

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi di sensitività relativa allo studio del reattore ISOTHERM-ITEA alimentato a slurry di carbone

Antonio Di Nardo, Giorgio Calchetti





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi di sensitività relativa allo studio del reattore ISOTHERM-ITEA
alimentato a slurry di carbone

Antonio Di Nardo, Giorgio Calchetti

ANALISI DI SENSITIVITÀ RELATIVA ALLO STUDIO DEL REATTORE ISOTHERM-ITEA
ALIMENTATO A SLURRY DI CARBONE

A. Di Nardo, Giorgio Calchetti (ENEA)

Aprile 2009

Report Ricerca 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 - Sviluppo di un sistema di combustione di tipo "flameless" per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO₂

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

Sommario

Sono illustrati i risultati di simulazioni bi-dimensionali / tri-dimensionali del processo di oxy-combustione di slurry di carbone, realizzato nel reattore ISOTHERM di ITEA. La combinazione di combustibile e ossigeno rende possibile il raggiungimento di elevate temperature, oltre 2000 °C. Ciò garantisce la massima efficienza del processo e assicura la distruzione di inquinanti pericolosi formati durante la combustione.

La particolare uniformità della reazione è facilitata dal ricircolo di parte dei prodotti della combustione, che dopo essere stati raffreddati vengono arricchiti in O₂ e riciclati, utilizzandone il calore per la produzione di vapore. Per le condizioni operative imposte, si intende indagare sul possibile instaurarsi di un regime di combustione flameless.

Introduzione

Secondo quanto atteso, nel combustore oggetto di studio, la combinazione di combustibile, e ossigeno rende possibile il raggiungimento di elevate temperature, oltre 2000°C. Ciò garantisce la massima efficienza del processo e assicura la distruzione di inquinanti pericolosi formatisi durante la combustione. In più la pressione regnante nel sistema assicura il rifornimento di ossigeno ovunque. La particolare uniformità della reazione è facilitata dal ricircolo di parte dei prodotti della combustione, che dopo essere stati raffreddati vengono arricchiti in O₂ e ricircolati, utilizzandone il calore per la produzione di vapore. Per le condizioni operative adoperate è probabile l'instaurarsi di un regime di combustione flameless.

ITEA, ed ENEA hanno pianificato campagne sperimentali aventi lo scopo di verificare e ottimizzare tale processo, nel caso di utilizzo come combustibile di slurry di carbone. Per questo motivo sono state eseguite una prima serie di simulazioni numeriche al fine di prevedere l'insieme dei fenomeni termo-fluidodinamici coinvolti.

Modellazione delle particelle di slurry

Dal punto di vista numerico sorge la necessità di simulare l'evoluzione e l'interazione di due fasi distinte: le particelle di slurry e la fase gassosa.

La prima è stata simulata secondo un approccio lagrangiano, mentre la seconda ovviamente con un approccio euleriano. Chiaramente il forte interscambio di energia, quantità di moto e materia è stato preso in considerazione. Per esempio la turbolenza della fase gassosa comporta fluttuazioni nella traiettoria delle particelle. L'influenza della turbolenza sulla dispersione delle particelle è stata valutata utilizzando un metodo stocastico nel tracciamento della traiettoria delle particelle, che consiste nel ricalcolare la traiettoria delle stesse un certo numero di volte e considerarne poi la media.

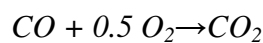
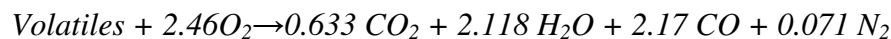
Se consideriamo la singola particella di slurry durante tutta la sua evoluzione, possiamo distinguere diverse fasi. La prima fase consiste nel semplice riscaldamento della particella man mano che attraversa zone ad alta temperatura. La seconda fase consiste nella evaporazione dell'acqua contenuta all'interno. Nella terza fase avviene il rilascio dei componenti volatili e nella quarta e quinta la combustione superficiale del carbone e il processo di scambio termico delle ceneri residue. Non è stata simulata la frantumazione dello slurry immediatamente all'uscita sia a causa delle non ben chiare caratteristiche fisiche dello stesso, che della mancanza di dati in letteratura a riguardo. Inoltre, secondo i dati forniti, la quantità di acqua adoperata rispetto a quella di carbone sembra essere troppo esigua e la granulometria del carbone troppo grande, per la formazione di una pasta omogenea. Si è pensato allora di introdurre nel reattore particelle di slurry aventi la stessa distribuzione granulometrica del carbone di partenza, immaginando che l'acqua fosse contenuta all'interno dei pori del carbone.

Il tasso di rilascio dei componenti volatili è stato valutato con il single kinetic rate model, secondo il quale l'emissione di volatili è proporzionale alla quantità di volatili restanti nella particella con una costante di proporzionalità avente una forma del tipo Arrhenius.

La velocità di combustione della frazione solida è invece controllata sia dalla cinetica chimica della reazione che dalla diffusione di ossigeno verso la particella.

Modellazione della fase gassosa

Le simulazioni effettuate sono di tipo RANS su griglie bidimensionali e tridimensionali. La turbolenza della fase gassosa è stata trattata con il modello a due equazioni $k-\epsilon$, mentre l'interazione chimica-turbolenza sia secondo il modello eddy-breakup, con il quale si assume una cinetica chimica di equilibrio, per cui infinitamente veloce, che con il modello eddy-dissipation-concept, capace di catturare fenomeni di non equilibrio quali ignizione, spegnimento locale etc. Nel primo caso si è modellato l'insieme delle reazioni in fase gassosa con un meccanismo a due steps:



Nel secondo caso si è adottato uno schema cinetico ridotto contenente 150 reazioni e 33 specie chimiche.

Lo scambio termico per irraggiamento è stato valutato con il modello P1, adatto a grossi spessori ottici, utilizzando il modello WSGGM per la valutazione delle proprietà radiative del mezzo gassoso. Si è inoltre tenuto conto dell'interazione radiativa delle particelle, cosa che incide notevolmente sui risultati ricavati

Simulazioni

I prodotti della combustione riciclati sono introdotti attraverso un condotto anulare all'interno del quale sono sistemate delle pale swirlanti, che non si estendono per tutta la sezione. Al centro del condotto è disposta la lancia di iniezione del combustibile assieme a vapore propellente, avente lo scopo di facilitare l'atomizzazione del getto.

Per il primo gruppo di simulazioni effettuate (bidimensionali), le condizioni al contorno sono le seguenti:

Operating and boundary conditions

Recirculated gas flow rate: 12525 kg/h with 2421 kg/h O₂, at 370 K (partially swirled)

CO₂ 41.3%-- H₂O 20.64%-- O₂ 32.56%-- N₂ 5.5%

Coal flow rate: 1000 kg/h dry, 55% volatile 36,7% char, granulometry with Rosin-Rammler distribution (d_{min}=1e-6m d_{max}=3e-4m spread=1.36--6 sample diameters)

Water content: 10% and 25% by volume.

Propellant flow rate: water vapor 270 kg/h at 370 K

Operating pressure: 400 kPa

Wall temperature: 1500 K

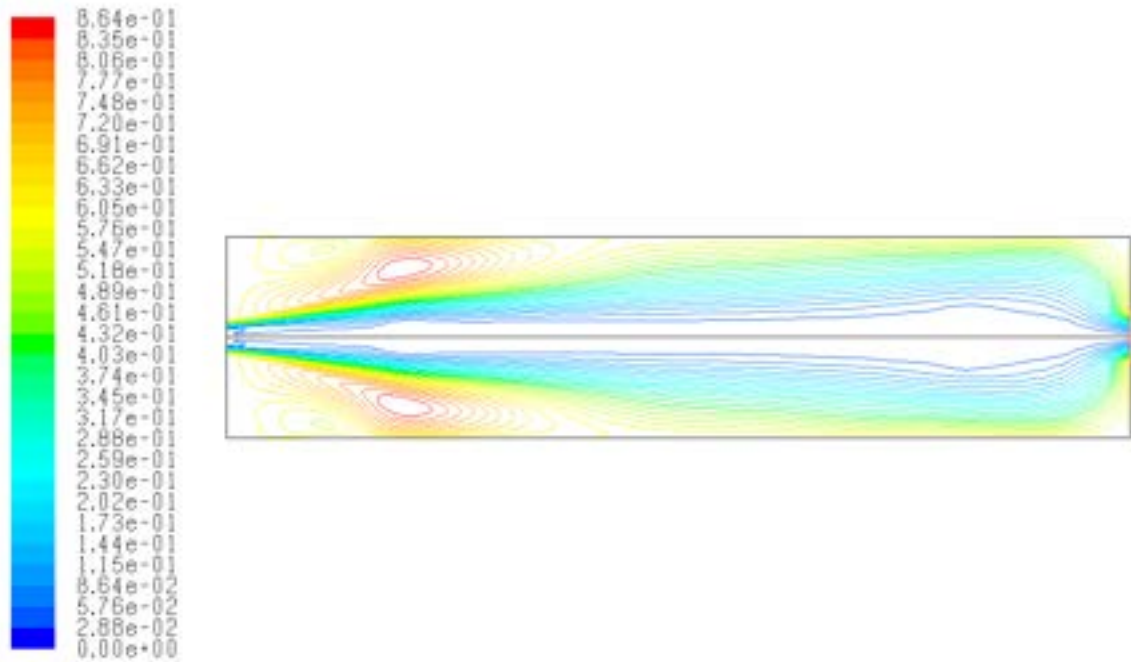


Figure 1. Stream function (kg/s).

I due casi esaminati (contenuto d'acqua nello slurry del 10 e 25% in volume) sono molto simili per ciò che riguarda il campo fluidodinamico (fig. 1). Si nota la formazione di un grosso vortice toroidale nella prima parte della camera, causato dalla forte velocità di uscita del combustibile e dalla componente di swirl data al comburente. Anche i picchi di temperatura sono gli stessi, circa 1780K, ma la distribuzione di temperatura è abbastanza differente. Nel caso al 10% la zona ad alta temperatura è molto più vicina al bruciatore (fig. 2), mentre nel caso al 25% comincia solo dopo 1.2m ed è più concentrata (fig. 3). Ciò si giustifica considerando che nel primo caso il rilascio di volatili avviene immediatamente (fig. 4) mentre nel secondo è ritardato (fig. 5) dal maggior contenuto d'acqua, che deve evaporare completamente prima che ciò possa avvenire. La stessa situazione si verifica ovviamente per la combustione solida del carbone (fig. 8 ,9). Le figure 10-13 riportano la distribuzione della CO₂ e dell' O₂, nei due casi.

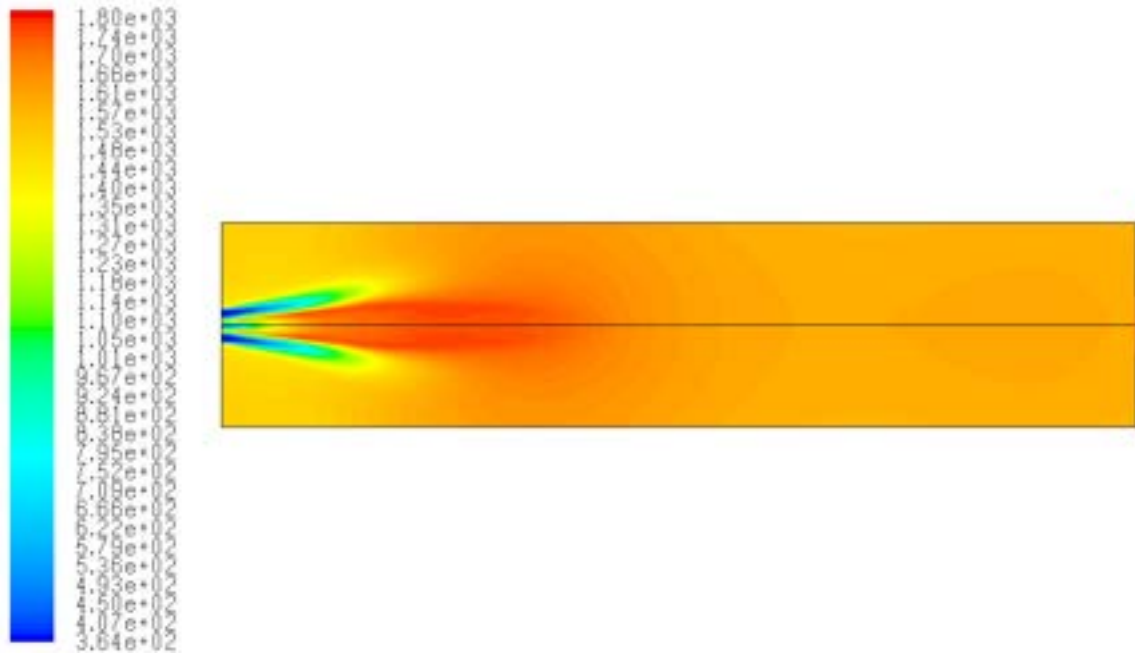


Figure 2. Temperature (K), slurry water content 10%.

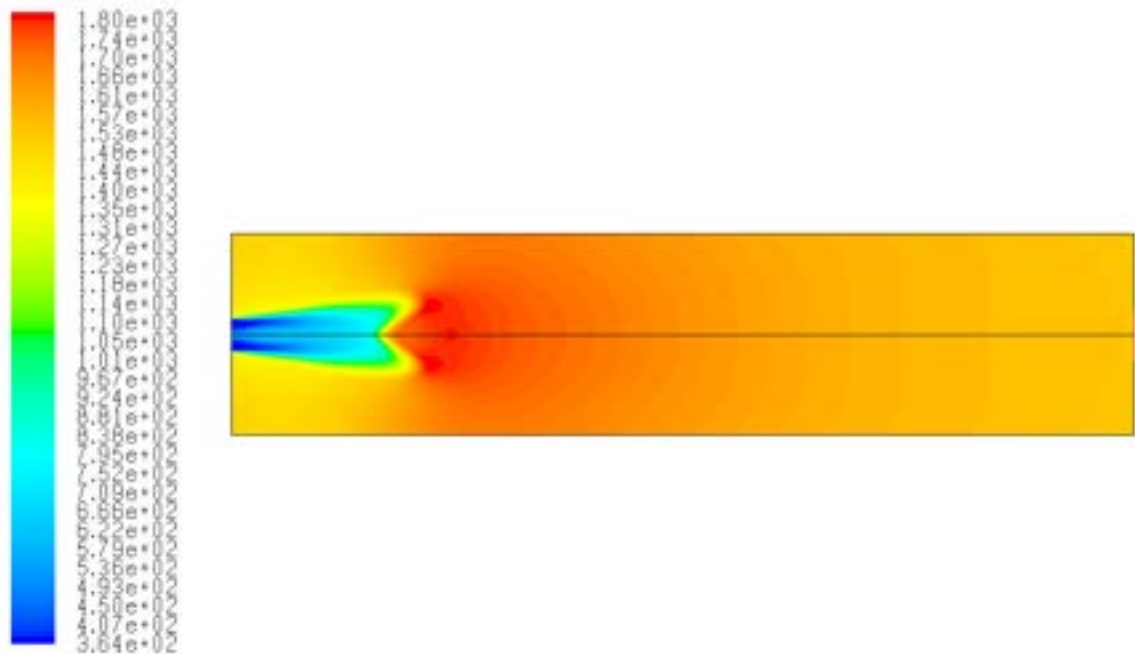


Figure 3. Temperature (K), slurry water content 25%.

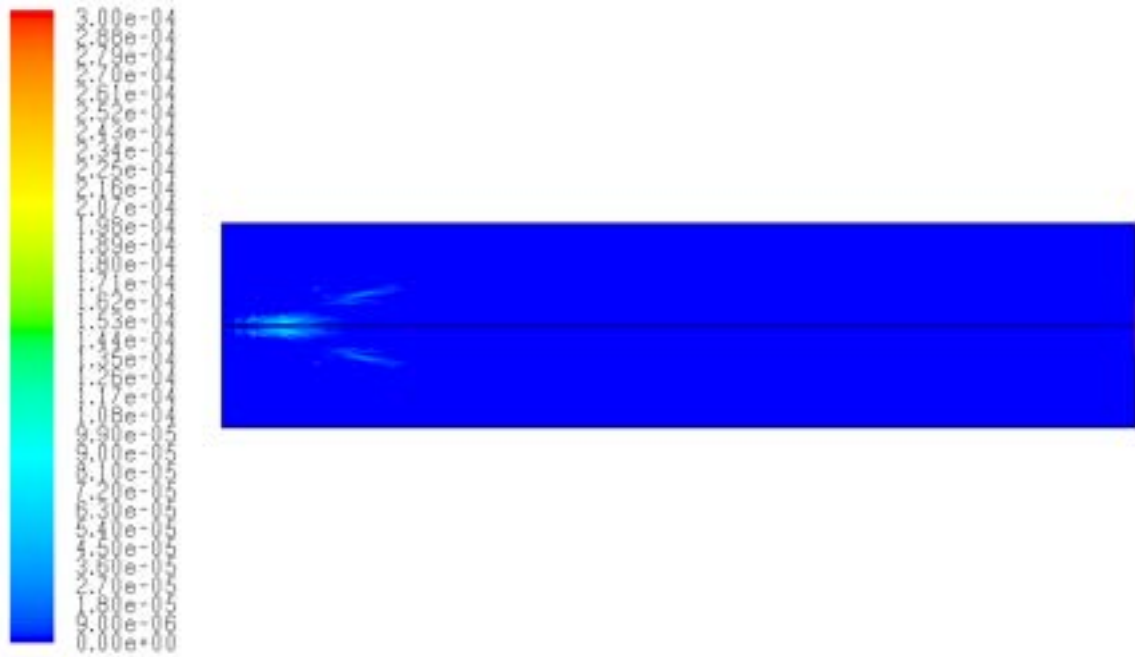


Figure 4. Volatiles emission rate (kg/s), slurry water content 10%.

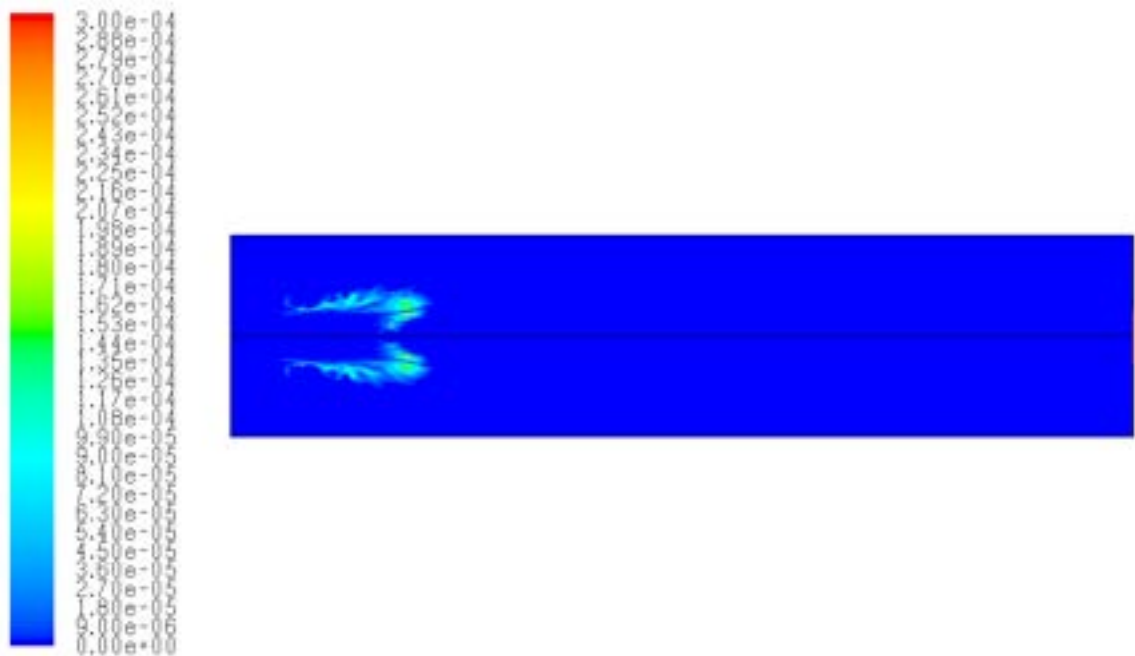


Figure 5. Volatiles emission rate (kg/s), slurry water content 25%.

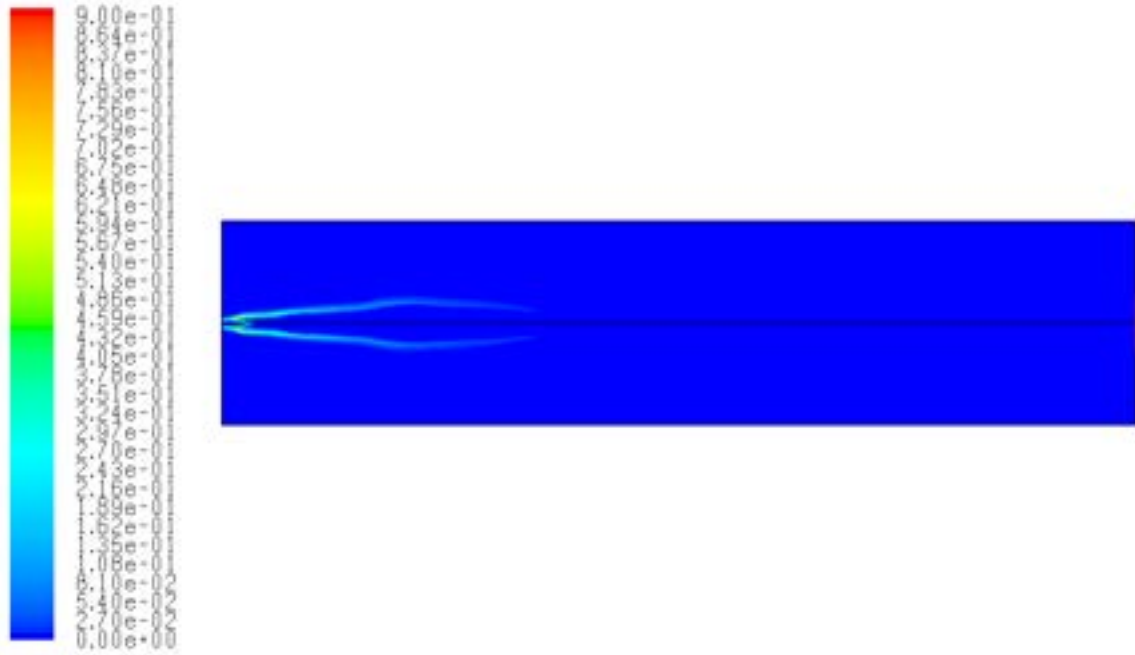


Figure 6. Volatiles reaction rate ($\text{kgmol/m}^3\text{s}$), slurry water content 10%.

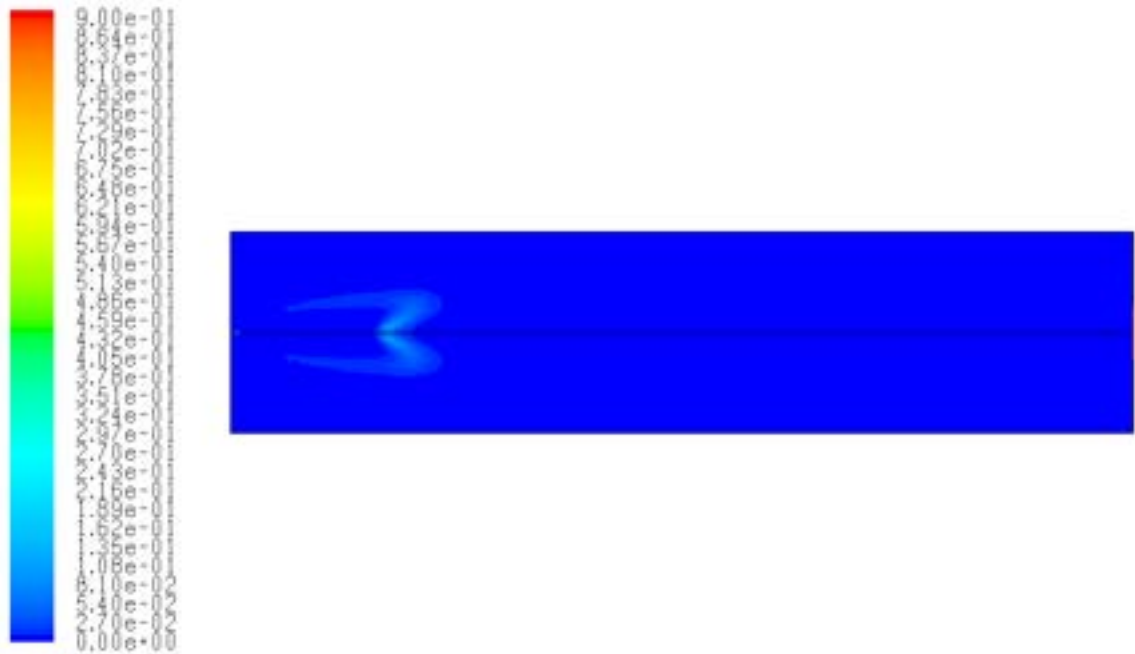


Figure 7. Volatiles reaction rate ($\text{kgmol/m}^3\text{s}$), slurry water content 25%.

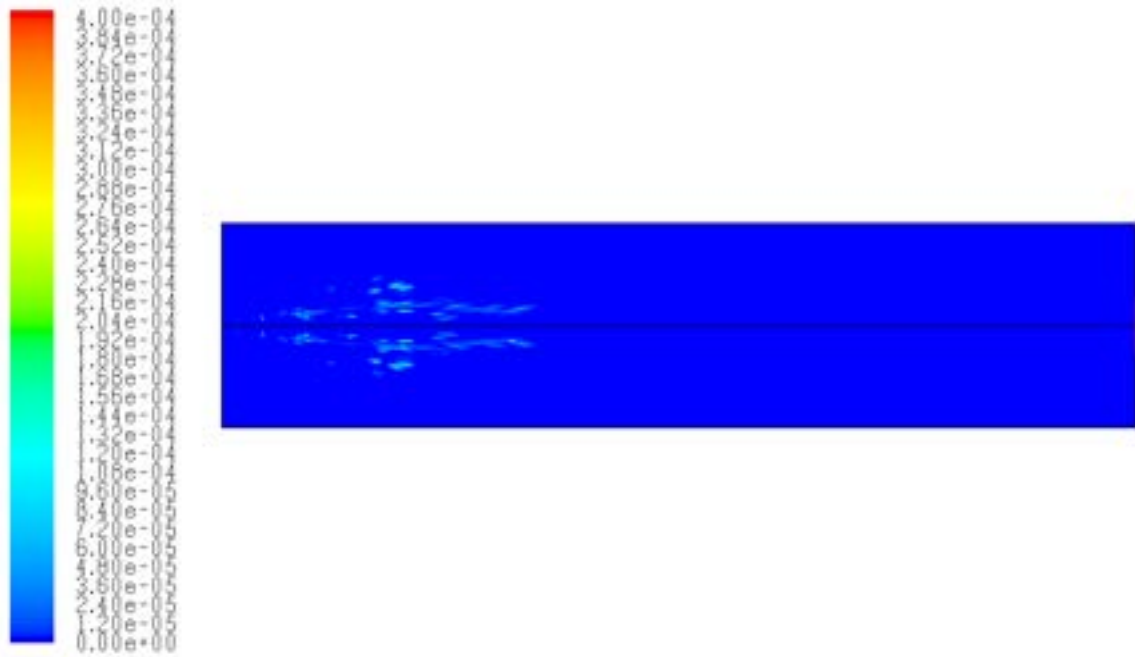


Figure 8. Char combustion rate (kg/s), slurry water content 10%.

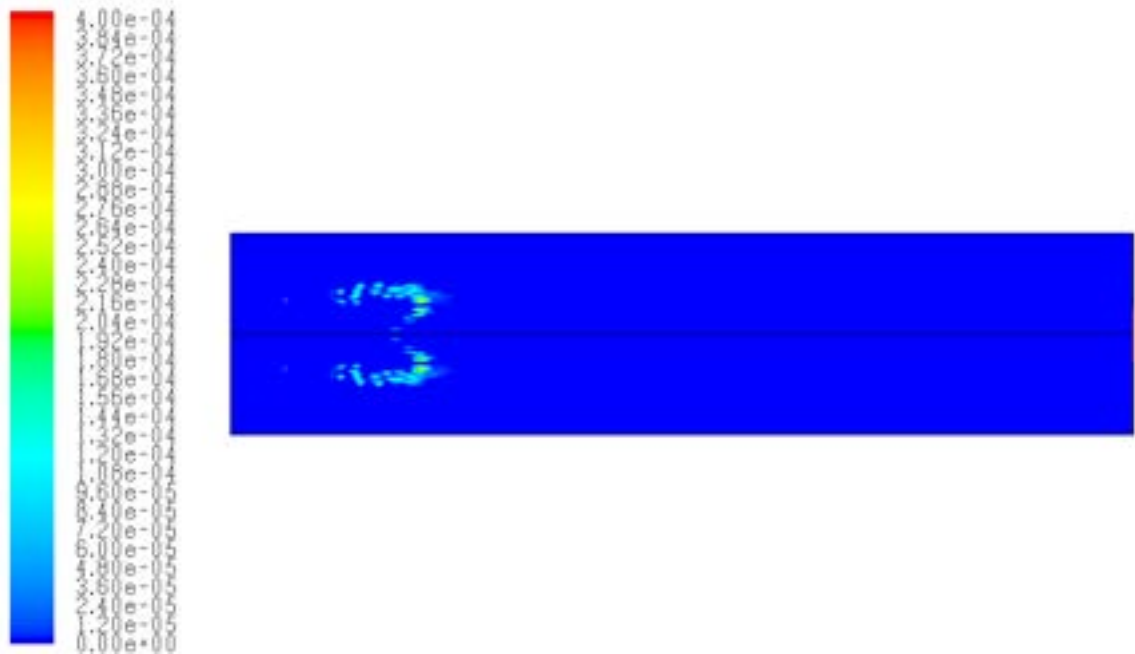


Figure 9. Char combustion rate (kg/s), slurry water content 25%.

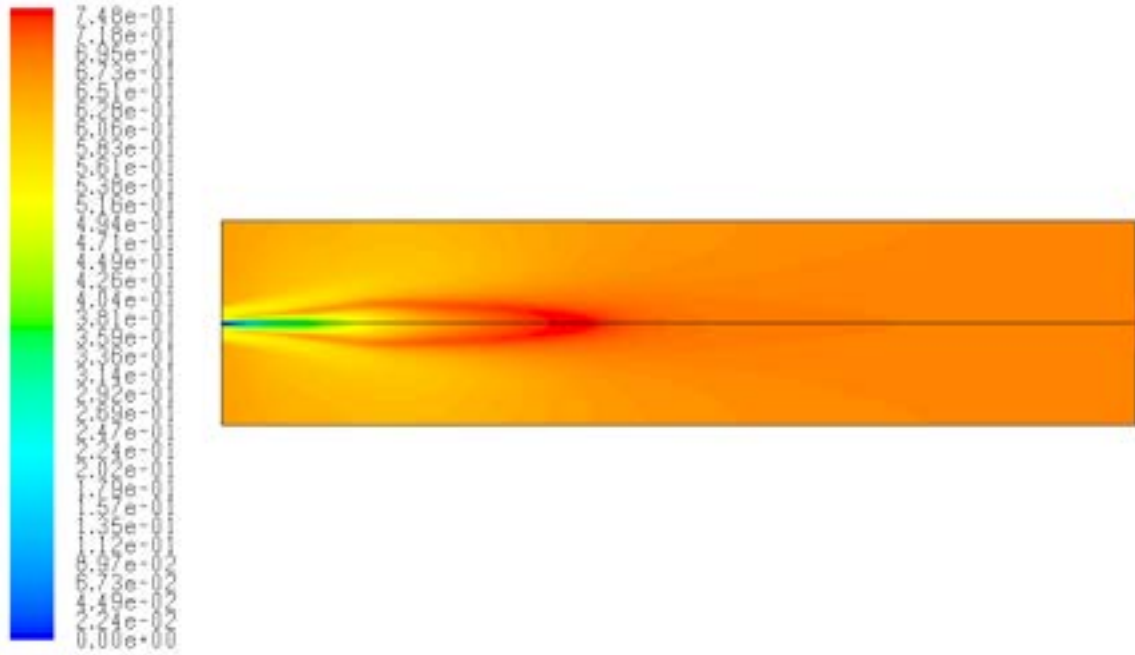


Figure 10. Mass fraction of CO₂, slurry water content 10%.

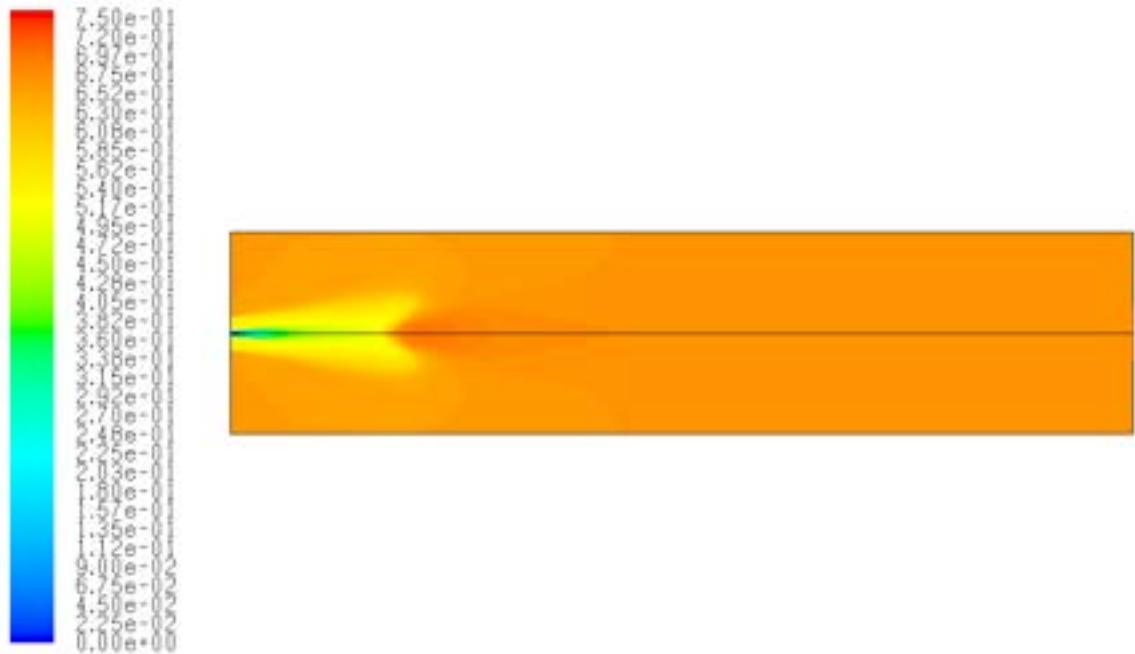


Figure 11. Mass fraction of CO₂, slurry water content 25%.

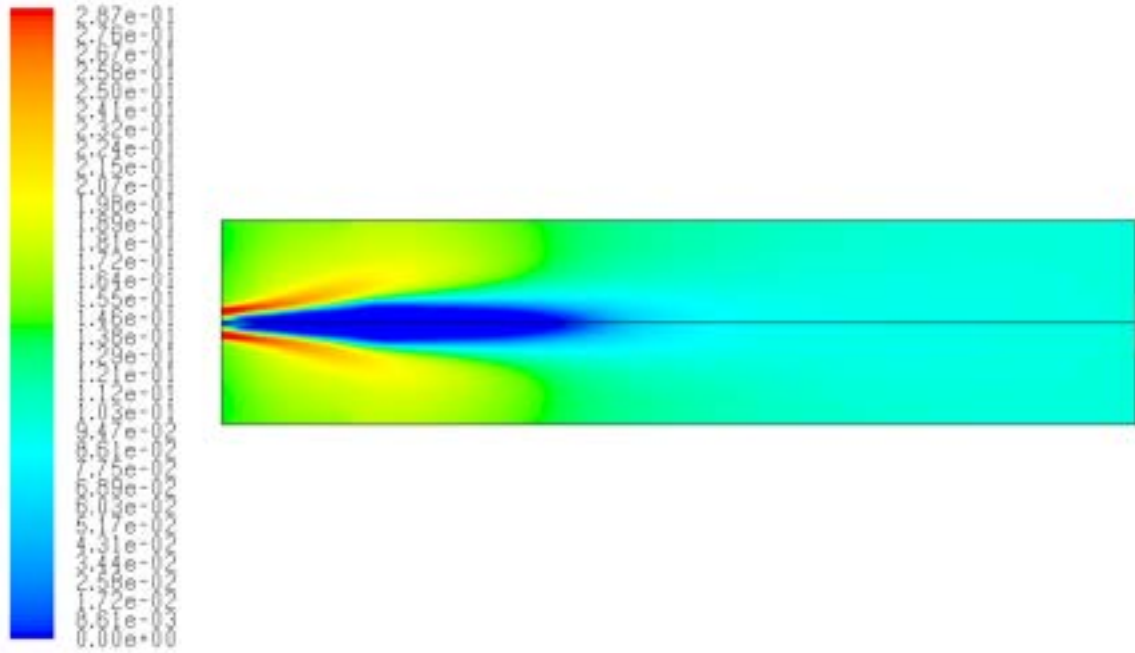


Figure 12. Mass fraction of O₂, slurry water content 10%.

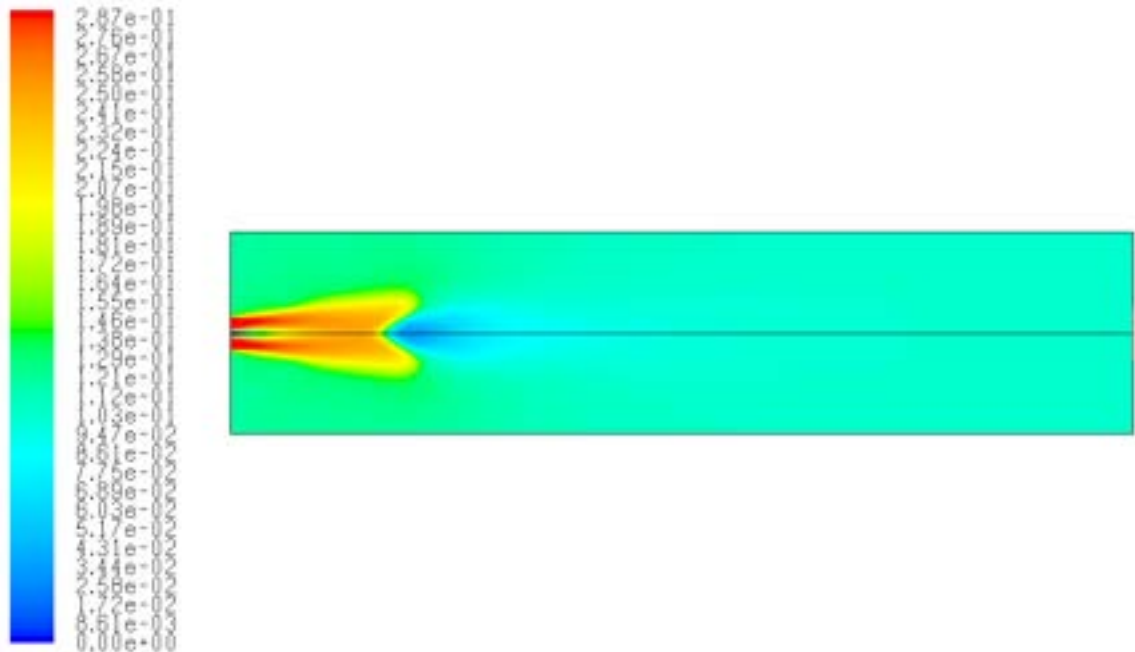


Figure 13. Mass fraction of O₂, slurry water content 25%.

Per il secondo gruppo di simulazioni effettuate (bidimensionali), le condizioni al contorno sono le seguenti:

Operating and boundary conditions

Recirculated gas flow rate: 2480 kg/h with 1100 kg/h O₂, at 511 K (partially swirled)

Coal flow rate: 509 kg/h dry, 25.04% volatile 54% char, granulometry with Rosin-Rammler distribution($d_{min}=1e-6m$ $d_{max}=3e-4m$ spread=1.36--6 sample diameters)

Water content: 28% by volume.

Propellant flow rate: water vapor 270 kg/h at 370 K

Operating pressure: 400 kPa

Wall: 9 W/mq K $T_f=343$ K

In totale in questo caso sono state eseguite quattro simulazioni, variando rispetto alle condizioni sopra riportate (caso 1), la granulometria (caso 2, mean $d=1e-4m$), la temperatura dei fumi ricircolati (caso 3, 773 K) e contemporaneamente sia la portata che la temperatura dei fumi ricircolati (caso 4, 5083 kg/h 773 K).

I primi tre casi studiati presentano un campo fluidodinamico simile tra loro, avendo le stesse portate in gioco e le temperature massime si attestano intorno a 1800 K (fig. 14 a,b,c). Per il primo caso la devolatilizzazione avviene tra 0.6 e 0.7 m (fig. 15a) dall'uscita e la combustione superficiale si completa a circa metà della camera (fig. 16a). Nel secondo caso, la granulometria più grossa delle particelle, è causa di una devolatilizzazione più estesa (fig. 15b) ed una combustione solida più lunga (fig. 16b). Nel terzo caso invece la maggiore temperatura di ricircolo dei fumi, determina una rapidissima devolatilizzazione e combustione in fase solida (fig. 15c, 16c).

L'ultimo caso si presenta completamente differente. La maggiore portata introdotta di fumi esausti comporta lo schiacciamento del vortice toroidale verso la sezione di ingresso (fig. 14b). In queste condizioni la concentrazione di ossigeno è scesa dal 32% al 18% in massa. Per questi motivi, nonostante il rapido rilascio di volatili (fig. 16d), la combustione è distribuita in una zona più ampia (fig. 15d, 17d, 18b), raggiungendo picchi di temperatura più bassi (1500 K), rassomigliando di più ad una flameless.

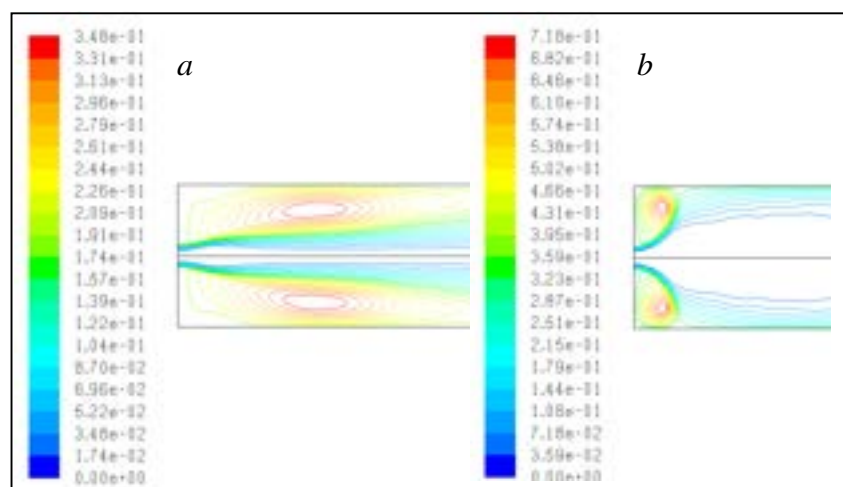


Figure 14. Stream function (kg/s). a) Case 1, Case 2, Case 3, b) Case 4.

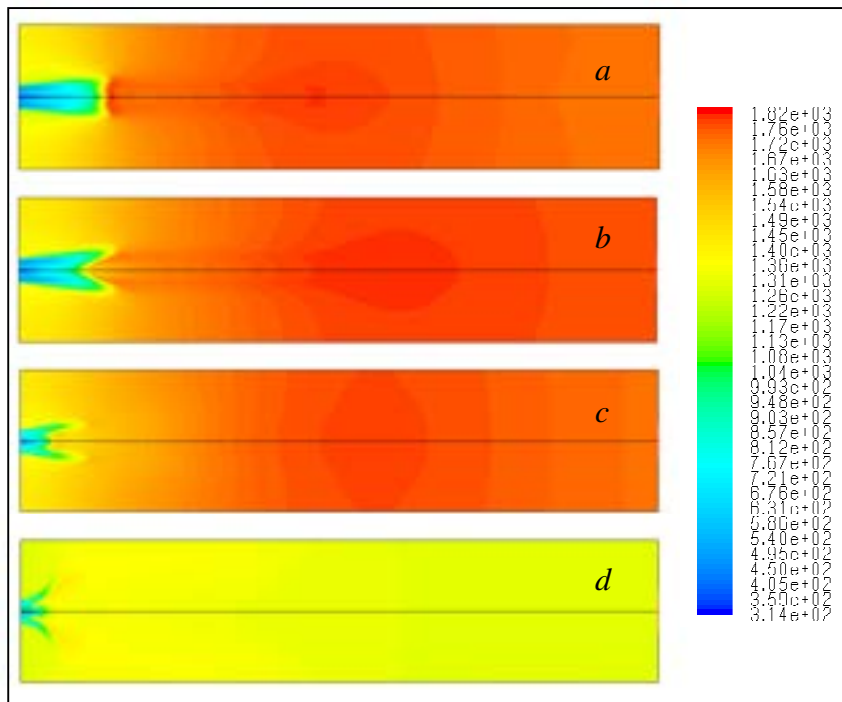


Figure 15. Temperature (K). a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3, d) Case 4.

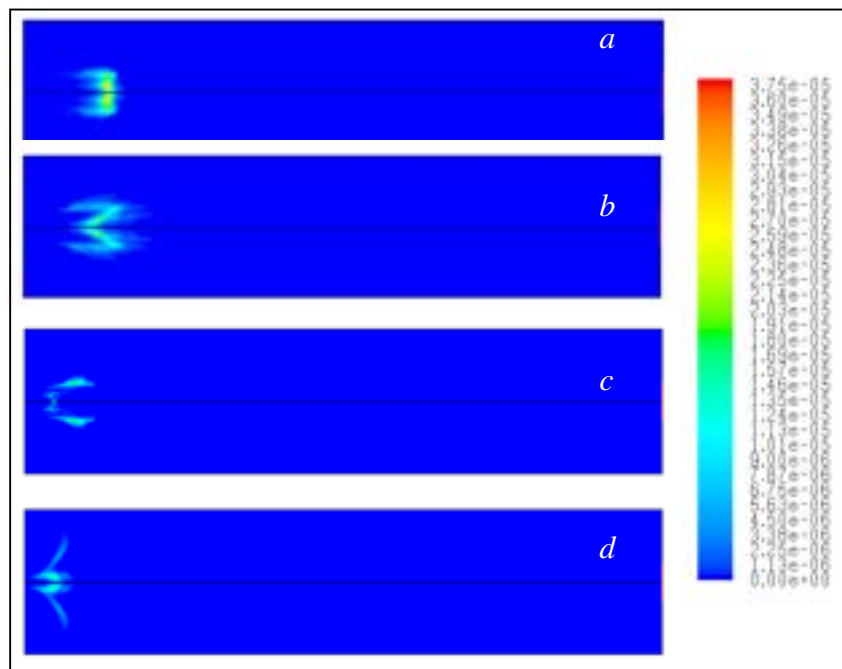


Figure 16. Volatiles emission rate (kg/s). a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3, d) Case 4.

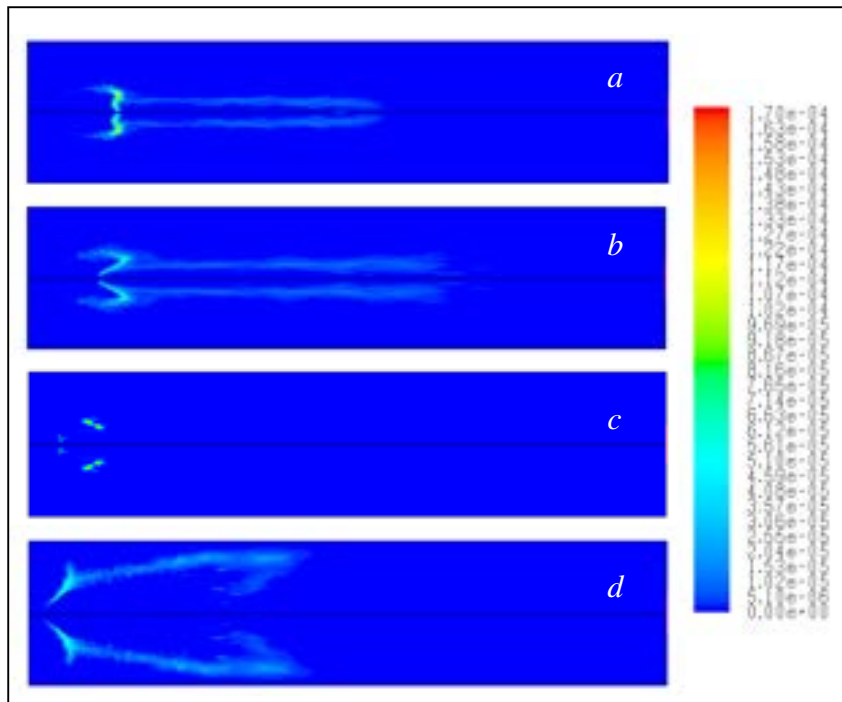


Figure 17. Char combustion rate (kg/s). a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3, d) Case 4.

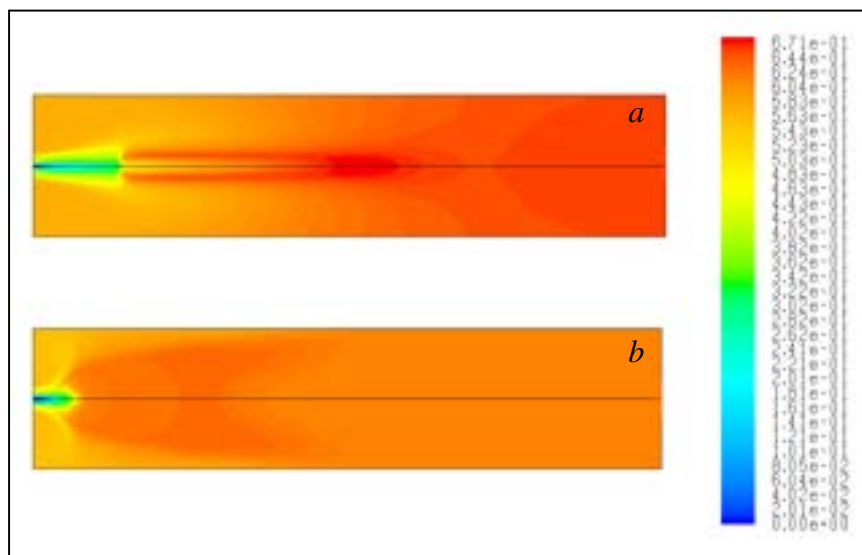


Figure 18. CO₂ mass fraction. a) Case 1, b) Case 4.

Per il terzo gruppo di simulazioni effettuate (bidimensionali), le condizioni al contorno sono in pratica uguali a quelle del gruppo precedente, eccetto per le condizioni a parete e per la granulometria del carbone, decisamente più grossa di quella adottata fino ad ora:

Operating and boundary conditions

Recirculated gas flow rate: 2480 kg/h with 1100 kg/h O₂, at 511 K (partially swirled)

Coal flow rate: 509 kg/h dry, 38.39% volatile 41.53% char, granulometry with Rosin-Rammler distribution.

Water content: 28% by volume.

Propellant flow rate: water vapor 270 kg/h at 370 K

Operating pressure: 400 kPa

Wall: 1673 K.

In questo gruppo si è utilizzato per la modellazione della combustione gassosa, lo schema a 150 reazioni e 33 specie. Volutamente si è comunque partiti da una granulometria più piccola di quella assegnata, pari a circa un terzo. Si vede dalle figure come in effetti in queste condizioni non si riesce ad ottenere il completamento della combustione del carbone (fig. 19-22). Questo fatto è confermato anche dall'andamento dei campi relativi alla devolatilizzazione e burnout del carbone (fig. 20-21), dai quali si osservano zone concentrate a diversa distanza dall'ingresso in cui volatilizzano le particelle di diversa dimensione: le particelle di dimensioni maggiori devolatilizzano nella parte finale della camera di combustione. Il completamento della reazione si verifica solo riducendo la granulometria a circa il 10% di quella assegnata (fig. 23-26).

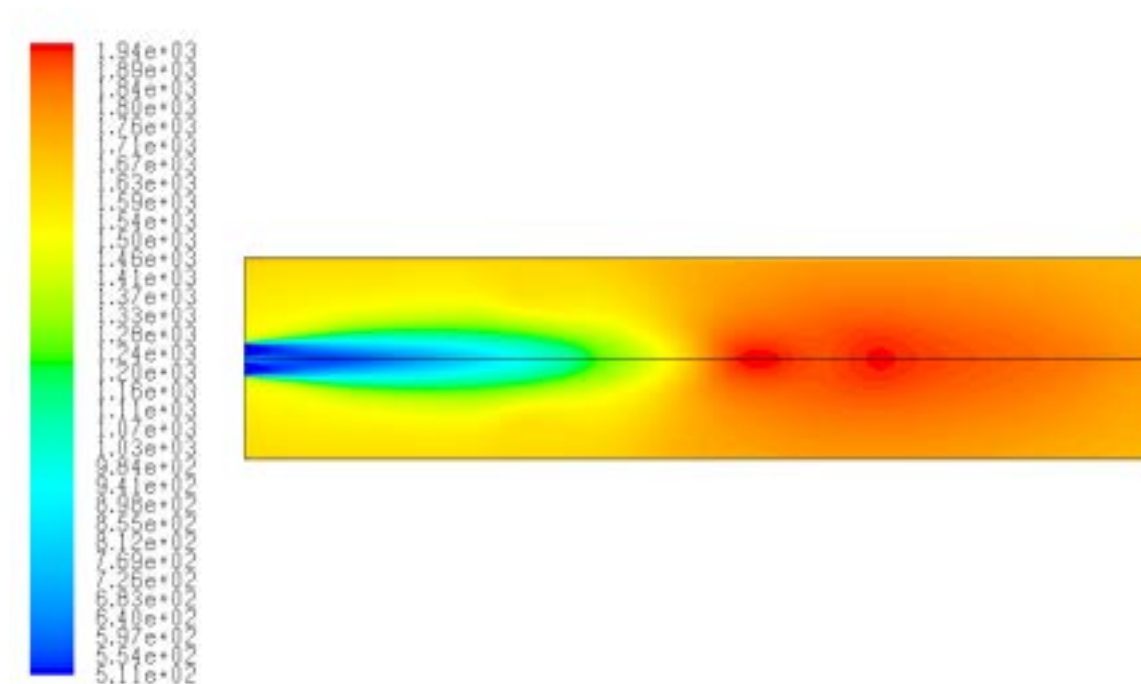


Figure 19. Temperature (K).

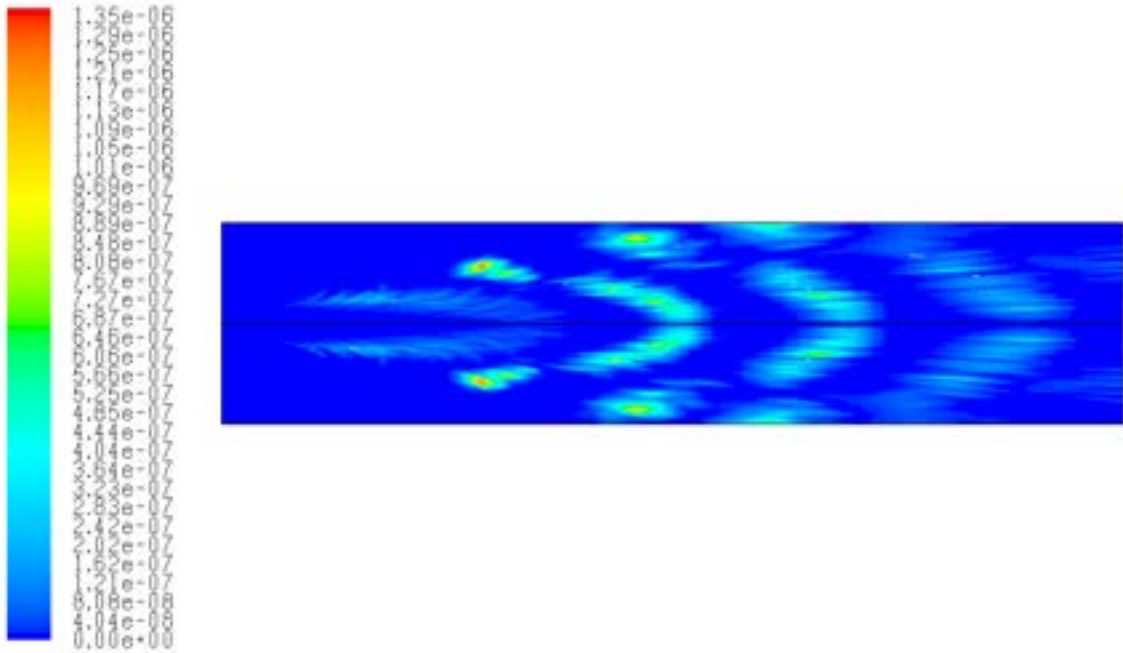


Figure 20. Volatiles emission rate (kg/s).

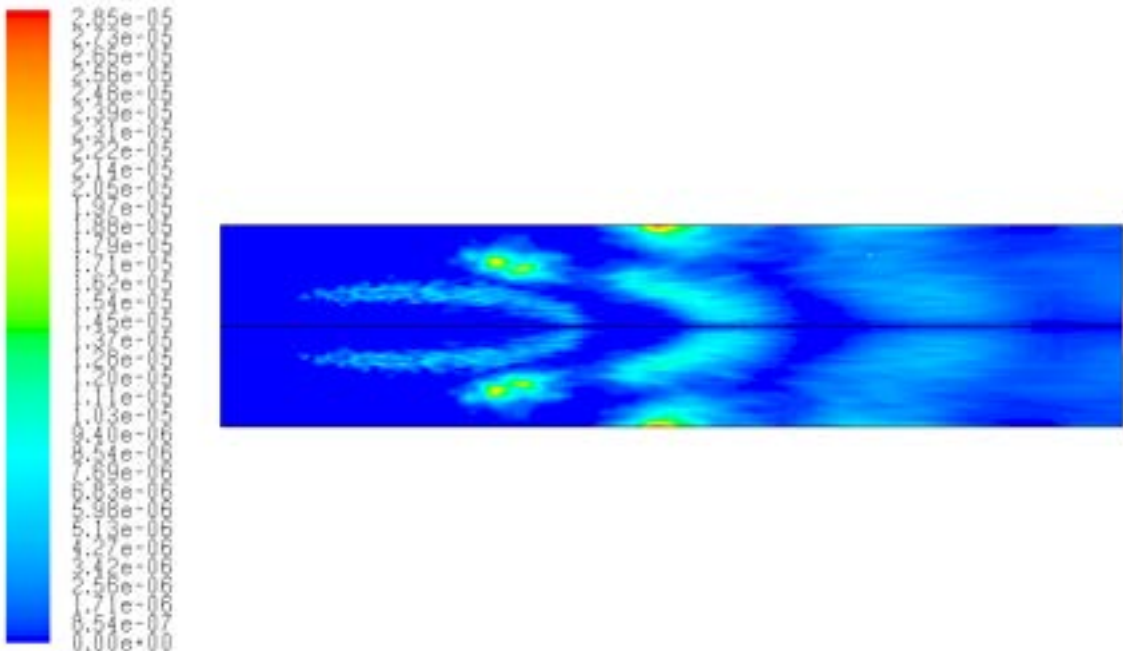


Figure 21. Char combustion rate (kg/s).

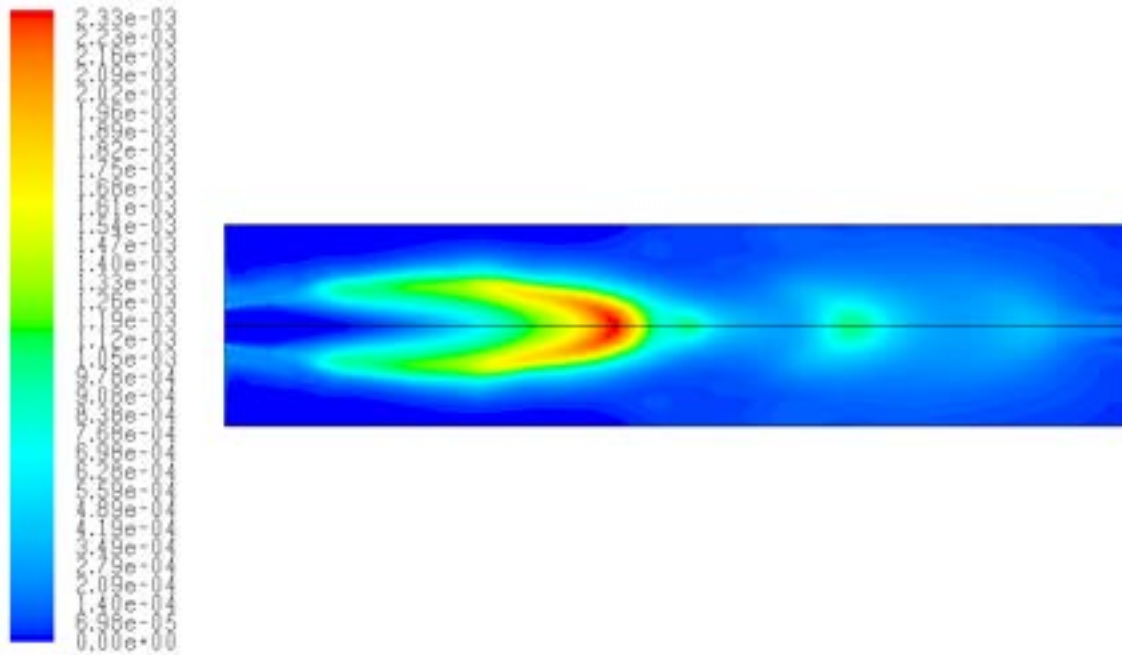


Figure 22. CO mass fraction.

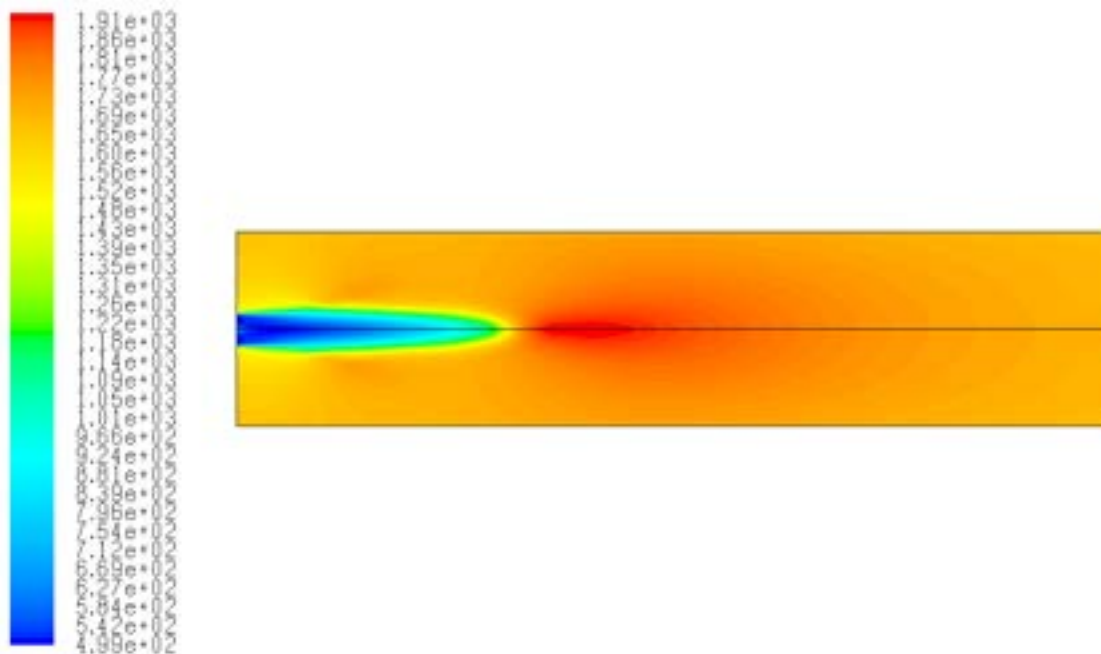


Figure 23. Temperature (K).

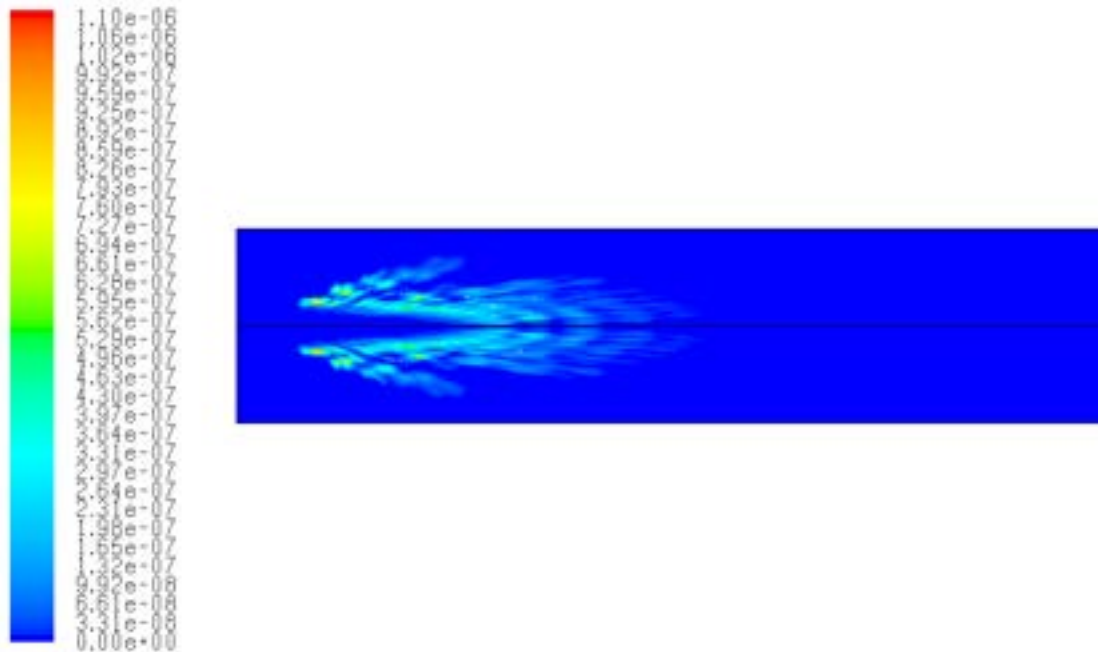


Figure 24. Volatiles emission rate (kg/s).

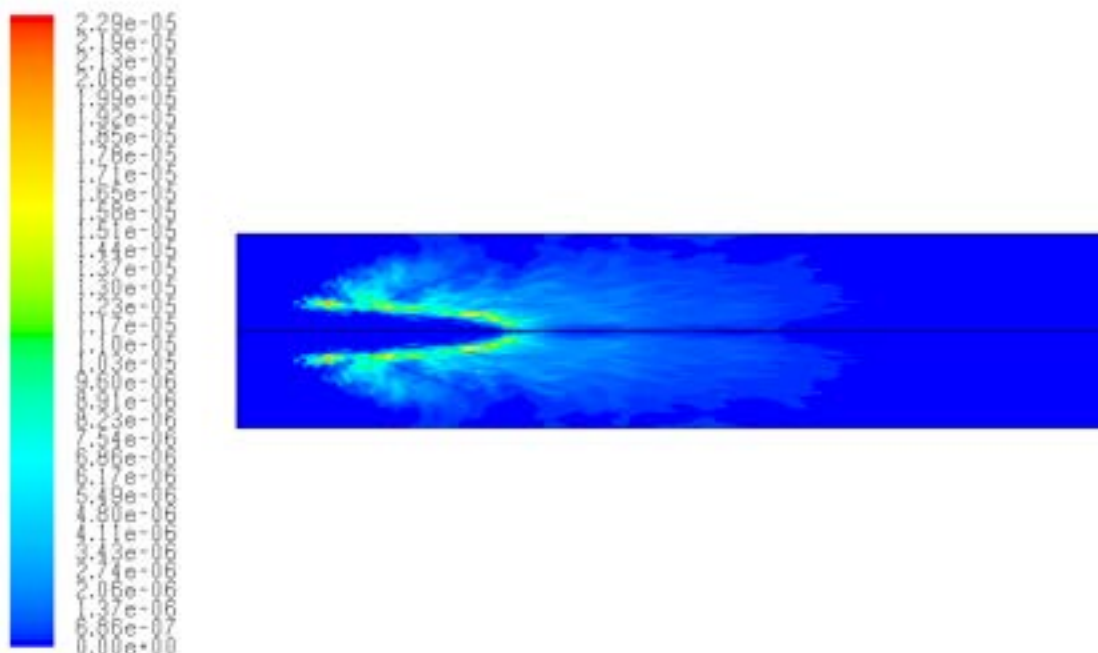


Figure 25. Char combustion rate (kg/s).

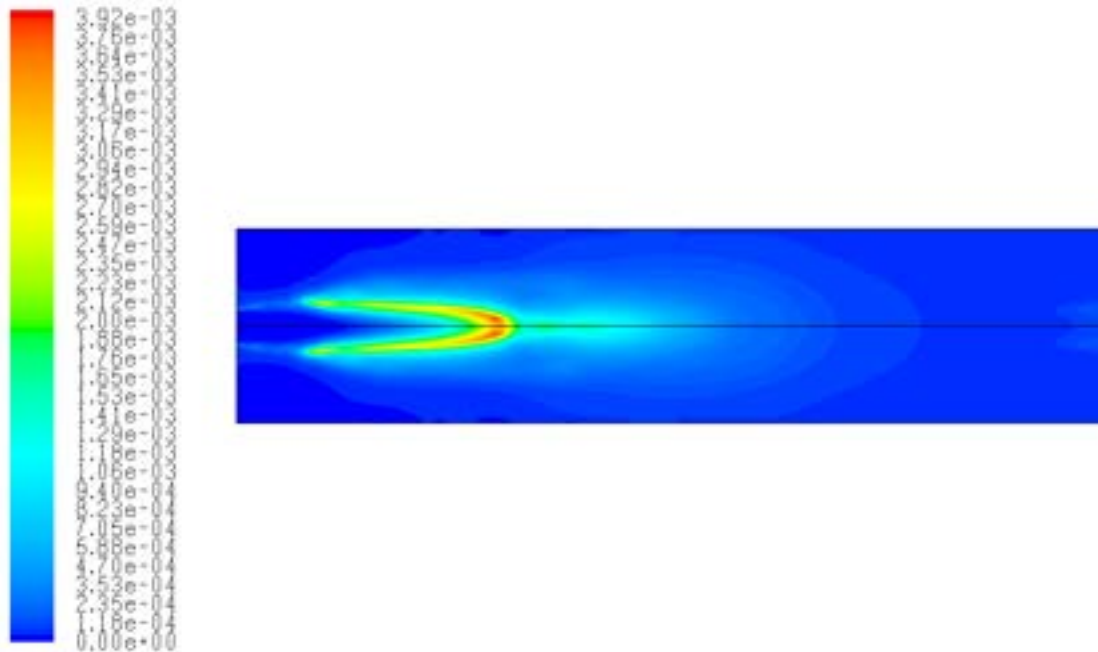


Figure 26. CO mass fraction.

In conclusione, dato il costo computazionale, si è eseguita una sola simulazione su griglia tridimensionale, con circa 500000 celle di calcolo, per le stesse condizioni precedenti, utilizzando sempre lo schema cinetico a 150 reazioni e 33 specie. I risultati sono comunque in linea con le simulazioni 2D. Le asimmetrie presenti nel campo sono da imputare agli effetti gravitazionali e al posizionamento del camino nella parte alta.

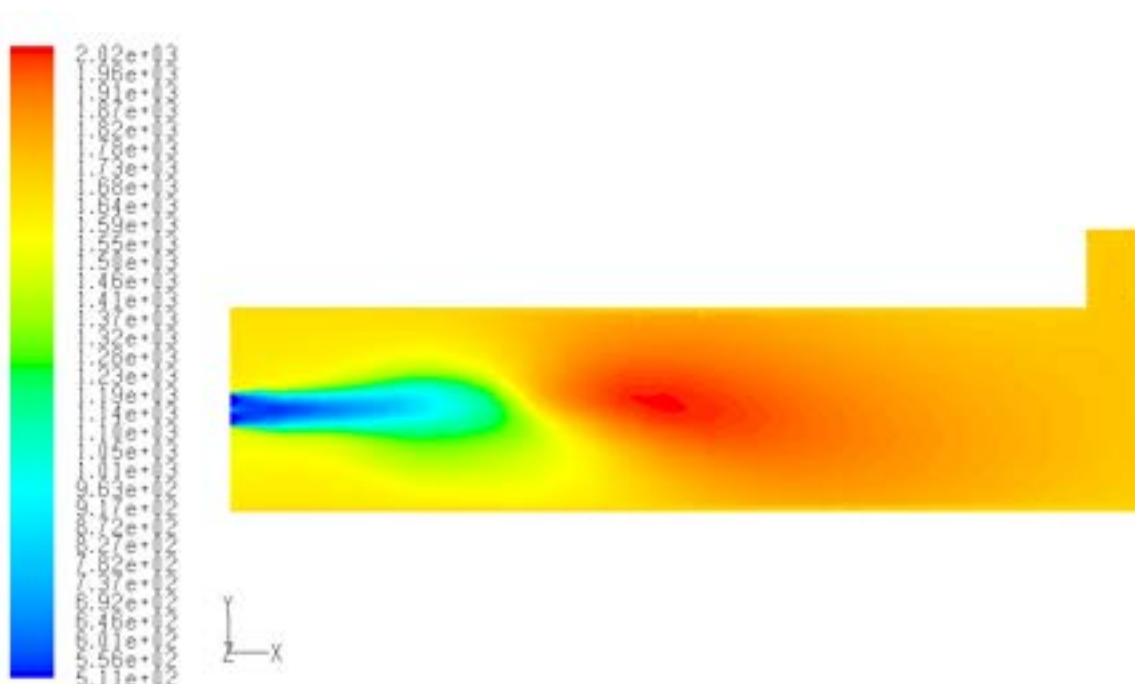


Figure 27. Temperature (K).

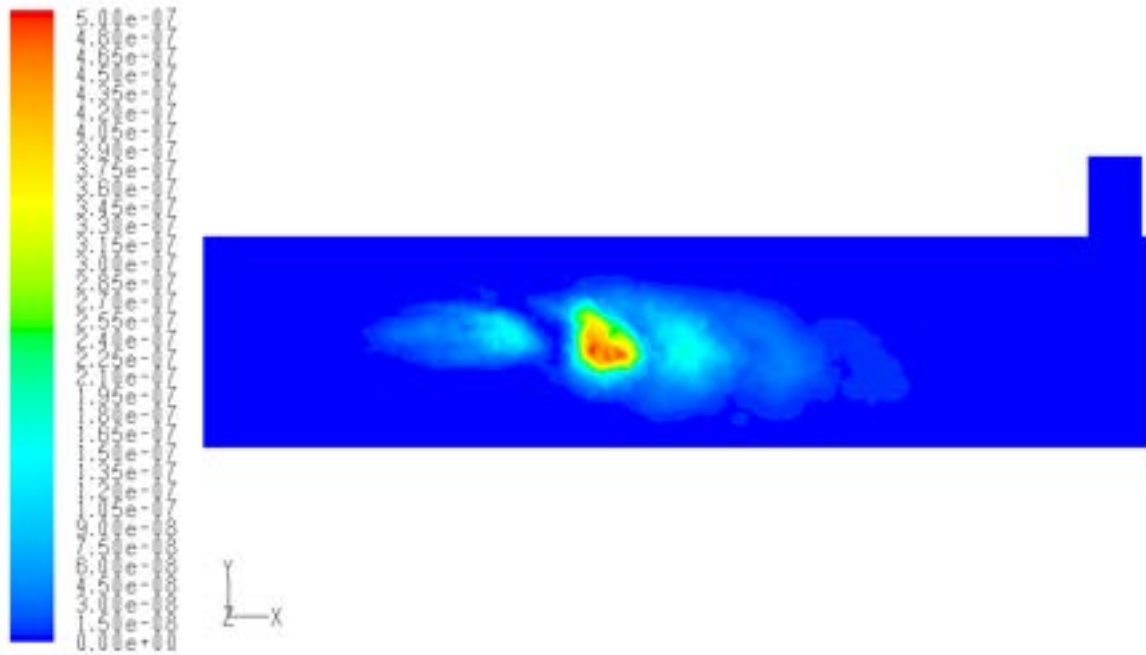


Figure 28. Volatiles emission rate (kg/s).

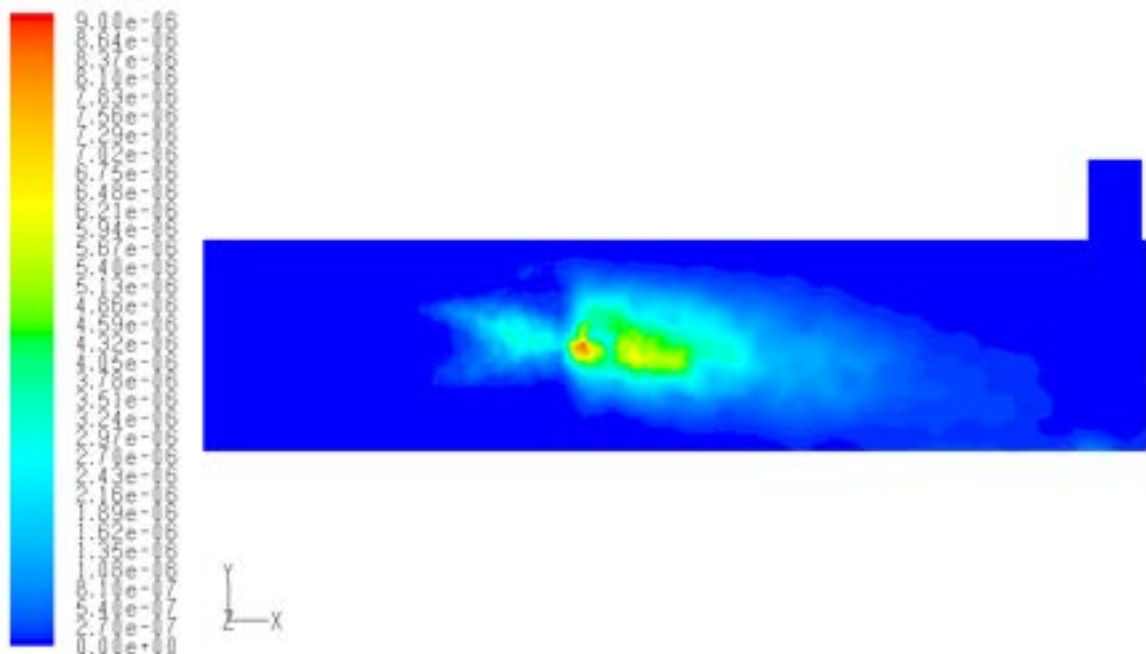


Figure 29. Char combustion rate (kg/s).

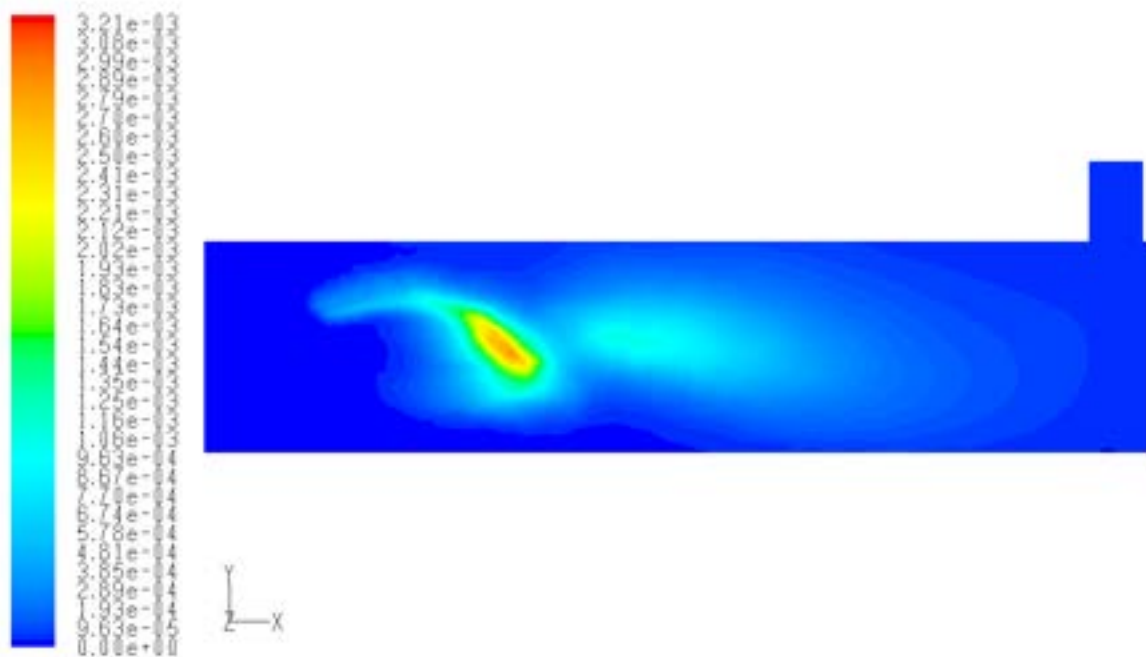


Figure 30. CO mass fraction.

Conclusioni e sviluppi futuri

Dai risultati presentati si osserva che per ottenere una mild combustion in senso stretto, andrebbero aumentate sia la portata che la temperatura dei gas ricircolati (fig. 15d). Infatti in queste condizioni si avrebbero delle concentrazioni di O₂ nel comburente e dei picchi di temperatura coerenti con i dati riportati in letteratura. In ogni caso sembra che un sufficiente contenuto di acqua nello slurry favorisca l'instaurarsi di una combustione di tipo distribuito. Nel prosieguo verrà affrontato il problema della scalatura del sistema, al fine di incrementarne la potenza .

Bibliografia

1. Badzioch S. and Hawksley P. G. W.: Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles. *Ind. Eng. Chem. Process Design and Development*, **9**:521-530, 1970.
2. Baum M. M. and Street P. J.: Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech.*, **3**(5):231-243, 1971.
3. Field M. A.: Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K. *Combustion and Flame*, **13**:237-252, 1969.
4. Launder B. E. and Spalding D. B.: *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.
5. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z. and Zhu J.: A New k- ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows—Model Development and Validation. *Computers Fluids*, **24**(3):227-238, 1995.

6. Magnussen B. F. and Hjertager B. H.: On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In *16th Symp. (Int'l.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1976.
7. Cheng P.: Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method, *AIAA Journal*, **2**:1662-1664, 1964.
8. Siegel R. and Howell J. R.: *Thermal Radiation Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC, 1992.
9. Coppalle A. and Vervisch P.: The Total Emissivities of High-Temperature Flames. *Combust. Flame*, 49:101-108, 1983.
10. Smith T. F., Shen Z. F. and Friedman J. N.: Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model. *J. Heat Transfer*, **104**:602-608, 1982.