliati, e più in generale all’interno di installazioni industriali dove sono frequenti tubazioni di interconnessione tra apparecchiature.

In letteratura sono disponibili modelli teorici e semiempirici che si propongono di predire il picco massimo di pressione che si può generare in sistemi di tal genere (Abdullin et al., 1988; Singh, 1994; Molkov, 1994). Tutti si mostrano inadeguati perché necessitano dell’introduzione di parametri arbitrari che tengono conto del livello di turbolenza generato e perché la loro applicabilità è spesso ristretta a geometrie semplici e difficilmente rispondenti alle caratteristiche delle reali installazioni industriali.

Il codice CFD AutoReagas è stato utilizzato per l’analisi del fenomeno del “*pressure piling*” all’interno di sistemi interconnessi composti da due camere sia di eguale che di diverso volume, al variare della posizione dell’ignizione all’interno dell’apparecchiatura (Maremonti et al., 1999a) e al variare del diametro della tubazione di collegamento.

I risultati numerici sono stati confrontati con i dati sperimentali di Phylaktou et al., (1993) e di Singh (1977). Le Figure 9 e 10 mostrano gli andamenti della pressione nel tempo, rispettivamente nel primo e nel secondo recipiente, così come ottenuto mediante il codice AutoRegas per l’esplosione di una miscela stechiometrica di metano in aria in un sistema interconnesso con camere di uguale volume. In particolare è riportato l’andamento della pressione nel caso di ignizione nel centro della prima camera e nel caso in cui l’ignizione è sulla parete opposta alla sezione sulla quale insiste il tubo di connessione (ignizione laterale), oltre alle relative curve sperimentali.

È evidente il buon accordo tra i dati misurati e quelli calcolati. Dagli andamenti della pressione possono essere distinte le differenti fasi della propagazione della fiamma: il lento aumento di pressione dovuto alla iniziale fase laminare, il rapido incremento nella seconda camera per effetto della combustione turbolenta e l’aumento di pressione nella prima camera per effetto del “*backflow*” di prodotti caldi dal vessel secondario. In accordo con i dati sperimentali, inoltre, l’ignizione laterale produce un $[dP/dt]_{\max}$ nella camera secondaria molto più alto di quello che si registra per ignizione centrale: la violenza dell’esplosione è infatti pari a circa 520 bar/s nel caso di ignizione centrale e 3000 bar/s, nel caso di ignizione finale.

In Figura 11 sono confrontati i dati sperimentali (Singh, 1977) e calcolati della pressione massima in funzione del rapporto dei volumi VR ottenuti per sistemi interconnessi con un tubo di diametro pari a 1.9 cm e 3.2 cm. Il primo recipiente è stato mantenuto a volume costante e pari a 54 litri. I risultati numerici sono in buon accordo con i dati sperimentali. Future investigazioni si propongono di estendere i risultati a configurazioni di scala maggiore, per le quali risulta oneroso condurre estese indagini sperimentali.

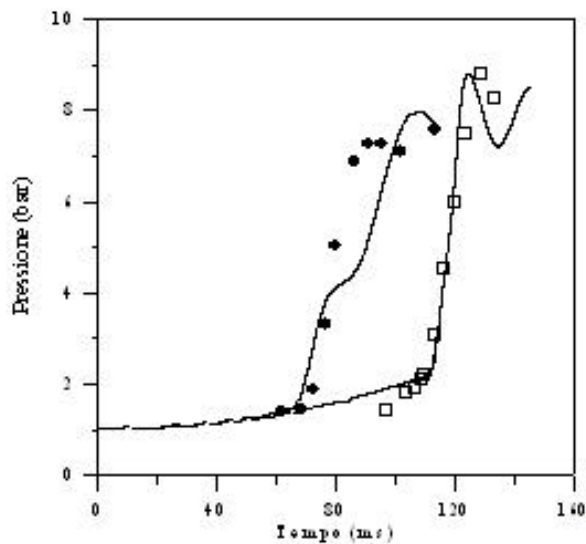


Figura 9. Curve pressione-tempo nel vessel di ignizione, () simulazioni, () dati sperimentali per ignizione centrale, () dati sperimentali per ignizione laterale.

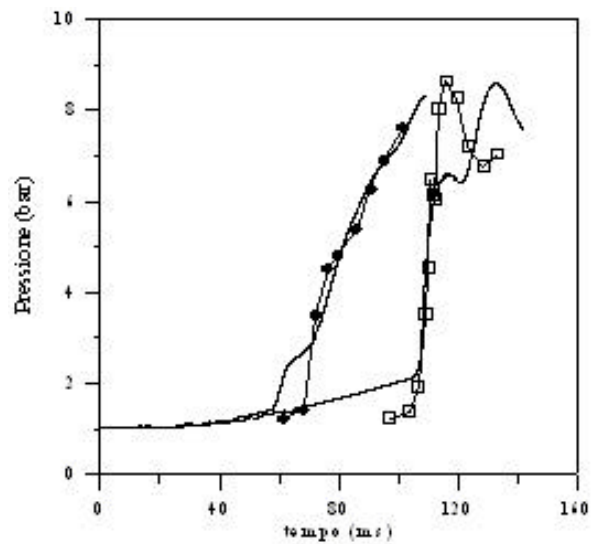


Figura 10. Curve pressione-tempo nel secondo vessel, () simulazioni, () dati sperimentali per ignizione centrale, () dati sperimentali per ignizione laterale.

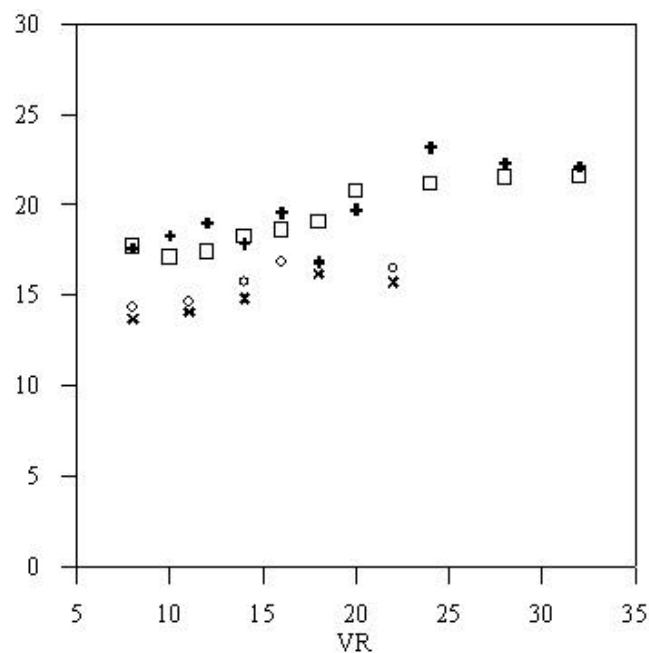


Figura 11. Andamento del picco massimo di pressione al variare del rapporto di volume VR. Diametro del tubo: 1.9 cm. Metano: sperim.; + calc.; Propano: $\diamond$ sperim.; X calc.

Le esplosioni di vapore in ambienti inconfinati

Le esplosioni di nuvole di vapore (Vapour Cloud Explosions, VCEs) sono da considerarsi tra i rischi maggiori all'interno di installazioni industriali dove sono stoccati o manipolati grandi quantitativi di materiali infiammabili (Lees, 1996). L'analisi delle conseguenze di VCEs è in genere effettuata adottando modelli e procedure semplificate quali il metodo TNT-equivalente o le più recenti estensioni del metodo Multi-Energy (Van den Berg, 1985). Recentemente, i codici CFD sono stati utilizzati per lo stesso scopo, in particolare per ambienti industriali particolarmente congestionati quali le piattaforme petrolifere.

E' da notare che l'utilizzo di codici CFD fornisce l'intensità e la direzione dell'onda di pressione generata dalla combustione esplosiva di una nuvola di vapore distribuita nello spazio. L'intensità non discende da una sorgente puntuale, come accade nel caso dei metodi semplificati, e consente di evidenziare i punti critici dell'impianto rispetto all'interazione del flusso generato dalla combustione con le apparecchiature. La conoscenza della direzionalità dell'onda d'urto prodotta consente anche di individuare eventuali effetti domino sull'ambiente circostante.

In questo testo riportiamo un esempio di applicazione del codice AutoReagas per la riproduzione dell'esplosione di vapore avvenuta in Napoli nel 1985 (Maremonti et al, 1999b).

L'area in esame (Figura 12) copriva 49,000 m² e conteneva 37 tanks utilizzati per lo stoccaggio di benzine, olio combustibile, diesel, per una capacità totale di circa 100,000 m³ di infiammabili. L'intera area è congestionata e confinata da mura, edifici, e da un terrapieno alto circa 8 m.

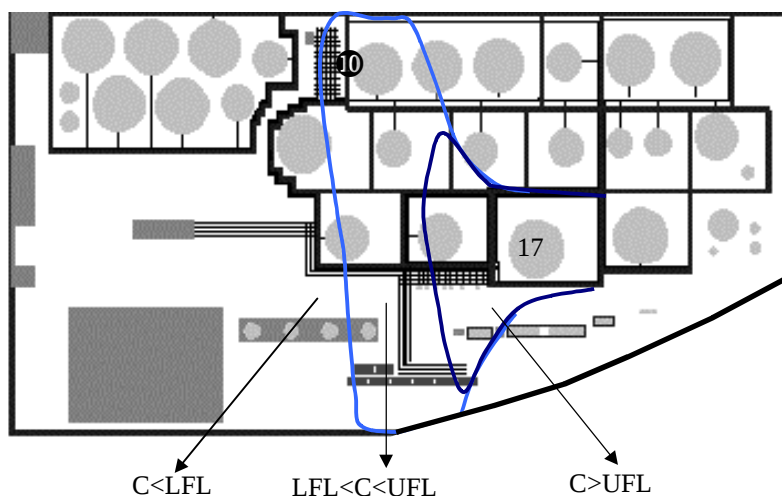


Figura 12. "Footprint" della nuvola di vapore sull'area di stoccaggio, altezza 1 m. 10 = ignizione.

L'incidente fu originato da un sovrariempimento del serbatoio 17 durante le operazioni di scarico di benzina "invernale" da una nave ancorata nel porto. La fuoriuscita durò circa 1.5 h, e l'ammontare totale spillato fu di circa 700 tonnellate. La benzina fuoriuscita invase il bacino di contenimento e l'adiacente area della stazione di pompaggio. Le condizioni climatiche e geometriche favorirono la formazione di una nuvola omogenea nella concentrazione di grande dimensione.

L'analisi della dispersione ha indicato lo sviluppo di una nuvola stratificata larga 300 m e lunga circa 120 m (Figura 12). L'ignizione è stata assunta nei pressi della stazione di pompaggio, in accordo con le testimonianze.

La VCE prodotta e il successivo incendio, che durò circa una settimana, distrussero quasi tutti gli edifici e le attrezzature all'interno dell'area. L'onda d'urto associata produsse 5 morti e effetti minori furono osservati fino a 5 km di distanza.

Le simulazioni delle VCE sono state effettuate considerando nuvole omogenee alla concentrazione stechiometrica (3.1%) di altezza pari a 4 m, 6 m e 8 m e una nuvola stratificata (nuvola non omogenea), con concentrazione variabile tra il 2.5% e il 7%. A tali nuvole corrisponde un quantitativo di miscela infiammabile compreso tra le 4 e le 8 tonnellate. Il calcolo con il codice CFD ha predetto, per tutte le nuvole, una durata dell'esplosione compresa tra 3 e 4 secondi, in accordo con i segnali sismici registrati dalle centraline di rilevamento dislocate nell'area circostante.

La Tabella 2 riporta i risultati in termini di sovrappressione massima (P_{max}) calcolata mediante il metodo Multi-Energy (ME), mediante il codice CFD AutoReagas e mediante l'analisi dei danni, per alcuni punti chiave all'interno dell'area.

Tabella 2. Danni osservati e picchi di sovrappressione ($P_{\max}$) stimati mediante l'analisi dei danni e calcolati mediante le simulazioni CFD.

Punto di osservazione	Analisi del danno		CFD				ME
	Danno osservato	Pressione stimata	Nuvola omogenea			Nuvola non omogenea	H 8 m
			H 4m	H 6m	H 8m		
		$P_{\max}$ kPa	$P_{\max}$ kPa	$P_{\max}$ kPa	$P_{\max}$ kPa	$P_{\max}$ kPa	$P_{\max}$ kPa
Edificio principale	Demolizione parziale	5.0	1.4	4.7	5.5	2.5	62
Guar-rail autostrada	Danneggiato	7.0	6.0	24.7	9.8	5.1	60
Edificio olio lubrificante	Tetto danneggiato	11.0	4.2	5.1	9.3	3.4	63
Supporto in cemento dei gravity tanks	Danneggiato	11.0	2.0	6.7	10.8	8.4	73
Rail tanks	Danneggiato	48.0	3.3	18.5	60.0	11.1	65
Tank 3	Distrutto	>4.1	2.6	4.3	16.5	9.5	77
Tank 4	Distrutto	>38.0	8.1	20.7	51.5	5.9	69
Tank 17	Distrutto	-	10.3	14.7	28.0	13.2	-
Tank 20	Distrutto	>1.9	2.8	4.3	4.7	2.6	76
Tank 101	Deformato	>1.8	1.4	2.5	3.5	2.6	75
Punto di ignizione	-	-	24.6	32.8	60.0	6.5	-
Vetri (fino a 1 km)	Distrutto	3	-	-	-	-	4
Tetti divelti (600 m)	Distrutto	<10	-	-	-	-	8

I risultati ottenuti con la nuvola di 8 m mostrano il migliore accordo con i risultato dell'analisi dei danni, considerati come risultati “sperimentali”. E' evidente, infine, la sovrastima delle sovrappressioni calcolate mediante il metodo Multi-Energy. Il ME tiene conto della variazione della velocità di fiamma per effetto della geometria dello scenario dividendo la nuvola in porzioni con congestionamento uniforme. Malgrado quest'avanzamento rispetto al più semplice metodo TNT, le sotto-porzioni di nuvole sono analizzate con un metodo ancora concettualmente legato al confronto con un'equivalente carica di esplosivo. I risultati sono quindi fortemente influenzati dal differente comportamento fisico di un'esplosione puntuale rispetto alla fisica della combustione di una nuvola di vapore che si estende su un'ampia superficie.

Conclusioni

In questo lavoro è stato illustrato che i codici CFD possono fornire risultati in buon accordo con i dati sperimentali per sistemi di diversa scala e geometria.

L'obiettivo della nostra ricerca consiste sia nello sviluppo di “*benchmark*” numerici per codici fluodinamici, identificando condizioni sperimentali caratteristiche di particolari regimi di propagazione del fronte di fiamma, sia nello sviluppo di un “*tool*” di indagine per la comprensione dei meccanismi fisici che dominano l'evoluzione dei fenomeni esplosivi e di valutazione delle possibili conseguenze di un'esplosione.

Poiché allo stato attuale non esiste un modello “universale”, le due attività sono necessariamente da affiancarsi. Non appare infatti proponibile, nell’ambito delle attività di progettazione per la sicurezza, l’approccio, altrimenti applicato, di identificare la validità di un modello con la riproducibilità di un singolo evento mediante un opportuno aggiustamento dei parametri del modello stesso. Risulta perciò necessario identificare, di volta in volta, una configurazione di riferimento rispetto alla quale sviluppare l’attendibilità dei risultati che si ottengono per fissati valori dei parametri caratteristici dei modelli e relativi al particolare regime di propagazione che si intende investigare.

Bibliografia

- Abdullin, R.K., Babkin, V.S. and Senachin, P.K., Comb. Expl. and Shock Waves, 1988, 24, 123-132.
- Bakke, J.R., , D.Sc. thesis, University of Bergen, Bergen, 1986.
- Barletta, M., Marra, F.S., Salzano, E., Russo, G., *Open Combustion Meeting*, , 23st Event of the Italian Section of the Combustion Institute, Lacco Ameno, 2000.
- Bray, K.N.C., Proc. Roy. Soc. London, A431 (1990) 315-325.
- Chao, J., Kolbe, M. and Lee, J.H.S., ICDERS, Heidelberg, Germany, 1999.
- Ellis, O. C. de C., Fuel: J. Fuel Sci., 7, 502, 1928.
- Launder, B.E., Spalding, D.B., Mathematical models of turbulence, Academic Press, London, 1972.
- Lee, J.H.S., Knystautas, R., Chan, C.K., 20th Symp. (Int.) on Combustion, Pittsburgh, PA, 1984, pp. 1663-1672.
- Lees, F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth, New York, 1996.
- Magnussen, B.F., Hjertager, B.H., 16th Symp. (Int.) on Combustion, 719-729, The Combustion Institute, Pittsburgh (PA), 1976.
- Maremonti, M., Marra, F., Salzano, E., Continillo, G., *Proc. of the Combustion Meeting '98*, 21st Event of the Italian Section of the Combustion Institute, Ravello, Italy, 1998, p. 147-150.
- Maremonti, M., Russo, G., Salzano, E., Tufano, V., Numerical simulation of gas explosions in linked vessels, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 3, 189-194, (1999a).
- Maremonti, M., Russo, G., Salzano, E., Tufano, V., Post-accident analysis of vapour cloud explosions in fuel storage areas, *Process Safety and Environmental Protection*, Trans IChemE, 77, 360-365, (1999b).
- Marra, F. S., Continillo, G., J., Twenty-sixth Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Irvine, 1996.
- Molkov V.V., 4th International Symposium of Fire Safety Science, Ottawa, Canada, 1994, 1245-1254.
- Peraldi, O., Knystautas, R., J.H.S. Lee, 21st Symp. (Int.) on Combustion, Pittsburgh, PA, 1986, pp. 1629-1637.
- Phylaktou, H., Andrews, G.E., J. Loss Prev. Proc. Ind., 1993, 6(1), 15-19.
- Popat, N.R., Catlin, C.A., Arntzen, B.J., Lindstedt, R.P., Hjertager, B.H., Solberg, T., Saeter, O., Van den Berg, A.C., 1996, *Journal of Hazardous Materials*, 45: 1-25.
- Singh, J., PhD Thesis, Imperial College, London, 1977.
- Singh, J., Trans. IChemE, B, 72, 1994, 220-228.
- Spalding D.B., 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (PA), 1977, 1657-1663.
- STAR-CD user Manual, Computational Dynamics, , London, 1999.
- Tufano, V., Maremonti, M., Salzano, E., Russo, G., J. of Loss Prev. in the Process Industries, 11 (1998) 169-175.
- Van den Berg, A.C., 1985, *Journal of Hazardous Materials*, 12: 1-10.
- Van den Berg, A.C., The, H.G., Mercx, W.M., Moilleau, Y., Hayhurst, C.J., 1995, 8th Int. Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry, Antwerp, Belgium, 349-364.