



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio delle strutture reattive locali in un bruciatore a polverino di
carbone operante in condizione "flameless"

Antonio Cavaliere, Mara de Joannon



STUDIO DELLE STRUTTURE REATTIVE LOCALI IN UN BRUCIATORE A POLVERINO DI CARBONE
OPERANTE IN CONDIZIONE "FLAMELESS"

Antonio Cavaliere, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Napoli Federico II; Mara de Joannon, Istituto di Ricerche sulla Combustione, C.N.R.

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

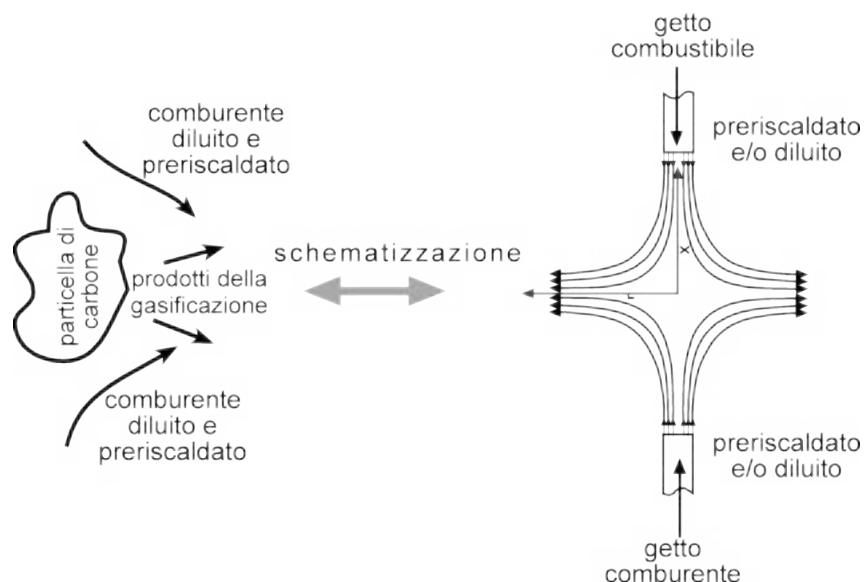
Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: *Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone*

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

Introduzione

L'attività di ricerca svolta estende l'analisi delle strutture reattive in un bruciatore a polverino di carbone "flameless" a condizioni locali di flusso differenti rispetto a quelle valutate nel corso del primo anno. Tali strutture reattive derivano dalla ignizione e dalla ossidazione della frazione volatile dei prodotti della gasificazione del polverino di carbone. Le particolari condizioni di funzionamento del sistema fanno in modo che l'ignizione è assicurata dalla elevata temperatura del flusso di gas riciclati contenente ossigeno ed un alto tenore di anidride carbonica ed acqua. Per l'esemplificazione delle strutture locali che si creano nelle zone di interesse il processo è stato schematizzato considerando una configurazione a getti contrapposti, messa in evidenza in Fig. 1, in cui i due getti sono alimentati in condizioni opportune. In particolare, i due flussi gassosi, l'uno contenente il combustibile e l'altro contenente il comburente, sono preriscaldati e/o diluiti in modo tale da ottenere differenti



condizioni di alimentazione.

Fig.1: Schematizzazione delle zone reattive nel processo considerato

Facendo riferimento alla temperatura di preriscaldamento e alla diluizione di uno o entrambi i flussi, l'ignizione e la struttura reattiva che ne deriva è identificata in letteratura come Hot Diluted Diffusion Ignition (HDDI) [1]. In particolare in questa specifica condizione di funzionamento è possibile avere quattro modalità di alimentazione dei reagenti che sono riassunti nella tabella riportata di seguito.

4 casi	Ossidante	Combustibile
HODO	Hot Diluted	
HODF	Hot	Diluted
HFDO	Diluted	Hot
HFDF		Hot Diluted

E' possibile, quindi, avere un'alimentazione in cui l'ossidante è preriscaldato e diluito (HODO), o ancora in cui l'ossidante è preriscaldato ed il combustibile diluito (HODF), ovvero l'ossidante è diluito ed il combustibile è preriscaldato (HFDO). Un ultimo caso prevede, invece, il riscaldamento e la diluizione della corrente contenente il combustibile (HFDF).

Sulla base dei risultati ottenuti nel corso del primo anno di attività sulla caratterizzazione delle strutture reattive stabilizzate nelle condizioni Hot Oxidant Diluted Oxidant e Hot Oxidant Diluted Fuel l'analisi è stata estesa alle condizioni di alimentazione in cui il getto di combustibile è contemporaneamente preriscaldato e diluito, identificate come Hot Fuel Diluted Fuel (HFDF). Questa è, tra le possibili condizioni di alimentazione, quella in cui può trovarsi con maggiore probabilità localmente il combustibile derivante dalla gasificazione del carbone.

Risultati Conseguiti

Considerando un getto di combustibile ed un getto di comburente che miscelano, nello strato di miscelamento i profili di temperatura, iniziale e di lavoro, saranno funzione della frazione di miscelamento Z . In Fig. 2 sono riportati i profili della temperatura di miscelamento senza reazione T_{frozen} e della temperatura adiabatica di reazione T_{max} relativi al caso standard, in cui il getto di aria e di combustibile non preriscaldati e non diluiti si miscelano e reagiscono. Spostandosi nello strato di miscelamento dalla zona in cui è alimentato l'ossidante ($Z=0$) verso il combustibile ($Z=1$), è possibile vedere che la temperatura adiabatica aumenta fino a raggiungere il massimo di circa 2400K in corrispondenza del valore stechiometrico di Z che in queste condizioni di alimentazione è pari a $Z_{stec}=0.055$. A valori della Z maggiori del valore stechiometrico corrisponde una temperatura adiabatica inferiore. Essa diminuisce all'aumentare di Z fino ad assumere il valore della temperatura di alimentazione del combustibile per $Z=1$. Sullo stesso diagramma sono riportati i profili di T_{max} e di T_{frozen} relativi ad una condizione HFDF, in cui il combustibile è preriscaldato fino alla temperatura di 1300K ed è diluito con azoto in modo tale che $X_f=0.1$.

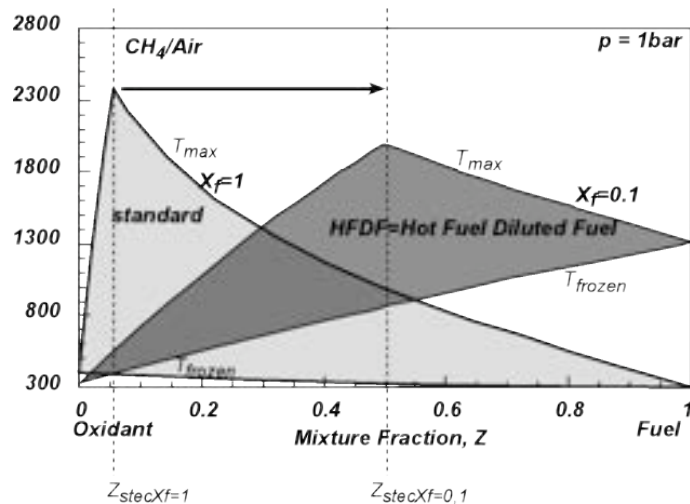


Fig.2 Distribuzione della temperatura iniziale e adiabatica nello strato di miscelamento in condizioni standard e HFDF

E' possibile notare che il preriscaldamento e la diluizione determinano due effetti principali disaccoppiati. In particolare, la diluizione del combustibile determina uno spostamento della Z_{stec} verso valori maggiori, cioè verso la zona di alimentazione del combustibile. Nel caso riportato, per $X_f = 0.1$ $Z_{stec} = 0.5$. Tale variazione è messa in evidenza nel diagramma di Fig. 3 dove è riportato il valore della frazione di miscelamento stechiometrica al variare della frazione molare del combustibile nella corrente.

Il secondo effetto è strettamente legato al preriscaldamento del combustibile. Dal diagramma riportato in Fig. 2 è possibile vedere che la T_{frozen} assume valori significativi in un ampio intervallo di Z che, in ogni caso dipendono dalla temperatura di preriscaldamento della corrente di combustibile. In particolare esiste un intervallo di $Z > Z_{stec}$ per il quale la T_{frozen} è maggiore della temperatura di ignizione T_{ign} . Questo comportamento è evidente dal diagramma di Fig. 4 dove sono riportati i profili T_{frozen} e T_{max} già presenti in Fig. 2 per il caso HFDF. Sullo stesso diagramma di Fig. 4 sono stati riportati i profili della temperatura di ignizione T_{ign} e della temperatura di equilibrio T_{eq} al variare di Z . E' possibile vedere che per $Z > Z_{stec}$ la temperatura di ignizione è sempre inferiore della temperatura di preriscaldamento. Questo implica che sarebbe possibile avere zone di ignizione nella frazione di miscelamento lontane dalle condizioni stechiometriche. Nella Fig. 4 è anche possibile vedere che per valori di $Z > 0.8$ la temperatura di equilibrio è inferiore sia alla T_{frozen} e, per un limitato intervallo di valori, alla T_{ign} .

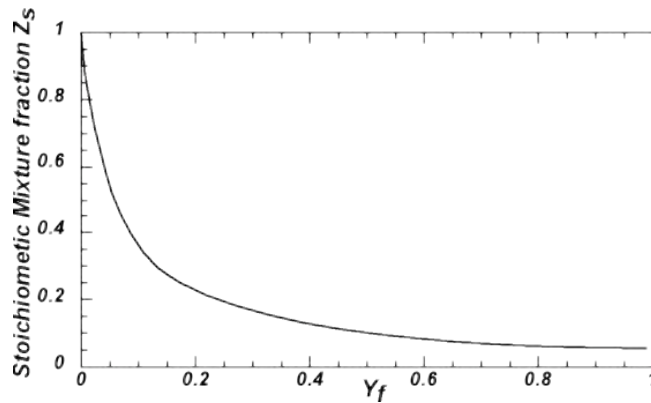


Fig.3 Variazione della frazione di miscelamento stechiometrica al variare della diluizione del combustibile nella condizione HFDF

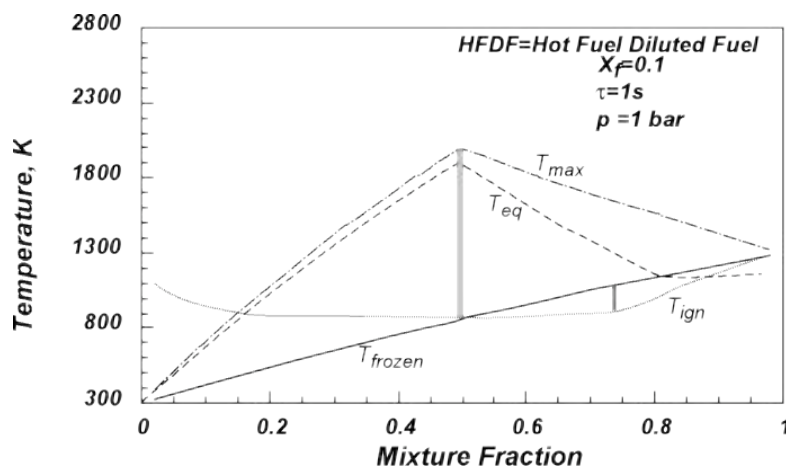


Fig.4 Distribuzione della temperatura iniziale, adiabatica, di equilibrio e di ignizione nello strato di miscelamento nelle condizioni HFDF

Così come fatto per le configurazioni analizzate in passato, relative a condizioni di diluizione e/o preriscaldamento del combustibile e del comburente differenti, lo studio delle strutture reattive è stato affrontato utilizzando un approccio di tipo numerico. Utilizzando un codice di calcolo commerciale e modelli cinetici presenti in letteratura (GRI3.0, [2]), è stata condotta una analisi dettagliata della dipendenza dell'ignizione e della relativa struttura reattiva che si stabilizza in funzione dei parametri operativi. In particolare sono stati valutati gli effetti della composizione dei flussi, della temperatura di preriscaldamento, della pressione e della velocità di stiramento sull'evoluzione del processo ossidativo. Sono quindi state individuate le regioni in cui si stabilizzano i diversi regimi di reazione e come tali regioni dipendono dai parametri considerati.

Come descritto in Fig. 1, è stato utilizzato un modello fisico del sistema che consente di semplificare lo studio del sistema. In particolare, quest'ultimo è stato schematizzato per mezzo di una configurazione costituita da due getti contrapposti, uno contenente il combustibile e l'altro il comburente alimentati ad una temperatura pari a T_o e T_{in} rispettivamente. Il sistema è rappresentato nella parte superiore della Fig. 5 nel caso standard in cui il comburente è

costituito da aria ed il getto combustibile da metano alimentati alla temperatura $T_o = T_{in} = 300K$ ed alla velocità $v_o = 25 \text{ cm/s}$.

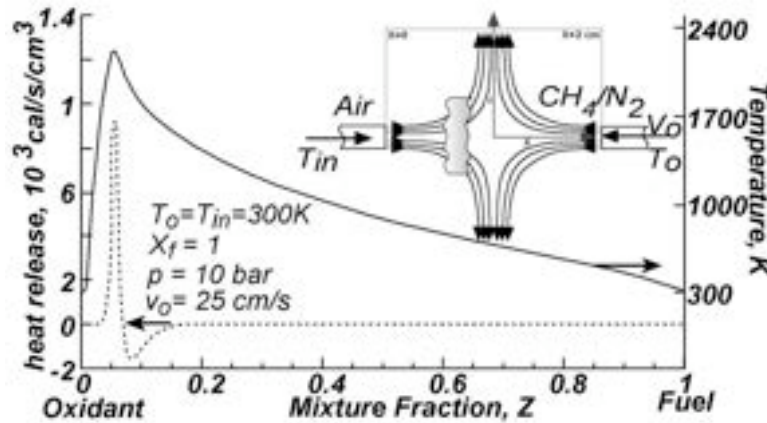


Fig. 5: Schematizzazione di getti contrapposti profili relativi ottenuti in condizioni standard.

L'analisi delle strutture ossidative è stata effettuata valutando la velocità di rilascio di calore (\dot{h}) e il profilo di temperatura che si ottengono in tale sistema in funzione della coordinata assiale. Una valutazione più significativa è ottenuta considerando i profili di tali grandezze nello strato di miscelamento, in funzione della frazione di miscelamento Z .

La velocità di stiramento è stata fatta variare in un intervallo tra 10 e 300 s⁻¹. I valori della velocità della corrente ossidante sono stati scelti in maniera tale che i due getti contrapposti avessero la stessa energia cinetica. Ciò si traduce in un'invarianza del punto di stagnazione tra i due getti il quale, per le condizioni scelte, è posto ad una distanza pari a circa metà della distanza tra le due sezioni di ingresso.

La diluizione della corrente di combustibile è stata ottenuta considerando una variazione della frazione molare del combustibile da 1 a 0.02. A tali gradi di diluizione corrispondono degli incrementi massimi di temperatura, relativi alla completa ossidazione del combustibile, che variano dai 50-100 K, fino a circa 2000 K, per condizioni non diluite.

La temperatura d'ingresso del getto di ossidante è di 300 K, in tutti i casi analizzati. La temperatura del getto di combustibile varia da 600 K fino ai 2400 K in maniera da esplorare i casi in cui la temperatura adiabatica di fiamma delle miscele è maggiore o minore della temperatura del flusso combustibile. Sono stati analizzati due valori della pressione di lavoro 1 e 10 atm. I valori dei parametri considerati sono stati riassunti nella Tab. 1.

Frazione molare di combustibile	0.01-1
Temperatura getto ossidante	300K
Temperatura getto combustibile	600K-2400K
Pressione	1-10 bar
Velocità di stiramento	10 sec ⁻¹ -300sec ⁻¹

Tab.1: Intervalli dei parametri analizzati nello studio della configurazione HFDF

Gli effetti della diluizione e del preriscaldamento del combustibile sulle strutture reattive che si stabilizzano sono visibili nei profili di temperatura e di rilascio di calore riportati in Fig. 6, in funzione di Z su curve parametriche nella concentrazione di combustibile. Essi si riferiscono ad una temperatura di preriscaldamento del combustibile di 1400K $v_o=100\text{cm/s}$ ed una pressione di 10 bar. La linea tratteggiata sul diagramma rappresenta la temperatura di miscelazione dei getti di combustibile e comburente in assenza di reazione. Il punto presente sulla curva di rilascio di calore rappresenta il valore di $Z = Z_{st}$. Per pressione di 10 bar, il profilo di temperatura ottenuto per $X_f=1$, cioè in assenza di diluizione, è molto simile a quello riportato in condizioni standard in Fig. 5, sebbene in questo caso il valore massimo di temperatura raggiunto è di 2340K a causa del preriscaldamento del combustibile.

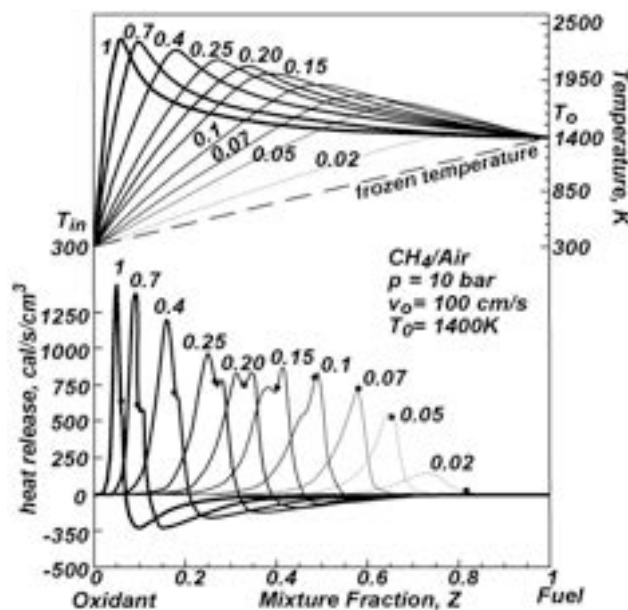


Fig. 6: Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HFDF alla pressione di 10.

Quindi esso decresce fino al valore di preriscaldamento del combustibile per $Z=1$. Il profilo di \dot{h} cresce rapidamente fino a raggiungere un massimo in corrispondenza del massimo di temperatura a $Z=0.053$ molto prossimo al valore stechiometrico ($Z_{st}=0.055$) quindi decresce fino ad una spalla poco pronunciata a $Z=0.062$. Successivamente continua a decrescere, diviene negativo in corrispondenza della zona pirolitica e quindi torna nuovamente verso lo zero. All'aumentare della diluizione del combustibile si hanno un insieme di effetti che determinano un drastico cambiamento della struttura reattiva all'aumentare della diluizione del combustibile. In particolare, il massimo della curva di rilascio di calore si sposta verso Z maggiori in seguito allo spostamento del valore di Z_{st} , il profilo contemporaneamente si

estende su un intervallo delle frazioni di miscelamento più ampio, appare un secondo massimo e la zona pirolitica si restringe. In particolare, quest'ultima non è più presente per valori della frazione molare di combustibile minori di 0.1. Nelle condizioni di massima diluizione considerata è possibile ritrovare la caratteristica ben identificata nella configurazione HODF che prevede uno spostamento tra la frazione di miscelamento alla quale si verifica il massimo di Z_{st} .

I profili ottenuti a pressione inferiore presentano le stesse caratteristiche principali e la stessa evoluzione che presentano i profili ottenuti a pressione maggiore, sebbene la presenza di due massimi sui profili di rilascio di calore e l'estensione della zona reattiva sono più evidenti.

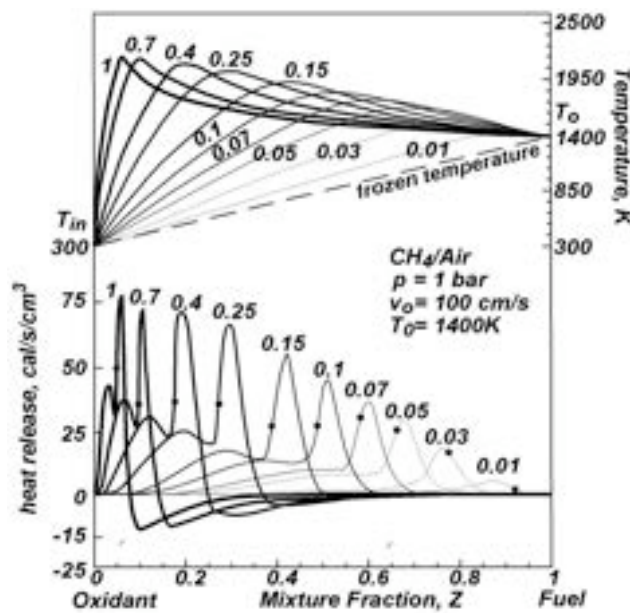


Fig. 7: Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HFDF alla pressione di 1 bar.

Al fine di mettere in evidenza l'estensione della zona reattiva lo spessore di fiamma δ è stato valutato considerando la curva gaussiana che meglio approssima il profilo di rilascio di calore, seguendo un classico approccio riportato in letteratura. La deviazione standard della curva gaussiana così ottenuta è stata calcolata valutando lo spessore della densità di distribuzione a metà della sua altezza, che risulta correlato allo spessore di fiamma. Esso è riportato in Fig. 8 per i profili ottenuti per $X_f=1$ e $X_f=0.05$. Nel caso di combustibile non diluito lo spessore di fiamma $\delta_1=0.1$ è inferiore al valore $\delta_2=0.3$ relativo al caso diluito.

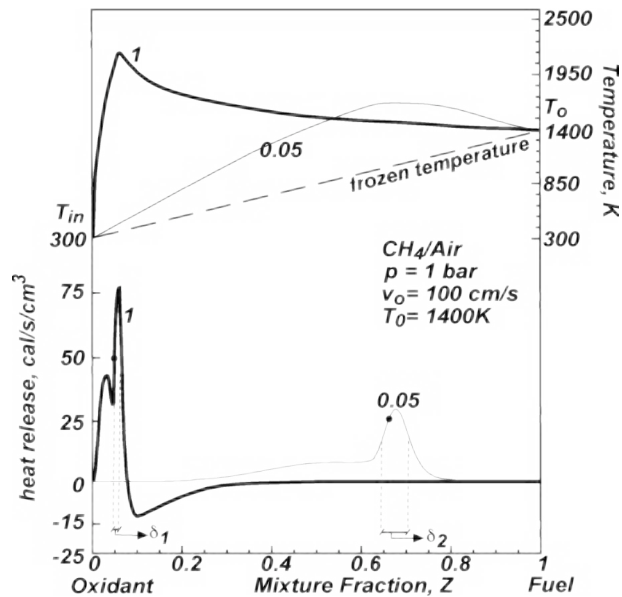


Fig. 8: Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HFDF alla pressione di 1 bar.

In un ampio intervallo di condizioni al sistema è possibile associare soluzioni multiple. E' questo il caso dei profili riportati in Fig. 9. Essi corrispondono a profili di velocità di rilascio di calore ottenuti per una temperatura iniziale di 1200K ed una frazione molare di combustibile pari a 0.5. E' possibile vedere che si possono stabilizzare due strutture reattive differenti, corrispondenti rispettivamente ad una condizione di alta e di bassa conversione. A tali due profili corrispondono caratteristiche sostanzialmente differenti non solo nei valori assoluti delle velocità di rilascio ma anche per la struttura e la posizione rispetto all'asse delle frazioni di miscelamento. Il profilo di alta conversione si stabilizza per valori di Z_{st} intorno allo stechiometrico e generalmente presenta la zona pirolitica. Il profilo di bassa conversione si stabilizza, invece, in corrispondenza di valori di Z molto alti, interessa un intervallo di frazioni di miscelamento più ampio e non presenta la regione pirolitica.

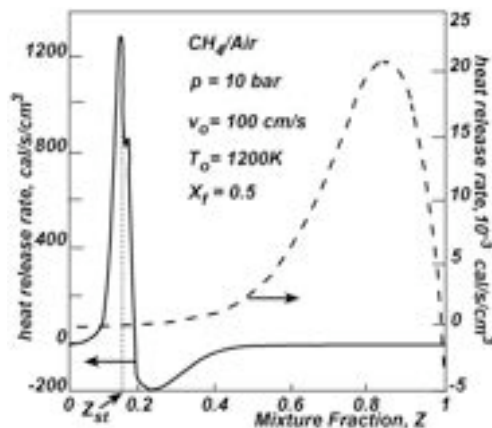


Fig. 9: Strutture reattive multiple ottenute nella configurazione HFDF.

La possibilità di stabilizzare due strutture ossidative con tipologie sostanzialmente differenti è stata rilevata in un ampio campo di valori della velocità di stiramento, come è possibile vedere

dalla Fig.10 dove sono riportati i valori massimi di h al variare della velocità di stiramento in un intervallo tra 0 e 300sec⁻¹ per tre temperature di preriscaldamento del getto di combustibile. La doppia soluzione è presente fino a $k = 250$ sec⁻¹. Per valori maggiori della k è presente solo la soluzione di bassa conversione. Nell'intervallo di k in cui sono presenti entrambe le soluzioni, quella di bassa conversione acquista sempre più importanza nei confronti di quella di alta all'aumentare della temperatura di preriscaldamento del combustibile.

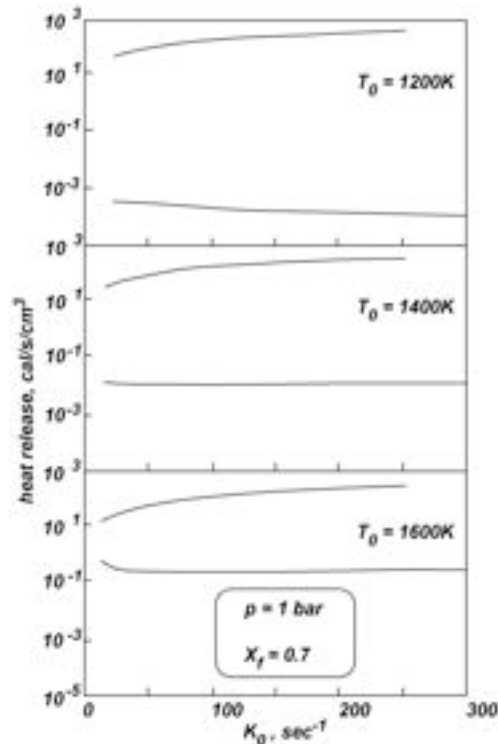


Fig. 10: h di alta e bassa conversione al variare della velocità di stiramento.

Sulla base della tipologia dei profili di velocità di rilascio di calore ottenuti è possibile individuare differenti regimi reattivi, così come fatto in passato considerando altre configurazioni di alimentazione. E' possibile quindi ottenere una mappa in funzione della temperatura iniziale e dell'incremento ΔT ottenibile nelle corrispondenti condizioni di alimentazione. La mappa ottenuta a 10 bar per una velocità di stiramento pari a 50sec⁻¹ è riportate in Fig.11. Nella mappa relativa alla pressione di 10 bar, la regione in basso a sinistra della mappa, corrispondente ai valori più bassi di T_o e ΔT , indicata con no-combustion, identifica la zona in cui non è possibile stabilizzare alcuna struttura reattiva. Tale zona si estende fino a $T_o = T_{ign}$. Nello stesso intervallo di T_o , un incremento di ΔT porta alla stabilizzazione di una struttura reattiva tipica della combustione tradizionale, determinata dal feed-back di calore e materia dalla zona di reazione vera e propria verso i reagenti. In questo caso, quindi si stabilizza una struttura reattiva tipica delle fiamme a diffusione, dove una zona ossidativa, posizionata a $Z = Z_{st}$ è seguita da una zona pirolitica.

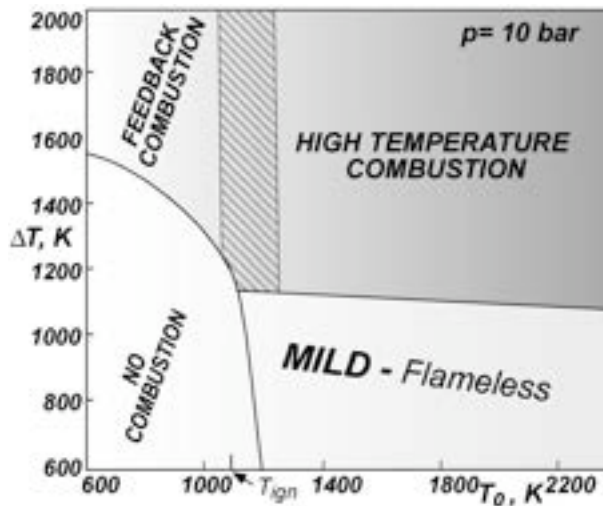


Fig. 11: Mappa di comportamento ottenuta per la configurazione HFDF a 10 bar.

Aumentando la temperatura di preriscaldamento del combustibile è presente nella mappa la zona di combustione di alta temperatura. In questo caso la struttura reattiva si estende su un intervallo di Z più ampio rispetto al caso della combustione feed-back mantenendo però inalterate le principali caratteristiche delle strutture di fiamma tradizionali. La zona tratteggiata indica che il passaggio dalla zona di combustione feed-back alla zona identificata come High Temperature Combustion è graduale. A partire da quest'ultima zona, un decremento di ΔT determina un ulteriore allargamento della zona reattiva fino a raggiungere la zona identificata con MILD. La caratteristica principale in questa regione è la scomparsa della zona pirolitica. L'estensione della zona interessata alla reazione e l'assenza della regione pirolitica sono due caratteristiche tipiche della combustione flameless, così come è evidenziato nella mappa. Una mappa analoga è stata ottenuta per una pressione di 1 bar, e riportata in Fig. 12.

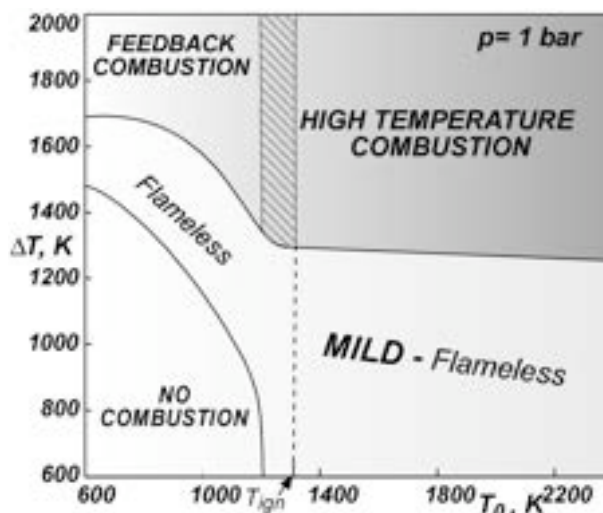


Fig. 12: Mappa di comportamento ottenuta per la configurazione HFDF a 1 bar.

Le caratteristiche principali delle strutture reattive identificate sono le stesse sebbene gli intervalli dei parametri in cui si verificano differiscono leggermente per un effetto dovuto alla pressione di lavoro. Una differenza non trascurabile, invece, è la presenza di una zona

flameless tra la zona di assenza di reazione e la zona di combustione feed-back. In corrispondenza di tale zona si stabilizzano strutture reattive più estese rispetto alle strutture di fiamma tradizionali, cioè interessano un intervallo di Z relativamente ampio rispetto alle strutture relative alla zona feed-back ed inoltre non presentano la regione pirolitica. Tali profili non possono essere classificati come MILD poichè sono relativi a strutture stabilizzate per temperature inferiori alla temperatura di ignizione e, di conseguenza, per definizione tali profili non rientrano nel regime MILD.

In definitiva anche nelle condizioni di alimentazione identificate come HFDF è stata messa in evidenza la possibilità di stabilizzare strutture reattive di differente tipologia ed identificare l'intervallo dei parametri in cui tali strutture sono associabili a regimi di combustione MILD.

E' stata inoltre presa in considerazione la configurazione che prevede l'alimentazione di combustibile e comburente entrambi diluiti e preriscaldati (HODO/HFDF). I prodotti della gasificazione della particella di carbone sono, generalmente, a temperatura maggiore della temperatura ambiente. Inoltre, i prodotti gassosi già parzialmente ossidati, e quindi ad alta temperatura, possono mescolarsi ulteriormente con la corrente ossidante, diluita e preriscaldata, per reagire e trasformarsi in prodotti di completa ossidazione. Poiché le strutture reattive riguardanti la diluizione ed il preriscaldamento del getto di combustibile e comburente singolarmente sono state già approfonditamente caratterizzate, è stata focalizzata l'attenzione su una condizione di alimentazione HODO/HFDF che consente la stabilizzazione di una struttura reattiva diffusiva per la quale si possa raggiungere una condizione isoterma all'interno della camera di combustione. Tale condizione identifica, infatti, una condizione limite ottimale di funzionamento nelle condizioni di alimentazione di riferimento. Sono state condotte, quindi, in modo sistematico un significativo numero di simulazioni numeriche per identificare la strategia più opportuna per il raggiungimento di tali condizioni di lavoro. In particolare, sono state effettuate simulazioni per identificare, a partire da una condizione con comburente diluito e preriscaldato, quale fosse la condizione più indicata alla quale associare una condizione di combustibile diluito e preriscaldato. Un esempio delle strutture reattive possibili in queste condizioni è riportato in figura 13. Esse si riferiscono ad una condizione in cui l'ossidante è diluito e preriscaldato a 900K ed in combustibile è anch'esso preriscaldato a 1200K. La frazione molare di combustibile varia tra 1 e 0.1.

Anche in questo caso, quindi, è possibile notare un aumento della estensione dell'intervallo di Z interessato alla reazione e l'assenza della regione pirolitica nei profili di velocità di rilascio di calore. E' possibile quindi anche in queste condizioni identificare delle strutture reattive classificabili come strutture MILD.

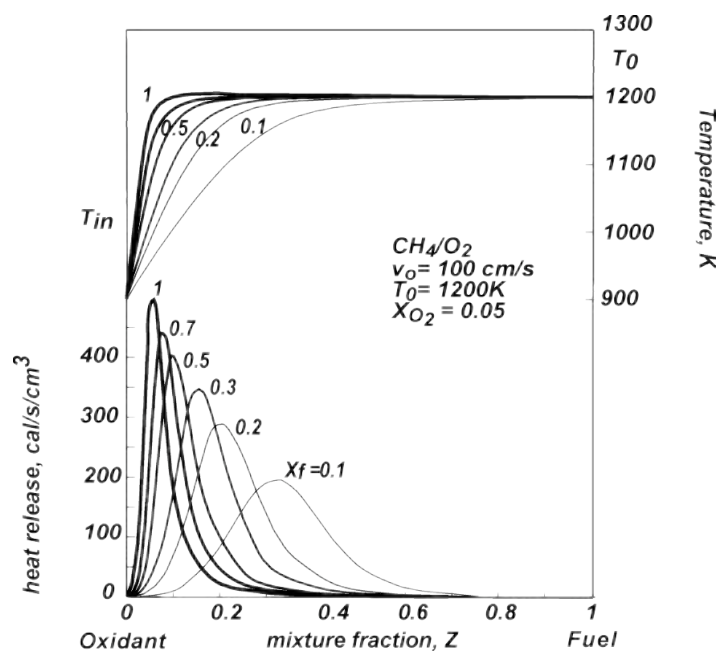


Fig. 13: Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HODO/HFDF

Conclusioni

L'attività di ricerca svolta nel corso dell'anno ha consentito di identificare le differenti strutture reattive che possono stabilizzarsi in due condizioni di alimentazione di riferimento. In particolare è stata considerata la configurazione HFDF e la configurazione HODO/HFDF. E' stato possibile identificare gli intervalli dei parametri in cui è possibile ottenere strutture associabili ad un processo di combustione MILD. E' stato, inoltre, confermato che esistono tre caratteristiche che possono identificare una struttura reattiva classificabile come MILD: la scomparsa della regione pirolitica nei profili di rilascio di calore, l'estensione della struttura reattiva nello spazio della frazione di miscelamento e lo spostamento del massimo del profilo di velocità di rilascio di calore rispetto alla frazione di miscelamento stechiometrica.

Bibliografia

- Bowman, C., Frenklach, M, Gardiner, WR, Smith, G (1999). "The GRI 3.0 Chemical Kinetic Mechanism." University of California: Berkeley, CA.
- de Joannon, M., Sabia, P , Cavaliere, A (2009). HDDI Mild Combustion. Alternative Ignition Systems. M. Lackner, ProcessEng Engineering GmbH.

Prodotti della Ricerca

Sorrentino G., de Joannon M., Cavaliere A., *Internal heating of steam flow by means of MILD Combustion*, 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, Poznan, July , 5-7 2010.

de Joannon M., Sorrentino G., Cavaliere A., *Effect of Hot Diluted Fuel Flow on Reactive Structures in MILD Combustion*, PTSE2010 - International Conference on "Processes and Technologies for a Sustainable Energy", Ischia, June, 27-30 2010.

Sorrentino G., de Joannon M., Cavaliere A., *MILD Combustion in Diffusion Controlled Regimes of Hot Diluted Fuel*, 33rd International Symposium on Combustion, Beijing, August, 1-6 2010.