

LA PROPAGAZIONE DI FIAMMA ATTRAVERSO MISCELE STRATIFICATE DI METANO IN ARIA

E. SALZANO¹, F.S. MARRA¹, G.RUSSO²

¹CNR-IRC, Via Diocleziano 328, 80125 Napoli.

²Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università "Federico II", Napoli.

SOMMARIO

Le formazione di miscele stratificate di combustibili sia più leggere che più pesanti dell'aria sono spesso all'origine di eventi incidentali catastrofici, ad esempio nel caso di esplosioni in miniera, nel caso di fuoriuscite accidentali all'interno di edifici o all'interno di apparecchiature industriali. Oltre agli aspetti prettamente legati alla sicurezza industriale, tali miscele sono peculiari anche dal punto di vista fenomenologico. E' stato infatti osservato sperimentalmente che la velocità di propagazione di fiamma in miscele gassose infiammabili stratificate aumenta al crescere dello spessore dello strato di miscela infiammabile e che si osserva una propagazione di fiamma stazionaria solo per spessori di miscela infiammabili notevolmente inferiori rispetto all'altezza della camera di combustione.

In questo lavoro è presentato il risultato delle simulazioni numeriche ottenute mediante tecniche CFD, della propagazione di fiamma di una miscela stratificata di metano all'interno di una camera di combustione.

Il fine del lavoro è quello di fornire indicazioni sui sistemi di sfogo di apparecchiature o edifici civili nel caso in cui un gas infiammabile sia più leggero che più pesante dell'aria occupi solo parzialmente il volume a disposizione. E' stato quindi sviluppata una modellistica che consente di seguire la propagazione di fiamma laminare anche per sistemi di grande scala.

INTRODUZIONE

Le formazione di miscele stratificate di combustibili sia più leggere che più pesanti dell'aria sono spesso all'origine di eventi incidentali catastrofici, ad esempio nel caso di esplosioni in miniera, nel caso di fuoriuscite accidentali all'interno di edifici o all'interno di apparecchiature industriali. Oltre agli aspetti prettamente legati alla sicurezza industriale, tali miscele sono peculiari anche dal punto di vista fenomenologico. E' stato infatti osservato sperimentalmente che la velocità di propagazione di fiamma in miscele gassose infiammabili stratificate risulta "stazionaria" per spessori di miscela infiammabili notevolmente inferiori rispetto all'altezza della camera di combustione analizzata mentre per spessori più elevati dello strato infiammabile si hanno forti accelerazione del fronte di fiamma, determinando in tal modo rapide transizioni a regime di combustione turbolenti e rendendo inefficaci eventuali sistemi di sfogo ipotizzati sulla base di miscele infiammabili con concentrazione omogenea [1].

Nonostante tali osservazioni, non sono disponibili modelli teorici in grado di prevedere con accuratezza tale fenomeno, né sono stati presentati in letteratura esempi di applicazione di metodi di fluidodinamica computazionale: ciò in considerazione del fatto che i modelli di fluidodinamica computazionale adoperati con successo per simulare molti fenomeni di combustione su configurazioni di laboratorio risultano difficilmente utilizzabili, dato l'elevatissimo onere computazionale, nel caso di geometrie complesse su scala "reale".

Un ulteriore difficoltà discende inoltre dall'impossibilità di prefigurare un unico regime di combustione per le fiamme in miscele stratificate, rendendo ancora più difficile l'individuazione e l'implementazione di metodologie computazionali semplificate.

In questo lavoro viene proposto un modello di combustione in grado di mediare tra l'esigenza di semplificazione e di accuratezza e capace di riprodurre, anche adottando una griglia ben più larga dello spessore della fiamma, le variazioni di accelerazione della fiamma in funzione dello spessore dello strato infiammabile, così come determinato sperimentalmente [2].

Il modello è stato incorporato in un software di fluidodinamica numerica commerciale (CFD-ACE+®, USA) che grazie alla possibilità di impiego di varie tipologie di griglie di calcolo (miste strutturate e non strutturate e multi-block) consente la descrizione di geometrie tridimensionali tipiche di configurazioni reali.

Nel lavoro vengono dapprima illustrate alcune caratteristiche peculiari delle fiamme in miscele stratificate, fornendo in tal modo gli elementi necessari per una corretta valutazione del fenomeno e delle difficoltà che si presentano rispetto allo sviluppo di un modello computazionale. Successivamente sono illustrati il modello proposto e i risultati numerici ottenuti per le sole miscele stratificate più leggere dell'aria e in particolare per le miscele di metano in aria.

LE MISCELE STRATIFICATE COMBUSTIBILE-ARIA

La propagazione di fiamma in miscele infiammabili stratificate fu analizzata per la prima volta per miscele stratificate su pozze di liquido [3], osservando che la velocità di propagazione del fronte supera di quattro, cinque volte la velocità laminare di fiamma caratteristica della composizione stechiometrica. Studi teorici e sperimentali [2, 4-5] hanno poi evidenziato che - sia per miscele infiammabili stratificate più leggere dell'aria che per quelle più pesanti dell'aria - l'aumento di velocità è legato a considerazioni di tipo unicamente fluidodinamico e che non sono necessarie considerazioni legate alla tensione superficiale e quindi alla presenza della superficie del liquido (nel caso di evaporazione da pozze) oppure alla presenza di "blast wave" precursori [6]. In particolare, le alte velocità sono il risultato dell'interazione puramente gascinamica tra il fronte di fiamma e l'atmosfera esterna non combustibile: l'espansione dei prodotti di combustione caldi provoca la redistribuzione dei gas freschi nelle immediate vicinanze del fronte di fiamma provocando l'aumento della superficie del fronte di reazione. Ciò provoca un notevole aumento della velocità di combustione e quindi della differenza di pressione tra i gas combusti e incombusti. Il campo di moto così creato sostiene le alte velocità di propagazione.

E' stato inoltre dimostrato che lo spessore dello strato premiscelato e l'estensione del confinamento verticale influenzano fortemente la velocità di combustione al fronte di fiamma e che il fronte di fiamma, pur esibendo velocità di propagazione molto più grandi della velocità laminare di fiamma, continua a mantenere caratteristiche essenzialmente laminari.

Un'altra caratteristica peculiare legata alla presenza della stratificazione di miscele infiammabili, e riconosciuta sperimentalmente da Phillips (1962) [7], è la contemporanea presenza di tre differenti meccanismi di combustione (Figura 1): a) propagazione della fiamma nello strato infiammabile premiscelato compreso tra i limiti di infiammabilità; b) un meccanismo di combustione di tipo diffusivo immediatamente a valle del fronte premiscelato dovuto al combustibile ed all'ossigeno residui rispettivamente nello strato ricco e povero dello strato infiammabile; c) un meccanismo di tipo "convettivo" dovuto al successivo miscelamento dello strato ricco di combustibile ed inizialmente non infiammabile con l'aria.

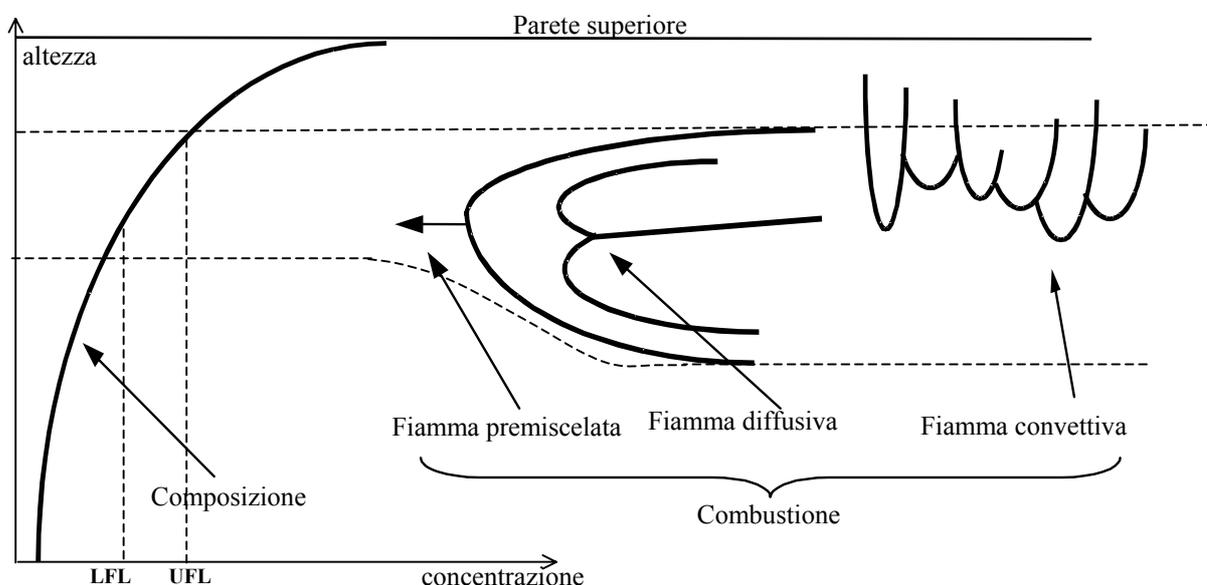


Figura 1. Composizione dello strato e meccanismi di combustione secondo Phillips (1965)

Nonostante la similitudine tra i fenomeni di accelerazione di fiamma di miscele stratificate più pesanti dell'aria e miscele più leggere dell'aria, è da osservare che i fenomeni convettivi di miscele più leggere dell'aria possono risultare particolarmente rilevanti in quanto i prodotti di combustione caldi sono di densità notevolmente più bassa sia rispetto alle miscele ricche poste negli strati più alti della camera di combustione

che rispetto agli strati di aria pura e/o di miscela povera di combustibile (eventualmente con concentrazione inferiore al limite inferiore di infiammabilità (LFL)), posti negli strati inferiori rispetto allo strato infiammabile.

Per il caso particolare delle miscele stratificate più leggere dell'aria, Liebman et al. (1970) hanno per primi analizzato l'aumento della velocità di fiamma S_f in funzione del gradiente di concentrazione formatosi in una camera di combustione in seguito alla diluizione di uno strato di metano al 50% v/v iniettato nella sezione superiore della camera stessa, e nella successiva ignizione della miscela. I dati sperimentali si riferiscono però alla velocità di fiamma in un solo punto lungo la direzione di propagazione del fronte di fiamma. Nello stesso lavoro gli autori forniscono relazioni empiriche in funzione delle altezze dello strato infiammabile e della galleria e dei numeri adimensionali di Reynolds di fiamma (Re_f):

$$Re_f = \frac{S_1(E-1)h_g^1}{\nu} \quad (1)$$

e di Richardson (Ri),

$$Ri = \frac{g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{aria}} \right) h_{100}}{[S_1(E-1)]^2} \quad (2)$$

dove S_1 è la velocità laminare di fiamma, g è l'accelerazione di gravità, ρ_f è la densità locale della miscela combustibile-aria, ρ_{aria} è la densità dell'aria, ν è la viscosità cinematica e h'_g è il diametro idraulico della galleria pari a $2h_g W / (h_g + W)$ dove W è la larghezza della galleria. Le relazioni empiriche sono però valide solo per sistemi di piccola scala e per distanze di propagazione di fiamma dal punto di ignizione relativamente piccole.

Feng et al. (1975) [2] hanno sviluppato un modello teorico per spiegare il comportamento per un singolo strato omogeneo di miscela combustibile posto sul soffitto di una galleria di lunghezza infinita o di lunghezza finita (Figura 2). Il modello si basa sulla soluzione delle equazioni di bilancio per la massa, la quantità di moto e l'energia e sull'assunzione che il flusso è stazionario, bidimensionale, incomprimibile (le velocità assolute sono basse) e inviscido (si assume che l'altezza della galleria sia sufficientemente grande). Si trascurano inoltre le velocità tangenziali di fiamma, la diffusione dovuta ai gradienti di temperatura e di concentrazione prima e dopo il fronte di fiamma.

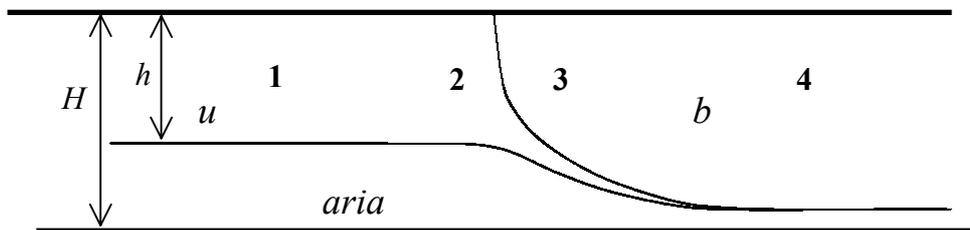


Figura 2. Schema della galleria infinita (Feng, 1975)

L'effetto dello spessore dello strato infiammabile è descritto in funzione del parametro m pari al rapporto dell'altezza dello strato combustibile h con l'altezza della galleria H ($m = H/h$).

La soluzione analitica del sistema, ottenuta in condizioni stazionarie per una galleria di lunghezza infinita, dimostra che, per m tendente all'infinito, la velocità di fiamma tende al rapporto di espansione E , ossia al rapporto delle densità dei gas incombusti e combustibili. Al diminuire di m , la velocità di fiamma diminuisce fino a la valore della velocità laminare di fiamma per $m = 1$. Nel caso di gallerie di lunghezza finita il flusso è instazionario per valori di m inferiori a circa 22.3, mentre per valori superiori la

propagazione di fiamma è stazionaria: la velocità non cambia in funzione della distanza di propagazione dal punto di ignizione e risulta, nel caso del metano pari a 188 cm s^{-1} .

Per camere di combustione completamente aperte e riempite interamente da miscele infiammabili stechiometriche ($m = 1$) la fiamma accelera fortemente, ma la velocità iniziale di propagazione per distanze piccole dal punto di ignizione è minima e il rapporto con la velocità di fiamma laminare è pari alla radice quadrata del rapporto di espansione E (pari a circa 2.7 per il metano: la velocità è quindi pari a circa 120 cm s^{-1});

In Figura 3 sono riportati i risultati sperimentali come diagrammi della velocità di fiamma in funzione di ξ (distanza di propagazione adimensionalizzata rispetto alla lunghezza della galleria) al variare di m . Il modello teorico fornisce risultati in accordo con i dati sperimentali solo mediante l'introduzione del numero di Froude basato sulla velocità laminare di fiamma [6], al fine di tenere conto della diluizione dello strato infiammabile nel tempo necessario alla fiamma per propagare dal punto di ignizione al punto opposto della camera di combustione.

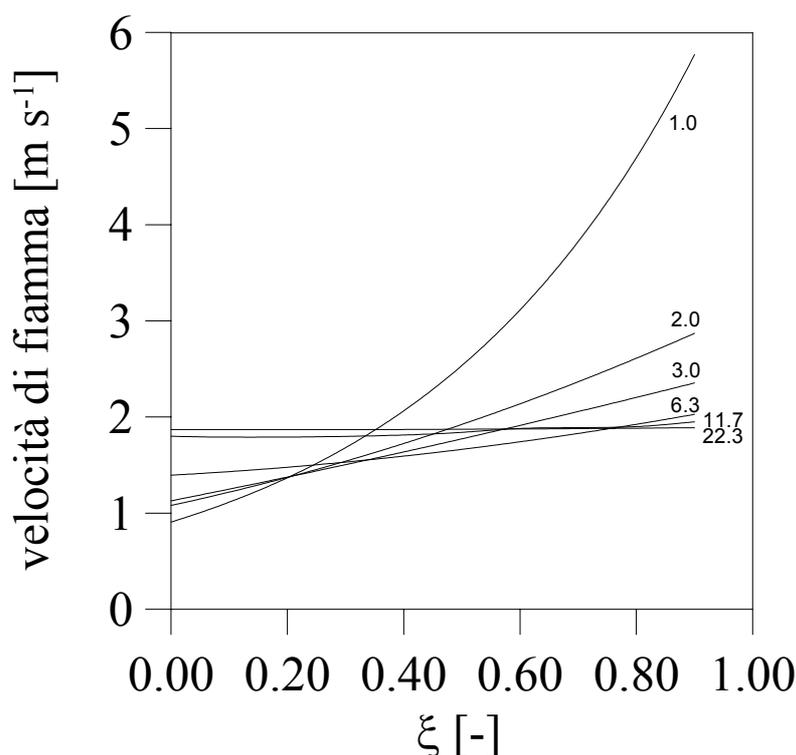


Figura 3. Velocità di fiamma al variare di $\xi (=x/L)$ al variare del parametro m per miscele stechiometriche di metano in aria.

Hirano e Suzuki (1980) [3] hanno riconosciuto valide, in linea generale, le assunzioni e le considerazioni di Feng et al. (1970) e Kaptein e Hermance (1976), ma non considerano sufficienti le conclusioni sul fronte di fiamma ottenute risolvendo semplici sistemi monodimensionali. Essi propongono dunque un modello bidimensionale per il caso in cui la miscela stratificata è in contatto con una superficie solida o liquida e nel caso in cui è trascurabile l'effetto del confinamento ossia per miscele stratificate all'aperto. Per simulare gli effetti dell'espansione termica del gas combusto Hirano e Suzuki suppongono inoltre una sorgente energetica puntuale *immaginaria* posta immediatamente dietro il fronte di fiamma. Sulla base di tali assunzioni e risolvendo un sistema di equazioni basato sulle funzioni di velocità potenziale ("stream function") si ottengono i profili di velocità e concentrazione a valle del fronte di fiamma, per entrambi i casi. Tali profili di velocità dimostrano ancora una volta che l'aumento di velocità di fiamma di miscele stratificate è legato a considerazioni puramente idrodinamiche, ma l'utilizzo di sorgenti energetiche esclude lo sviluppo di velocità di combustione ai diversi meccanismi convettivi e diffusivi prima accennati.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati codici di calcolo di fluidodinamica numerica (Computational Fluid Dynamics, CFD) che rendono possibile riprodurre la propagazione di fiamma in sistemi confinati e inconfinati in condizioni di flusso turbolento e di miscela omogenea (generalmente stechiometrica) [8, 9].

Viene qui proposta una estensione di tali modelli al caso delle fiamme stratificate in regime laminare, mediante un approccio che rende comunque possibile l'inclusione dei modelli per i regimi turbolenti.

IL MODELLO DI COMBUSTIONE

Per descrivere i fenomeni di combustione in ambienti di scala media o grande, aperti o solo parzialmente confinati, è necessario, per l'economia del calcolo in termini computazionali, utilizzare griglie con celle di grande dimensione che non consentono in definitiva di risolvere la struttura del fronte di fiamma. Risulta pertanto impossibile l'utilizzo di modelli di combustione basati sulla soluzione diretta delle reali cinetiche di reazione, con dipendenze di Arrhenius che fornirebbero automaticamente la giusta velocità di reazione in funzione delle condizioni locali della miscela.

Le possibili formulazioni alternative consistono in genere nella identificazione del fronte di fiamma con una superficie di discontinuità [10]. I possibili approcci al calcolo della evoluzione di una superficie di discontinuità in un flusso possono essere ricondotti a due modalità di ricostruzione del fronte all'interno della singola cella di calcolo, denominati rispettivamente metodo "front tracking" e metodo "front capturing" [11].

Lo studio delle fiamme stratificate contempla l'analisi e la simulazione di meccanismi di combustione di tipo diffusivo e convettivo, oltre alla combustione laminare (o turbolenta) di sistemi premiscelati. La scelta di non rifarsi alle più collaudate tecniche di "front tracking" [12] è dettata dalla necessità di rendere possibile la contemporanea descrizione di tutti i tre regimi di combustione che possono coesistere, come prima descritto, durante la propagazione della fiamma nella miscela stratificata, e dalla evidenza sperimentale che le diverse velocità di combustione in ognuno di tali regimi provocano un notevole allargamento della regione in cui è istantaneamente attivo il processo di combustione, rendendo dubbia la validità dell'ipotesi di esistenza di un fronte di reazione di spessore sempre trascurabile rispetto alle dimensioni complessive. Nel caso dei metodi "front tracking", inoltre, è adottata una variabile ausiliare ("G-equation level set method") che risulta di difficile utilizzo nel caso di fiamme complesse che non possono essere identificate da una singola discontinuità.

E' stato quindi sviluppato un modello di combustione che si basa sulla "ricostruzione" del reale profilo della fiamma all'interno delle celle di calcolo. Si assume che la lunghezza caratteristica della cella $\Delta x (= V_{cell}^{1/3})$ è sempre più grande dello spessore del fronte di fiamma δ_{flame} .

La reazione di combustione è stata considerata come una reazione one-step dai reagenti ai prodotti e la velocità di combustione modellata secondo la classica equazione funzione della velocità laminare del fronte di fiamma S_u :

$$R_c = \rho_F S_l A_f \quad (3)$$

dove A_f è la superficie della fiamma e ρ_F è la densità parziale locale della miscela combustibile al momento dell'ignizione. Al fine di valutare la variazione della velocità di combustione con la concentrazione in miscele stratificate, il termine S_l è definito in funzione del rapporto equivalente ϕ al momento dell'ignizione. Tale funzione è ricavata sulla base di correlazioni empiriche disponibili per la maggior parte delle miscele di idrocarburi in aria comunemente utilizzate [13].

Per quanto riguarda il meccanismo di propagazione della fiamma, è stata sviluppata una metodologia basata su una temperatura di ignizione calcolata per ognuna delle celle appartenenti al dominio di calcolo. Quando la fiamma sta per entrare nel volume di cella, la temperatura calcolata T_{cell} , che rappresenta il valore medio nella cella, può essere interpretata come la somma di due contributi (Figura 4):

- a) l'energia della miscela infiammabile non ancora ignita, dovuta al trasporto di calore, e dipendente dalla temperatura delle celle adiacenti (e con temperatura T_{cold});
- b) l'energia della frazione combusta del volume di cella $\delta^* \Delta x^2$, proporzionale alla temperatura di fiamma adiabatica T_{hot} , a sua volta funzione del rapporto equivalente.

Trascurando la variazione dei calori specifici, l'energia termica media contenuta nella cella computazionale risulta esprimibile come:

$$T_{cell} \Delta x^3 = T_{hot} \delta^* \Delta x^2 + T_{cold} (\Delta x - \delta^*) \Delta x^2 \quad (4)$$

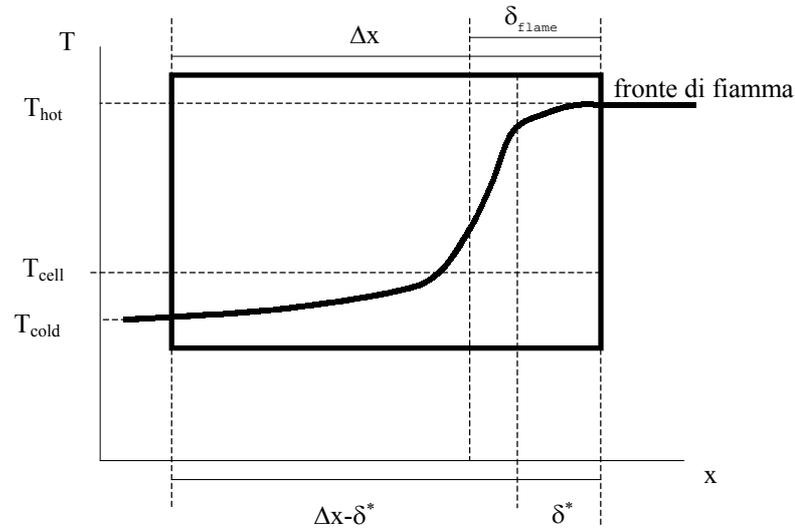


Figura 4. Profilo della temperatura in una cella di calcolo adiacente ad una cella combusta

Si assume quindi che la fiamma sia completamente penetrata nella cella –la cella è ignita - quando il bilancio energetico descritto dalla [3] verifica l’uguaglianza per $\delta^* = \delta_{flame}(\phi)$, dove lo spessore del fronte di fiamma $\delta_{flame}(\phi)$ è calcolato in funzione della velocità laminare di fiamma, e quindi a sua volta è funzione del rapporto equivalente ϕ e del coefficiente di trasporto di calore α [14]:

$$\delta_{flame}(\phi) = \frac{\alpha}{S_l(\phi)} \quad (5)$$

Ciò definisce una temperatura di ignizione di cella, fornita dall’equazione seguente:

$$T_{ign} = T_{cold} + \frac{\delta_{flame}(\phi)}{\Delta x} (T_{hot} - T_{cold}) \quad (6)$$

Accanto al meccanismo di ignizione proposto dalla Eq. (6) per la propagazione del fronte di fiamma “premiscelato”, ulteriori meccanismi possono essere definiti per descrivere altre modalità di combustione quali i meccanismi di combustione con modalità diffusiva e convettiva. Per questi ultimi, in questo lavoro è stato assunto, in via preliminare, che il processo di combustione iniziato nella modalità premiscelata non si esaurisca con il consumo totale dei reagenti, ma rimanga attivo bruciando con velocità infinita tutto il combustibile che negli istanti successivi viene trasportato per diffusione o convezione nella stessa cella, ciò per effetto iniziatore dei prodotti caldi di combustione.

Questo modello di combustione è stato inserito in un codice CFD denominato CFD-ACE+® (CFD Research Corporation, USA).

Il modello sviluppato è stato verificato riproducendo la propagazione di fiamma di una miscela stechiometrica di metano in aria all’interno di una camera di combustione di lunghezza pari a 2.13 m e altezza pari a 0.44 m costruita in modo da variare l’altezza dello strato d’aria rispetto allo strato infiammabile. Questa configurazione è stata studiata sperimentalmente da Feng et al. (1975) e costituisce un eccellente “test case” per il modello. Infatti, pur in presenza di una semplice configurazione geometrica e di una ben definita composizione iniziale della miscela, esso include le fenomenologie fisiche che determinano i comportamenti caratteristici della propagazione di una fiamma di miscele stratificate.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Sono qui presentate e simulate le prove sperimentali effettuate da Feng (1975) per miscele di metano in aria all'interno di una camera di combustione, schematizzata in Figura 5. Nella parte alta della camera di combustione, separata dal resto della camera da un setto separatore, è iniettata una miscela stechiometrica di metano in aria. Il setto separatore è successivamente "sfilato" dalla camera al momento dell'ignizione. Nello stesso tempo la miscela è ignita con una scintilla.

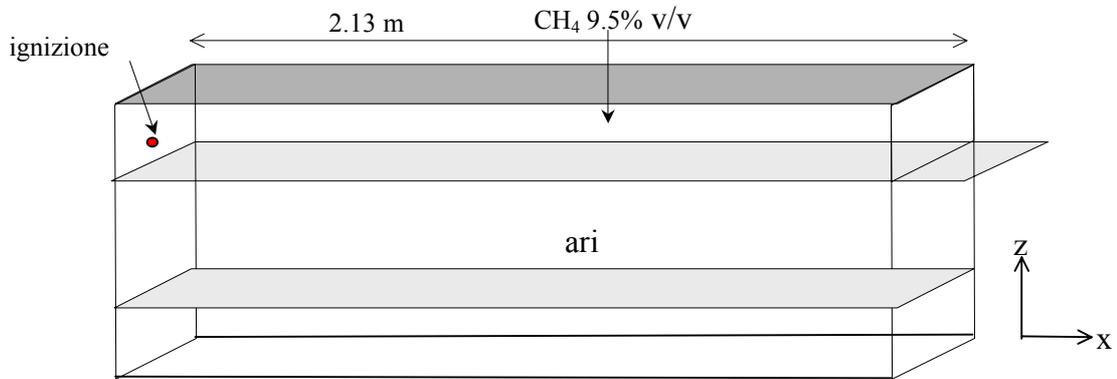


Figura 5. Camera di combustione riprodotta nelle simulazioni (Feng et al., 1975).

La posizione del setto separatore aria può essere invece variata lungo l'altezza della camera, in modo da variare il rapporto m tra lo spessore totale dello strato aria+combustibile H e lo spessore del solo strato infiammabile h .

La Figura 6 riporta, per il caso con $m = 22$, la tipologia della griglia bidimensionale utilizzata; sono evidenti le "camere" esterne, sui cui contorni sono fissate condizioni di apertura all'esterno, necessarie per diminuire gli effetti delle condizioni al contorno sull'accelerazione del fronte di fiamma. Il numero di celle totali è circa 15000. Esse hanno lato di dimensione di 8 mm nella sezione del dominio interessata dalla combustione.



Figura 6. Tipologia di griglia utilizzata per la simulazione della fiamma stratificata con $m=22$

Lo sviluppo della fiamma dopo circa 0.2 s dal momento dell'ignizione per il test con $m = 22$, è visualizzato in Figura 7 mostrando il campo istantaneo di densità.

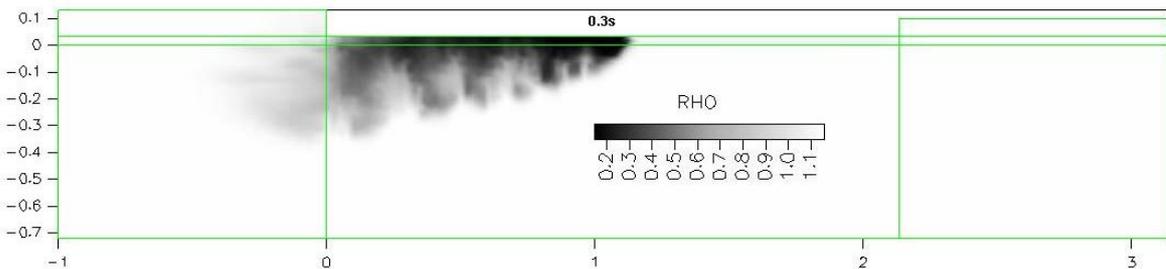


Figura 7. Posizione della fiamma calcolata dopo 0.2 s in termini di densità. $m=22$.

Nella figura seguente sono riportate le posizioni della fiamma in funzione del tempo lungo la direzione di propagazione, per i valori $m = 1$, $m = 2$ e $m = 22$. I corrispondenti risultati sperimentali, ricavati dai dati di velocità precedentemente mostrati in Figura 3, sono riportati per il confronto.

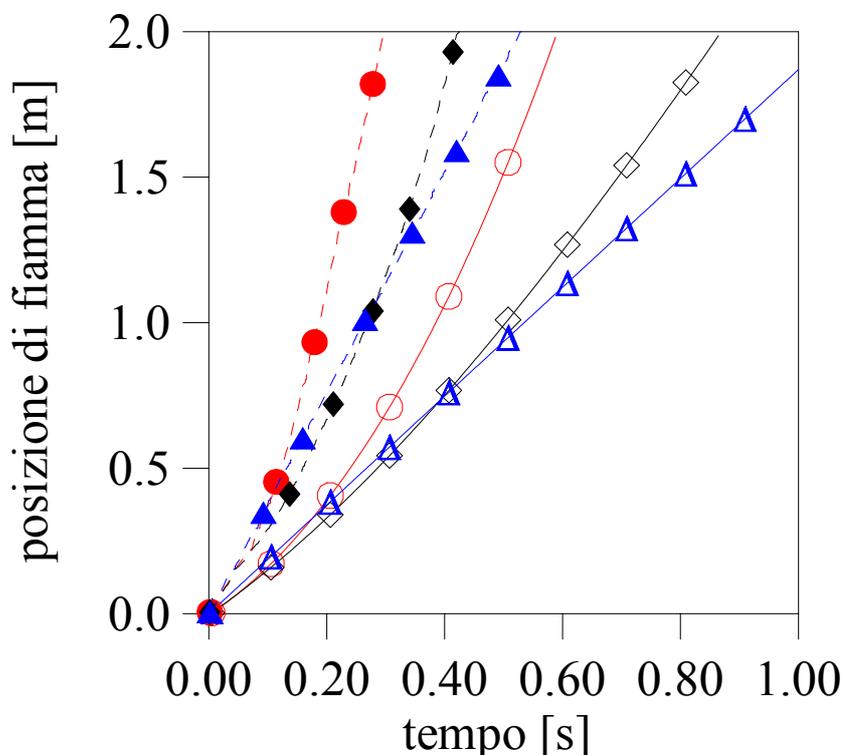


Figura 8. Posizione del fronte di fiamma in funzione del tempo calcolata da CFD-ACE+, al variare del rapporto $m = H/h$ all'interno della camera di combustione. O: $m = 1$; Δ : $m = 2$; \square : $m = 22$. Le linee tratteggiate con i simboli pieni si riferiscono ai dati calcolati.

Il confronto dei risultati numerici ottenuti con l'analisi sia sperimentale che teorica effettuata da Feng et alii evidenzia che sono correttamente riprodotti gli andamenti della posizione della fiamma - e quindi delle velocità - al variare del rapporto m lungo la camera di combustione. In particolare è correttamente riprodotta la forte diminuzione della velocità da $m = 1$ a $m = 2$. Per $m = 22$ l'effetto della stratificazione risulta trascurabile: si nota la formazione di una fiamma stazionaria lungo la direzione di propagazione così come previsto teoricamente e osservato sperimentalmente. Anche i punti di intersezione delle varie curve sono qualitativamente predetti. Tuttavia i valori di velocità assoluti calcolati sono più elevati di circa un fattore 2. A tal riguardo è ancora in fase di sviluppo e studio la modellazione della fase di ignizione (i risultati sperimentali di Feng et al. sono estrapolati per i valori iniziali della propagazione di fiamma).

CONCLUSIONE

Il modello di propagazione di fiamma presentato in questo lavoro è in grado di riprodurre gli andamenti delle velocità al variare del rapporto di volume tra la sezione di camera di combustione occupata da miscela stechiometrica infiammabile e sezione di camera occupata semplicemente da aria, anche se i valori assoluti di velocità si discostano di un fattore di circa 2 rispetto al dato sperimentale.

Il modello è quindi in grado di descrivere il notevole aumento di velocità che si ottiene per miscele stratificate allorché non sono trascurabili gli effetti della presenza di un confinamento sulla sezione opposta allo strato di miscela infiammabile, in questo caso la parte bassa della camera di combustione. Il contributo alla velocità di fiamma avuto dai fenomeni di combustione post-fiamma nel caso di miscele stratificate più leggere dell'aria per i valori di m considerati è quindi trascurabile, così come definito da Feng et al. (1975).

Ulteriori sviluppi affronteranno il problema dell'ignizione e analizzeranno i fenomeni di combustione convettiva, questi ultimi risultando sicuramente influenti nel caso di miscele stratificate infiammabili non premiscelate (ossia nel caso in cui si hanno gradienti di concentrazione lungo l'asse). Tali miscele sono

tipicamente incontrate nei casi reali di esplosione, sia per miscele più leggere dell'aria che per miscele più pesanti dell'aria. Le considerazioni riportate in questo lavoro sono applicabili sia all'interno di sistemi confinati che per lo studio di esplosioni all'atmosfera.

ELENCO DEI SIMBOLI

A_f	superficie della fiamma [m ²];
E	rapporto di espansione tra le densità dei gas incombusti e dei gas combustibili [-];
h	altezza dello strato di combustibile [m];
h'_g	diametro idraulico della camera di combustione [m];
hg	diametro della camera di combustione [m];
H	altezza della camera di combustione [m];
g	accelerazione di gravità [m s ⁻²];
L	lunghezza della camera di combustione [m];
m	rapporto h/H [-];
S_u	velocità laminare di fiamma [m s ⁻¹];
T_{cell}	temperatura calcolata nella cella di calcolo [K];
T_{hot}	temperatura adiabatica di fiamma [K];
T_{hot}	temperatura dei gas freschi in celle di calcolo adiacenti alla cella combusta [K];
V_{cell}	volume della cella di calcolo [m ³];
W	larghezza della camera di combustione [m].

Simboli greci

α	coefficiente di trasporto di calore [m ² s ⁻¹];
δ_{flame}	spessore del fronte di fiamma [m];
Δx	spessore della cella di calcolo [m];
ξ	distanza di propagazione della fiamma adimensionalizzata rispetto alla lunghezza della camera di combustione [-];
ν	viscosità cinematica [m ² s ⁻¹];
ρ_f	densità della miscela combustibile-aria [kg m ⁻³];
ρ_{aria}	densità dell'aria [kg m ⁻³];
ϕ	rapporto equivalente [-].

Apici e pedici

u	incombusti;
b	combusti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tamanini F., Chaffee J., *Combustion behavior of stratified propane/air layers simulating flammable liquid spills*, Mediterranean Combustion Symposium, Antalya, Turkey, 1999.
- [2] Feng C. C., Lam S. H., Glassman, I., *Flame propagation through layered fuel-air mixtures*, *Combustion Science and Technology*, Vol. 10, pp. 59-71, 1975.
- [3] Roberts A.F., *Spread of flame on a liquid surface*, Ph.D. Thesis, Imperial College, London, 1958.
- [4] Liebman I., Corry J., Perlee E., *Flame propagation in layered methane-air systems*, *Combustion Science and Technology*, 1970, 1, 257-267.
- [5] Hirano T., Suzuki T., *Theoretical simulation of gas movements in front of propagating flames through layered flammable mixtures*, *Combustion Science and Technology*, 1980, 23, 215-224.
- [6] Kapstein M., Hermance E., *Horizontal propagation of laminar flames through vertically diffusing mixtures above a ground plane*, XVI Symp. Int. on Combustion, The Combustion Institute, 1976, 1295-1306.

- [7] Phillips H., Flame in a buoyant methane layer, Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1277-1283, 1962.
- [8] Moen I.O., Lee J.H.S., Hjertager B.H., Fuhre K., Eckhoff R.K., *Pressure development due to turbulent flame propagation in large-scale methane-air explosions*, Combustion and Flame, 47, 1982, 3-52.
- [9] Van den Berg A.C., The H.G., Mercx W.M., Moilleau Y., Hayhurst C.J., *AutoReagas A CFD tool for gas explosion hazard analysis*, 8th International Symposium of Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Antwerp, Belgium, 1995, 349-364.
- [10] Vervisch L. and Veynante D., *Turbulent Combustion Modeling*, in: "Introduction to Turbulent Combustion", von Karman Institute Lecture Series 1999-04, Rhode-Saint-Genese, Belgium, 1999.
- [11] LeVeque R. J., *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [12] Bray, K.N.C. and Peters, N., *Laminar flamelets in turbulent flames*, in: Libby, P.A., Williams, F.A., "Turbulent Reacting Flows", Academic Press, London, 1994.
- [13] Dibble R. W., Warnatz J., Maas U., *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Springer Verlag, 2001.
- [14] Kuo K., *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons, 1986.