

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in

INGEGNERIA CHIMICA



**Convalida di un modello CFD per
l'analisi delle conseguenze di incendi in
ambienti confinati**

Autori:

Giovanni Costingo

Matricola: 783037

Lucio Zampollo

Matricola: 784130

Relatori:

Prof. Ing. Marco Derudi

Prof. Ing. Alessandro Parente

Anno accademico 2012-2013

A mio padre

Giovanni

“CFD is not Colors For Directors”

Professor Anthony G. Dixon

Il più grande ringraziamento va ai nostri Relatori il Prof. Ing. Marco Derudi e il Prof. Ing. Alessandro Parente, per il tempo che ci hanno dedicato, l'indispensabile guida fornita e la costante disponibilità.

Un ringraziamento speciale al Prof. Ing. Alberto Cuoci per l'aiuto che ci ha fornito nelle fasi di maggiore disperazione con OpenFOAM e a Tarek Beji e Georgios Maragkos, dell'Università di Gent (UGent), per i mille consigli utili che ci hanno dato.

Un grosso ringraziamento ai "ragazzi" dell'Università Libera di Bruxelles (ULB) che non solo ci hanno spesso aiutato a risolvere problemi ai nostri occhi insormontabili, ma ci hanno anche accolto nel migliore dei modi creando un ambiente di lavoro piacevole, stimolante e divertente.

Infine un ringraziamento a tutte le persone che hanno accompagnato la nostra permanenza a Bruxelles, in particolare la nostra vicina Roberta, il compagno di arrampicate Alessandro e i cari amici Caterina, Alex e Dinka.

Giovanni e Lucio

I più importanti ringraziamenti vanno a mia madre, mio fratello Luca e Elena. Senza il vostro aiuto e la vostra pazienza tutto questo non sarebbe stato possibile. L'esperienza che ho vissuto a Bruxelles è stata per me una grande occasione di crescita, anche personale, per cui vi ringrazio sinceramente. Inoltre un grazie per la vostra capacità di sopportarmi, so bene di non essere un tipo facile soprattutto nei periodi di lavoro intenso. Infine un ringraziamento speciale a Lucio. Senza di te l'esperienza passata a Bruxelles non sarebbe stata la stessa cosa. Grazie per aver condiviso con me le difficoltà e le gioie di questi mesi di convivenza e di lavoro. Ma soprattutto grazie per la tua preziosa amicizia.

Giovanni

I più grandi ringraziamenti vanno alla mia famiglia, che con grande pazienza mi ha supportato e dato l'opportunità di affrontare questa esperienza. Ringrazio i miei compagni di viaggio e di suonata Camillo Kraus, Flavio Ferrara, Riccardo Malaspina, Marco Mascolo, Maria Lombardi, Ruggero Meils, Paola Dagrada, Giulia Sergi e tutti gli altri che sono sempre stati presenti, riempiendomi le giornate di felicità ed accogliendomi a braccia aperte al mio ritorno dal Belgio. Ringrazio anche i miei compagni d'università che mi hanno seguito in questo percorso senza i quali non sarei arrivato alla fine, in particolare Gioavvni Costingo, per avermi sopportato sei mesi in Belgio; Giuseppe Pugliese e Gabriele Manenti, che hanno affrontato con me, passo dopo passo, tutti questi anni.

Lucio

Convalida di un modello CFD per l'analisi delle conseguenze di incendi in ambienti confinati

Giovanni Costingo, Lucio Zampollo

Abstract

La modellazione CFD^I è uno strumento ormai consolidato nella valutazione delle conseguenze di eventi incidentali e nella progettazione dei relativi sistemi di sicurezza. La sua crescente importanza ha determinato un rapido sviluppo dei software e degli algoritmi numerici utilizzati, sempre più robusti ed efficienti in accordo all'aumento della potenza di calcolo disponibile. In tale contesto si inserisce il seguente lavoro che si pone come obiettivo la valutazione delle potenzialità di alcuni software open source rilasciati recentemente: Blender^{II} utilizzato nelle fasi di pre e postprocessing e OpenFOAM^{III}, solver FireFOAM, per la risoluzione del modello creato. Sono stati studiati alcuni casi sperimentali riguardanti propagazione di incendi, nello specifico pool fire, in ambienti confinati caratterizzati da diversi layout e diverse condizioni di ventilazione (HVAC^{IV}). Lo studio si è concentrato in particolare sull'analisi della capacità di FireFOAM di valutare le distribuzioni di temperatura e la propagazione di fumo in ambiente, per gli scenari incidentali considerati. È stato utilizzato anche un secondo software di modellazione CFD, la cui affidabilità è ormai assodata, FDS-SMV^V. Riproducendo gli stessi casi studio con entrambi i software si è ottenuta un'ulteriore convalida dei risultati ottenuti con OpenFOAM oltre al semplice confronto con i dati sperimentali disponibili. Si sono quindi valutate le diverse caratteristiche dei due software di modellazione, evidenziandone peculiarità e potenzialità. Sia FDS che OpenFOAM hanno fornito risultati in buon accordo con i dati sperimentali dimostrando di essere in grado di simulare correttamente i fenomeni analizzati.

^IComputational Fluid Dynamics - Fluidodinamica computazionale

^{II}Versioni 2.63 e 2.68

^{III}Open Field Operation and Manipulation, versione 2.2.2, rilascio 14 Ottobre 2013

^{IV}Heating, Ventilation, and Air Conditioning

^VFire Dynamic Simulator – SmokeView, versione 5

0.1 Introduzione

La fluidodinamica computazionale è uno strumento ormai largamente impiegato per lo studio dei fenomeni di trasporto (materia, calore e quantità di moto), che avvengono nei sistemi fisici in presenza o meno di reazioni chimiche. La modellazione CFD possiede alcune importanti caratteristiche di convenienza che hanno determinato un sempre maggior interesse nei suoi confronti con conseguente sviluppo del settore. Essa permette di studiare sistemi anche molto complessi non riproducibili sperimentalmente. È possibile simulare senza pericolo sistemi a elevato rischio, come incendi, consentendo altresì una significativa riduzione dei tempi e dei costi associati all'attività accademica e industriale. In particolare si pone come strumento efficiente per ottenere dati accurati in alternativa alle più costose riproduzioni sperimentali. Fattore negativo da considerare nell'aspetto di convenienza economica vi è il costo delle licenze dei software CFD, spesso rilevante. La situazione economicamente ideale è rappresentata dai software open source, cioè di pubblico accesso in modo completamente gratuito, oggetto di analisi del presente lavoro. Bisogna infine considerare il rapido incremento della potenza di calcolo disponibile che permette di abbattere i tempi di

calcolo necessari e di modellare sistemi sempre più complessi, rendendo estremamente interessanti anche le prospettive future della modellazione CFD. Tra i suoi vari settori di impiego acquisisce sempre maggior rilevanza la valutazione delle conseguenze di eventi incidentali, finalizzata alla progettazione di sistemi di sicurezza adeguati. Di particolare interesse è la modellazione di pool fire in ambienti confinati. Tali casi presentano infatti un'elevata criticità dovuta al rapido aumento delle temperature raggiunte in ambiente e ad un'altresì rapida generazione di fumo con conseguente diminuzione della visibilità e dei livelli di ossigeno in ambiente. Ne conseguono alti rischi di perdite di vite umane e di avere rilevanti danni alle infrastrutture, con relativi effetti negativi dal punto di vista economico. Negli ultimi quindici anni sono stati vari gli eventi catastrofici riguardanti incendi in ambienti confinati che hanno evidenziato la necessità di miglioramenti dei sistemi di sicurezza previsti e quindi un più approfondito studio del fenomeno. Tra questi si ricordano il disastro del tunnel del Monte Bianco (Francia -1999), dove l'incendio di un autocarro si propagò in modo incontrollato coinvolgendo 34 veicoli e causando 39 vittime; l'incendio del treno ascendente nel tunnel di Kaprun (Austria - 2000) che

causò 155 vittime; l'incidente del tunnel del Gottardo (Svizzera – 2001) in cui, a seguito di uno scontro frontale tra due autocarri, si innescò un incendio che coinvolse 23 veicoli provocando 11 vittime. Si nota come eventi incidentali di questo tipo siano particolarmente critici all'interno di tunnel automobilistici dove le caratteristiche ambientali di layout e congestione, dovuta ai veicoli, rendono difficoltoso l'intervento delle squadre per le emergenze. Dal punto di vista della sicurezza i parametri di maggior interesse nel caso di incendi in ambiente confinato, quindi analizzati in fase di modellazione, sono i profili di temperatura e distribuzione del fumo. In particolare si nota come la maggior parte delle vittime in tali scenari incidentali non siano dovute al rischio termico associato all'esposizione diretta alle fiamme, bensì siano causate dall'intossicazione per inalazione dei gas caldi di combustione. La distribuzione del fumo in ambiente deve quindi essere studiata in modo da poter prevedere dei sistemi di ventilazione adeguati, atti a garantire che le vie di fuga siano percorribili e sgombrare da fumo. Esistono vari tipi di sistemi di ventilazione, che si differenziano tra loro per il diverso principio di funzionamento. Tra questi, sono ampiamente utilizzati i sistemi che impongono un flusso d'aria longitudina-

le di velocità tale da garantire che il fumo venga spinto completamente a valle dell'incendio, mentre nella zona a monte vengono garantite condizioni di sicurezza. Di fondamentale importanza è quindi la valutazione del valore di velocità longitudinale che garantisca tali condizioni, detto velocità critica, u_{cr} . Nel presente lavoro tra i vari software CFD disponibili si è scelto di utilizzare OpenFOAM. Tale scelta è stata dettata dal fatto che si tratta di un software open source quindi economicamente molto interessante, che presenta ottime potenzialità nello studio di casi anche molto diversi tra loro. Si è voluto valutare le potenzialità del solver FireFOAM nello studio degli scenari incidentali prima descritti per cui non erano ancora disponibili lavori approfonditi e esaurienti. È stato utilizzato anche FDS, un secondo software CFD open source per il quale sono invece già disponibili studi riguardanti pool fire in ambienti confinati. Esso rappresenta uno dei principali software di modellazione CFD impiegati in ambito industriale e accademico, grazie a caratteristiche di accuratezza e affidabilità a cui corrispondono relativamente bassi costi in termini di risorse e tempi di calcolo. I risultati ricavati da FireFOAM sono stati dunque confrontati sia con i dati sperimentali disponibili, sia con i risultati delle si-

mulazioni svolte con FDS per avere un'ulteriore convalida. Ai software CFD si è affiancato l'uso di un software di creazione grafica 3D, anch'esso open source, Blender. Esso è stato utilizzato in fase di preprocessing per la creazione delle geometrie dei casi studio, successivamente importate nei diversi solver CFD tramite opportuni pacchetti applicativi integrati. Nella fase di postprocessing è stato invece usato insieme ai due software di visualizzazione presenti di default nei pacchetti OpenFOAM e FDS, rispettivamente ParaView e SMV. Sono stati studiati due diversi casi studio: il primo riguardante incendi in ambienti confinati riprodotto sperimentalmente da Steckler, et al. [1]; il secondo relativo a pool fire in tunnel congestionati, con presenza di ostacoli, e alla valutazione della velocità critica di ventilazione, con riferimento ai lavori svolti da Lee e Tsai [2] e da Tavelli, et al. [3].

0.2 Materiali e metodi

0.2.1 Strumenti di modellazione

Tutte le simulazioni CFD sono state effettuate utilizzando il software OpenFOAM. Si tratta di un toolbox C++, senza interfaccia grafica e completamente open source. Sfrutta un

metodo di approccio ai volumi finiti per la risoluzione di sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali su griglie 3D poliedriche altamente non strutturate. Tra le caratteristiche più interessanti di OpenFOAM vi è la possibilità da parte dell'utente di implementare nuovi solver o pacchetti aggiuntivi rendendo così il software estremamente versatile e adattabile alle più svariate situazioni applicative. In particolare si è scelto di lavorare con FireFOAM uno dei solver presenti di default in OpenFOAM, questo perché la conoscenza approfondita di un solver standard rappresenta un ottimo punto di partenza per una comprensione più dettagliata di OpenFOAM. Inoltre ciò lo rende usufruibile da una più ampia utenza che non necessariamente possiede l'elevato livello di conoscenze specialistiche necessarie per la scrittura ex novo di solver. In modo molto generico FireFOAM è definito come un "Risolutore transitorio per incendi e fiamme diffusive turbolente". Presenta una serie di sottomodelli per descrivere i fenomeni di turbolenza, galleggiamento, pirolisi, irraggiamento e formazione di nubi reattive. Tali modelli possono essere attivati o meno a seconda del caso analizzato in modo da ottimizzare i tempi di calcolo. Nel solver è prevista la risoluzione delle equazioni di conservazione di mas-

sa, momento, entalpia totale e frazioni massive delle specie presenti. Le prime due costituiscono le equazioni di Navier-Stokes che vengono quindi risolte per ogni volume finito utilizzando un approccio LES^{VI} per la modellazione della turbolenza. Vengono dunque calcolati in maniera esplicita solo i vortici turbolenti di dimensioni maggiori fino a una dimensione detta di cut off, mentre quelli di dimensioni inferiori sono descritti con dei modelli di sottogriglia. Si richiede quindi un'operazione di filtraggio spaziale delle equazioni di conservazione originali. All'utilizzo di OpenFOAM è stato affiancato l'utilizzo di un secondo software CFD, FDS, anch'esso open source. Con esso si è modellato il caso studio "Steckler" mentre non è stato necessario modellare il secondo caso studio "tunnel", per cui si è fatto riferimento alle simulazioni già svolte con FDS nel lavoro di Tavelli, et al. [3]. Come OpenFOAM, FDS effettua simulazioni di tipo LES con un approccio a volumi finiti, esso però risolve non più le equazioni di Navier-Stokes rigorose bensì una loro forma semplificata. Essa è appropriata per flussi poco comprimibili a bassa velocità, con particolare enfasi sul trasporto di calore e diffusione dei fumi generati da un incendio. Ciò permette una più veloce

risoluzione rispetto al problema matematico rigoroso, trascurando però il contributo delle onde di pressione acustica e introducendo così un errore nella soluzione. A differenza di OpenFOAM, FDS non è in grado di lavorare con griglie non strutturate. Ciò determina una maggiore difficoltà nella fase di pre-processing in cui è necessario adattare la geometria del caso studio al passo della griglia di calcolo per poter modellare in modo corretto il sistema. FDS, a differenza di OpenFOAM, è infatti in grado di trattare condizioni al contorno di qualsiasi tipo descrivendo anche i flussi termici nei corpi solidi. Perché gli ostacoli vengano modellati correttamente devono quindi essere dimensionati sul passo di griglia usato. Tale caratteristica diventa ancor più problematica nel momento in cui si lavora con più processori in parallelo. FDS infatti richiede la definizione di un numero di griglie di calcolo pari al numero di processori utilizzati con relative problematiche di sovrapposizione e affiancamento delle diverse griglie. Al contrario OpenFOAM riesce a gestire in modo molto più agevole il calcolo in parallelo richiedendo la creazione di una sola griglia e andandola a suddividere lui stesso tra i diversi processori in base alle impostazioni definite dall'utente. Si evidenzia infine il diverso approccio dei due

^{VI}Large Eddy Simulation

software per cui OpenFOAM risolve in modo dettagliato le reazioni chimiche presenti nel sistema studiato, mentre FDS richiede solitamente la definizione di una potenza emessa dall'incendio HRR^{VII} per poi definire le specie chimiche prodotte come una percentuale della portata bruciata di combustibile. L'ultimo software utilizzato è stato Blender. Si tratta di un programma per la creazione grafica 3D con il quale sono stati creati i layout dei diversi casi studio poi esportati nei diversi software CFD. L'impiego di Blender ha ottimizzato la fase di creazione delle geometrie permettendo la realizzazione di layout anche molto complessi in breve tempo e con minor sforzo. Inoltre fornisce un'interfaccia grafica per la definizione di alcuni parametri del modello altrimenti definibili solo successivamente nei diversi ambienti CFD. Blender può anche essere utilizzato nella fase di postprocessing insieme ai due software di visualizzazione standard di OpenFOAM e FDS, ParaView e SMV. Esso permette la visualizzazione in modo confortevole dei dati ricavati dalle simulazioni offrendo la possibilità di manipolarli graficamente per la creazione di presentazioni più accattivanti anche in formato video.

^{VII}Heat Release Rate, (kW)

0.3 Casi studio

Sono stati affrontati due diversi casi studio.

0.3.1 Caso Steckler

Il primo, che in seguito sarà denominato "caso Steckler", ha avuto per lo più scopo propeudeutico per poter prendere confidenza coi diversi software usati. Si è fatto riferimento al lavoro di Steckler, et al. [1] riproducendo una delle 55 prove sperimentali condotte riguardanti incendi in ambienti confinati. L'ambiente in cui sono state effettuate le prove sperimentali è una stanza di dimensioni $2,8 \times 2,8 \times 2,18 \text{ m}^3$ con pareti e soffitto di spessore 10 cm ricoperti con uno strato isolante ceramico, quindi ragionevolmente considerabili adiabatiche per basse potenze di incendio. (Figura 1) È presente un vano porta di tipo 6/6 ($0,74 \times 1,83 \text{ m}^2$) in corrispondenza del quale sono state poste sette file di termocoppie e nella stessa posizione degli anemometri per quantificare il flusso d'aria entrante e uscente dalla stanza. Si è riprodotto il caso denominato AR^{VIII} caratterizzato dalla presenza di un bruciatore di metano di potenza 62,9 kW localizzata al centro della stanza in posizione A, rialzato da terra di 0,3 m e avente dimensioni $0,42 \times 0,48 \text{ m}^2$ (temperatura ambiente di $6 \text{ }^\circ\text{C}$).

^{VIII}ARised

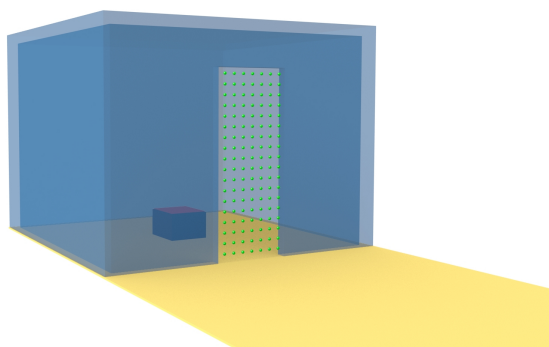


Figura 1: Geometria del “caso Steckler”

0.3.2 Caso tunnel

Il secondo caso studio affrontato, in seguito denominato “caso tunnel”, ha fatto riferimento ai lavori di Lee e Tsai [2] e di Taveli, et al. [3] riguardanti pool fire in ambienti confinati e congestionati. L'ambiente in cui si sono svolte le prove sperimentali è una riproduzione su scala da laboratorio (1:15) di un tunnel automobilistico, lungo 7 m con sezione trasversale di $0,6 \times 0,4 \text{ m}^2$. (Figura 2)

In corrispondenza dell'estremità sinistra del tunnel è presente un sistema di ventilazione meccanica e relativo sistema di distribuzione dell'aria di lunghezza 2,4 m. L'estremità destra del tunnel è invece aperta all'ambiente avente temperatura pari a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Le pareti del tunnel presentano spessore di 10 mm eccetto una parete di vetro, dal lato dell'osservatore, di spessore 6 mm. Esse sono state ragionevolmente considerate adiabatiche. Il tunnel è equipaggiato con due termocoppie T_a e T_b in prossimità del soffitto. T_a si trova in corrispondenza della mezzeria del tunnel sull'asse verticale della pool fire, mentre T_b è posta sulla stessa linea ma a monte della pool fire di 0,1 m. Nelle simulazioni si è inserita inoltre una linea di dispositivi per la misurazione della concentrazione di CO_2 lungo la mezzeria del tunnel per la sua intera lunghezza in corrispondenza del soffitto.

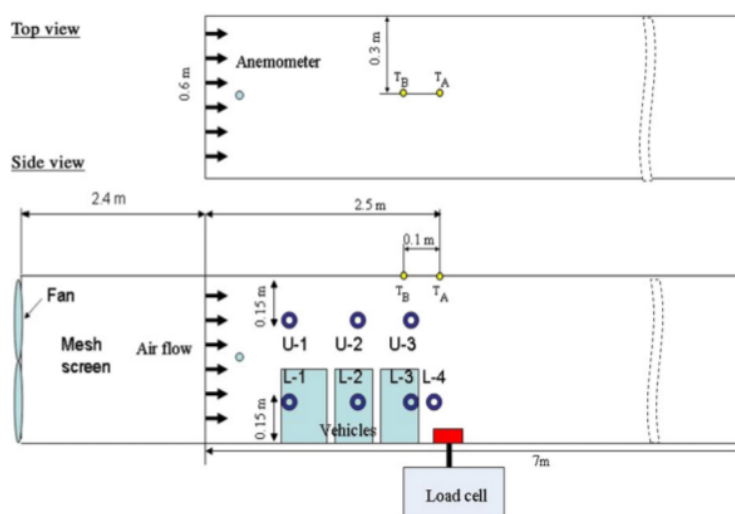


Figura 2: Geometria del “caso tunnel”

Per ogni prova effettuata si è identificato con due diversi approcci il valore di velocità critica di ventilazione, u_{cr} , a cui corrisponde retro diffusione di fumo nulla. Il primo detto "approccio ΔT " è basato sul confronto dei valori di temperatura rilevati dalle due termocoppie T_a e T_b . La condizione critica si ha quando sia T_a che T_b rilevano temperatura ambiente e quindi il loro scostamento, ΔT , è nullo. In tali condizioni infatti la velocità di ventilazione imposta è tale da spingere completamente il fumo oltre la pool fire, impedendo alle due termocoppie di rilevare la "temperatura di fumo". Il secondo approccio invece è basato sulla definizione di un valore di soglia di concentrazione di CO_2 a cui corrisponde la presenza o meno di fumo e successiva misurazione dei profili di concentrazione in ambiente tramite i dispositivi posizionati. Tale metodo, detto "approccio CO_2 ", si fonda sull'approssimazione che il fumo coincida con la sola CO_2 e non è quindi un approccio rigoroso. Si definisce un valore di concentrazione di CO_2 di riferimento, che rappresenta il limite per definire la presenza o meno di fumo. È stato scelto il valore di 1000 ppm in quanto rappresenta una soglia di particolare criticità per gli ambienti indoor. Si è comunque osservato come sia l'approssimazione iniziale che la scelta del valo-

re di soglia non influenzino in modo significativo i risultati ottenuti. La pool fire presente è sollevata da terra di 0,05 m e costituita da benzina, approssimata a n-ottano nelle simulazioni. Sono inoltre presenti degli ostacoli distribuiti in file rettilinee a monte della pool fire, quindi interposti tra pool fire e sistema di ventilazione, il cui numero e dimensioni variano a seconda del caso simulato. (Figura 3)

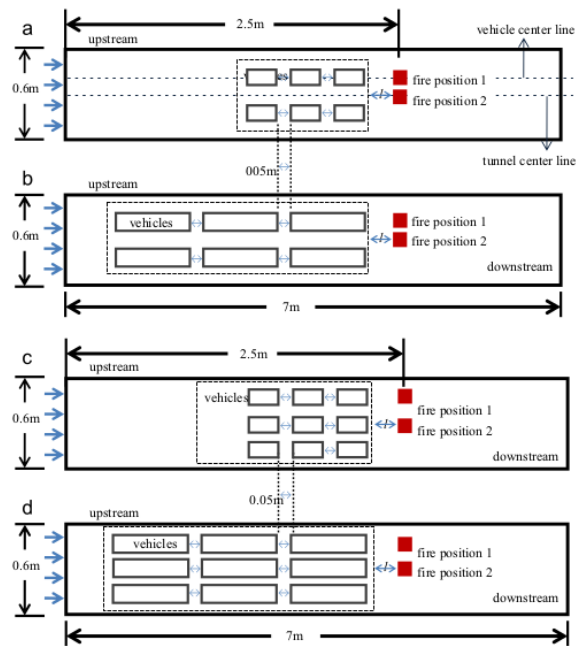


Figura 3: Posizioni e dimensioni della pool fire e degli ostacoli - "caso tunnel"

Si sono considerate due taglie di ostacoli, media $0,61 \times 0,13 \times 0,22 \text{ m}^3$ e grande $0,61 \times 0,13 \times 0,30 \text{ m}^3$. Le simulazioni effettuate si differenziano per potenza, dimensione e posizione della pool fire. Le due dimensioni considerate sono $6,3 \times 6,3 \text{ cm}^2$ per la se-

rie di prove A e $9 \times 9 \text{ cm}^2$ per la serie B, posizionate sulla mezzeria del tunnel o dietro agli ostacoli. Le varie simulazioni sono state condotte imponendo diversi valori di ventilazione longitudinale e lasciando che il campo di moto si sviluppasse completamente in assenza di pool fire per 200 s. Dopo tale tempo si è innescata la pool fire utilizzando una rampa lineare di 50 s per svilupparne la completa potenza. Le potenze di pool fire volute nelle varie simulazioni sono state ottenute imponendo adeguati valori di portata di combustibile bruciato.

0.4 Risultati e discussione

Data la necessità dei codici CFD di suddividere il dominio in volumi di controllo tramite l'impiego di una griglia di calcolo, una fase fondamentale per la creazione di una simulazione è l'effettuare un'analisi di sensitività della griglia stessa. Tale aspetto è estremamente critico in quanto se la griglia utilizzata è eccessivamente lasca, avente cioè un basso numero di celle di grandi dimensioni, si ottengono dei risultati non realistici. Se invece la griglia risulta eccessivamente fine, elevato numero di celle di piccole dimensioni, si va incontro a oneri computazionali e quindi tempi di calcolo eccessivi. Il problema consiste quindi nel trovare il passo di gri-

glia adeguato per risolvere il problema di ot-timo tra accuratezza dei dati ottenuti da simulazione e tempo di calcolo necessario. Tale tematica è stata affrontata in modo diverso a seconda del caso studio considerato e in base al software impiegato, ricordando che FDS utilizza griglie di tipo strutturato mentre OpenFOAM è in grado di lavorare con griglie altamente non strutturate.

0.4.1 Caso Steckler

Per il primo caso studio si è deciso di lavorare in maniera simile con i due diversi software CFD. Si è optato per una griglia il più regolare possibile, evitando quindi di modificarne le dimensioni di cella lungo le tre coordinate (stretch o grading, [4]). Ciò ha permesso di usare le relazioni presenti in letteratura per ottenere una stima preliminare delle dimensioni di griglia ottimali. Si è fatto riferimento al lavoro di Ma e Quintiere [5] che correla il passo di griglia sopra il bruciatore al calore rilasciato dallo stesso tramite la relazione:

$$R^* = \frac{\max(dx, dy, dz)}{(Q/\rho_{air}C_p T_{amb}\sqrt{g})^{\frac{2}{5}}} = 0,05 \dots 1 \quad (1)$$

Dove: Q indica il flusso di calore generato dal bruciatore (kW), ρ_{air} la densità dell'aria (kg m^{-3}), C_p il calore specifico dell'aria (kJ

$\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), T_{amb} la temperatura ambiente (K), g l'accelerazione di gravità (m s^{-2}) e dx , dy , dz le dimensioni di cella lungo i tre assi geometrici (m). Per ottenere dei dati sufficientemente attendibili il parametro R^* deve essere compreso tra valori di 0,05 e 1. Applicando tale formula si è ottenuto che la dimensione minima della cella utilizzabile nelle simulazioni è di 0,05 m. Lo studio di sensitività ha dimostrato che è possibile utilizzare una griglia di 0,1 m ottenendo comunque dati attendibili e riducendo così i tempi di calcolo necessari. Si è inoltre deciso di testare gli effetti della funzione "wall layer" di OpenFOAM che permette di aumentare il numero di celle presenti in corrispondenza delle patch^{IX} [4].

I profili di temperatura e di velocità, ricavati con OpenFOAM, sono quindi diagrammati in funzione dell'altezza del vano porta. (Figura 4) Si nota la tendenza di OpenFOAM a sovrastimare le temperature nella zona alta della stanza, con tutti i passi di griglia utilizzati, 0,05 m, 0,1 m, 0,2 m e 0,2_{Wall Layer} m. Si nota inoltre una diminuzione dello scostamento dai dati sperimentali tramite l'impiego del "wall layer" tra le due griglie 0,2 m e 0,2_{Wall Layer} m. Per valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti ci si è riferiti a un confronto diretto con i dati sperimentali valutandone lo scostamento relativo. (Figura 5)

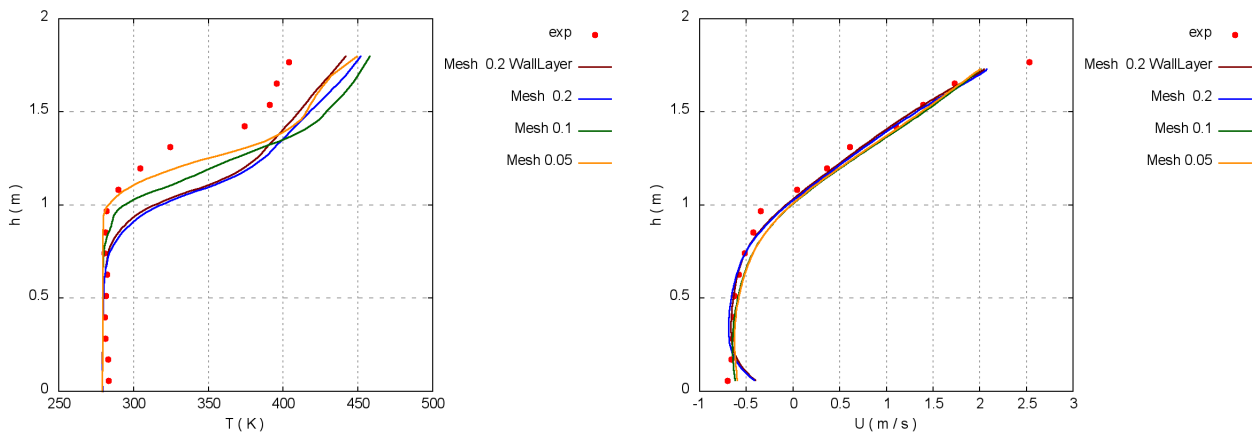


Figura 4: Profili di temperatura (Grafico a sinistra) e di velocità (Grafico a destra) lungo l'altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con OpenFOAM - "caso Steckler"

^{IX}Gruppo di una o più superfici, non necessariamente collegate fisicamente, a cui sono attribuite le medesime condizioni al contorno

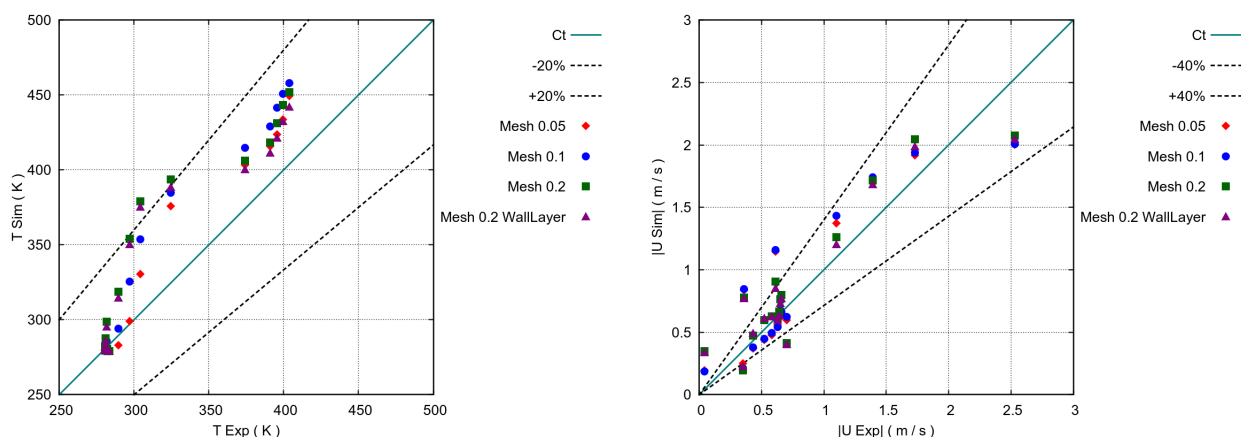


Figura 5: Errori relativi % sulla temperatura (Grafico a sinistra) e sulla velocità (Grafico a destra), per le diverse mesh in OpenFOAM - “caso Steckler”

Per entrambi i software utilizzati si sono osservati errori relativi inferiori al 20% per le temperature. L'errore aumenta nella stima delle velocità rimanendo sotto il 40%. Si osserva come, nella valutazione delle temperature, FDS risenta particolarmente del passaggio da una griglia di 0,1 m a una di 0,2 m. Al contrario il passare da una griglia di 0,05 m a una di 0,1 m non comporta significativi cambiamenti nei risultati. In OpenFOAM invece l'errore è distribuito in modo più graduale tra i diversi passi di griglia.

0.4.2 Caso tunnel

Per il secondo caso studio non è stato necessario effettuare simulazioni in FDS, facendo riferimento a quelle già svolte nel lavoro di Tavelli, et al. [3]. Sono state svolte dunque

solo simulazione con OpenFOAM. In questo caso si è deciso di lavorare con una griglia altamente non strutturata effettuando tre diversi grading nelle tre direzioni a partire dal fire dove la griglia è più fitta. Con tale configurazione si è cercato di abbattere il più possibile i tempi di calcolo necessari, mantenendo comunque una sufficiente definizione del fire in termini di numero di celle. Sono stati presi in considerazioni tre diversi passi di griglia, definiti dalla dimensione di cella in corrispondenza del fire ($0,01_{\text{Wall Layer}}$ - $0,02$ - $0,02_{\text{Wall Layer}}$ - $0,04$ m), con i quali si sono svolti i test di analisi di sensitività della griglia utilizzando la configurazione del caso studio B16. Si è deciso di imporre co-

me limite massimo al grading tra celle adiacenti il valore di 1,2 in modo da non avere un aumento troppo repentino del passo di griglia con conseguenti problemi di convergenza della soluzione. Si è inoltre aumentata la definizione del fire tramite l'impiego della funzione "refinement surface" che permette l'aumento del numero di facce di cella descrittive la patch considerata. Anche in questo caso si è valutato l'effetto del "wall layer" sulla griglia avente il miglior compromesso tra tempo di calcolo e accordo con i dati sperimentali. L'analisi di sensitività delle griglie è stata svolta tramite il calcolo del GCI^X [6, 7, 8]. Il GCI consiste in una stima di convergenza mirata a verificare l'indipendenza di griglia, cioè che i risultati non siano troppo influenzati dalla risoluzione della griglia di calcolo, permettendo così la scelta della griglia ottimale per le simulazioni successive. Esso viene valutato per confronto tra coppie di griglie e indica che il risultato ottenuto con la griglia più fine delle due si scosta dalla soluzione reale di una quantità inferiore al GCI stesso. Il GCI è stato calcolato a partire dalle simulazioni svolte con i tre diversi passi di griglia facendo riferimento ai valori di temperatura rilevati lungo la mezzzeria del tunnel per la sua intera lunghezza. Si osserva come con una griglia con passo di cella di 0,02 m al di sopra del fire si ottengono dei valori di GCI inferiori al 7% raggiungendo una ragionevole accuratezza dei risultati. Tale griglia consente inoltre di avere tempi di calcolo nettamente inferiori rispetto alla griglia più fine da 0,01_{Wall Layer} m avente un valore di GCI del 5%. La griglia a 0,02 m risulta dunque essere il miglior compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo. Si è quindi deciso di svolgere con tale griglia le simulazioni successive per ricavare gli andamenti di temperatura e concentrazione di CO₂ al variare della velocità di ventilazione imposta e avere una valutazione preliminare dei valori di velocità critica, u_{cr} . Nell'intorno di tali valori sono state quindi effettuate alcune simulazioni utilizzando la griglia più fine da 0,01_{Wall Layer} m. Si sono così raffinate

^XGrid Convergence Index - Indice di convergenza di griglia

le precedenti stime di u_{cr} ricavate con il solo

approccio ΔT , scelto per la sua rigidità, in modo da contenere il numero totale di simulazioni. Inoltre in questa seconda fase di simulazione grazie al maggior numero di celle della mesh ci si è accertati dello svolgimento di simulazioni di tipo LES e non URANS, con i rispettivi vantaggi di precisione dei risultati. Tale strategia risolutiva ha permesso l'ottenimento di risultati precisi e attendibili, contenendo altresì i tempi di calcolo necessari. La valutazione dei valori di u_{cr} è stata quindi effettuata in due fasi distinte di simulazione, distinguendo tra gli approcci ΔT e CO_2 , e successivamente si sono valutati gli errori relativi dei risultati ottenuti. Si sono quindi diagrammati i profili ottenuti in funzione del grado di congestione del tunnel, α , distinguendo in base alla dimensione della pool fire. In particolare "small burner" indica la pool fire di dimensioni $6,3 \times 6,3 \text{ cm}^2$ mentre "big burner" quella di dimensioni $9 \times 9 \text{ cm}^2$. (Figure 6, 7) Per quanto riguarda l'approccio ΔT si è osservata una buona capacità di OpenFOAM nel valutare la differenza di temperatura tra le due termocoppie di controllo. I profili ottenuti sono mediamente simili a quelli osservati nei lavori considerati [2, 3]. Si osserva una maggiore criticità da parte di OpenFOAM nel caso "big burner" in cui l'andamento ricavato non corrisponde a quello sperimentale. Gli errori relativi sono comunque minori del 20% per i

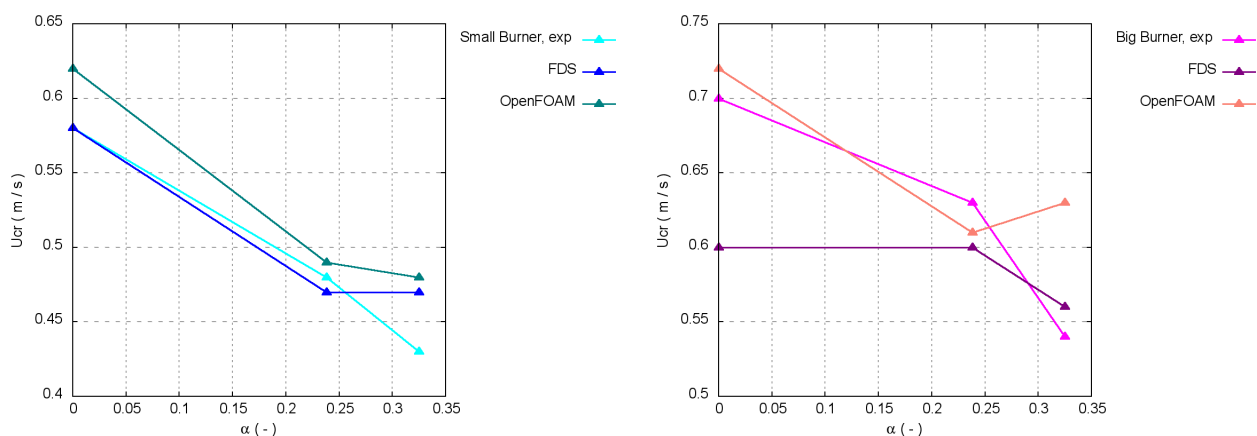


Figura 6: Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi "small burner" (Grafico a sinistra) e "big burner" (Grafico a destra) - Approccio ΔT

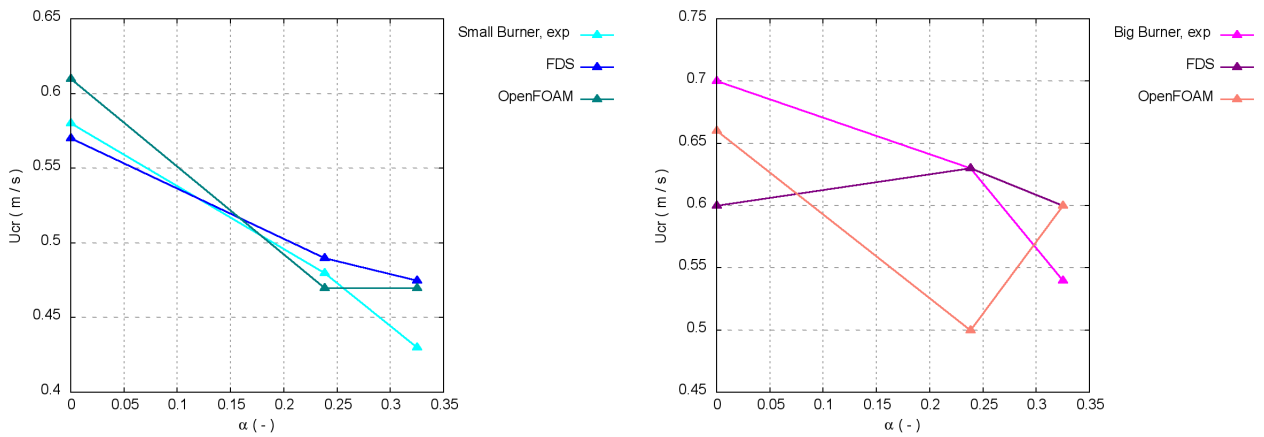


Figura 7: Andamenti di u_{CR} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi “small burner” (Grafico a sinistra) e “big burner” (Grafico a destra) - Approccio CO_2

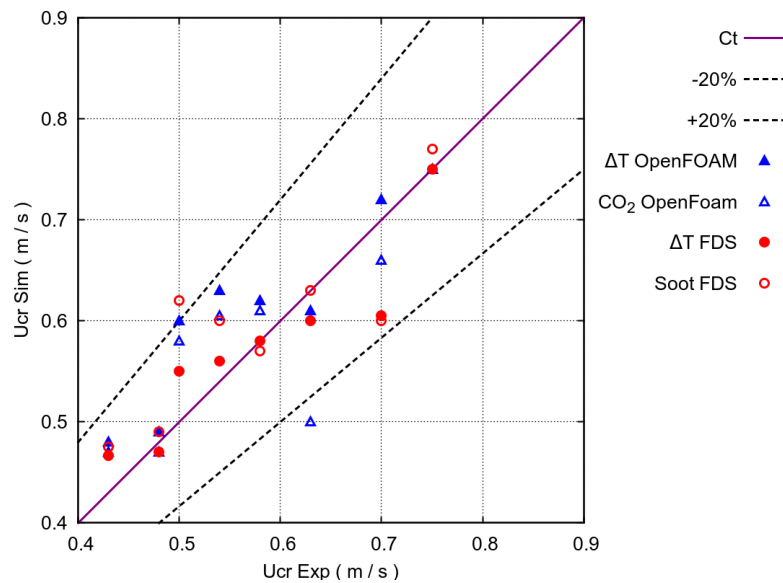


Figura 8: Errori % per i diversi approcci ΔT e CO_2 per FDS e OpenFOAM - “caso tunnel”

due software e leggermente inferiori per FDS rispetto OpenFOAM. (Figura 8) Le differenze tra i risultati ottenuti con i due software sono comunque minime. Per quanto riguarda il secondo approccio l'approssimazione del fumo alla sola CO_2 introduce

ovviamente un errore nei risultati ottenuti. Si nota un maggiore scostamento tra i risultati forniti dai due software e la criticità riscontrata nel caso “big burner” è accentuata rispetto all'approccio precedente. I risulta-

ti sono comunque sufficientemente aderenti ai valori sperimentali. Si ottengono anche in questo caso errori relativi inferiori al 20% sia per FDS che per OpenFOAM.

0.5 Conclusioni

Si è appurato come sia FDS che OpenFOAM siano in grado di simulare in modo adeguato le conseguenze di pool fire in ambienti confinati aventi diversi layout. Si è testata in particolare la loro capacità di valutare fenomeni di retro diffusione di fumo in tunnel automobilistici dove le vetture stesse agiscono da ostacoli determinando differenti livelli di congestione. Entrambi i software forniscono dei profili e dei risultati numerici ragionevolmente in accordo con i dati sperimentali da cui si scostano di un errore relativo inferiore al 20%. Essi sono dunque ritenuti attendibili costituendo così un'importante risorsa per l'esecuzione di studi di sicurezza. Si è inoltre convalidata la strategia risolutiva utilizzata. Le diverse metodologie adottate per la valutazione delle u_{cr} hanno fornito entrambi buoni risultati. Si ritiene comunque più attendibile l'approccio ΔT non essendo soggetto a ipotesi semplificative, per quanto poco influenti, e essendo quindi rigoroso. Riguardo i tempi di calcolo necessari si eviden-

zia che FDS richiede tempistiche di ordini di grandezza inferiori rispetto a OpenFOAM.

Bibliografia

- [1] K. D. Steckler, J. G. Quintiere, W. J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, U. S. Department of commerce, NB-SIR 82-2520, Symposium (International) on Combustion 19th, 1982.
- [2] Y. P. Lee, K. C. Tsai, Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal* 53 (2012) 35–42.
- [3] S. Tavelli, R. Rota, M. Derudi, Validation of FDS for predicting fire behavior in congested tunnels, Submitted to *Fire Safety Journal*, 2013.
- [4] OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 2.2.2, 2013.
- [5] T. G. Ma, J. G. Quintiere, Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations, *Fire Safety Journal* 38 (2003) 467-492.
- [6] P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Hermosa Publishers, USA, 1998.
- [7] J. Franke, W. Frank, Application of generalized Richardson extrapolation to the computation of the flow across an asymmetric street intersection, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 1616–1628.
- [8] www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html

Indice

Sommario	I
0.1 Introduzione	II
0.2 Materiali e metodi	IV
0.2.1 Strumenti di modellazione	IV
0.3 Casi studio	VI
0.3.1 Caso Steckler	VI
0.3.2 Caso tunnel	VII
0.4 Risultati e discussione	IX
0.4.1 Caso Steckler	IX
0.4.2 Caso tunnel	XI
0.5 Conclusioni	XV
Introduzione	1
1 Stato dell'arte	5
1.1 Incendi in galleria	5
1.1.1 Cause e frequenza di accadimento	6
1.1.2 Principali eventi incidentali connessi a incendi in galleria	9
1.2 Propagazione dei fumi	12
1.3 Sicurezza in galleria	14
1.3.1 Obiettivi dell'attività ingegneristica	14
1.3.2 Effetti termici	15
1.3.2.1 Effetti termici sulle persone	16
1.3.2.2 Effetti termici sulle strutture	16
1.3.3 Tossicità	17
1.4 Ventilazione in galleria	18
1.4.1 Classificazione dei sistemi di ventilazione	18
1.5 CFD nella sicurezza	21

2	Materiali e metodi	23
2.1	La fluidodinamica computazionale	24
2.1.1	Il preprocessing	25
2.1.2	Il solver	26
2.1.2.1	Il metodo delle differenze finite	26
2.1.2.2	Il metodo dei volumi finiti	27
2.1.2.3	Il metodo degli elementi finiti	27
2.1.2.4	Il metodo spettrale	28
2.1.3	La fase di postprocessing	28
2.1.4	Costruzione della mesh	29
2.1.4.1	Mesh strutturate	29
2.1.4.2	Mesh strutturate a blocchi	30
2.1.4.3	Mesh non strutturate	31
2.1.4.4	Mesh ibride	32
2.1.4.5	Definizione del passo di griglia	32
2.1.4.6	Analisi di sensitività e indipendenza di griglia	33
2.2	Le equazioni dei flussi reattivi turbolenti	36
2.2.1	Le equazioni di trasporto	36
2.2.1.1	Conservazione della massa	37
2.2.1.2	Conservazione della quantità di moto	38
2.2.1.3	Conservazione delle specie chimiche	39
2.2.1.4	Conservazione dell'energia	40
2.2.2	Le leggi costitutive	42
2.2.2.1	La legge di Newton	43
2.2.2.2	La legge di Fick	44
2.2.2.3	La legge di Fourier	45
2.2.2.4	L'equazione di stato	46
2.2.3	Le equazioni di Navier-Stokes	46
2.3	La descrizione numerica della turbolenza	50
2.3.1	LES - Large Eddy Simulation	52
2.3.1.1	I filtri	53
2.3.1.2	Filtraggio delle equazioni di Navier–Stokes per fluidi incompressibili	55
2.3.1.3	Filtraggio delle equazioni di Navier–Stokes per fluidi comprimibili	57
2.3.1.4	Il modello di Smagorinsky	60
2.4	FDS - Fire Dynamics Simulator	62
2.4.1	Descrizione del modello	63

2.4.1.1	Caratteristiche principali	64
2.4.1.2	Limitazioni principali	67
2.5	OpenFOAM - Open source Field Operation And Manipulation	70
2.5.1	La struttura generale	71
2.5.1.1	System	71
2.5.1.2	Constant	72
2.5.1.3	0	72
2.5.2	La mesh	72
2.5.2.1	SnappyHexMesh	74
2.5.3	Il solver FireFOAM	75
2.5.3.1	Equazione generale	75
2.5.3.2	Modello di combustione	76
2.5.3.3	Modello radiativo	78
2.5.3.4	Schemi numerici e strategie di risoluzione	78
2.6	Confronto tra FDS e OpenFOAM	80
2.7	Blender	81
3	I casi studio	83
3.1	Caso Steckler	84
3.1.1	Descrizione dell'esperimento	85
3.1.2	Simulazioni effettuate	86
3.1.2.1	Modellazione in FDS	87
3.1.2.2	Modellazione in OpenFOAM	92
3.1.3	Risultati	98
3.1.3.1	Determinazione dei profili medi di temperatura e ve- locità	98
3.1.3.2	Analisi dei risultati ottenuti	100
3.2	Caso tunnel	110
3.2.1	Descrizione dell'esperimento	111
3.2.2	Simulazioni effettuate	114
3.2.2.1	Modellazione in OpenFOAM	114
3.2.3	Metodologie e strategia risolutiva	120
3.2.3.1	Approccio ΔT	120
3.2.3.2	Approccio CO_2	122
3.2.3.3	Strategia risolutiva	125
3.2.4	Risultati	127

3.2.4.1	Determinazione dei valori medi di temperatura e concentrazione di CO ₂	127
3.2.4.2	Analisi di sensitività della mesh	129
3.2.4.3	Prima fase: valutazione preliminare di u_{cr}	130
3.2.4.4	Seconda fase: raffinamento di u_{cr}	138
3.2.4.5	Analisi dei risultati ottenuti	139
4	Commenti conclusivi	147
	Bibliografia	151
	Appendice	153

Elenco delle figure

1	Geometria del “caso Steckler”	VII
2	Geometria del “caso tunnel”	VII
3	Posizioni e dimensioni della pool fire e degli ostacoli - “caso tunnel”	VIII
4	Profili di temperatura (Grafico a sinistra) e di velocità (Grafico a destra) lungo l’altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con OpenFOAM - “caso Steckler”	X
5	Errori relativi % sulla temperatura (Grafico a sinistra) e sulla velocità (Grafico a destra), per le diverse mesh in OpenFOAM - “caso Steckler”	XI
6	Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi “small burner” (Grafico a sinistra) e “big burner” (Grafico a destra) - Approccio ΔT	XIII
7	Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi “small burner” (Grafico a sinistra) e “big burner” (Grafico a destra) - Approccio CO_2	XIV
8	Errori % per i diversi approcci ΔT e CO_2 per FDS e OpenFOAM - “caso tunnel”	XIV
2.1	Mesh strutturate di tipo “H, O, C”	30
2.2	Mesh chimera	31
2.3	Mesh non strutturata	32
2.4	Mesh ibrida	32
2.5	Definizione di fiamma negli approcci DNS (a), LES (b) e URANS (c) .	50
2.6	Oscillazioni turbolente negli approcci DNS, LES, URANS	52
2.7	Influenza della dimensione di filtro sulla precisione dei risultati . . .	55
2.8	Struttura generale di OpenFOAM	70
2.9	Struttura generale della simulazione	71
2.10	Sistema di coordinate locali	74
2.11	SnappyHexMesh	75
2.12	Interfaccia grafica di Blender	82

3.1	Geometria del “caso Steckler”	85
3.2	Posizioni del bruciatore e dimensioni dei vani porta - finestra	86
3.3	Dominio in FDS - “caso Steckler”	87
3.4	Mesh FDS - Dall’alto verso il basso 0,2, 0,1 e 0,05 m	88
3.5	Geometria in FDS - “caso Steckler”	89
3.6	Problema di rappresentazione dovuto a una “voxels size” eccessivamente grande	91
3.7	Geometria in OpenFOAM - “caso Steckler”	92
3.8	Mesh OpenFOAM - Dall’alto verso il basso 0,2/0,2 _{Wall Layer} , 0,1 e 0,05 m - “caso Steckler”	94
3.9	Definizione delle patch - “caso Steckler”	97
3.10	Andamento della temperatura nel tempo per FDS e OpenFOAM - “caso Steckler”	99
3.11	Slice file della temperatura per FDS e OpenFOAM - “caso Steckler”	101
3.12	Profili di temperatura lungo l’altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”	102
3.13	Errori relativi % sulla temperatura, per le diverse mesh, per FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”	104
3.14	Slice file della velocità per FDS e OpenFOAM - “caso Steckler”	106
3.15	Profili di velocità lungo l’altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”	107
3.16	Errori relativi % sulla velocità, per le diverse mesh, per FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”	109
3.17	Geometria del “caso tunnel”	111
3.18	Posizioni e dimensioni della pool fire e degli ostacoli - “caso tunnel”	113
3.19	Geometria in OpenFOAM - “caso tunnel”	115
3.20	Mesh usate - A partire dall’alto 0,04 m, 0,02/0,02 _{Wall Layer} m e 0,01 _{Wall Layer} m - “caso tunnel”	116
3.21	Definizione delle patch - “caso tunnel”	119
3.22	Andamento qualitativo di ΔT al variare della velocità di ventilazione - “caso tunnel”	121
3.23	Confronto tra soot e concentrazione di CO ₂ in FDS - prova B16 a ventilazione variabile - “caso tunnel”	124
3.24	Profili di concentrazione di CO ₂ - prova B16 a ventilazione variabile - “caso tunnel”	124
3.25	Andamento della temperatura nel tempo - “caso tunnel”	128

3.26	Profili di temperatura lungo la mezzeria del tunnel	129
3.27	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"	132
3.28	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"	132
3.29	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	133
3.30	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	133
3.31	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"	134
3.32	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"	134
3.33	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"	136
3.34	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"	137
3.35	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	137
3.36	Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi "small burner" (Grafico in alto) e "big burner" (Grafico in basso) - Approccio ΔT	140
3.37	Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi "small burner" (Grafico in alto) e "big burner" (Grafico in basso) - Approccio CO_2	141
3.38	Errori % per i diversi approcci ΔT e CO_2 - FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - "caso tunnel"	144
3.39	Errori % per FDS e OpenFOAM - Approccio ΔT (Grafico in alto) e Approccio CO_2 (Grafico in basso) - "caso tunnel"	145
4.1	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"	153
4.2	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"	154

4.3	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"	154
4.4	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"	155
4.5	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"	155
4.6	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"	156
4.7	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"	156
4.8	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"	157
4.9	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"	157
4.10	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - "caso tunnel"	158
4.11	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - "caso tunnel"	158
4.12	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - "caso tunnel"	159
4.13	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	159
4.14	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	160
4.15	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"	160
4.16	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - "caso tunnel"	161
4.17	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - "caso tunnel"	161
4.18	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - "caso tunnel"	162

4.19	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"	162
4.20	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"	163
4.21	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"	163
4.22	Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"	164
4.23	Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"	164
4.24	Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"	165

Elenco delle tabelle

1.1	Valutazione del tasso di incendi in gallerie stradali	8
1.2	Principali incidenti in galleria	9
2.1	Confronto tra FDS e OpenFOAM	80
3.1	Condizioni al contorno “caso Steckler”	97
3.2	Simulazioni effettuate - “caso tunnel”	114
3.3	Condizioni al contorno - “caso tunnel”	119
3.4	GCI% - “caso tunnel”	130
3.5	Valori definitivi di u_{cr} ($m s^{-1}$) per i diversi software e approcci - “caso tunnel”	139

Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito a enormi progressi nella simulazione numerica di sistemi reattivi turbolenti. Ciò è stato reso possibile dai progressi conseguiti in diversi settori tra cui: la modellazione della fisica dei sistemi; lo sviluppo di algoritmi numerici sempre più robusti ed efficienti; l'aumento della potenza di calcolo disponibile; l'introduzione di schemi cinetici sempre più dettagliati. La grande diffusione di tale pratica è stata determinata da alcune sue peculiarità che la fanno preferire alle sperimentazioni. Tra queste il fatto di poter riprodurre sistemi anche molto complessi con un dispendio minore di tempo e denaro, oltre alla possibilità di simulare fenomeni intrinsecamente pericolosi altrimenti difficilmente riproducibili in condizioni di sicurezza. In questo lavoro di tesi si è affrontata la modellazione numerica di incendi da pool fires in ambienti confinati e congestionati. Incendi di questo tipo sono caratterizzati da una notevole criticità dovuta al rapido aumento delle temperature all'interno dell'ambiente e a una altrettanto rapida diminuzione della visibilità e del livello di ossigeno. Si ha quindi un elevato rischio di perdite di vite umane e di notevoli danni alle strutture con conseguenti perdite economiche. Risultano inoltre determinanti alcuni fattori legati al layout dell'ambiente, come la presenza di pareti e/o di ostacoli che vanno a modificare lo sviluppo del fenome-

no e che pertanto devono essere modellati in modo opportuno nelle simulazioni. Negli ultimi quindici anni sono stati vari gli eventi catastrofici di questo tipo, si ricordano: il disastro del tunnel del Monte Bianco (Francia - 1999), dove l'incendio di un autocarro si propagò in modo incontrollato coinvolgendo 34 veicoli e causando 39 vittime; l'incendio del treno ascendente nel tunnel di Kaprun (Austria - 2000) che causò 155 vittime; l'incidente del tunnel del Gottardo (Svizzera - 2001) in cui, a seguito di uno scontro frontale tra due autocarri, si innescò un incendio che coinvolse 23 veicoli provocando 11 vittime. La modellazione CFD^I in questo ambito assume quindi notevole interesse e importanza, finalizzata allo sviluppo di sistemi antincendio e alla progettazione di sistemi di ventilazione adeguati e delle vie di fuga. La modellazione CFD permette inoltre di valutare grandezze quali le concentrazioni delle specie chimiche, la visibilità, le temperature in gioco, i flussi termici, ecc. La versatilità permessa dalle simulazioni numeriche consente quindi di avere una vasta gamma di informazioni di estremo interesse, fornendo gli strumenti per una comprensione più approfondita del sistema e del fenomeno in esame per una progettazione più razionale di strutture e apparecchiature sempre più sicure.

Tra i diversi codici fluidodinamici disponibili si è scelto di utilizzare il codice open source OpenFOAM^{II} e nello specifico il solver standard FireFOAM. Tale software consiste in una toolbox CFD formata da moduli elementari sviluppati in linguaggio di programmazione C++. È stato utilizzato anche un secondo codice fluidodinamico sempre open source, FDS^{III}. Questo secondo codice rappresenta l'attuale software di riferimento per la simulazione di incendi e valutazione delle loro con-

^IComputational Fluid Dynamics - Fluidodinamica computazionale

^{II}Open Field Operation and Manipulation, versione 2.2.2, rilascio 14 Ottobre 2013

^{III}Fire Dynamic Simulator - SmokeView, versione 5

sequenze sull'ambiente circostante. Si è dunque utilizzato FDS come convalida di OpenFOAM in aggiunta al confronto con i dati sperimentali a disposizione. Entrambi i codici si basano sul metodo dei volumi finiti e sulla modellazione della turbolenza con approccio di tipo LES^{IV}, particolarmente indicato per la modellazione dei flussi reattivi governati dalle forze di galleggiamento. Nel corso della tesi è stato possibile verificare le capacità predittive dei due codici in diverse condizioni evidenziandone le diverse peculiarità. Si è inoltre utilizzato Blender^V, un software open source di creazione grafica 3D, per la realizzazione delle geometrie di studio in fase di preprocessing. Lo si è impiegato anche in fasi di postprocessing per la manipolazione dei dati ottenuti affiancandolo ai software di visualizzazione implementati di default in OpenFOAM e FDS, rispettivamente ParaView e SmokeView.

Il lavoro svolto si articola in quattro capitoli. Nel primo viene illustrato lo stato dell'arte in cui si inserisce il lavoro di tesi. Il secondo capitolo descrive i materiali e i metodi utilizzati. Il terzo capitolo presenta i casi studio analizzati, le simulazioni effettuate e i risultati ottenuti. Sono stati affrontati due diversi casi studio: il primo detto "caso Steckler" fa riferimento ad uno degli esperimenti svolti da Steckler, et al. [1] e riguarda la simulazione di una pool fire in una stanza di piccole dimensioni avente un vano porta che la mette in comunicazione con l'ambiente circostante; il secondo detto "caso Tunnel" presenta una pool fire in un tunnel automobilistico congestionato dalla presenza di veicoli, con riferimento ai lavori svolti da Lee e Tsai [2] e da Tavelli, et al. [3]. In questo secondo caso studio si sono valutate le velocità critiche di ventilazione, tali per cui non si osserva retrodiffusione di fumo in

^{IV}Large Eddy Simulation

^VVersioni 2.63 e 2.68

tunnel provvisti di ventilazione longitudinale, per le diverse configurazioni considerate. Infine, nel quarto capitolo, sono presentate le conclusioni a cui si è giunti nel presente lavoro.

Capitolo 1

Stato dell'arte

In questo primo capitolo si presenterà lo “stato dell'arte” del presente lavoro di tesi. Con tale termine si intende il più alto livello di sviluppo e conoscenza, attualmente raggiunto dal campo d'indagine scientifica di interesse. Come già accennato nell'Introduzione il presente lavoro di tesi tratta la modellazione numerica di incendi da pool fires in ambienti confinati e congestionati. Tra gli eventi incidentali di questo tipo maggiormente rilevanti, si trovano gli incendi in galleria.

1.1 Incendi in galleria

Nel passato la sicurezza in galleria era una tematica estremamente specialistica che riguardava soltanto un limitato numero di esperti. L'opinione pubblica quasi non si interessava a questa materia ed erano molto rari gli stanziamenti per la sicurezza. La situazione è cambiata negli ultimi 15 anni, dopo alcuni tragici incendi tra cui quelli dei tunnel stradali del Monte Bianco e del Gottardo. La preoccupazione generale è cresciuta drasticamente con forti effetti sugli standard di progettazione e sicurezza.

Gli incendi in galleria non sono comunque un fenomeno nuovo. Il danno potenziale tuttavia si è sviluppato significativamente col passare degli anni, in particolare a causa dell'aumento dei volumi di traffico.

1.1.1 Cause e frequenza di accadimento

Le cause più comuni di incendi nei tunnel sono:

1. collisioni tra veicoli;
2. difetti elettrici, spesso malfunzionamenti delle luci dei veicoli;
3. surriscaldamento dei freni;
4. altri difetti che portano all'autoignizione dei veicoli.

Si nota inoltre come la maggior parte degli eventi incidentali di questo tipo sia causata da camion.

Altre cause meno frequenti sono:

1. difetti tecnici dell'equipaggiamento dei tunnel che portano a autoignizione;
2. eventi legati ai lavori di manutenzione nei tunnel.

Il rischio di incendio dei veicoli tende ad aumentare nelle situazioni di intenso riscaldamento del motore e di alto stress termico dei freni. In via teorica la frequenza di accadimento degli incendi in galleria è legata ad alcune caratteristiche come la lunghezza del tunnel, il traffico, il controllo della velocità e la pendenza della strada. Un'ulteriore fonte di pericolo, di crescente importanza, è l'età avanzata di gran

parte dei trafori attualmente presenti in parecchi paesi. Questo tema è particolarmente problematico dal punto di vista dei dispositivi tecnologici di sicurezza, che tendono a diventare obsoleti velocemente.

Compito dell'ingegnere è sviluppare delle procedure di miglioramento delle strutture, considerando alcune importanti limitazioni presenti:

1. realizzazione in fasi, spesso distribuite su lunghi periodi di tempo;
2. stanziamento economico limitato;
3. possibilità molto limitata di chiusura al traffico della galleria.

Gli incendi in galleria sono fortunatamente eventi relativamente rari, benché molto più frequenti di quanto si possa comunemente presupporre. I dati statistici disponibili sebbene molto incerti, possono fornire informazioni molto interessanti. (Tabella 1.1, [4]) A causa della grande dispersione dei dati i valori sono solo indicativi.

Veicolo		Casi / 10 ⁸ veicoli per km
Guasti		500 - 1500
Incidenti	Totale	50
	con feriti	10
	con vittime	1
Veicoli privati	tutti gli incendi	2 - 10 - (25)
Veicoli pesanti (senza merci pericolose)	tutti gli incendi	10
	con danni alla galleria	1
Veicoli pesanti (con merci pericolose)	tutti gli incendi	2 (stima)

Tabella 1.1: Valutazione del tasso di incendi in gallerie stradali

Gli incidenti in galleria devono essere visti nel contesto del numero annuale generale di vittime della strada, dell'ordine di 6500 per l'Italia, 7500 per la Germania, 8000 per la Francia e oltre 40000 per gli Stati Uniti. La galleria è comunque, in termini statistici, molto più sicura della strada all'aria aperta.

1.1.2 Principali eventi incidentali connessi a incendi in galleria

In Tabella 1.2 si riportano i casi di incidenti in galleria, di maggior interesse degli ultimi 30 anni. Si nota come la maggior parte sia stata causata da tamponamenti e collisioni.

Anno	Tunnel	Paese	Lunghezza (m)	Vittime	Feriti	Veicoli	Tipo di incidente
1980	Sakai	Giappone	459	5	5	10	Collisione
1983	Pecrile	Italia	600	8	22	10	Collisione
1986	L'Armé	Francia	1105	3	5	5	Collisione
1993	Serra Ripoli	Italia	442	4	4	16	Collisione
1994	Hugouenot	Sud Africa	6111	31	28	1	Collisione di bus
1995	Pfaender	Austria	6719	53	4	4	Collisione
1996	I. Femmine	Italia	148	5	10	20	Collisione
1999	M. Bianco	Italia	11600	39	-	26	Incendio dopo perdita
1999	Tauren	Austria	6400	12	-	40	Collisione tra più macchine
2001	Gothard	Svizzera	17000	11	10	8	Collisione tra due camion
2003	Vicenza	Italia	600	6	50	-	Bus ribaltato
2007	Ehrentalerberg	Austria	3345	-	12	39	Collisione
2007	Santa Clarita	USA	165	3	23	33	Collisione e incendio
2007	San Martino	Italia	4800	2	10	1	Collisione
2008	Ofenauer	Austria	1390	-	17	18	Collisione di più macchine
2009	Gubrist	Svizzera	3200	-	4	2	Collisione
2010	Trojane	Slovenia	885	-	5	6	Rottura di camion
2010	Wuxi Lihu	Cina	10950	24	19	-	Collisione

Tabella 1.2: Principali incidenti in galleria

Tra i più disastrosi incendi in galleria ricordiamo:

1. galleria del Montebianco - Francia-Italia - 24 marzo 1999: Un camion contenente 12 tonnellate di farina e 9 tonnellate di margarina prese fuoco poco dopo l'ingresso della Galleria del Montebianco, un importante tunnel che attraversa le Alpi. L'incendio, alimentato dalle materie combustibili presenti nel veicolo, in breve tempo raggiunse enormi proporzioni ed i pompieri impiegarono 53 ore per domarlo e 39 persone morirono carbonizzate. Il tunnel restò chiuso per due anni per poter riparare ai danni. Le cause principali dei gravi danni provocati dall'incendio furono:
 - (a) l'alto traffico in galleria;
 - (b) l'incorretto comportamento del cammionista;
 - (c) il mancato arresto dei veicoli all'ingresso, nonostante l'uscita del fumo;
 - (d) l'incorretta gestione della ventilazione;
2. tunnel Tauren - Austria - 27 maggio 1999: un incidente tra più veicoli fece sviluppare velocemente l'incendio nel Tunnel Tauren, un'altra galleria che attraversa le alpi. La generazione di gas tossici, le alte temperature e la presenza di molto fumo portò alla morte di 12 persone e 40 feriti. L'incidente fu causato da un colpo di sonno del guidatore e dalla perdita di diesel a seguito dell'impatto di uno dei veicoli;
3. San Gottardo - Svizzera - 24 ottobre 2001: la galleria del San Gottardo fu teatro di una tragica collisione tra due autocarri. Un camion belga urtò la parete

della galleria invadendo la corsia opposta dove lo scontro fu inevitabile, causando il danneggiamento di un serbatoio e la conseguente fuoriuscita di diesel. Un cortocircuito di un cavo elettrico a contatto con la miscela di diesel e aria provocò un'esplosione, a seguito della quale entrambi i camion e il loro carico andarono rapidamente in fiamme. Dieci persone persero la vita a seguito dell'intossicazione dai gas tossici e una morì bruciata.

1.2 Propagazione dei fumi

La progettazione di sistema di sicurezza adeguati deve essere basata sulla solida conoscenza della fisica degli incendi in galleria, che deriva da considerazioni teoriche, da esperimenti su grande scala effettuati in condizione controllate e dall'analisi di incendi reali. Il pericolo principale per gli utenti della galleria è il fumo, che in breve tempo può ridurre la visibilità e rendere la fuga impossibile. L'aspetto fondamentale per un controllo efficace dell'incendio in galleria è quindi un sistema adeguato di gestione dei fumi, che può essere realizzato basandosi su una solida comprensione dello sviluppo e della propagazione del fumo stesso. Le migliori fonti di informazioni sullo sviluppo dell'incendio e sul coportamento del fumo sono derivate da un certo numero di prove su grande scala, tra cui le principali:

1. Ofenegg, Svizzera, 1965;
2. Eureka 499 "Firetun", progetto europeo svolto in Norvegia, 1991-1992;
3. Memorial Tunnel, USA, 1993-1995.

La velocità di propagazione del fumo è determinata dagli effetti aero-termici dovuti alle caratteristiche del tunnel e dal riscaldamento dell'aria interna che induce un flusso d'aria verso l'imbocco a causa dell' "effetto camino". In genere la velocità di propagazione del fumo è molto superiore rispetto alla velocità media dell'aria nel tunnel, a causa della stratificazione termica. Questa differenza di velocità è fondamentale per qualunque studio nel campo della sicurezza e la mancata considerazione del fenomeno della stratificazione termica può portare a una sottovalutazione drammatica dei pericoli dell'incendio.

La velocità di fuga dei pedoni in galleria è dell'ordine di 1-2 m s⁻¹ o persino più bassa. I requisiti in termini di rilevazione d'incendio e rapidità, sia della risposta del sistema che d'intervento sono pertanto estremamente alti. Gli incendi reali hanno inoltre evidenziato chiaramente la necessità di fornire informazioni veloci e facilmente comprensibili agli utenti del tunnel.

Ulteriori temi cruciali relativi la propagazione del fumo sono la velocità critica e la stratificazione del fumo stesso. Con il primo termine si intende la più piccola velocità longitudinale sufficiente per impedire interamente la propagazione di fumo contro il senso di ventilazione ("backlayering" o "retrodiffusione"). Questo concetto è fondamentale in particolare nel caso di sistemi di ventilazione longitudinale. La stratificazione è invece la manifestazione della tendenza dei gas caldi a spostarsi al di sopra dei gas più freddi. È un concetto fondamentale per la sicurezza dell'utente in caso di incendio, in quanto il fumo caldo inizialmente è concentrato nella parte superiore del tunnel e le condizioni di visibilità nella parte più bassa possono ancora essere ottimali per la fuga. La preservazione della stratificazione del fumo risulta quindi essere un obiettivo fondamentale nell'ingegneria della ventilazione in galleria.

1.3 Sicurezza in galleria

Allo scopo di assicurare un livello ottimale di sicurezza in galleria, risultano essere determinanti svariati fattori interconnessi fra loro. Nonostante le indicazioni generali, la migliore combinazione di tali elementi deve essere sviluppata per ogni caso specifico e risulta essere intimamente collegata alle caratteristiche del singolo tunnel. Di seguito verranno illustrati alcuni aspetti fondamentali riguardanti la sicurezza in galleria. Inanzitutto saranno discussi gli obiettivi che l'attività ingegneristica deve porsi per scenari di questo tipo. In seguito verranno prese in considerazione le principali fonti di rischio legate agli incendi in galleria, in particolare gli effetti termici e la tossicità del fumo.

1.3.1 Obiettivi dell'attività ingegneristica

Obiettivo primario dell'attività ingegneristica in tale settore, è ovviamente impedire il verificarsi di eventi che mettano a rischio la vita umana, l'ambiente o le strutture installate nel tunnel.

L'obiettivo secondario è invece l'attenuazione delle conseguenze, tramite:

1. introduzione della possibilità dell'utenza di mettersi in salvo autonomamente;
2. implementazione di contromisure tecniche adatte. Esse sono in gran parte dettate dalla catena di eventi in caso di incendio:
 - (a) accensione e sviluppo dell'incendio;
 - (b) rilevazione d'incendio;
 - (c) fase di auto-savataggio;

- (d) risposta automatica di tutti i sistemi di sicurezza;
 - (e) intervento, salvataggio assistito ed estinzione dell'incendio;
3. introduzione della possibilità di intervento, da parte degli utenti o dei servizi di emergenza, nelle migliori condizioni possibili.

Dal punto di vista tecnico gli elementi principali per la sicurezza possono essere identificati come segue:

1. individuazione tempestiva degli incendi;
2. informazione dell'utente;
3. possibilità di auto-salvataggio;
4. ventilazione del tunnel.

L'informazione dell'utente è di fondamentale importanza e richiede mezzi adatti per la comunicazione, che deve risultare facilmente intuibile. Non appena l'incendio è rilevato, tutti gli utenti nel traforo devono immediatamente essere avvertiti. Pochi minuti di ritardo nella comunicazione possono portare a conseguenze drammatiche. Questo aspetto non è stato riconosciuto adeguatamente per molto tempo.

1.3.2 Effetti termici

Tra le principali fonti di rischio legate a fenomeni incidentali di questo tipo, si trovano ovviamente gli effetti termici dell'incendio. Essi possono colpire in modo ambivalente sia le persone coinvolte che le infrastrutture circostanti.

1.3.2.1 Effetti termici sulle persone

Per quanto riguarda gli effetti termici sulle persone si osserva come, l'irraggiamento diretto dovuto alle fiamme sia influente solo in prossimità dell'incendio, mentre allontanandosi si risente solo dell'effetto della temperatura dei fumi caldi. Per evacuare l'ambiente incidentato, il livello di radiazione deve essere sotto il limite entro il quale causerebbe ustioni serie alla pelle nuda per un'esposizione di diversi minuti. Il valore di soglia è tra i 2 e i 2,5 kW m⁻². I vigili del fuoco possono resistere normalmente a un livello di radiazioni di 5 kW m⁻² tramite l'impiego di tute apposite, ma la durata dell'operazione deve essere inferiore di 30 minuti, con anche l'ausilio del respiratore. Per permettere l'evacuazione del tunnel in un periodo di circa 15 minuti la temperatura dell'aria dovrebbe essere al di sotto degli 80 °C.

1.3.2.2 Effetti termici sulle strutture

L'effetto termico sulle strutture è un parametro di grande importanza a cui sono legati due aspetti differenti:

1. aspetto di carattere economico. Eventuali danni alla struttura implicano infatti lavori successivi di riparazione o manutenzione straordinaria, con relativo dispendio economico anche considerevole;
2. aspetto di sicurezza. L'effetto termico sulla struttura può infatti portare a cedimenti strutturali durante il lasso di tempo dell'evacuazione. Ciò deve essere ovviamente evitato. In fase di progettazione si considera quindi che gli oggetti pesanti non debbano cedere al di sotto di temperature di 400-450 °C, per l'intero lasso di tempo necessario alle operazioni antincendio.

1.3.3 Tossicità

Un ulteriore parametro di fondamentale importanza è la tossicità del fumo. Essa è determinata principalmente dal tipo di combustibile che viene bruciato. Si considera ad esempio l'influenza della CO e dell'HCN, che può essere rappresentata come:

$$A = \frac{[CO]}{LC_{50CO_{30}}} + \frac{[HCN]}{LC_{50HCN_{30}}} \quad (1.1)$$

Dove:

[] Concentrazione

$LC_{50CO_{30}} = 4600 \text{ ppm}$ Livello di concentrazione a cui il 50% delle persone muore per effetto della sola CO, dopo 30 minuti di esposizione

$LC_{50HCN_{30}} = 160 \text{ ppm}$ Livello di concentrazione a cui il 50% delle persone muore per effetto del solo HCN, dopo 30 minuti di esposizione

Se $A = 1$ si stima una mortalità del 50% delle persone esposte. Se $A > 1$ si prevede la morte di tutte le persone esposte.

1.4 Ventilazione in galleria

In caso di incendio il generico sistema di ventilazione deve creare le migliori condizioni per realizzare i seguenti obiettivi:

1. evacuazione degli utenti, auto-salvataggio ed evacuazione assistita;
2. intervento dei vigili del fuoco;
3. protezione dell'integrità strutturale della galleria.

La scelta del sistema di ventilazione dipende principalmente dalle caratteristiche della galleria, lunghezza e pendenza, così come dal volume di traffico e dalle sue caratteristiche, uni o bidirezionale, scorrevole o frequentemente congestionato, percentuale dei veicoli che trasportano merci pesanti o merci pericolose ecc.

1.4.1 Classificazione dei sistemi di ventilazione

Il primo livello di distinzione tra i diversi sistemi di ventilazione è tra:

1. ventilazione naturale;
2. ventilazione longitudinale;
3. ventilazione con estrazione localizzata del fumo.

I sistemi di ventilazione longitudinale sono classificati a loro volta in due forme principali:

1. ventilazione longitudinale semplice con acceleratori;
2. ventilazione longitudinale con estrazione centrale.

Questa ultima forma è particolarmente interessante per le gallerie a singola canna con traffico bidirezionale. Oltre a essere ragionevolmente semplice in termini di realizzazione, è anche interessante dal punto di vista ambientale poiché porta ad una drastica limitazione dell'aria inquinata agli imbocchi. L'installazione di acceleratori è solitamente necessaria per il corretto funzionamento di questo sistema.

I sistemi con la capacità di estrazione concentrata del fumo, generalmente assumono una delle seguenti forme di base:

1. ventilazione longitudinale semplice con ventilatori e/o estrazione centrale in caso di funzionamento normale e estrazione localizzata del fumo attraverso apposite serrande in caso di incendio;
2. ventilazione semitrasversale, con aggiunta di aria fresca sia durante il funzionamento normale che in misura ridotta assieme all'estrazione localizzata attraverso serrande in caso di incendio;
3. ventilazione trasversale, dove l'aggiunta dell'aria fresca e l'evacuazione di quella inquinata sono in equilibrio durante il funzionamento normale, mentre in caso di incendio l'estrazione localizzata del fumo è preponderante.

Tali sistemi offrono vantaggi significativi rispetto alla semplice ventilazione longitudinale, sia in termini di sicurezza che di funzionalità, ma presentano un costo molto più elevato.

I campi di applicabilità dei diversi sistemi dipendono sempre meno dal funzionamento in condizioni normali, a causa della diminuzione del livello delle emissioni dei motori dei veicoli. La gamma di applicabilità dei sistemi di ventilazione semplici è dettata principalmente da considerazioni sulla sicurezza. È quindi molto utile, per

stabilire almeno a livello nazionale e regionale un livello omogeneo di sicurezza, che tali limiti di applicabilità siano regolati in direttive o in linee guida di riferimento.

Per quanto riguarda la progettazione, i sistemi di ventilazione devono essere progettati per poter funzionare correttamente almeno nelle circostanze seguenti:

1. funzionamento normale;
2. manutenzione della galleria;
3. incendio.

In caso di incendio in galleria con ventilazione longitudinale il fumo prodotto dal fuoco deve essere controllato nel modo migliore. Il raggiungimento della velocità critica è il requisito caratteristico nel caso di traffico unidirezionale, mentre velocità basse sono solitamente desiderabili per evitare la destratificazione del fumo in caso di traffico bidirezionale o unidirezionale con frequente congestione.

Nel caso di incendio in galleria con estrazione concentrata del fumo è essenziale:

1. estrarre più fumo possibile;
2. confinare la propagazione del fumo in una zona limitata;
3. fornire una quantità sufficiente di aria fresca per la sopravvivenza degli utenti.

Il tasso di estrazione di fumo in caso di incendio è dell'ordine di $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ o maggiore. A titolo d'esempio con il nuovo sistema di ventilazione del traforo del San Gottardo possono essere raggiunti valori di estrazione dell'ordine di $250\text{-}350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

1.5 CFD nella sicurezza

L'applicazione di strumenti e di metodi CFD nell'ingegneria della sicurezza delle gallerie, è piuttosto recente se comparata ad altri settori come l'aeronautica e le turbomacchine. Dopo un lungo processo di validazione il CFD sta ora raggiungendo uno stadio maturo e guadagnandosi l'accettazione per applicazioni nel campo delle gallerie. Se usato in modo esso ha le potenzialità per fornire una nuova importante visione e una comprensione fisica migliore del fenomeno, sia nella fase di progetto che come strumento di verifica delle assunzioni progettuali. Risulta essere uno strumento essenziale ogni volta che sono richieste informazioni dettagliate sulla stratificazione del fumo, sulla visibilità, sulla temperatura, sulla radiazione e sulle concentrazioni delle sostanze inquinanti. Può inoltre risultare inestimabile anche per l'analisi di componenti particolari o di nuovi metodi di ventilazione.

L'entrata in vigore del D.M. 9 maggio 2007 "Direttive per l'Attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio" sancisce, anche da un punto di vista normativo, la possibilità del ricorso alle metodologie dell'ingegneria antincendio prestazionale, FSE^I, come strumento di analisi per la progettazione nell'ambito della sicurezza antincendio. Una delle sfide di questo nuovo approccio è comprendere quanto a fondo incidere con misure protettive sia impiantistiche che gestionali per la riduzione del rischio, potendosi virtualmente porre dei sempre nuovi scenari o degli ulteriori interventi ovvero delle prescrizioni gestionali più restrittive. Nell'ultimo decennio l'FSE ha giovato del continuo progresso della fluidodinamica computazionale, sia sul piano della ricerca sulla modellazione dei fenomeni fisici,

^IFire Safety Engineering

sia dal punto di vista della implementazione tecnologica di tali modelli mediante algoritmi di calcolo e grazie alla potenza sempre crescente dei calcolatori elettronici.

L'approccio basato sulla simulazione del fenomeno di incendio, grazie ai modelli di calcolo, sta diventando maturo a tal punto da essere impiegato, con discreti risultati, anche nell'ambito della cosiddetta "Fire Investigation" ossia l'analisi del fenomeno di incendio al fine di poter caratterizzare cosa è accaduto con buona probabilità nell'ambito di un determinato luogo in seguito a incidente o evento delittuoso. I metodi simulativi vengono iniziati a partire da dati ed evidenze raccolti in campo e successivamente osservati e tendono a riprodurre la "scena di incendio", ricostruendo i processi di combustione, spiegando lo sviluppo delle fiamme e dimostrando il movimento del fumo descrivendo a posteriori, la configurazione del combustibile, gli effetti della ventilazione, l'impatto dei sistemi di protezione passiva e attiva e la sorgente di innesco.

Capitolo 2

Materiali e metodi

In questo capitolo verranno illustrati i “materiali e metodi” usati nel presente lavoro di tesi. Si affronteranno brevemente i diversi aspetti teorici-modellistici di rilevanza ed i software utilizzati, evidenziandone le diverse peculiarità:

1. i fondamenti della fluidodinamica computazionale;
2. le equazioni per la descrizione dei flussi reattivi turbolenti;
3. le metodologie per la descrizione numerica dei flussi turbolenti, con particolare attenzione al modello LES.
4. i software utilizzati:
 - (a) FDS;
 - (b) OpenFOAM;
 - (c) Blender.

2.1 La fluidodinamica computazionale

La modellazione CFD è uno strumento ormai ampiamente utilizzato sia in ambito accademico che industriale. Essa permette lo studio di sistemi fisici che coinvolgono fenomeni di trasporto di calore, materia e quantità di moto, anche in presenza di reazioni chimiche. La gamma di diversi campi di applicazione è estremamente varia estendendosi a tutti i settori dell'ingegneria, dalla progettazione dei motori a combustione interna, alla progettazione di turbomacchine, allo studio di sistemi di combustione, ecc. Più recentemente la si è applicata anche alla simulazione dei sistemi reattivi e degli incendi. La CFD presenta il grande vantaggio di consentire lo studio di sistemi molto complessi non trattabili sperimentalmente. In particolare permette la simulazione di sistemi che coinvolgono fenomeni intrinsecamente pericolosi, come incendi e esplosioni, consentendo altresì una riduzione significativa dei tempi necessari e dei costi. Essa è quindi un modo efficiente per ottenere grandi moli di dati e informazioni di buona qualità in alternativa alle costose attività sperimentali. Sono ormai disponibili svariati codici CFD ognuno dei quali caratterizzato da diverse peculiarità e spesso specifici per lo studio di determinate tipologie di fenomeni. Essi hanno raggiunto dei livelli di complessità notevoli mantenendo tuttavia sempre la medesima struttura generale formata da tre parti principali a cui corrispondono altrettante fasi della simulazione fluidodinamica, che verranno considerate singolarmente nel seguito.

2.1.1 Il preprocessing

La prima fase è il preprocessing che comprende al suo interno:

1. definizione del dominio computazionale;
2. creazione della mesh, cioè della griglia di calcolo;
3. definizione delle proprietà dei fluidi e dei fenomeni fisici e chimici coinvolti;
4. definizione di condizioni al contorno appropriate.

La risoluzione delle equazioni che descrivono il moto dei fluidi e i fenomeni fisici e chimici viene effettuata solo in corrispondenza di un numero limitato di punti dello spazio, detti nodi, distribuiti all'interno della mesh in corrispondenza delle celle di calcolo. Ciò rappresenta ovviamente una approssimazione in quanto si cerca di descrivere un fenomeno intrinsecamente continuo nello spazio, limitandosi a considerare solo alcuni punti. Come tutte le approssimazioni ciò introduce un errore nella soluzione numerica rispetto alla soluzione esatta. Più è alto il numero di nodi della griglia e più ci si avvicina a una descrizione continua dello spazio, riducendo l'errore e ottenendo una soluzione numerica più accurata.

È altresì vero che l'aumento del numero di nodi, quindi del numero di volte in cui vengono risolte le equazioni prima nominate, implica maggiori oneri computazionali andando ad incrementare i tempi di calcolo necessari. Si pone quindi la necessità di raggiungere un compromesso tra questi due fattori andando a risolvere il problema di ottimo corrispondente. La costruzione della mesh rappresenta in assoluto l'operazione più delicata nella definizione di una simulazione fluidodinamica. Essa infatti deve avere proprietà e caratteristiche tali da garantire la risoluzio-

ne di tale problema di ottimo, fornendo una soluzione numerica che sia affidabile e accurata mantenendo altresì dei tempi di calcolo accettabili.

2.1.2 Il solver

La seconda fase interessa il risolutore numerico o solver. Consiste nel codice di calcolo che discretizza le equazioni di trasporto da risolvere utilizzando la mesh e le informazioni fornite nel preprocessing, per poi risolvere tali equazioni discretizzate. I metodi di approccio al problema possono essere diversi tra cui i più comuni sono:

1. le differenze finite;
2. i volumi finiti;
3. gli elementi finiti;
4. i metodi spettrali.

Da un punto di vista generale il solver effettua una approssimazione delle funzioni incognite^I, Φ , attraverso delle funzioni semplici. Discretizza le equazioni di trasporto attraverso la sostituzione delle approssimazioni definite precedentemente e risolve dunque le equazioni discretizzate.

2.1.2.1 Il metodo delle differenze finite

Il metodo delle differenze finite costituisce il metodo di più immediato utilizzo per geometrie semplici. Descrive le incognite del fluido, Φ , solo in corrispondenza dei nodi della griglia di calcolo. Le approssimazioni alle differenze finite delle derivate

^IVelocità, pressione, temperatura e composizione

delle incognite vengono ricavate dalle espansioni in serie di Taylor, utilizzando solo i valori delle incognite, Φ , in corrispondenza dei nodi della griglia. Le derivate che compaiono nelle equazioni, $\partial\Phi$, vengono dunque sostituite da delle differenze finite, $\Delta\Phi$, ottenendo così un sistema di equazioni algebriche in corrispondenza di ciascun nodo. Questo metodo è particolarmente usato quando è necessario ottenere degli schemi di alto ordine su griglie regolari, per esempio nella DNS^{II}.

2.1.2.2 Il metodo dei volumi finiti

Il metodo dei volumi finiti rappresenta un caso particolare del metodo delle differenze finite ed è la tecnica più ampiamente utilizzata nei codici CFD. In tale metodo il dominio di calcolo viene suddiviso in un certo numero di volumi detti volumi di controllo a cui vengono applicate le equazioni di trasporto. A ciascun volume di controllo è associato un punto in corrispondenza del quale sono calcolate le variabili, Φ . Principale pregio di tale metodo è la possibilità di applicarlo a qualsiasi tipo di griglia anche fortemente non strutturata e su geometrie anche molto complesse. Lo svantaggio rispetto al metodo alle differenze finite è invece rappresentato dalla maggiore difficoltà con cui sono costruiti gli schemi ad elevato ordine, specialmente in 3D. Esistono infatti due diversi livelli di approssimazione, rispettivamente interpolazioni e integrali.

2.1.2.3 Il metodo degli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti sfrutta delle funzioni definite a tratti per descrivere le incognite, Φ . Il dominio di calcolo è suddiviso in una serie di volumi discreti, o ele-

^{II}Direct Numerical Simulation

menti finiti, tramite l'impiego di griglie non strutturate. Le equazioni di conservazione sono soddisfatte dalla soluzione esatta di Φ . Se le funzioni che approssimano, Φ , venissero sostituite all'interno delle equazioni, queste non sarebbero soddisfatte esattamente ma presenteranno uno scarto residuo, che verrà successivamente minimizzato tramite l'introduzione di una funzione peso. Un grosso vantaggio di tale metodo è la capacità di gestire geometrie anche molto complesse mentre lo svantaggio principale è il costo computazionale maggiore rispetto ai volumi finiti e alle differenze finite.

2.1.2.4 Il metodo spettrale

Il metodo spettrale approssima la generica variabile Φ tramite una serie di Fourier o una funzione polinomiale di Chebyshev. A differenza dei metodi delle differenze finite o dei volumi finiti, in questo metodo numerico le approssimazioni non sono locali ma applicabili e valide sull'intero dominio computazionale. Inoltre la variabile Φ viene sostituita all'interno delle equazioni di trasporto da una espansione in serie (es. Taylor).

2.1.3 La fase di postprocessing

L'ultima fase detta postprocessing è effettuata a posteriori dalla risoluzione delle equazioni di trasporto. Essa si compone di:

1. la visualizzazione dei dati ottenuti;
2. l'analisi di tali dati;
3. l'interpretazione dei risultati ottenuti.

2.1.4 Costruzione della mesh

Di fondamentale importanza è la costruzione della griglia di calcolo o mesh, da questa dipende infatti la qualità complessiva della simulazione fluidodinamica. Maggiore è il numero dei nodi di griglia e migliore è l'accuratezza che può essere garantita a scapito di un aumento del tempo di calcolo e della richiesta di memoria. Si cerca quindi di arrivare ad un compromesso tra accuratezza e affidabilità del risultato numerico e le risorse computazionali che si hanno a disposizione.

Esistono varie tipologie di mesh caratterizzate ognuna da diverse peculiarità:

1. mesh strutturate;
2. mesh strutturate a blocchi;
3. mesh non strutturate;
4. mesh ibride.

2.1.4.1 Mesh strutturate

Sono definite da una famiglia di linee che intersecano una linea appartenente a una famiglia diversa al massimo solo una volta senza intersecarsi tra loro. La struttura regolare di queste griglie ha indubbi vantaggi nella programmazione dei codici di calcolo. Lo svantaggio principale è la restrizione del loro impiego solo a geometrie relativamente semplici. É inoltre difficile distribuire i punti della griglia in maniera efficace andando a utilizzare un elevato numero di punti in regioni del dominio di calcolo dove questa accuratezza non è necessaria. A seconda della loro forma le mesh strutturate vengono classificate in mesh di tipo "H", "O" oppure "C". (Figura

2.1) Le griglie di tipo "H" sono caratterizzate da quattro differenti lati: est, ovest, nord e sud. Una griglia di tipo "O" rappresenta un gruppo di linee infinite. Un piano di sezione immaginario permette di mappare la griglia all'interno di un rettangolo dove due dei quattro lati sono coincidenti (significa che il lato nord coincide con il lato sud o in modo analogo il lato ovest con il lato est). Infine le griglie di tipo "C" sono comunemente utilizzate in simulazioni nel settore dell'aeronautica.

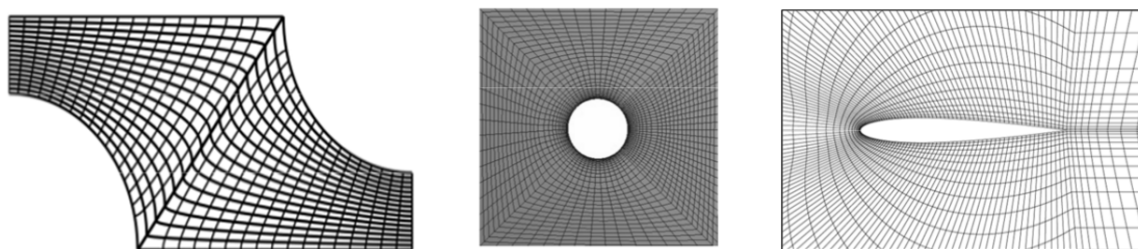


Figura 2.1: Mesh strutturate di tipo "H, O, C"

2.1.4.2 Mesh strutturate a blocchi

In tal caso il dominio di calcolo viene suddiviso in una serie di griglie strutturate con caratteristiche diverse. Queste possono coprire regioni distinte del dominio computazionale toccandosi solo sulle interfacce, oppure possono in parte sovrapporsi. Nella prima configurazione si ha il vantaggio di poter garantire elevata accuratezza dove questa è necessaria snellendo invece la mesh dove ci si può permettere minore accuratezza. Si ha però una maggiore difficoltà nella costruzione del codice fluidodinamico. Le mesh aventi la seconda configurazione, in cui si osserva sovrapposizione delle diverse griglie, vengono indicate col nome di "Mesh chimera" o "Mesh composita". Sono solitamente impiegate nella descrizione di oggetti in movimento e il loro svantaggio principale consiste nella bassa qualità di trasferimento dei dati tra le interfacce. In figura se ne riporta un classico esempio in cui la griglia rettangolare

è fissata nello spazio mentre la griglia associata al cilindro si muove con l'oggetto in modo da garantire un buon livello di dettaglio vicino alla sua superficie. (Figura 2.2)

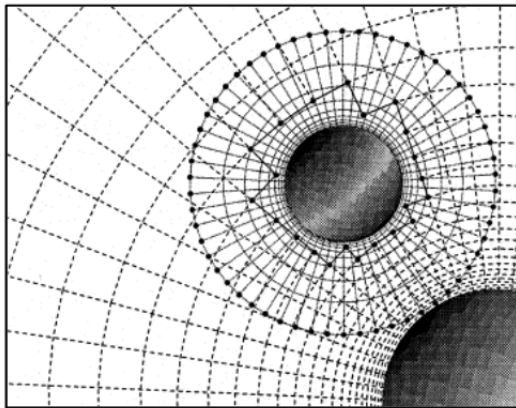


Figura 2.2: Mesh chimera

2.1.4.3 Mesh non strutturate

Queste griglie possono essere utilizzate con qualsiasi tipo di discretizzazione prestandosi particolarmente bene all'applicazione del metodo dei volumi finiti e degli elementi finiti. I volumi di controllo possono avere qualsiasi forma, ma nella maggior parte dei casi sono triangoli o quadrilateri per problemi 2D (Figura 2.3) e tetraedri o esaedri per problemi 3D. Tali mesh vengono generate automaticamente da opportuni algoritmi e sono facilmente applicabili a qualsiasi dominio e geometria. Lo svantaggio principale è rappresentato dalla struttura irregolare che si traduce in una struttura non ordinata delle matrici associate alle equazioni algebriche da risolvere. I metodi necessari per la risoluzione delle equazioni algebriche su griglie di questo tipo sono più lenti di quelli per griglie strutturate. Inoltre il metodo delle differenze finite non può essere applicato su griglie di questo tipo in quanto troppo complesso.

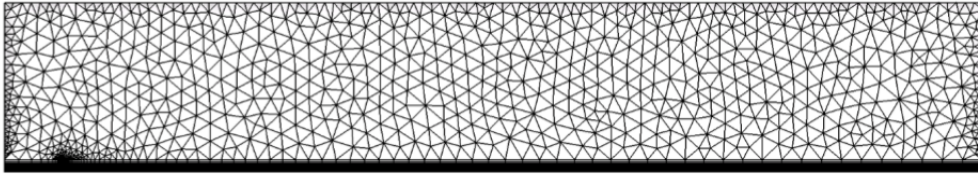


Figura 2.3: Mesh non strutturata

2.1.4.4 Mesh ibride

Le mesh ibride sono caratterizzate da un modello di discretizzazione che usa elementi di diverse geometrie: triangoli, rettangoli, poligoni, ecc.(Figura 2.4). Similmente alle mesh non strutturate, le mesh ibride permettono la descrizione dettagliata di geometrie complesse. Nella loro implementazione bisogna considerare gli alti costi computazionali associati.

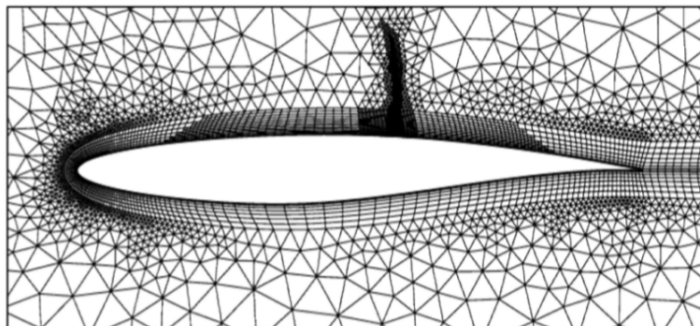


Figura 2.4: Mesh ibrida

2.1.4.5 Definizione del passo di griglia

La definizione del passo di griglia, cioè delle dimensioni delle celle formanti la mesh, è un'operazione di fondamentale importanza per qualsiasi simulazione CFD. Essa infatti determina il livello di accuratezza e affidabilità dei dati ottenuti dalla simulazione e altresì i tempi di calcolo necessari. Esistono vari lavori in letteratura che forniscono diverse metodologie per la valutazione di un passo di griglia ade-

guato per il singolo caso studio considerato. Tra queste, quella di più immediato utilizzo prescrive che la sorgente termica venga descritta da almeno 10×10 celle, cioè far sì che la sua dimensione caratteristica sia descritta da almeno 10 celle [5]. In alternativa è possibile utilizzare la seguente relazione che correla il passo di griglia sopra la sorgente termica al calore rilasciato dalla stessa [5]:

$$R^* = \frac{\max(dx, dy, dz)}{(Q/\rho_{air}C_pT_{amb}\sqrt{g})^{\frac{2}{5}}} = 0,05 \dots 1 \quad (2.1)$$

Dove:

Q	Flusso di calore generato dalla sorgente termica	(kW)
ρ_{air}	Densità dell'aria	(kg m ⁻³)
C _p	Calore specifico dell'aria	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
T _{amb}	Temperatura ambiente	(K)
g	Accelerazione di gravità	(m s ⁻²)
dx, dy, dz	Dimensioni di cella lungo i tre assi geometrici	(m)

Per ottenere dei risultati sufficientemente attendibili il parametro R^* deve essere compreso tra valori di 0,05 e 1. Tale approccio fornisce una prima indicazione del passo di griglia consigliato. È comunque necessario procedere con l'analisi di sensitività in modo da raffinare la stima preliminare ottenuta e verificare l'indipendenza di griglia.

2.1.4.6 Analisi di sensitività e indipendenza di griglia

È prassi comune, nella preparazione di una simulazione CFD, l'impiego preliminare di diverse mesh aventi passo di griglia differente. Così facendo è possibile effettua-

re l'analisi di sensitività cioè la verifica che i risultati ottenuti dalla simulazione non siano troppo influenzati dalla risoluzione della griglia di calcolo impiegata. Tale operazione viene effettuata come prima fase per poi poter definire una mesh definitiva utilizzata in seguito per l'intera campagna di simulazioni da svolgere. In letteratura sono presenti diverse metodologie per effettuare l'analisi di sensitività e verificare l'indipendenza di griglia. Tra queste è ampiamente impiegato il calcolo del GCI^{III} [6, 7, 8]. Il GCI consiste in una stima di convergenza, valutato per confronto tra coppie di griglie e indica che il risultato ottenuto con la griglia più fine delle due si scosta dalla soluzione reale di una quantità inferiore al GCI stesso.

Si considerano tre mesh con diversi passi di griglia (1 = fine, 2 = media, 3 = lasca) scelte in modo che il rapporto tra le dimensioni di griglia abbia circa valore di 2. Per assicurare l'indipendenza di griglia deve essere verificata la seguente equazione:

$$GCI_{23} = r^p GCI_{12} \quad (2.2)$$

Dove:

$r_{23} = r_{12} = r = 2$ Rapporto tra le dimensioni di griglia

p Ordine di precisione locale o globale

L'ordine di precisione locale o globale è calcolato come:

$$p = \ln \left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right) / \ln(r) \quad (2.3)$$

Il GCI viene calcolato facendo riferimento a una variabile fisica locale o globale.

Esso è applicabile solo se tale variabile ha andamento monotono, crescente o altresì

^{III}Grid Convergence Index - Indice di convergenza di griglia

decescente. Se ne considerano i diversi valori assunti per le tre diverse mesh considerate, f_3, f_2, f_1 . I singoli GCI vengono calcolati a partire dall'errore, E , associato alla mesh considerata. Considerando per esempio la mesh 1 l'errore associato vale:

$$E_1 = \frac{f_1 - f_0}{f_0} \quad (2.4)$$

In cui f_0 rappresenta il valore assunto dalla variabile considerata per la mesh limite avente passo di cella nullo. Tale mesh rappresenta il limite teorico a cui è possibile giungere per descrivere lo spazio continuo. Il valore f_0 rappresenta quindi il "valore vero" della variabile considerata ed è valutato come:

$$f_0 \cong f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (2.5)$$

É quindi possibile calcolare il GCI come:

$$GCI = F_s E \quad (2.6)$$

Dove F_s è un fattore di sicurezza pari a 3 per confronto fra due mesh e pari a 1,25 per confronto fra tre mesh.

2.2 Le equazioni dei flussi reattivi turbolenti

In questa sezione sono presentate le equazioni fondamentali per la descrizione dei flussi reattivi turbolenti. Per eventuali approfondimenti si rimanda al testo [9].

2.2.1 Le equazioni di trasporto

Di seguito vengono trattate le equazioni di conservazione necessarie alla modellazione dei flussi reattivi. Si considera l'equazione di conservazione di una generica proprietà estensiva, Φ , in una regione limitata dello spazio, detta volume di controllo. Essa viene solitamente espressa come legame tra la velocità di cambiamento di Φ e le determinazioni esterne e interne al volume di controllo. Consideriamo dunque la generica quantità Φ nel volume V di superficie S , l'equazione di conservazione nella forma generale, dunque indipendente dal tipo di sistema di riferimento, è:

$$\int_V \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} dV + \int_S \rho\Phi \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_S \vec{Q}_S(\Phi) \cdot \vec{n} dS + \int_V Q_V(\Phi) dV \quad (2.7)$$

Dove:

\vec{n} Versore ortogonale ad ogni punto della superficie S positivo uscente

\vec{u} Velocità del fluido

ρ Densità del fluido

$\vec{Q}_S(\Phi)$ Flusso netto diffusivo di Φ attraverso S

$Q_V(\Phi)$ Generazione di Φ in V per unità di volume

Il primo termine a primo membro rappresenta la velocità di cambiamento di Φ nel volume, mentre il secondo termine è il flusso convettivo di Φ attraverso la

superficie S , funzione della velocità convettiva del fluido. A secondo membro il primo termine è il flusso diffusivo di Φ nel volume V , mentre il secondo termine rappresenta la generazione di Φ nel volume V .

Applicando il teorema della divergenza di Gauss si trasformano gli integrali di superficie in integrali di volume. Si considera quindi un volume di controllo infinitesimo ricavando la formulazione differenziale, indipendente dal tipo di sistema di riferimento:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\Phi\vec{u}) = \nabla\vec{Q}_S(\Phi) + Q_V(\Phi) \quad (2.8)$$

In forma più compatta, introducendo la derivata lagrangiana:

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{u}\nabla\Phi \quad (2.9)$$

Di seguito sono presentate le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto, delle specie chimiche e dell'energia, trascurando la loro derivazione.

2.2.1.1 Conservazione della massa

La conservazione della massa o equazione di continuità è ottenuta in forma integrale a partire dalla equazione generale precedentemente descritta:

$$\int_V \frac{\partial\rho}{\partial t} dV + \int_S \rho\vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2.10)$$

Per i problemi di ingegneria chimica la velocità con cui la massa varia in V è imputabile esclusivamente ai flussi di materia attraverso la superficie S . Applicando il

teorema della divergenza il termine di convezione viene trasformato in un integrale di volume. Si ottiene la forma differenziale indipendente dal sistema di riferimento:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.11)$$

2.2.1.2 Conservazione della quantità di moto

Tale equazione di conservazione considera le forze agenti sul volume di controllo:

1. forze superficiali (pressione, tensione superficiale e sforzi tangenziali);
2. forze di campo (gravità, forze di Coriolis e forza elettromagnetica).

La sua forma integrale è:

$$\int_V \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{u} \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_S \underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{n} dS + \int_V \rho \vec{f} dV \quad (2.12)$$

Dove:

$\underline{\underline{\sigma}}$ Tensore degli sforzi

Il secondo termine a secondo membro è il termine sorgente, definito come:

$$\rho \vec{f} = \rho \sum_{k=1}^{N_c} \vec{f}_k \omega_k \quad (2.13)$$

Dove:

\vec{f}_k Forza di volume agente sulla k-esima specie

N_c Numero totale di specie

ω_k Frazione massiva della specie k-esima

Se si considera solo la gravità, \vec{f}_k coincide con il vettore accelerazione di gravità \vec{g} . L'equazione indica che la velocità con cui cambia la quantità di moto all'interno del volume di controllo è uguale alla somma delle forze di volume e di superficie agenti sul fluido. Sempre applicando il teorema della divergenza ai flussi convettivi e diffusivi, si ottiene la forma differenziale vettoriale indipendente dal sistema di riferimento:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = \rho\vec{f} + \nabla\sigma_{\underline{\underline{}}} \quad (2.14)$$

O meglio:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho\vec{f} + \nabla\sigma_{\underline{\underline{}}} \quad (2.15)$$

Tante sono le dimensioni geometriche del problema che ci si accinge a risolvere, tante solo le equazioni scalari derivate dalla precedenti, una per ogni direzione. In un riferimento di coordinate cartesiane, nella generica direzione i -esima si ha:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla(\rho u_i \vec{u}) = \rho f_i + \nabla\sigma_{\underline{\underline{}}} \quad (2.16)$$

2.2.1.3 Conservazione delle specie chimiche

Tale equazione esprime la conservazione della massa della specie k -esima. Le sue forme integrale e differenziale sono rispettivamente:

$$\int_V \frac{\partial(\rho\omega_k)}{\partial t} dV + \int_S \rho\vec{u}\omega_k \cdot \vec{n} dS = - \int_S \vec{J}_k \cdot \vec{n} dS + \int_V \dot{\Omega}_k dV \quad k = 1, \dots, Nc \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{D\omega_k}{Dt} = \frac{\partial(\rho\omega_k)}{\partial t} + \nabla(\rho\omega_k\vec{u}) = -\nabla\vec{J}_k + \dot{\Omega}_k \quad k = 1, \dots, Nc \quad (2.18)$$

Dove:

\vec{J}_k Flusso diffusivo molecolare della specie k-esima

$\dot{\Omega}_k$ Velocità di formazione massiva della specie k-esima per unità di volume

Definendo:

$$\sum_{k=1}^{Nc} \vec{J}_k = 0 \quad (2.19)$$

$$\sum_{k=1}^{Nc} \dot{\Omega}_k = 0 \quad (2.20)$$

É possibile ottenere, sommando tutte le Nc equazioni della conservazione delle specie, l'equazione di continuità. É consuetudine esprimere il flusso diffusivo molecolare con riferimento alla velocità di diffusione \vec{V}_k :

$$\vec{J}_k = \rho\omega_k\vec{V}_k \quad (2.21)$$

2.2.1.4 Conservazione dell'energia

Tale equazione di conservazione può essere scritta in forme differenti a partire dall'equazione di conservazione dell'energia totale specifica per unità di massa \hat{E} . L'energia totale è pari alla somma dell'energia cinetica specifica \hat{E}_k associata al moto convettivo della materia, e dell'energia interna specifica \hat{U} associata allo stato

molecolare della materia e funzione di temperatura, pressione e composizione del sistema:

$$\hat{E} = \hat{E}_k + \hat{U}(T, p, \omega_k) = \frac{1}{2} \vec{u} \cdot \vec{u} + \hat{U}(T, p, \omega_k) \quad (2.22)$$

L'equazione di conservazione nella forma integrale è:

$$\int_V \frac{\partial(\rho \hat{E})}{\partial t} dV + \int_S \rho \hat{E} \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \quad (2.23)$$

$$= - \int_S \vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_S \underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{u} \cdot \vec{n} dS + \int_V \dot{Q} dV + \int_V \rho \sum_{k=1}^{N_c} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{u} + \vec{V}_k) dV$$

Dove:

\dot{Q} Termine sorgente dell'energia per il volume

\vec{q} Flusso termico

Il quarto termine a secondo membro rappresenta la potenza prodotta dalle forze di volume sulla specie k. La forma vettoriale, indipendente dal sistema di riferimento è:

$$\rho \frac{D\hat{E}}{Dt} = \frac{\partial(\rho \hat{E})}{\partial x} + \nabla(\rho \vec{u} \hat{E}) = -\nabla \vec{q} + \nabla(\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{u}) + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{N_c} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{u} + \vec{V}_k) \quad (2.24)$$

Tale relazione rispetta ovviamente il primo principio della termodinamica secondo cui la variazione dell'energia nell'unità di tempo di una particella di fluido

è uguale alla somma del lavoro fatto sulla particella e della velocità di apporto di calore alla particella.

2.2.2 Le leggi costitutive

Applicando le equazioni citate nel paragrafo precedente a un qualsiasi continuo si ottiene un sistema di equazioni differenziali. Il problema matematico non è risolto in quanto il numero di equazioni è inferiore a quello delle incognite. Il sistema è dunque indeterminato.

Le incognite del problema sono:

ρ	Densità del fluido
\vec{u}	Vettore velocità del fluido
p	Pressione
\hat{E}	Energia totale specifica
ω_k	Frazione massiva della specie k-esima
$\underline{\sigma}$	Tensore degli sforzi
\vec{J}_k	Flusso diffusivo molecolare della specie k-esima
\vec{q}	Flusso di energia

Considerando i gradi di libertà del problema:

$$g.d.l. = n^\circ \text{incognite} - n^\circ \text{equazioni} = 3 \quad (2.25)$$

Perché il problema sia risolvibile è necessario saturare i gradi di libertà tramite l'impiego di tre equazioni aggiuntive dette "leggi costitutive" o "equazioni di

chiusura". È inoltre necessaria una equazione di stato per determinare le variabili termodinamiche della miscela di gas. Di seguito sono illustrate le leggi costitutive per fluidi newtoniani e l'equazione di stato dei gas perfetti.

2.2.2.1 La legge di Newton

La legge di Newton viene utilizzata per la riscrittura del tensore degli sforzi, $\underline{\underline{\sigma}}$, che per i fluidi Newtoniani rappresenta la velocità molecolare di trasporto della quantità di moto. La forma generalizzata della legge di Newton della viscosità è:

$$\underline{\underline{\sigma}} = 2\mu\underline{\underline{D}} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{\mu}\right)\underline{\underline{I}} = \left(2\mu\underline{\underline{D}} - \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{\mu}\underline{\underline{I}}\right) - p\underline{\underline{I}} = \underline{\underline{\tau}} - p\underline{\underline{I}} \quad (2.26)$$

Dove:

μ Viscosità dinamica

$\underline{\underline{I}}$ Tensore identità

p pressione statica

$\underline{\underline{D}}$ Tensore delle deformazioni

$\underline{\underline{\tau}}$ Parte viscosa del tensore degli sforzi

$\underline{\underline{D}}$ è definito come:

$$\underline{\underline{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \cdot \vec{\mu} + (\nabla \cdot \vec{\mu})^T) \quad (2.27)$$

$\underline{\underline{\tau}}$ è espresso come:

$$\underline{\underline{\tau}} = 2\mu\underline{\underline{D}} - \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{\mu}\underline{\underline{I}} \quad (2.28)$$

In coordinate cartesiane:

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij} = \left(2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - p\delta_{ij} \quad (2.29)$$

Dove δ_{ij} è il delta di Kronecker che assume il valore:

$$\delta_{ij} \begin{cases} 1 & \text{per } i = j \\ 0 & \text{per } i \neq j \end{cases} \quad (2.30)$$

Il tensore delle deformazioni risulta:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.31)$$

2.2.2.2 La legge di Fick

Risolvendo il seguente sistema è possibile ricavare il flusso diffusivo molecolare o la velocità di diffusione:

$$\nabla X_k = \sum_{p=1}^{Nc} \frac{X_k X_p}{\Gamma_{kp}} (V_p - V_k) + (\omega_k - X_k) \frac{\nabla p}{p} + \frac{\rho}{p} \sum_{p=1}^{Nc} \omega_k \omega_p (f_k - f_p) \quad k = 1, \dots, Nc \quad (2.32)$$

Dove:

Γ_{kp} Coefficiente binario di diffusione massivo della
specie k-esima nella specie p-esima

X_k Frazione molare della specie k-esima

Si ha un sistema lineare di dimensioni Nc^2 da risolvere in ogni direzione per ogni punto e in ogni istante. Per ragioni di costo computazionale è consuetudine semplificare il sistema introducendo la legge di Fick. Essa permette di riscrivere la velocità di diffusione o il flusso diffusivo molecolare come:

$$\omega_k \vec{V}_k = -\Gamma_{k,mix} \nabla \omega_k \quad (2.33)$$

$$\vec{J}_k = -\rho \cdot \Gamma_{k,mix} \nabla \omega_k \quad (2.34)$$

Dove:

$\Gamma_{k,mix}$ Coefficiente di diffusione della specie k-esima nella miscela

2.2.2.3 La legge di Fourier

Il flusso di energia è solitamente espresso come somma di un primo contributo dato dalla legge di Fourier e di un secondo termine associato alla diffusione delle specie con entalpie differenti, nel caso di miscele formate da diverse specie:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \hat{H}_k \omega_k V_k \quad (2.35)$$

Dove:

λ Conducibilità termica

\hat{H}_k Entalpia specifica della specie k-esima

2.2.2.4 L'equazione di stato

L'equazione di stato consente di esprimere la variabile di stato scelta in funzione di altre due variabili di stato del sistema. In questo lavoro le condizioni di lavoro sono tali da ritenere accettabile l'ipotesi che la miscela di gas sia approssimabile ad un gas perfetto, introducendo la relativa equazione di stato:

$$p = \rho RT \quad (2.36)$$

Dove:

R Costante universale dei gas

Inoltre si ha:

$$\hat{U} = \hat{C}_v T \quad (2.37)$$

Dove:

\hat{C}_v Calore specifico a volume costante

2.2.3 Le equazioni di Navier-Stokes

Unendo le equazioni di massa e di quantità di moto illustrate in precedenza si ottiene un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali, per fluidi Newtoniani:

Conservazione della massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.38)$$

Conservazione della quantità di moto

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{f} - \nabla \left(p + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{u} \right) + \nabla \left[\mu \left(\nabla \cdot \vec{u} + (\nabla \cdot \vec{u})^T \right) \right] \quad (2.39)$$

Conservazione delle specie

$$\rho \frac{D\omega_k}{Dt} = \nabla \cdot (\rho \cdot \Gamma_{k,mix} \nabla \omega_k) + \dot{\Omega}_k \quad k = 1, \dots, Nc \quad (2.40)$$

Conservazione dell'energia

$$\rho \frac{D\hat{E}}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u} \hat{E}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot \left(\lambda \nabla T - \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{V}_k \hat{H}_k \right) + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{u} + \vec{V}_k) \quad (2.41)$$

Definendo l'entalpia totale specifica \hat{H}_{tot} e l'entalpia specifica \hat{H} come:

$$\hat{H}_{tot} = \hat{E} + \frac{p}{\rho} \quad (2.42)$$

$$\hat{H} = \hat{U} + \frac{p}{\rho} \quad (2.43)$$

Introducendo tali definizioni nella equazione di conservazione dell'energia, si ottengono le equazioni di conservazione dell'entalpia totale e specifica:

$$\rho \frac{D\hat{H}_{tot}}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{q} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \vec{u}) + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{u} + \vec{V}_k) \quad (2.44)$$

$$\rho \frac{D\hat{H}}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \vec{q} + \underline{\underline{\tau}} \nabla(\vec{u}) + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{u} + \vec{V}_k) \quad (2.45)$$

Dove è identificabile il termine sorgente dovuto al calore viscoso, \dot{Q}_{diss} , quantità sempre positiva:

$$\dot{Q}_{diss} = \underline{\underline{\tau}} \nabla(\vec{u}) > 0 \quad (2.46)$$

É solitamente più confortevole avere a disposizione un'equazione scritta in termini di temperatura. Si introduce quindi l'entalpia sensibile \hat{H}_s :

$$\hat{H}_s = \hat{H} - \sum_{k=1}^{Nc} \Delta \hat{H}_{f,k}^0 \cdot \omega_k \quad (2.47)$$

L'equazione di conservazione dell'entalpia sensibile è ottenibile da quella dell'entalpia specifica:

$$\rho \frac{D\hat{H}_s}{Dt} = \dot{Q}_R + \frac{Dp}{Dt} + \nabla(\lambda \nabla T) - \nabla \left(\rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{V}_k \hat{H}_k \right) + \dot{Q}_{diss} + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{V}_k) \quad (2.48)$$

Dove \dot{Q}_R è il calore rilasciato dalle reazioni chimiche:

$$\dot{Q}_R = - \sum_{k=1}^{Nc} \Delta \hat{H}_{f,k}^0 \cdot \dot{\Omega}_k \quad (2.49)$$

Solitamente, per condizioni lontane da quelle soniche, si deriva un'equazione di conservazione riferita alla temperatura:

$$\rho \frac{D\hat{H}_s}{Dt} = \sum_{k=1}^{Nc} \hat{H}_{s,k} \rho \frac{D\omega_k}{Dt} + \rho \hat{C}_p \frac{DT}{Dt} \quad (2.50)$$

Inserendola in quella dell'entalpia sensibile si ottiene:

$$\rho \hat{C}_p \frac{DT}{Dt} = \dot{Q}_R^* + \frac{Dp}{Dt} + \nabla(\lambda \nabla T) - \nabla \left(\rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{V}_k \hat{C}_{p,k} \right) + \dot{Q}_{diss} + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{Nc} \omega_k \vec{f}_k \cdot (\vec{V}_k) \quad (2.51)$$

Dove:

\dot{Q}_R^* Calore rilasciato dalla combustione

definito come:

$$\dot{Q}_R^* = - \sum_{k=1}^{Nc} \hat{H}_k \cdot \dot{\Omega}_k = - \sum_{k=1}^{Nc} \hat{H}_{k,s} \cdot \dot{\Omega}_k - \sum_{k=1}^{Nc} \Delta \hat{H}_{f,k}^0 \cdot \dot{\Omega}_k = - \sum_{k=1}^{Nc} \hat{H}_{k,s} \cdot \dot{\Omega}_k + \dot{Q}_R \quad (2.52)$$

2.3 La descrizione numerica della turbolenza

Sono possibili diverse metodologie d'approccio per descrivere numericamente i flussi turbolenti. Ognuna di queste è caratterizzata da diverso livello di dettaglio, complessità e costo computazionale.

I metodi principali sono gli approcci:

1. URANS^{IV};
2. LES;
3. DNS.

Tali approcci sono caratterizzati da un crescente costo computazionale associato a una maggiore rigorosità della soluzione numerica ottenuta. (Figura 2.5) L'approccio URANS presenta quindi il costo computazionale più basso fino ad arrivare al DNS che è invece il più costoso.

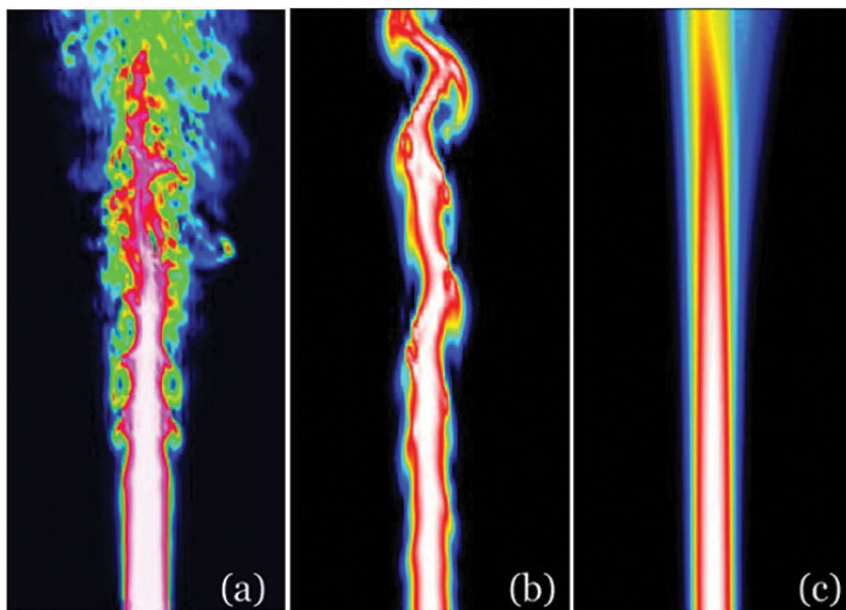


Figura 2.5: Definizione di fiamma negli approcci DNS (a), LES (b) e URANS (c)

^{IV}Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

Il metodo URANS permette di ricavare solo i valori medi delle grandezze che caratterizzano il flusso, essendo le equazioni utilizzate in tale metodo ottenute attraverso delle operazioni di mediazione temporale delle equazioni di Navier-Stokes, dell'energia e delle specie. É inoltre richiesta la chiusura di alcuni termini. L'operazione di mediazione temporale introduce all'interno delle equazioni dei termini addizionali che richiedono di essere opportunamente modellati. Ciò rappresenta il principale svantaggio di questo approccio, d'altro canto le limitate risorse computazionali richieste lo rendono interessante per lo studio di geometrie complesse. Per tale ragione è di fatto la metodologia più comunemente impiegata in ambito industriale.

Il livello di dettaglio immediatamente superiore è rappresentato dall'approccio LES. A differenza del metodo precedente i vortici turbolenti di dimensioni maggiori vengono calcolati in maniera esplicita, mentre quelli di dimensione inferiore sono rappresentati da modelli di sottogriglia. Le equazioni LES sono ricavate tramite un'operazione di filtraggio spaziale a partire dalle equazioni di conservazione originali.

Il massimo livello di dettaglio è raggiunto dall'approccio DNS che risolve le equazioni di Navier-Stokes, dell'energia e delle specie in modo rigoroso, senza alcuna manipolazione semplificativa. Sono quindi risolte esplicitamente tutte le scale turbolente, da cui il costo computazionale estremamente elevato. Ciò consente all'approccio DNS di descrivere rigorosamente le variazioni delle variabili osservate dovute alle oscillazioni turbolente. (Figura 2.6) Tali peculiarità lo relegano a impiego esclusivamente accademico.

Nella DNS sono quindi risolte tutte le frequenze spaziali, nella LES solo le più

grandi fino ad una frequenza di “cut off” mentre le più piccole sono modellate, nelle URANS sono risolte solo le variabili medie.

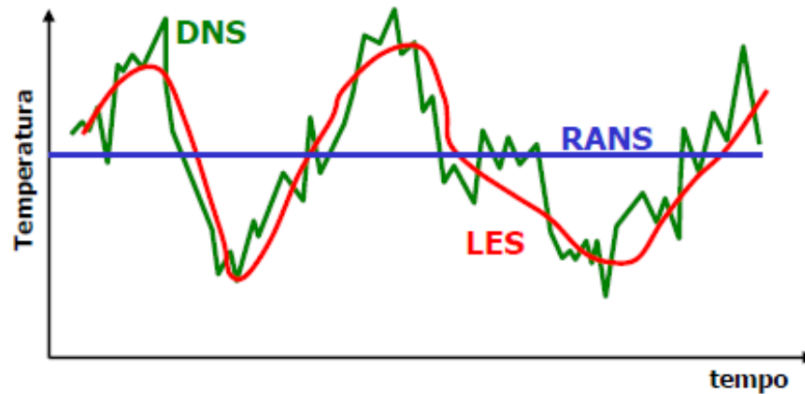


Figura 2.6: Oscillazioni turbolente negli approcci DNS, LES, URANS

2.3.1 LES - Large Eddy Simulation

Gli approcci URANS benchè ampiamente utilizzati hanno dei limiti intrinseci nella descrizione dei flussi turbolenti oltre un certo livello di dettaglio, rendoli a volte incapaci di cogliere aspetti caratteristici di particolari tipi di moto. Limite principale di questo tipo di simulazione è l'assenza di distinzione tra vortici di grandi e di piccole dimensioni, nonostante le loro diverse caratteristiche. I vortici di grandi dimensioni sono anisotropici e dipendenti dalla geometria e dalle condizioni al contorno. I vortici di piccole dimensioni hanno invece proprietà particolari per cui assumono un comportamento universale poco dipendente dalla geometria e isotropico, se il numero di Reynolds è abbastanza alto. É evidente come questo tipo di approccio in cui tutti i vortici sono descritti attraverso un unico modello di turbolenza pone seri limiti alla generalità e applicabilità del metodo URANS.

La LES si basa dunque sul calcolo attraverso una simulazione non stazionaria

dei vortici di dimensioni maggiori, e della modellazione di quelli di dimensione minore. Si effettua un'operazione di filtraggio delle operazioni di conservazione e di trasporto in modo da separare i vortici di piccola scala da quelli di grande scala. É quindi prevista la scelta di un filtro opportuno caratterizzato da una certa ampiezza "cut off width" in modo da risolvere tutti i vortici di dimensione caratteristica maggiore dell'ampiezza del filtro stesso. Così facendo le informazioni relative i vortici più piccoli vengono perse. Il loro effetto sul flusso viene descritto attraverso un modello di sottogriglia. Vengono quindi introdotti nelle equazioni filtrate degli sforzi turbolenti di sottogriglia. Se si usa il metodo dei volumi finiti le equazioni filtrate vengono risolte sulla griglia di calcolo che agisce da filtro. In questo modo si caratterizza in maniera molto dettagliata il flusso medio e tutti i vortici che hanno una scala maggiore dell'ampiezza del filtro. La LES è quindi una tecnica utilizzata per modellare i processi dissipativi che si verificano a scale di lunghezza inferiore a quelle che sono invece esplicitamente risolte sulla griglia numerica che agisce da filtro.

2.3.1.1 I filtri

Nelle simulazioni LES il filtro ha il fine di separare i vortici di grandi dimensioni da quelli di dimensioni inferiori.

Il filtro spaziale è definito come:

$$\bar{\psi}(x, t) = L \iiint_{-\infty}^{+\infty} L(x, x', \Delta) \psi(x', t) dx' dx'_2 dx'_3 \quad (2.53)$$

Dove:

$L(x, x', \Delta)$	Kernel o filter function
$\bar{\psi}(x, t)$	Funzione filtrata
$\psi(x', t)$	Funzione originale (non filtrata)
Δ	Ampiezza del filtro

Questa operazione è fatta su base spaziale.

Il filtro più comunemente utilizzato nelle simulazioni LES basate sui volumi finiti è il “top hat” o “box filter”:

$$L(x, x', \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & |x - x'| \leq \Delta/2 \\ 0 & |x - x'| > \Delta/2 \end{cases} \quad (2.54)$$

Due filtri che sono utilizzati in ambito accademico sono il “Gaussian filter” e lo “Spectral cut off”, rispettivamente:

$$L(x, x', \Delta) = \left(\frac{\gamma}{\pi \Delta^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\gamma \frac{|x - x'|^2}{\Delta^2} \right) \quad (2.55)$$

$$L(x, x', \Delta) = \prod_{i=1}^3 \frac{\sin \left(\frac{|x_i - x'_i|}{\Delta} \right)}{|x - x'|} \quad (2.56)$$

L’ampiezza di “cut off” del filtro Δ è una misura indicativa delle dimensioni minime dei vortici che possono essere risolti dalla simulazione e in modo complementare è la dimensione massima dei vortici che vengono modellati. Nel metodo dei volumi finiti è inutile scegliere un filtro la cui dimensione sia inferiore alla di-

mensione caratteristica del passo di griglia. Solitamente si assume come ampiezza di “cut off” del filtro la dimensione caratteristica della cella di calcolo. In calcoli tri-dimensionali, se le celle non sono perfettamente cubiche ma hanno lati di lunghezze diverse $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ si assume che:

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.57)$$

L’azione del filtro porta quindi a una semplificazione delle caratteristiche del moto. La dimensione del filtro consente perciò di rimuovere una quantità più o meno grande di informazioni dal segnale originale semplificando la rappresentazione numerica del flusso. (Figura 2.7) D’altro canto se la riduzione della quantità di informazioni è eccessiva si rischia una rappresentazione insoddisfacente e quindi inutilizzabile.

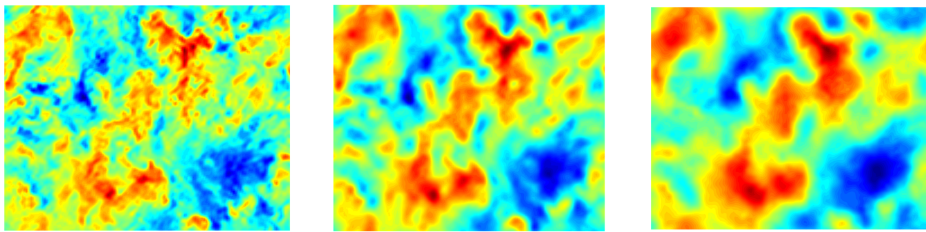


Figura 2.7: Influenza della dimensione di filtro sulla precisione dei risultati

2.3.1.2 Filtraggio delle equazioni di Navier–Stokes per fluidi incomprimibili

Si applica l’operazione di filtraggio alle equazioni di Navier–Stokes.

Si considera un filtro lineare $L(\xi, \eta)$ definito come:

$$\bar{\psi}(x, t) = L(\psi)(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dx' L(x - x', t - t') \psi(x', t') = Lt' \quad (2.58)$$

Dove il “kernel” del filtro, $L(\xi, \eta)$, è assunto normalizzato cioè:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dx' L(x', t') = 1 \quad (2.59)$$

Vengono considerati solo filtri per cui $L(\xi, \eta)$ sia maggiore di 0 se η maggiore di 0, ovvero filtri in grado di filtrare solo sui tempi passati e non nel futuro. Nella LES classica si considera solo un filtraggio spaziale e non temporale, cioè $L(\xi, \eta) = L(\xi)\delta(\eta)$ dove δ indica la funzione delta di Dirac. Sono applicabili le seguenti proprietà:

$$\overline{\frac{\partial f}{\partial t}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} \quad (2.60)$$

$$\overline{\nabla f} = \nabla \bar{f} \quad (2.61)$$

Si può quindi dimostrare che un filtro lineare integrale gode della proprietà commutativa rispetto alla derivazione temporale dell’operatore. La proprietà commutativa consente di arrivare a delle equazioni filtrate estremamente semplici.

Applicando il filtro alle equazioni di Navier–Stokes:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \nabla(\bar{v}\bar{v}) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{v} \quad (2.62)$$

Il termine di accumulo e quello diffusivo possono essere riscritti sulle variabili filtrate. Lo stesso per il termine di pressione. Al contrario il termine convettivo non può essere espresso come il prodotto delle due grandezze filtrate, se non introducendo un termine supplementare:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \nabla(\bar{v}\bar{v}) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \nabla \underline{\underline{\tau}}^{sgs} \quad (2.63)$$

Il termine $\rho(\bar{v}\bar{v})$ è stato decomposto in termini di $\rho(\bar{v}\bar{v})$ e di tensore degli sforzi turbolenti $\underline{\underline{\tau}}^{sgs}$:

$$\tau^{sgs} = \rho(\bar{v}\bar{v} - \bar{v}\bar{v}) \quad (2.64)$$

L'equazione ottenuta governa la conservazione della quantità di moto e l'evoluzione spaziale e temporale della velocità. Per poter stimare $\underline{\underline{\tau}}^{sgs}$ è necessario conoscere contemporaneamente v e \bar{v} . Tuttavia in una simulazione LES non si ha accesso diretto alla soluzione di v . D'altra parte l'equazione può essere risolta solo se il tensore viene espresso in forma chiusa, ovvero in funzione \bar{v} di soltanto. Per ovviare al problema della chiusura degli sforzi turbolenti, sono stati proposti diversi approcci noti come modelli di sottogriglia. Il nome deriva dal fatto che la modellazione coinvolge strutture più piccole della dimensione di ampiezza del filtro Δ . Nella maggior parte delle simulazioni l'ampiezza del filtro è direttamente correlata al passo di griglia. Allo scopo di arrivare ad un buon modello di sottogriglia è quindi necessario avere una conoscenza dettagliata delle proprietà fisiche delle strutture turbolente più piccole del passo di griglia.

2.3.1.3 Filtraggio delle equazioni di Navier–Stokes per fluidi comprimibili

Nel caso di un fluido a densità variabile è necessario fare alcune considerazioni preliminari. Per applicare il filtro convolutivo di base, L , all'equazione di continuità in forma generale è necessario sviluppare il termine $\overline{\nabla \rho v}$. È possibile utilizzare ρ e

\bar{v} come variabili di base nella formulazione comprimibile e inserire un termine di sottogriglia nell'equazione di continuità. Tale termine deve essere modellato. Ciò non è confortevole dal punto di vista numerico, è quindi necessario ricorrere ad un "filtro materiale" o "filtro di Favre".

$$\tilde{\psi} = \frac{\overline{\rho\psi}}{\bar{\rho}} = \frac{L(\rho\psi)}{L(\rho)} = L_p(\psi) \quad (2.65)$$

Dove:

L_p Operatore filtro di Favre

Utilizzando L_p , che corrisponde all'operatore L , si può riscrivere l'equazione in una forma molto più semplice. Essendo $\overline{\rho v} = \bar{\rho} \tilde{v}$ se gli effetti di comprimibilità sono trascurabili si ha che $\tilde{v} \rightarrow \bar{v}$. Si arriva quindi all'equazione di conservazione della quantità di moto usando $\bar{\rho}$ e \tilde{v} come variabili di riferimento. Il termine più difficilmente trattabile è quello convettivo a causa della non linearità $\overline{\rho v v}$.

Sfruttando le proprietà dell'operatore di Favre si ha:

$$\overline{\rho v v} = \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v} = \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v} + (\bar{\rho}(\tilde{v} \tilde{v} - \tilde{v} \tilde{v})) \quad (2.66)$$

Introducendo un tensore degli sforzi turbolenti comprimibili:

$$\frac{\tau^{sgs}}{\bar{\rho}} = \tilde{v} \tilde{v} - \tilde{v} \tilde{v} = [L_p, \pi] (\tilde{v}, \tilde{v}) \quad (2.67)$$

Il tensore degli sforzi turbolenti per flussi comprimibili ha la medesima espressione trovata nel caso incomprimibile, se si sostituisce all'operatore L l'operatore L_p .

In questo caso il termine viscoso implica la presenza di termini supplementari essendo la viscosità funzione della temperatura e della composizione. Per tenere conto di tali variazioni è necessario introdurre dei termini aggiuntivi nelle equazioni.

Il tensore degli sforzi per un fluido Newtoniano è:

$$\underline{\underline{\tau}} = -\mu \left(\nabla_o v + (\nabla_o v)^T \right) + \left(\frac{2}{3}\mu - k \right) (\nabla v) \underline{\underline{\delta}} = -\mu(T, \omega) \underline{\underline{S}}(v) \quad (2.68)$$

È necessaria la scrittura di $\bar{\tau}_{ij} = \overline{\mu(T, \omega) S_{ij}}$ in funzione delle variabili di base filtrate. Ciò non è possibile trattandosi di un termine non lineare, quindi l'operazione di filtraggio implica necessariamente l'introduzione di un termine addizionale.

Si può però decomporre $\bar{\tau}_{ij}$ come:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu(\bar{T}, \tilde{\omega}) S_{ij}(\tilde{v}) + \{ \bar{\tau}_{ij} - \check{\tau}_{ij} \} \quad (2.69)$$

Ciò comporta l'introduzione di un termine di sottogriglia $\bar{\tau}_{ij} - \check{\tau}_{ij}$. In tal modo si evidenzia la presenza dei termini addizionali viscosi a cui si è fatto riferimento precedentemente. Le equazioni filtrate sono quindi:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho} \tilde{v}) = 0 \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{v}}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v}) = -\nabla \bar{p} - \nabla \underline{\underline{\check{\tau}}} - \nabla \underline{\underline{\tau}}^{sgs} - \nabla(\underline{\underline{\bar{\tau}}} - \underline{\underline{\check{\tau}}}) \quad (2.71)$$

Tale approccio è utilizzabile per filtrare una qualsiasi equazione di trasporto.

2.3.1.4 Il modello di Smagorinsky

Tale modello è usato per ovviare al problema della chiusura degli sforzi e tra i vari modelli esistenti è il più semplice. Gli sforzi di Reynolds sono assunti proporzionali al tensore delle velocità di deformazione calcolato sulle velocità filtrate

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right);$$

$$R_{ij} = -2\mu^{sgs} e_{ij} + \frac{1}{3} R_{ii} \delta_{ij} = -\mu^{sgs} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} R_{ii} \delta_{ij} \quad (2.72)$$

Dove:

μ^{sgs} Viscosità dinamica di sottogriglia

Il termine $\frac{1}{3} R_{ii} \delta_{ij}$ permette di ritrovare la definizione di energia cinetica turbolenta nel caso in cui questa venga calcolata a partire dalla traccia della matrice R_{ij} . Questo modello è ampiamente utilizzato nei lavori LES, associato agli sforzi di Reynolds e agli sforzi incrociati.

Di seguito sono illustrati i software utilizzati nel lavoro di tesi, evidenziandone le diverse peculiarità:

1. FDS;
2. OpenFOAM;
3. Blender.

Per eventuali approfondimenti si rimanda ai rispettivi manuali, siti e forum. [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]

Tutti i software utilizzati nel presente lavoro sono open source. I primi due, FDS e OpenFOAM, sono dei risolutori CFD mentre Blender è un software di creazione grafica 3D, utilizzato nelle fasi di pre e postprocessing. Essendo FDS l'attuale riferimento per la simulazione di incendi, è stato impiegato come verifica e convalida dei risultati ottenuti con OpenFOAM.

2.4 FDS - Fire Dynamics Simulator

FDS è un software di modellazione CFD sviluppato dal BFRL^V e dal NIST^{VI}, per la simulazione di flussi reattivi turbolenti tramite l'impiego di modelli di tipo LES. In questo lavoro di tesi è stata utilizzata la versione 5 resa disponibile nel febbraio del 2000.

La simulazione del fenomeno tramite FDS viene descritta prendendo in considerazione diverse caratteristiche tra cui la radiazione termica e la presenza di particelle lagrangiane, utilizzate per individuare il movimento dei fumi o lo scarico da sprinkler e spruzzatori. In questo modo lo sviluppo del software ha come obiettivo la risoluzione di problemi pratici d'incendio nell'ambito dell'ingegneria della sicurezza, e si pone allo stesso tempo come strumento per lo studio della fluidodinamica e della combustione.

Oggi FDS viene utilizzato per modellare diversi fenomeni:

1. trasporto a bassa velocità di calore e prodotti di combustione della fiamma;
2. scambio termico radiativo e convettivo tra il gas e le superfici solide;
3. pirolisi di combustibili solidi;
4. propagazione della fiamma e sviluppo dell'incendio;
5. attivazione di sprinkler e di rilevatori di calore o di fumo.

FDS è dotato di un software aggiuntivo, SmokeView, che permette di visualizzare in forma grafica i risultati delle simulazioni effettuate in modo da fornire un'interfaccia

^VBuilding and Fire Research Laboratory

^{VI}National Institute of Standards and Technology

tridimensionale del fenomeno fisico. Così facendo viene data la possibilità di analizzare anche in modo qualitativo la fiamma generata ed il propagarsi dell'incendio nell'ambiente simulato.

Nel codice sorgente del programma Rehm e Baum hanno sviluppato una forma approssimata delle equazioni di Navier-Stokes allo scopo di descrivere fenomeni d'incendio caratterizzati da bassa velocità, dominati dalla convezione naturale, dall'energia termica rilasciata e dalle forze di galleggiamento. Così facendo si alleggeriscono di gran lunga i tempi di calcolo in quanto il fenomeno viene descritto attraverso le caratteristiche peculiari di un incendio, trascurando così altri fenomeni fisici che descrivono la fluidodinamica del sistema. Queste equazioni semplificate prendono il nome di "Equazioni della combustione per bassi numeri di Mach". Le derivate parziali delle equazioni di conservazione della massa, dei momenti e dell'energia vengono approssimate alle differenze finite e la soluzione viene aggiornata nel tempo per ogni cella di una griglia rettilinea, tridimensionale e strutturata, che può essere esclusivamente di forma rettangolare. Il raffinamento della griglia di calcolo dipende dall'accuratezza desiderata ma ovviamente comporta un aumento dei tempi computazionali.

2.4.1 Descrizione del modello

Nel modello di FDS vengono implementate le equazioni di trasporto per un sistema fluido reattivo tramite un set di equazioni differenziali alle derivate parziali costituito da sei equazioni in sei incognite, tutte funzioni del tempo e delle tre dimensioni dello spazio. Le incognite del problema sono:

1. la densità ρ ;
2. le tre componenti della velocità $v = (u, v, w)$;
3. la temperatura T ;
4. la pressione p .

A queste è necessario aggiungere la mixture fraction e la corrispondente equazione di trasporto.

Le equazioni di trasporto vengono discretizzate tramite uno schema numerico appropriato che tiene conto solo dei valori della variabile d'interesse in corrispondenza di punti particolari della griglia di calcolo. Viene usato il "metodo alle differenze finite" per la risoluzione delle equazioni di conservazione, e il "metodo dei volumi finiti" per la risoluzione dell'equazione RTE^{VII}.

2.4.1.1 Caratteristiche principali

Di seguito le principali caratteristiche del codice di FDS.

Modello idrodinamico FDS risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per flussi reattivi a bassa velocità, mettendo in rilievo i fenomeni di trasporto di calore e dei fumi dalla fiamma. Il fulcro dell'algoritmo consiste in uno schema esplicito di tipo "predictor-corrector", accurato al secondo ordine nel tempo e nello spazio.

^{VII}Radiative Transport Equation

Di default la turbolenza viene trattata tramite l'approccio LES nella forma di Smagorinsky. È possibile tuttavia fare una DNS se la griglia di calcolo è sufficientemente raffinata.

Modello di combustione In generale FDS utilizza una reazione a singolo stadio nella quale i prodotti vengono descritti tramite un modello mixture fraction a due parametri. Il concetto di mixture fraction viene definito come lo scalare passivo della frazione di gas in un dato punto del dominio fluido facente parte, almeno originariamente, della corrente di combustibile. Le frazioni massive di reagenti e prodotti vengono ricavate dalla frazione di miscela mediante le cosiddette "relazioni di stato", ottenute da una combinazione di analisi semplificate e di misurazioni. Può essere usata una reazione a due stadi con un modello mixture fraction a tre parametri nel quale nel primo step si ha l'ossidazione del combustibile a dare monossido di carbonio mentre nel secondo step il monossido di carbonio viene ossidato ad anidride carbonica.

Modello radiativo Lo scambio termico radiativo è incluso nel modello tramite la soluzione della corrispondente equazione di trasporto RTE per un gas grigio^{VIII}. In alcuni casi l'assunzione di gas grigio può essere sostituita con un modello wide-band per ottenere una miglior accuratezza spettrale. La RTE viene risolta utilizzando un metodo ai volumi finiti con approssimativamente 100 angoli solidi, il che implica un modesto utilizzo della CPU data la complessità del modello di radiazione per scambio del calore. I coefficienti di assorbimento della frazione del gas-soot vengono calcolati usando il modello narrow-band. Si tiene in considerazione inoltre

^{VIII}Un gas a emissività costante su tutto lo spettro elettromagnetico

il fatto che le gocce di liquido possono assorbire ed emettere radiazioni termiche in modo da simulare al meglio i modelli di sprinkler.

Mesh Viene impiegata una mesh strutturata 3D di forma poligonale. Le equazioni di trasporto vengono quindi approssimate in una o più griglie di calcolo di geometria rettilinea. Se nel dominio di calcolo esistono ostacoli solidi, essi sono forzati a conformarsi alla griglia sottostante. É quindi necessario porre particolare attenzione a tale aspetto nella fase di preprocessing per una corretta definizione della geometria. Ci si trova costretti ad adattare la geometria del caso studio al passo di griglia utilizzato.

Processi in parallelo Tramite l'MPI^{IX} è possibile svolgere simulazioni in parallelo con l'utilizzo di più processori andando a ridurre sensibilmente il tempo di calcolo necessario. L'utente deve definire un numero di mesh pari al numero di processori che si vuole utilizzare. Bisogna inoltre porre particolare attenzione alla definizione dei diversi passi di griglia in modo da non avere eccessiva discontinuità tra mesh adiacenti, con conseguenti errori di simulazione.

Condizioni al contorno A tutte le superfici solide vengono assegnate determinate condizioni al contorno di carattere termico, oltre alle informazioni relative al comportamento del materiale in caso di combustione. Lo scambio termico e massivo con le superfici solide viene trattato in genere utilizzando delle correlazioni empiriche. Nel caso DNS, è possibile valutarli in modo diretto dalle informazioni fluidodinamiche. FDS prevede la possibilità di valutare i flussi termici all'interno degli ostacoli

^{IX}Message Passing Interface

solidi, nei quali si estende la mesh di calcolo. La definizione delle proprietà dei materiali è quindi di fondamentale importanza.

Sprinklers e rivelatori L'attivazione degli eventuali sprinklers e dei rivelatori di calore e di fumo è modellata utilizzando delle semplici correlazioni. Gli spray provenienti dagli sprinklers vengono trattati come particelle lagrangiane, le quali vanno a rappresentare un campione delle gocce d'acqua emesse.

2.4.1.2 Limitazioni principali

Sebbene FDS possa essere utilizzato per la modellazione di vari scenari coinvolgenti fenomeni d'incendio, bisogna tenere conto delle limitazioni presenti in ciascuno dei suoi algoritmi. Alcune delle più importanti vengono enunciate di seguito:

Assunzione di flusso a bassa velocità L'utilizzo di FDS è limitato a flussi a numero di Mach inferiore a 0,3. Dunque il modello non può essere utilizzato per flussi a velocità che si avvicina a quella del suono, come in esplosioni o detonazioni, dove sarebbe necessario considerare anche gli effetti della comprimibilità del fluido. Tale assunzione è stata fatta col fine di rendere più agevoli le simulazioni d'interesse pratico in quanto per alti numeri di Mach si richiederebbero time steps estremamente piccoli.

Mesh L'efficienza di FDS è dovuta alla semplicità della griglia computazionale rettilinea utilizzata e all'impiego di un risolutore veloce e diretto per il campo di pressione. Questo può però costituire una limitazione qualora alcuni elementi della geometria non possano adattarsi a una forma rettangolare. Esistono varie tecniche

per superare il problema, tuttavia, se la risoluzione della griglia è sufficientemente fine, un contorno curvilineo può essere approssimato da piccole e numerose celle rettangolari.

Propagazione di fiamma e sviluppo dell'incendio Il modello implementato in FDS può essere utilizzato in modo affidabile quando la velocità di rilascio dell'HRR^X viene specificata dall'utente e quando lo scopo della simulazione è valutare il trasporto di calore ed i prodotti della combustione. In questi casi, per quanto riguarda i flussi di velocità e temperatura, il modello ha degli scostamenti dai dati sperimentali nell'intorno del 10-20% a seconda dell'accuratezza della griglia di calcolo. Per incendi dove l'HRR viene calcolato piuttosto che specificato, si ha un incremento dell'incertezza del modello per diverse ragioni:

1. le proprietà reali dei materiali e dei combustibili sono spesso sconosciute e difficili da riprodurre;
2. i processi fisici di combustione, radiazione e scambio di calore nella fase solida sono molto complicati e le loro rappresentazioni matematiche in FDS sono semplificate;
3. i risultati delle simulazioni sono sensibili sia a parametri fisici che numerici.

Modello di combustione Il modello utilizzato assume che la combustione sia controllata dalla miscelazione, pertanto non appena i reagenti entrano in contatto danno origine al fenomeno in questione. Tuttavia, questa non è una buona assunzione nel caso di compartimenti non sufficientemente ventilati oppure in presenza di un

^XHeat Release Rate

agente di soppressione come vapor d'acqua o CO_2 . In questi casi combustibile e ossidante possono miscelarsi senza reagire, secondo dei criteri empirici. La modellazione di sottogriglia dei fenomeni di estinzione utilizza inoltre delle regole empiriche che non consentono la combustione quando l'atmosfera circostante non è in grado di sostenerla. Vi è infine l'impossibilità di tenere in considerazione meccanismi cinetici dettagliati e dunque la conseguente condensazione della cinetica in una reazione globale.

Modello radiativo Il trasferimento di calore di radiazione è incluso nel modello tramite la risoluzione della RTE per gas grigi e, in alcuni casi, tramite il modello wide-band. La RTE viene risolta tramite il metodo dei volumi finiti per trasporti convettivi.

Questo modello porta a diverse limitazioni:

1. i coefficienti di assorbimento del fumo sono complesse funzioni della sua composizione e temperatura e, a causa della semplificazione del modello di combustione, la composizione chimica del fumo e in particolare la frazione di soot influenza sia l'assorbimento che l'emissione delle radiazioni termiche;
2. il trasporto radiativo viene discretizzato con circa 100 angoli solidi, pertanto, per ricettori lontani dalla sorgente localizzata di radiazione, la discretizzazione può portare a una distribuzione non uniforme dell'energia radiativa. Questo errore può essere evidenziato dalla visualizzazione dei campi di temperatura superficiali, dove degli hot spots mostrano l'effetto del numero finito di angoli solidi. Il problema si può risolvere aumentando il numero di angoli solidi a spese del tempo computazionale.

2.5 OpenFOAM - Open source Field Operation

And Manipulation

OpenFOAM è un software di modellazione CFD strutturato in moduli, tramite il linguaggio C++, in modo da offrire diversi risolutori in grado di simulare specifici problemi ingegneristici. Nel presente lavoro di tesi è stata utilizzata la versione 2.2.2 resa disponibile il 14 ottobre 2013. Il software mette a disposizione svariati risolutori preconfigurati, utilities e librerie che hanno la caratteristica di poter essere modificati a piacimento in modo da adattarsi al meglio alle richieste dell'utente. Una delle caratteristiche peculiari di OpenFOAM è infatti la sua struttura, (Figura 2.8) organizzata in modo da avere un codice sorgente modificabile dall'utente stesso.

Le applicazioni all'interno del software si dividono principalmente in due categorie:

1. i solvers, implementati per simulare i problemi specifici;
2. le utilities, per l'analisi dei dati e per facilitare il pre e postprocessing.

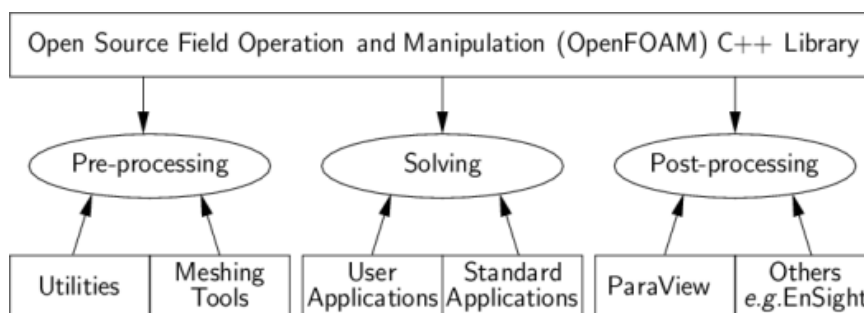


Figura 2.8: Struttura generale di OpenFOAM

2.5.1 La struttura generale

La generica simulazione, in OpenFOAM, si struttura nelle seguenti tre cartelle iniziali. (Figura 2.9)

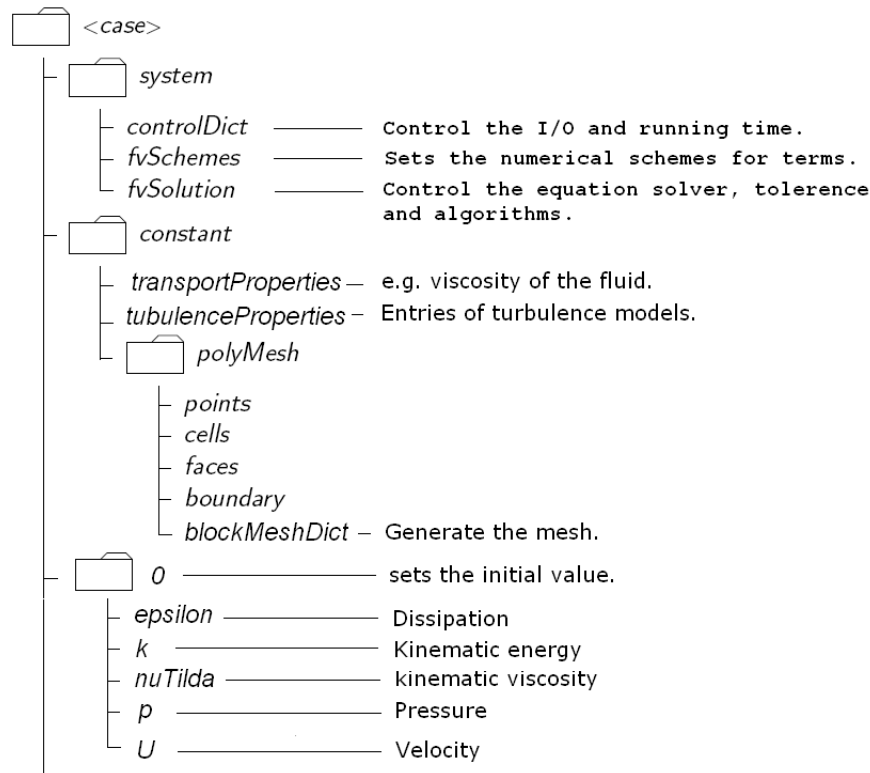


Figura 2.9: Struttura generale della simulazione

2.5.1.1 System

Vi si trovano i dati relativi la risoluzione numerica della simulazione. Contiene almeno tre file:

1. controlDict, dove vengono scritti tutti i parametri di controllo incluso il tempo di inizio e fine simulazione, il passo temporale e tutti gli output che si vogliono ricavare. Ogni variabile può essere cambiata mentre la simulazione è in corso, sospendendola solo momentaneamente;

2. fvSchemes, dove vengono scelti i tipi di schemi di discretizzazione usati;
3. fvSolution, dove per ogni variabile viene scelto il tipo di risolutore, le tolleranze ed altri parametri specifici.

2.5.1.2 Constant

Contiene una descrizione completa della mesh utilizzata nella sottocartella poli-Mesh e tutti i file necessari per la descrizione delle proprietà fisiche tra cui:

1. transportProperties, dove vengono inserite le proprietà del fluido;
2. turbulenceProperties, dove si trovano le costanti per il modello turbolento usato.

2.5.1.3 0

Consiste in una cartella “temporale” relativa al time step iniziale, 0. Contiene i file relativi le variabili del caso dove vengono specificati i valori iniziali e le condizioni al contorno. Nel corso della simulazione vengono create altre cartelle “temporali” in corrispondenza di ogni “tempo di scrittura”, settato nel file controlDict. I loro nomi corrispondono ai “tempi di scrittura” stessi. In queste cartelle sono scritti i risultati della simulazione descrivendo quindi l’andamento delle variabili nel dominio per la sua intera durata.

2.5.2 La mesh

La mesh è una parte integrante della risoluzione numerica e deve soddisfare alcuni criteri per assicurare una valida ed accurata convergenza. Durante ogni simula-

zione OpenFOAM controlla sempre che la mesh soddisfi una serie di condizioni necessarie. Di default il software definisce una mesh formata da celle 3D arbitrarie e poliedriche, legate da facce poligonali. Le celle hanno un numero illimitato di facce e, per ogni faccia, non c'è limite di vertici né nessuna restrizione riguardo il loro allineamento. Ogni blocco contenente la mesh viene descritto tramite otto vertici e dodici spigoli attraverso un sistema di coordinate locali, (x_1, x_2, x_3) , che deve rispettare la regola della mano destra. (Figura 2.10)

Il sistema di coordinate locali viene imposto in modo che i vertici presenti nel blocco vengano definiti nel seguente modo:

1. le origini degli assi vengono definite dal primo vertice, vertice 0 nel nostro esempio;
2. l'asse x_1 viene definito passando dal vertice 0 al vertice 1;
3. l'asse x_2 viene definito passando dal vertice 1 al vertice 2;
4. i vertici 0, 1, 2 e 3 definiscono il piano $x_3 = 0$;
5. l'asse x_3 viene definito passando dal vertice 0 al vertice 4;
6. i vertici 5, 6 e 7 sono rispettivamente analoghi ai vertici 1, 2 e 3.

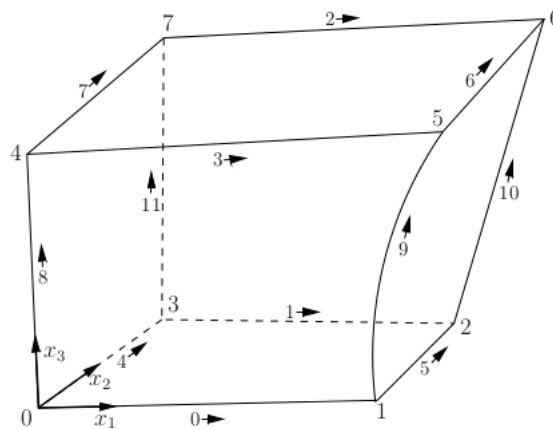


Figura 2.10: Sistema di coordinate locali

La descrizione della mesh con la sua struttura generale si trova nella cartella polyMesh.

Questo tipo di struttura generale offre grande libertà nella generazione e manipolazione della mesh permettendo di descrivere in modo accurato anche scenari molto complessi. Tuttavia ciò comporta una maggior complessità nel convertire la mesh usando i sistemi tradizionali.

2.5.2.1 SnappyHexMesh

Nel presente elaborato per definire meglio la geometria del sistema è stata utilizzata la funzione “SnappyHexMesh” che genera mesh complesse di esaedri e rompe automaticamente celle esaedriche in superfici triangolari. Così facendo la mesh viene ridefinita attraverso un sistema di iterazioni in modo da approssimarsi alle superfici geometriche presenti. (Figura 2.11) Il affinamento è molto flessibile e la gestione delle superfici viene definita tramite valori predefiniti dall’utente. La funzione “SnappyHexMesh” ha inoltre l’effetto di eliminare la griglia di calcolo in corrispondenza

degli ostacoli geometrici presenti. È di conseguenza impossibile valutare i flussi termici all'interno dei corpi solidi.

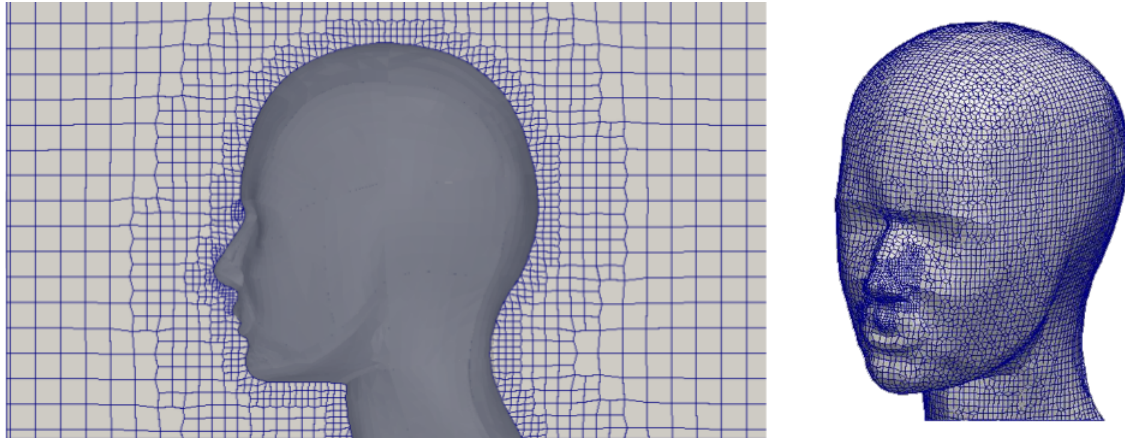


Figura 2.11: SnappyHexMesh

2.5.3 Il solver FireFOAM

OpenFOAM usa un metodo numerico ai volumi finiti, all'interno dei solver implementati, per la risoluzione di equazioni differenziali tramite mesh non strutturate. I risolutori di flussi fluidi sono sviluppati tramite una struttura robusta, implicita ed iterativa e vi è la possibilità di decomporre i domini per la risoluzione in parallelo delle simulazioni.

In questo elaborato di tesi si è utilizzato il solver standard FireFoam. Di seguito sono illustrate le sue caratteristiche principali.

2.5.3.1 Equazione generale

Il fluido comprimibile, multifase e turbolento viene descritto tramite una serie di equazioni cardine di continuità, del momento, di energia e di stato per ogni specie

simulata. Queste equazioni possono essere rappresentate con una forma generale per il trasporto di uno scalare, Φ , secondo la seguente espressione:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\Phi\vec{u}) = \nabla\vec{Q}_S(\Phi) + Q_V(\Phi) + Q_D(\Phi) \quad (2.73)$$

Dove:

\vec{u}	Velocità del fluido
ρ	Densità del fluido
$\vec{Q}_S(\Phi)$	Flusso netto diffusivo di Φ
$Q_V(\Phi)$	Generazione di Φ
$Q_D(\Phi)$	Generazione di Φ dovuta allo scambio interfase

2.5.3.2 Modello di combustione

La combustione turbolenta per una tipica simulazione di fiamma viene descritta sufficientemente bene tramite l'EDM^{XI}.^[17] Così facendo la chimica della combustione viene descritta tramite un modello "infinitely fast" con una reazione a singolo stadio, in modo da garantire il valore nominale dell'HRR, senza predire la formazione di intermedi difficilmente analizzabili a causa della scarsità di dati sperimentali. Nel modello utilizzato la velocità di consumo dei reagenti è determinata da un'ipotesi di miscelazione turbolenta, data la seguente equazione:

^{XI}Eddy Dissipation Model

$$\overline{\rho\dot{\omega}} = C\bar{\rho}\frac{1}{\tau_t} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}, \beta\frac{\tilde{Y}_P}{(1+s)}\right) = C\bar{\rho}\frac{\epsilon}{k} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}, \beta\frac{\tilde{Y}_P}{(1+s)}\right) \quad (2.74)$$

Dove:

$\overline{\rho\dot{\omega}}$ Indice di consumo di combustibile

Y_o Frazione massiva di ossigeno

Y_F Frazione massiva di combustibile

Y_P Frazione massiva dei prodotti di reazione

s Indice stechiometrico

τ_t Scala temporale di miscelazione turbolenta

ϵ Indice di dissipazione della turbolenza

k Energia cinetica della turbolenza

La reazione chimica è quindi controllata dalla miscelazione turbolenta per valori di $\frac{k}{\epsilon} > 0$, ed è limitata dalle specie con minor concentrazione in accordo con la reazione globale di combustione che viene descritta. Il modello è fortemente influenzato dalla risoluzione dei fenomeni turbolenti e le limitazioni sono essenzialmente dovute alla mancanza della dipendenza dalla temperatura. Per questo il campo di validità del modello viene delimitato da un intervallo di temperature abbastanza alto in modo da non essere un fattore limitante.

2.5.3.3 Modello radiativo

Il trasferimento di calore radiativo gioca un ruolo importante nel comportamento termico di un incendio, in particolare nella simulazione del pennacchio dove si raggiungono le temperature più alte. In OpenFoam sono disponibili due differenti modelli di radiazione, il modello P1 e il modello fvDOM^{XII} basati entrambi sulle equazioni RTE. Nel caso in cui la radiazione venisse calcolata il termine sorgente, nella RTE, viene posto uguale a zero. Nonostante il modello fvDOM richieda tempi computazionali più alti del modello P1, permette di usare le proprietà ottiche del gas grigio in modo da considerare lo scattering, la media semitrasparente, le superfici speculari, e la dipendenza della trasmissione dalla lunghezza d'onda.

Nelle simulazioni effettuate è stato usato il modello fvDOM che è spesso necessario per la corretta analisi di incendi a scapito di un considerevole aumento del tempo computazionale. Il modello usa le stesse discretizzazioni spaziali e temporali del dominio fluido ma con l'aggiunta di discretizzazioni angolari arbitrarie per il calcolo dell'intensità radiativa. Essa aumenta a causa dell'emissione all'interno della cella e della dispersione interna nelle altre direzioni, mentre decresce a causa dell'assorbimento e dello scattering dall'esterno.

2.5.3.4 Schemi numerici e strategie di risoluzione

FireFOAM, come ogni altro risolutore di OpenFoam, usa il metodo ai volumi finiti per risolvere il sistema di equazioni attraverso una mesh non strutturata che permette la trattazione di scenari complessi. La soluzione numerica viene trovata con uno schema completamente implicito di secondo ordine. La risoluzione del campo

^{XII}finite volume Discrete Ordinate Method

di pressione si basa su un metodo PISO^{XIII} o in alternativa PIMPLE^{XIV}, il quale è sufficientemente stabile da poter velocizzare la simulazione imponendo un alto numero di Courant, fino a un massimo di 2. Il numero di Courant esprime la relazione tra le proprietà fisiche del flusso, la griglia di calcolo e il passo temporale tramite la seguente equazione:

$$C = \bar{v} \frac{\Delta t_{max}}{\Delta x} \quad (2.75)$$

Dove:

C	Numero di Courant
\bar{v}	Velocità lineare media del fluido
Δt_{max}	Time step massimo
Δx	Dimensione locale di cella

La strategia adottata per l'analisi degli scenari incidentali è stata quella di far evolvere il fenomeno fino a condizioni stazionarie per poi mediare i risultati ottenuti nel tempo. Gli schemi risolutivi sono sempre del secondo ordine nel tempo e nello spazio e, anche se viene usato un risolutore implicito, è necessario assegnare un numero di Courant ragionevole per assicurare la convergenza. In questo elaborato abbiamo usato un Courant massimo di 1 in modo da garantire la soluzioni dello schema risolutivo PIMPLE.

^{XIII}Pressure Implicit with Splitting of Operators

^{XIV}PISO + SIMPLE

2.6 Confronto tra FDS e OpenFOAM

In questa breve sezione si riporta una tabella riassuntiva di confronto della caratteristiche salienti di FDS e OpenFOAM - FireFOAM, al fine di avere un quadro generale delle loro peculiarità, pregi e difetti. (Tabella 2.1)

Caratteristica	FDS	OpenFOAM - FireFOAM
Open source	✓	✓
Interfaccia grafica	NO	NO
Software di visualizzazione dati	SMV	ParaView
Personalizzazione	✓	✓
Postsolver	NO	✓
Oneri computazionali	Medio bassi	Medio alti
Equazioni risolte	Equazioni della combustione per bassi numeri di Mach	Equazioni di Navier-Stokes e di trasporto rigorose
Formulazione a numero di Mach	< 0,3	Basso
Metodo di discretizzazione	Metodo dei volumi finiti	Metodo dei volumi finiti
Approccio alla turbolenza	LES nella forma di Smagorinsky	LES nella forma di Smagorinsky
Mesh	Strutturata rettilinea di forma poligonale, 3D	Fortemente non strutturata, 2D o 3D
Modello di combustione	Reazione a singolo stadio con modello mixture fraction	"Infinitely fast" con reazione a singolo stadio (EDM)
Risoluzione della stechiometria	NO	✓
Valutazione di flussi termici nei solidi	✓	NO
Modello radiativo	RTE per un gas grigio	P1 e fvDOM (RTE)
Soot model	Resa % in soot. Default: $Y_{\text{soot}}=1\%$	NO

Tabella 2.1: Confronto tra FDS e OpenFOAM

2.7 Blender

Blender è un programma di creazione grafica 3D con il quale sono stati creati i layout dei diversi casi studio del presente lavoro, poi esportati nei due software CFD utilizzati. Per interfacciarlo con i software CFD presi in considerazione sono stati usati due differenti pacchetti:

1. BlenderFDS, realizzato da Emanuele Gissi nel Settembre del 2009; [18]
2. ODS Studio versione 1.1, della ODS Engineering, sviluppato da Mark Pitman nel 2012. [19]

Queste applicazioni sono state usate per facilitare la fase di preprocessing rispettivamente per FDS ed OpenFoam. L'impiego di Blender ha così ottimizzato la fase di creazione delle geometrie permettendo la realizzazione di layout anche molto complessi in breve tempo e con minor sforzo. Attraverso la sua interfaccia grafica è infatti possibile disegnare facilmente la geometria da analizzare, mentre con l'utilizzo dei pacchetti sopra citati si ha la possibilità di inserire le caratteristiche dei materiali e altresì alcune funzioni relative ai diversi software utilizzati.

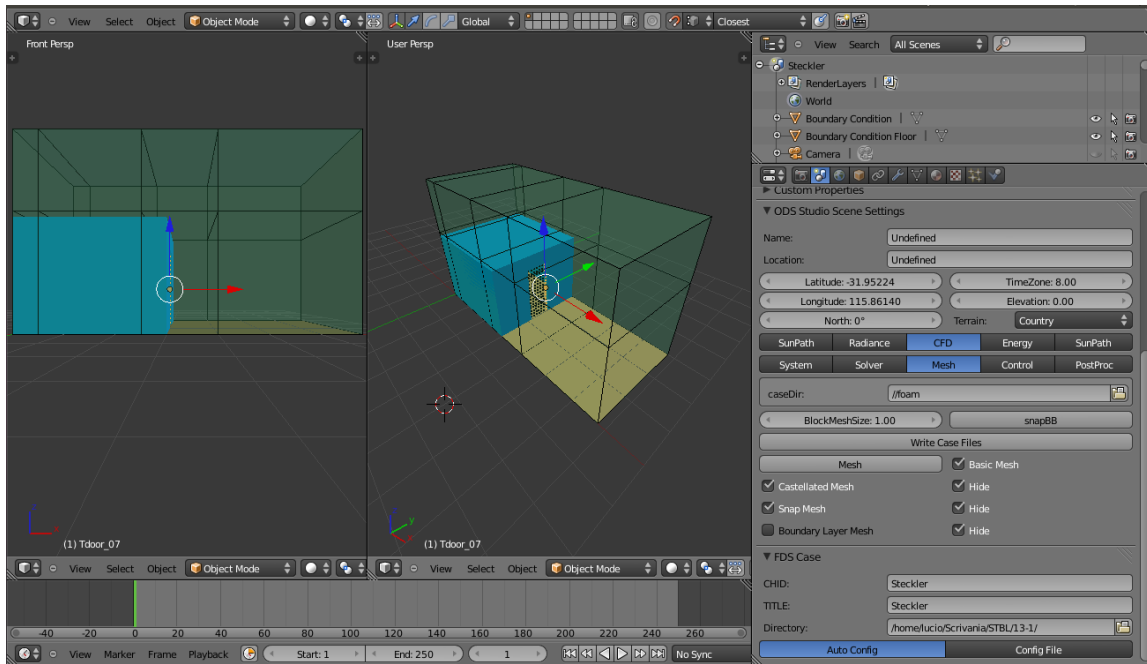


Figura 2.12: Interfaccia grafica di Blender

In figura si può notare come una volta creata la geometria la si possa esaminare in dettaglio in modo semplice e comprensibile attraverso la sua riproduzione 3D, mentre nella zona “toolBox” si possono settare tutte le caratteristiche del caso. (Figura 2.12) Una volta terminata la geometria e la definizione dello scenario si procede con l’esportazione del caso che produce un file leggibile dai software CFD considerati. Blender può essere utilizzato anche nella fase di postprocessing insieme ai due software di visualizzazione standard di OpenFOAM e FDS, rispettivamente ParaView e SMV. Esso permette la visualizzazione in modo confortevole dei risultati delle simulazioni offrendo la possibilità di manipolarli graficamente per la creazione di presentazioni più accattivanti anche in formato video. Blender permette inoltre di adattare, a piacimento dell’utente, la propria interfaccia grafica. Ciò è reso possibile dall’integrazione nel programma di una Shell in linguaggio Python con la quale è possibile programmare comandi personalizzati, per creare video ed immagini.

Capitolo 3

I casi studio

Nel seguente capitolo verranno illustrati i due casi studio affrontati in questo lavoro di tesi a cui si farà riferimento come:

1. “caso Steckler”;
2. “caso tunnel”.

Entrambi si inseriscono nello studio di incendi in ambienti confinati andando a considerare diverse configurazioni geometriche e differenti condizioni di ventilazione HVAC^I. Il primo dei due ha avuto per lo più scopo propedeutico al fine di apprendere il funzionamento dei software utilizzati e fare una prima esperienza di modellazione di fenomeni di questo tipo. Il “caso tunnel” rappresenta invece il corpo centrale del presente lavoro di tesi, nel quale è stato possibile valutare in modo più approfondito le potenzialità di FDS e in particolare di OpenFOAM. Per eventuali approfondimenti dei casi studio, si rimanda ai rispettivi articoli di riferimento [1] e [2, 3].

^IHeating, Ventilation, and Air Conditioning

3.1 Caso Steckler

Nel “caso Steckler” si è riprodotta una delle 55 prove sperimentali condotte da Steckler, et al. nel lavoro “Flow induced by fire in a compartment”. [1] E’ stato scelto questo lavoro perchè è un caso molto studiato in letteratura, già usato in precedenza da altri autori come convalida del codice FDS. Inoltre si tratta di un caso relativamente semplice dal punto di vista geometrico e delle condizioni di ventilazione, il che lo rende ideale come primo approccio ai software usati. In più le dimensioni del dominio di calcolo sono abbastanza piccole da permettere di avere risultati in breve tempo ad un costo computazionale ridotto. Infine le caratteristiche geometriche del caso lo rendono molto generico e quindi le conoscenze acquisite tramite la sua simulazione sono facilmente spendibili e generalizzabili allo studio di altri casi studio anche molto più complessi. Le 55 prove sperimentali sono state condotte a dimensioni reali portandosi in condizioni stazionarie. Lo studio si è focalizzato principalmente sulle fiamme di piccole dimensioni, che caratterizzano le fasi iniziali di sviluppo dell’incendio. É stata posta anche molta attenzione all’accuratezza delle misure effettuate di velocità e temperatura, tramite l’uso della strumentazione adeguata e di un sistema automatizzato di raccolta dati. Si è osservato come siano il flusso d’aria e di gas presenti nella stanza i fattori controllanti la temperatura e il trasferimento di calore. Essi sono i principali fattori che influenzano la propagazione e il comportamento dell’incendio.

3.1.1 Descrizione dell'esperimento

L'ambiente in cui si sono effettuate le prove sperimentali è una stanza di dimensioni $2,8 \times 2,8 \times 2,18 \text{ m}^3$ (Figura 3.1) con pareti e soffitto di spessore 10 cm ricoperti con uno strato isolante ceramico. Con tale configurazione è possibile raggiungere condizioni stazionarie nei 30 minuti seguenti l'ignizione del bruciatore a metano presente. Sono inoltre presenti sette file di dispositivi per la misurazione della temperatura e della velocità del flusso d'aria in corrispondenza del vano porta e un'ulteriore fila nell'angolo interno della stanza.

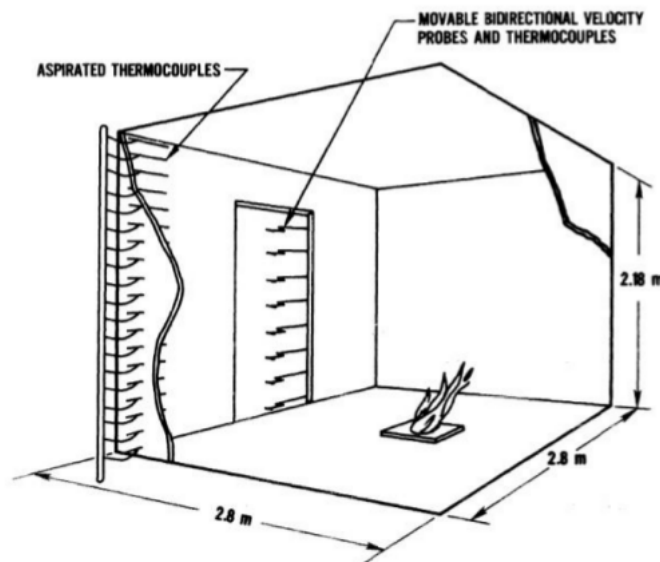


Figura 3.1: Geometria del "caso Steckler"

Nei 55 esperimenti svolti si è valutato il comportamento dell'incendio al variare di alcuni parametri caratteristici: (Figura 3.2)

1. la potenza della pool fire, con valori di 31,6, 62,9, 105,3 e 158 kW, e la sua posizione;
2. la presenza o meno di vani porta e finestra e loro dimensione;

3. la temperatura ambiente, variata dai 5 ai 35 °C.

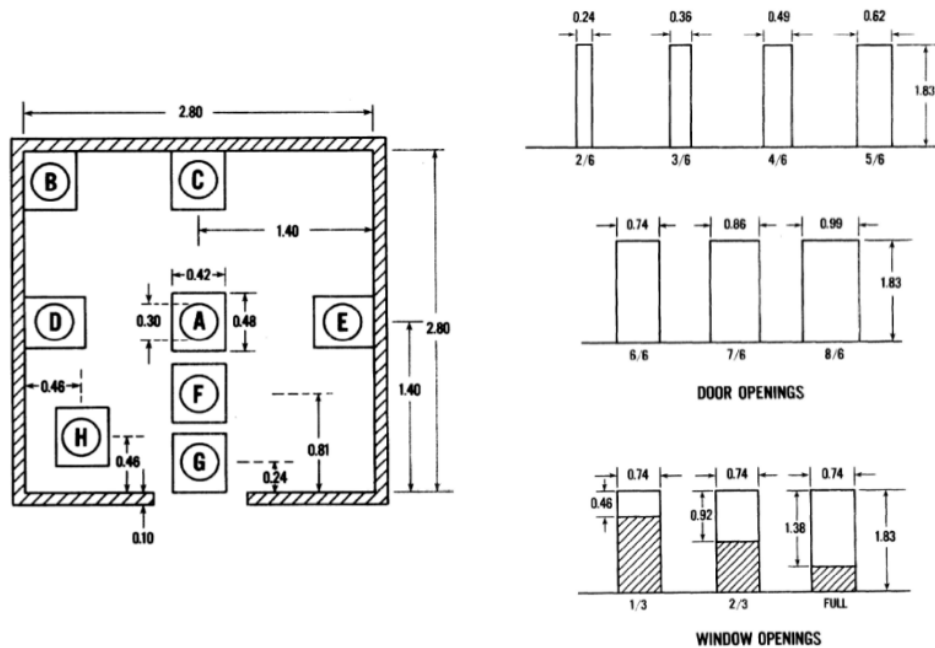


Figura 3.2: Posizioni del bruciatore e dimensioni dei vani porta - finestra

3.1.2 Simulazioni effettuate

Tra le 55 prove sperimentali disponibili si è deciso di simulare la configurazione denominata AR^{II}, caratterizzata da:

1. un bruciatore a metano di potenza 62,9 kW localizzato al centro della stanza in posizione A. (Figura 3.2) Il bruciatore è inoltre rialzato da terra di 0,3 m e ha diametro di 0,3 m;
2. un vano porta di tipo 6/6 avente dimensioni di 0,74 x 1,83 m²; (Figura 3.2)
3. temperatura ambiente di 6 °C.

Di seguito vengono illustrate le strategie di modellazioni utilizzate, distinguendo tra i due software CFD impiegati. Come linea di massima si è cercato di lavorare con

^{II}ARised

delle mesh molto semplici. Sono state inoltre strutturate nel modo più simile possibile con i due diversi software. Tale scelta è stata fatta per avere un primo confronto immediato tra i due software e per poter utilizzare questo caso studio come esempio propedeutico per l'apprendimento del funzionamento di FDS e OpenFOAM.

3.1.2.1 Modellazione in FDS

Nella modellazione con FDS è stato considerato un dominio di calcolo di dimensioni totali di $6,8 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$. (Figura 3.3) Esso comprende la stanza di dimensioni analoghe al caso sperimentale, $2,8 \times 2,8 \times 2,18 \text{ m}^3$, a cui è stato aggiunto lo spessore di 10 cm delle pareti. Sono stati inoltre considerati una zona sovrastante la stanza di altezza 1,72 m e una zona laterale, davanti al vano porta di lunghezza 3,8 m. L'aumento di dimensioni del dominio di calcolo ha determinato un incremento del tempo di calcolo, ma si è rivelato indispensabile per determinare in modo corretto i valori di temperatura e velocità sulla porta.

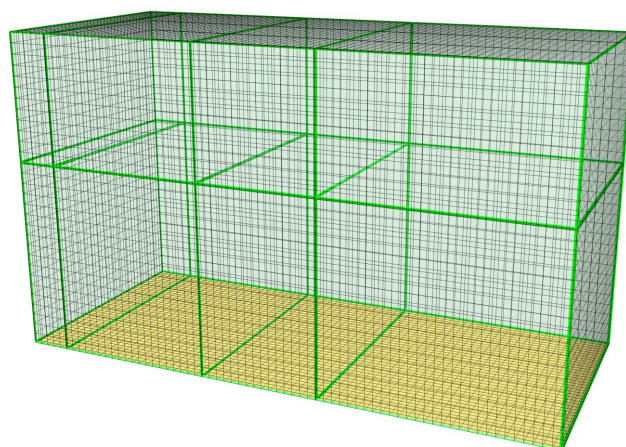


Figura 3.3: Dominio in FDS - "caso Steckler"

Come già detto nel paragrafo 2.4.1.1, FDS è in grado di lavorare solo con mesh 3D strutturate di forma poligonale. Tenendo conto di ciò si è utilizzata una mesh

molto semplice e regolare con celle cubiche. Sono stati considerati tre diversi passi di griglia, 0,2, 0,1 e 0,05 m, (Figura 3.4) stabiliti impiegando la correlazione di Quintiere per la definizione del passo di griglia in corrispondenza della sorgente termica. (Sotto sottosezione 2.1.4.5) Nel caso corrispondente a 0,2 m il numero di celle complessivo è stato 10200, 81600 nel caso a 0,1 m e 652800 in quello a 0,05 m.

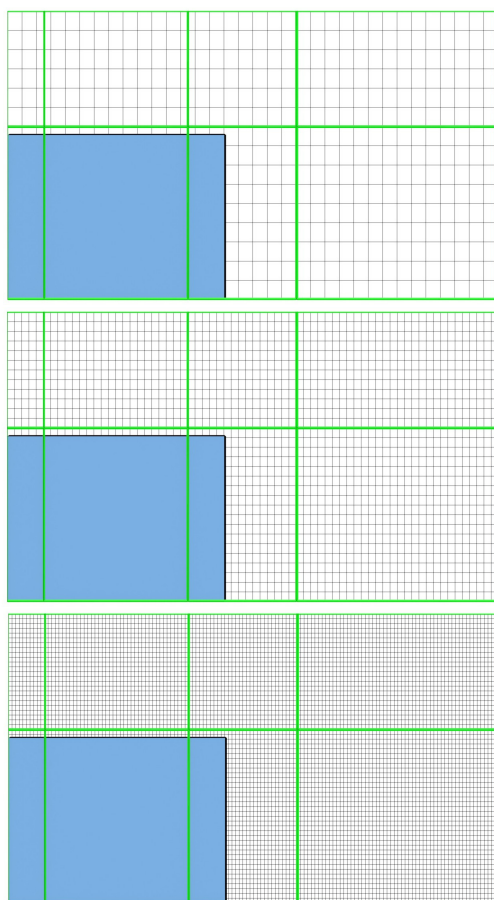


Figura 3.4: Mesh FDS - Dall'alto verso il basso 0,2, 0,1 e 0,05 m

Al fine di poter condurre le simulazioni con più processori in parallelo è stato necessario suddividere il dominio di calcolo in 8 mesh, un numero pari al numero di processori a disposizione. Queste mesh hanno in realtà caratteristiche di perfetta continuità l'una con le altre e di fatto possono essere considerate come una sola mesh grande quanto l'intero dominio. Tra le diverse mesh non viene infatti variato alcun

parametro e tanto meno il passo di griglia. In questo caso l'utilizzo di più mesh è stato solo un espediente per poter svolgere le simulazioni in parallelo. (Figura 3.3)

Bisogna però porre attenzione a come si suddivide il dominio tra le varie mesh. È opportuno che le zone dove avvengono i fenomeni di interesse e quelle dove sono posizionati i dispositivi di misura, non vengano suddivisi tra più mesh. Se così non fosse si rischia un'errata modellazione dei fenomeni d'interesse, oltre che una massiccia perdita di informazioni dovuta al passaggio dei dati da una mesh all'altra. Si è quindi fatto in modo che il bruciatore fosse contenuto, con margine, in una sola mesh e, allo stesso modo, che i dispositivi nel vano porta non coincidessero con il confine di due mesh adiacenti.

La limitazione nel tipo di mesh che FDS è in grado di utilizzare implicano una serie di aspetti di cui bisogna tener conto per modellare in modo corretto il caso studio. In particolare ci sono alcune accortezze a cui porre attenzione a seconda del passo di griglia utilizzato. Di seguito tale concetto verrà richiamato varie volte per i diversi elementi modellati.

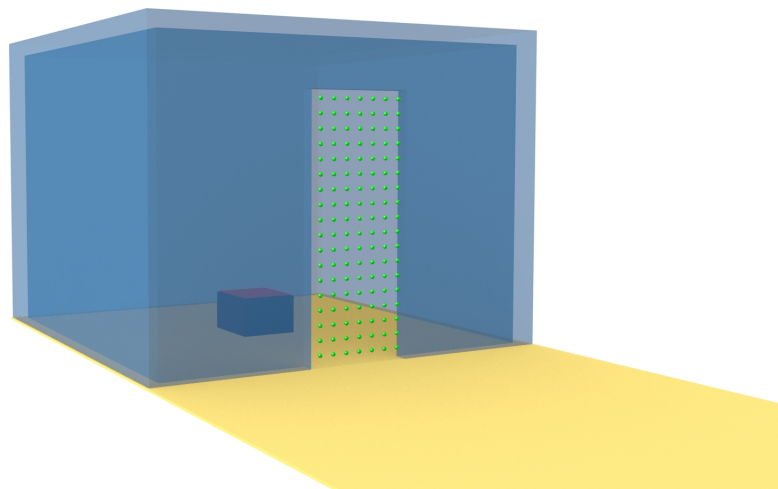


Figura 3.5: Geometria in FDS - "caso Steckler"

Come accennato in precedenza, in corrispondenza del vano porta sono state poste sette file di termocoppie e di anemometri nella medesima posizione del caso sperimentale. (Figura 3.5) È stato però necessario modificarne la posizione nelle simulazioni effettuate con la mesh più lasca. Infatti facendo altrimenti si avrebbero avuti più dispositivi nella medesima cella di calcolo che di conseguenza avrebbero rilevato gli stessi valori di temperatura e velocità, fornendo dei profili falsati. Per cercare di ovviare al problema li si è posizionati nel punto più prossimo in direzione verticale non appartenente alla medesima cella, ma a quella adiacente. Un ulteriore aspetto legato al passo di griglia a cui prestare particolare attenzione è la “voxels size” con cui si modella la geometria della stanza. Tale parametro definito in Blender, consiste nella dimensione dei pixel volumetrici o meglio degli elementi dell’immagine volumetrica. È necessario trovare, anche per tentativi, il valore che permetta una rappresentazione corretta della geometria delle pareti della stanza, tenendo presente che “voxels size” eccessivamente piccole implicano oneri computazionali aggiuntivi nella fase di preprocessing mentre valori troppo alti creano l’effetto mostrato in Figura 3.6.

Sempre tramite Blender si sono definite le pareti come adiabatiche. Tale approssimazione, data la bassa potenza della pool fire, è ragionevole e non implica grossi errori.

Per semplicità di rappresentazione il bruciatore è stato approssimato ad una superficie quadrata con area pari al contenitore di carburante, $0,42 \times 0,48 \text{ m}^2$. (Figura 3.5) Successivamente in base al passo di griglia impiegato è stato necessario adattarne le dimensioni in modo che i suoi vertici coincidessero perfettamente con i vertici delle celle della griglia. La sua potenza è stata definita direttamente in Blender tramite

il parametro $HRRPUA^{III}$. Ovviamente il valore di $HRRPUA$ deve essere adattato di volta in volta, in base alla dimensione della sorgente, che è funzione del passo di griglia, in modo tale da soddisfare la specifica di potenza pari a 62,9 kW. È stata inoltre definita la natura del combustibile, precisando che si tratta di metano puro, mentre non è stato necessario scrivere esplicitamente la stechiometria della reazione di combustione.

Ricordando infine che il bruciatore è rialzato da terra e appoggiato su un “box” solido, bisogna porre attenzione alla distanza interposta tra il “box” e la superficie a cui si approssima la sorgente. Essi devono infatti trovarsi a una distanza minima pari al passo di griglia utilizzato. Se così non fosse FDS sovrapporrebbe le condizioni imposte alle due superfici, l’adiabaticità del “box” e $HRRPUA$ del bruciatore. La condizione di adiabaticità avrebbe il sopravvento e ciò porterebbe al mancato innesco del bruciatore. Tale accortezza modellistica, comunque, non implica cambiamenti rilevanti nella fluidodinamica del fenomeno.

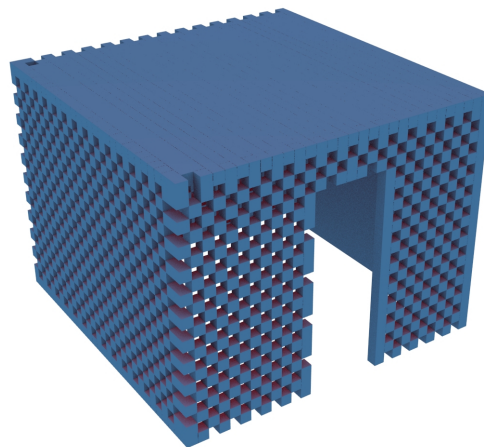


Figura 3.6: Problema di rappresentazione dovuto a una “voxels size” eccessivamente grande

^{III}Heat Release Rate Per Unit Area, kW m⁻²

3.1.2.2 Modellazione in OpenFOAM

La modellazione in OpenFOAM presenta ovviamente degli elementi comuni a quella fatta in FDS. Essi consistono sia in elementi modellati in modo analogo, sia in aspetti critici a cui bisogna prestare particolare attenzione. Altri fattori sono invece trattati diversamente a seguito della differente natura dei due software. Il medesimo dominio utilizzato con FDS è stato impiegato con OpenFOAM. Esso ha quindi dimensioni totali di $6,8 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$, comprende la stanza sperimentale in dimensioni reali a cui è aggiunto lo spessore delle pareti. Sono sempre considerate la zona sovrastante la stanza di altezza 1,72 m e quella laterale, davanti al vano porta di lunghezza 3,8 m. (Figura 3.7)

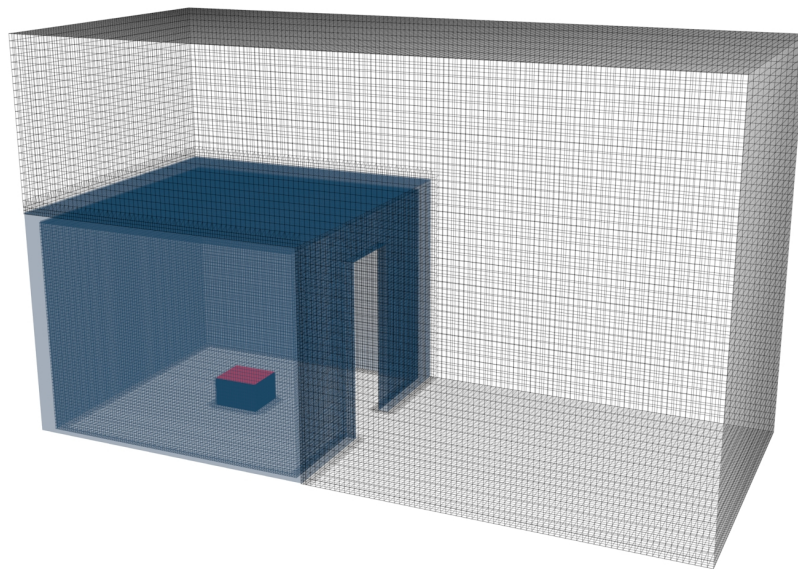


Figura 3.7: Geometria in OpenFOAM - “caso Steckler”

Come per FDS ciò è dettato dalla necessità di descrivere correttamente i flussi d’aria sulla porta. In particolare facendo altrimenti non si osserverebbe alcun flusso d’aria entrante nella stanza, ma solo uno uscente. Le conseguenze si osservano direttamente sulla forma di fiamma dell’incendio che, in presenza del flusso entrante si

piega allontanandosi dalla porta e avvicinandosi alla parete posteriore della stanza. A differenza di FDS, OpenFOAM permette l'utilizzo di mesh anche fortemente non strutturate. (Sottosezione 2.5.2) Questo ha facilitato molto la fase di preprocessing non essendo necessario adattare al passo di griglia i vari elementi della simulazione, come si è dovuto invece fare per FDS. Per confrontare i due software, si è comunque cercato di utilizzare una mesh molto semplice e simile a quella utilizzata in FDS, anche se non più con celle cubiche. Non è stato quindi dato alcun "grading" alla mesh [11]. Sono stati considerati gli stessi passi di griglia di FDS, 0,2, 0,1 e 0,05 m, stabiliti con la relazione di Quintiere [5]. Si è inoltre deciso di testare gli effetti della funzione "wall layer" di OpenFOAM che permette di aumentare il numero di celle presenti in corrispondenza delle patch^{IV} [11]. Così facendo è possibile modellare meglio le zone prossime agli ostacoli e alla sorgente, raggiungendo un maggior livello di dettaglio della simulazione. Per valutarne gli effetti, la funzione "wall layer" è stata applicata alla mesh da 0,2 m, che essendo la più lasca implica minori tempi di calcolo. Il set completo di mesh impegnate è quindi $0,2_{\text{Wall Layer}}, 0,2, 0,1$ e 0,05 m. (Figura 3.8)

^{IV}Gruppo di una o più superfici, non necessariamente collegate fisicamente, a cui sono attribuite le medesime condizioni al contorno

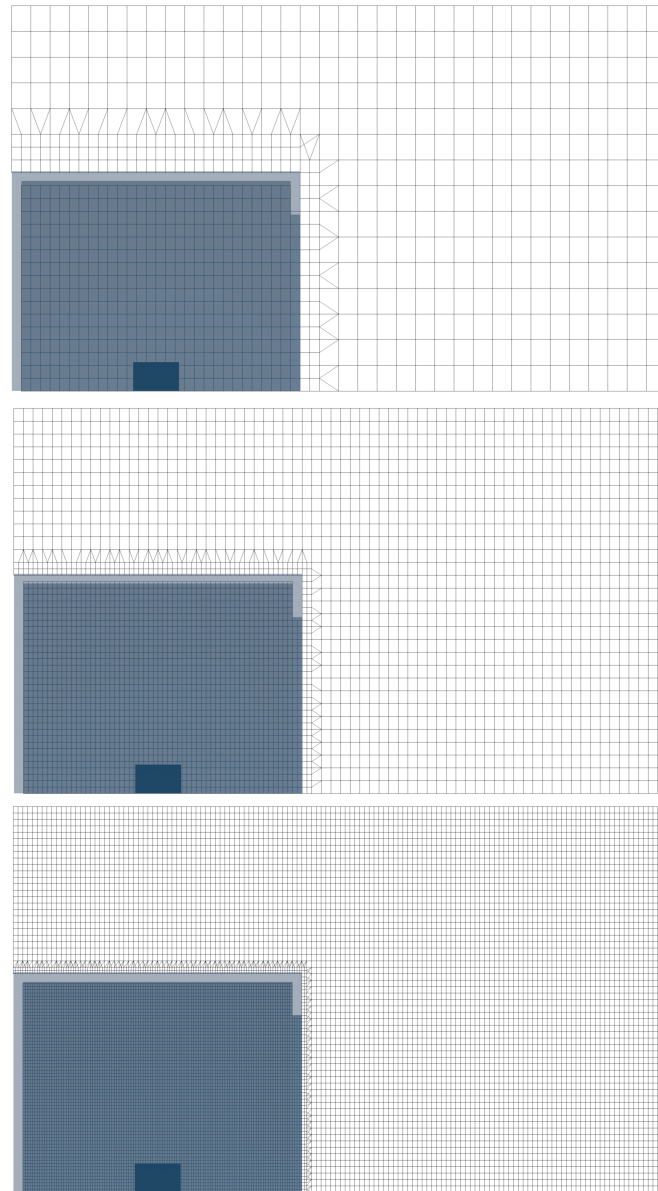


Figura 3.8: Mesh OpenFOAM - Dall'alto verso il basso $0,2/0,2_{\text{Wall Layer}}$, $0,1$ e $0,05$ m - "caso Steckler"

Il numero di celle totale è rispettivamente 20370 per le mesh $0,2$ m e $0,2_{\text{Wall Layer}}$ m, circa 118000 nel caso a $0,1$ m e 790000 in quello a $0,05$ m. L'utilizzo della funzione "SnappyHexMesh" (Sotto sottosezione 2.5.2.1) è il motivo per cui non è presente alcuna mesh in corrispondenza delle pareti della stanza e degli ostacoli. È opportuno disattivare l'opzione "snap" dello "SnappyHexMesh"[11], che andrebbe altrimenti ad arrotondare la mesh vicino agli spigoli solidi presenti nella geometria.

Le simulazioni sono state effettuate usando più processori in parallelo. OpenFOAM è in grado di gestire in modo autonomo la suddivisione del dominio di calcolo tra i diversi processori, quindi in fase di preprocessing non è stata necessaria alcuna accortezza particolare né la creazione di più mesh. È però opportuno verificare tramite ParaView che la suddivisione automatica del dominio non tagli le zone dove avvengono i fenomeni di interesse e quelle dove sono posizionati i dispositivi di misura. Se così non fosse si avrebbero problemi di simulazione.

Non si sono posizionati dispositivi di misura, questo perché OpenFOAM dispone di una funzione detta "Sampling data"[11]. Tale funzione permette di ricavare i valori di una variabile di interesse a posteriori, a simulazione già terminata. È possibile effettuare tali rilevamenti in punti, lungo linee o superfici e con continuità nello spazio, valutando quindi gli andamenti in modo più realistico. In questo caso la si è utilizzata per rilevare temperatura e velocità lungo la mezzeria del vano porta. La funzione "Sampling data" rappresenta uno strumento notevolmente comodo, permettendo di non dover rieffettuare completamente una simulazione qualora si volesse valutare un parametro precedentemente ignorato.

A seguito della mesh non strutturata, la scelta del "voxels size" non è più rilevante al fine della simulazione, entro limiti di ragionevolezza.

Si sono definite, direttamente in Blender, le pareti come adiabatiche.

Il bruciatore è stato rappresentato quadrato di dimensioni $0,42 \times 0,48 \text{ m}^2$. (Figura 3.7) Non è stato però più necessario modificarne l'area per adattarla al passo di griglia utilizzato, dato che si lavora con mesh non strutturate. Si è trattata la "patch" associata al bruciatore come un inlet di combustibile nel dominio di calcolo. La potenza dell'incendio è stata quindi definita imponendo, tramite la funzione

“flowRateInletVelocity” [15, 16], una portata di combustibile entrante adeguata al rispetto della specifica di potenza 62,9 kW. La portata massiva equivalente è stata quindi calcolata come:

$$m = \frac{HRR}{\Delta H_c} \quad (3.1)$$

Dove:

m	Portata massiva di metano	(kg s ⁻¹)
HRR	Potenza dell'incendio	(kW)
ΔH_c	Entalpia di combustione del metano	(kJ kg ⁻¹)

Bisogna porre attenzione nell'usare l'effettivo valore di ΔH_c che compare in OpenFOAM, opportunamente convertito, pari a $5,00261 \cdot 10^7$ J kg⁻¹. Tale valore rimane costante per tutti i passi di cella impiegati. È stato necessario scrivere esplicitamente la stechiometria della reazione di combustione, precisando che il combustibile è composto da metano puro. Si è utilizzato una reazione del tipo “irreversibleinfinitereaction”:



In OpenFOAM, non è stato necessario interporre alcuno spazio tra il “box” sottostante la pool fire e la superficie che la rappresenta. Questo grazie alla migliore capacità di OpenFOAM rispetto FDS nel gestire le condizioni imposte alle diverse superfici.

In Tabella 3.1 sono riportate le principali condizioni al contorno imposte alle diverse patch. (Figura 3.9)

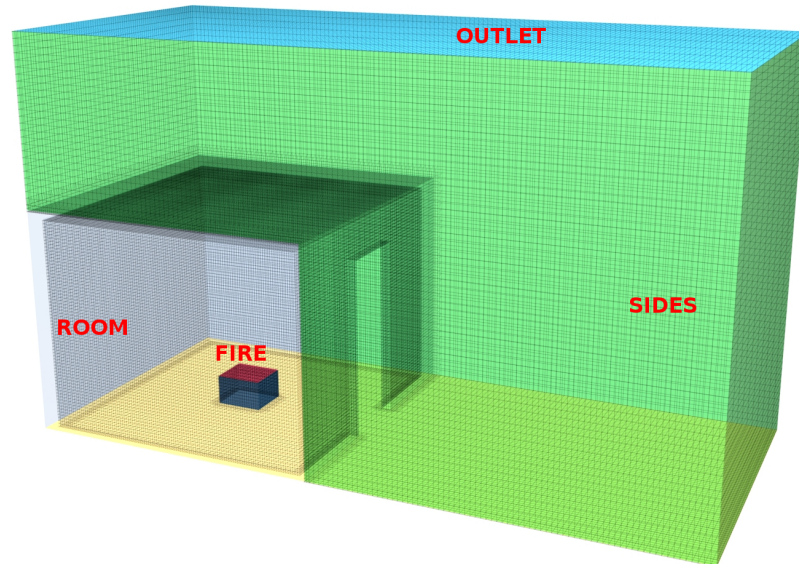


Figura 3.9: Definizione delle patch - “caso Steckler”

Patch	Variabile	Tipo	Valore
Fire	U	massFlowRate	0,00126 kg s ⁻¹
Outlet	U	inletOutlet	
	p_rgh	fixedFluxPressure	internalField
Sides	U	pressureInletOutletVelocity	
	p_rgh	totalPressure	internalField
Room	T	zeroGradient	

Tabella 3.1: Condizioni al contorno “caso Steckler”

3.1.3 Risultati

Di seguito si illustreranno la metodologia applicata, i valori numerici e gli andamenti dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

3.1.3.1 Determinazione dei profili medi di temperatura e velocità

In questa analisi sono stati effettuati dei confronti tra i profili medi di temperatura e velocità determinati lungo la mezzeria del vano porta. É quindi necessaria una precisazione di come tali profili sono stati ricavati, prendendo a esempio il caso studiato con passo di griglia di 0,05 m per entrambi i software CFD, FDS e OpenFOAM.

In tale simulazione, con FDS, sono stati posizionati 16 dispositivi di misura sulla mezzeria del vano porta e per ognuno di questi sono stati determinati i valori istantanei di temperatura e velocità. Si è imposta la scrittura dei valori rilevati ogni 1 s, per una durata totale di simulazione di 300 s. Per OpenFOAM si è invece proceduto in modo diverso senza posizionare alcun dispositivo e utilizzando, a simulazione ormai terminata, la funzione “Sampling data” lungo la mezzeria del vano porta. La si è inizialmente applicata ogni 1 s, per una durata totale di simulazione sempre di 300 s. Successivamente si è visto che il campionamento poteva essere fatto a intervalli di tempo più ampi, senza rilevanti effetti negativi sui dati ottenuti. La si è quindi applicata ogni 10 s, nei 300 s totali di simulazione. Considerando l’andamento temporale dei valori rilevati ad altezza dal suolo di 1,31 m^V, per FDS e OpenFOAM (Figura 3.10), si osserva come dopo circa 200 s la simulazione giunga a condizioni pseudostazionarie. Si è quindi valutato l’intervallo temporale di mediazione τ indicato in Figura 3.10 dall’area grigia. Esso rappresenta il lasso di tempo per cui il

^VAltezza della termocoppia numero 11 (Numerazione da 0 a partire dal basso)

valor medio della variabile considerata risulta circa costante. Nella maggior parte delle simulazioni si è osservato un valore di τ pari a circa 100 s. Lo si è quindi utilizzato per effettuare la media temporale dei valori istantanei rilevati in tale lasso di tempo.

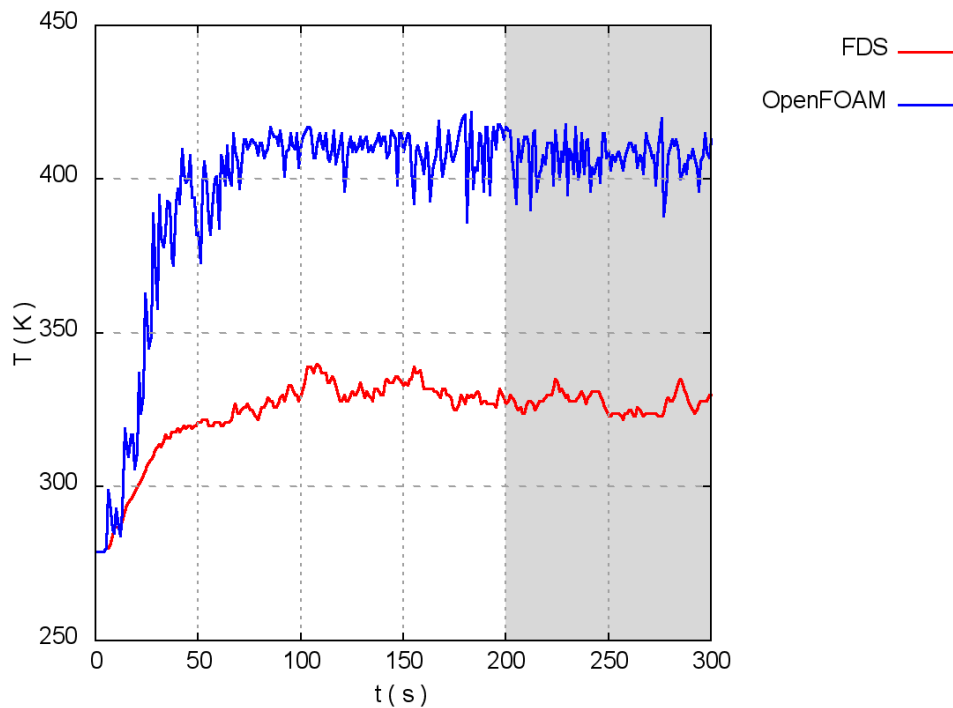


Figura 3.10: Andamento della temperatura nel tempo per FDS e OpenFOAM - “caso Steckler”

3.1.3.2 Analisi dei risultati ottenuti

Di seguito si riportano i vari profili di temperatura e velocità lungo la mezzeria del vano porta, ottenuti come illustrato precedentemente e il loro confronto con i dati sperimentali. Per avere un confronto più immediato tra i due software si trattano in parallelo sia i risultati ottenuti da FDS che quelli ottenuti da OpenFOAM.

Si sottolinea che per quanto riguarda i tempi di calcolo necessari FDS ha richiesto tempistiche di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto OpenFOAM.

Profili di temperatura Dalle simulazioni condotte si è osservata la formazione di due strati termici ben definiti:

1. il primo nella parte inferiore della stanza, corrisponde alla zona libera dal fumo e presenta quindi temperature mediamente più basse;
2. il secondo corrispondente invece alla zona superiore della stanza, dove si accumula il fumo prodotto dall'incendio e presenta quindi temperature notevolmente superiori.

Tale peculiarità si osserva chiaramente nelle "slice file" a 250 s, ricavate da SMV per FDS e da ParaView e Blender per OpenFOAM. (Figura 3.11) Dalle "slice file" si nota inoltre un valore di temperatura della fiamma molto più basso per FDS rispetto OpenFOAM. Ciò è dovuto alla diversa modellazione della fiamma tra i due software. Si ricorda infatti che FDS tratta la sorgente termica semplicemente come un "inlet" di HRR, mentre OpenFOAM svolge realmente la reazione chimica associata alla combustione. Di conseguenza i valori di temperatura raggiunti dalla fiamma so-

no ben diversi. FDS non risulta quindi assolutamente adatto per la valutazione della temperatura in prossimità della fiamma, mentre OpenFOAM dovrebbe esserlo.

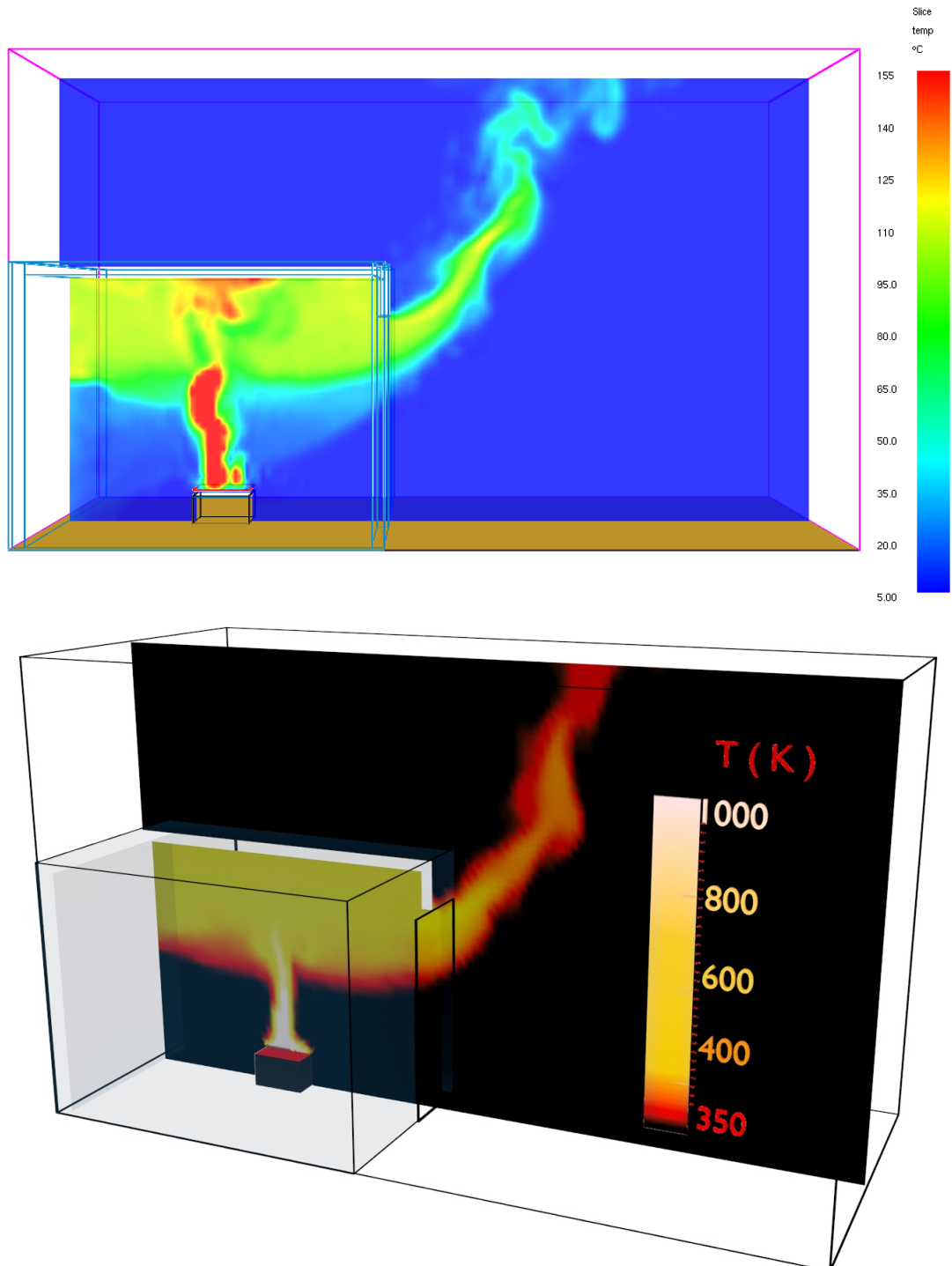


Figura 3.11: Slice file della temperatura per FDS e OpenFOAM - "caso Steckler"

Si riportano i grafici dei profili di temperatura in corrispondenza della mezzeria del vano porta, rispetto l'altezza del vano stesso. (Figura 3.12) Sono presentati i vari andamenti ricavati dalle diverse mesh utilizzate, per FDS e OpenFOAM, confrontati con i dati sperimentali.

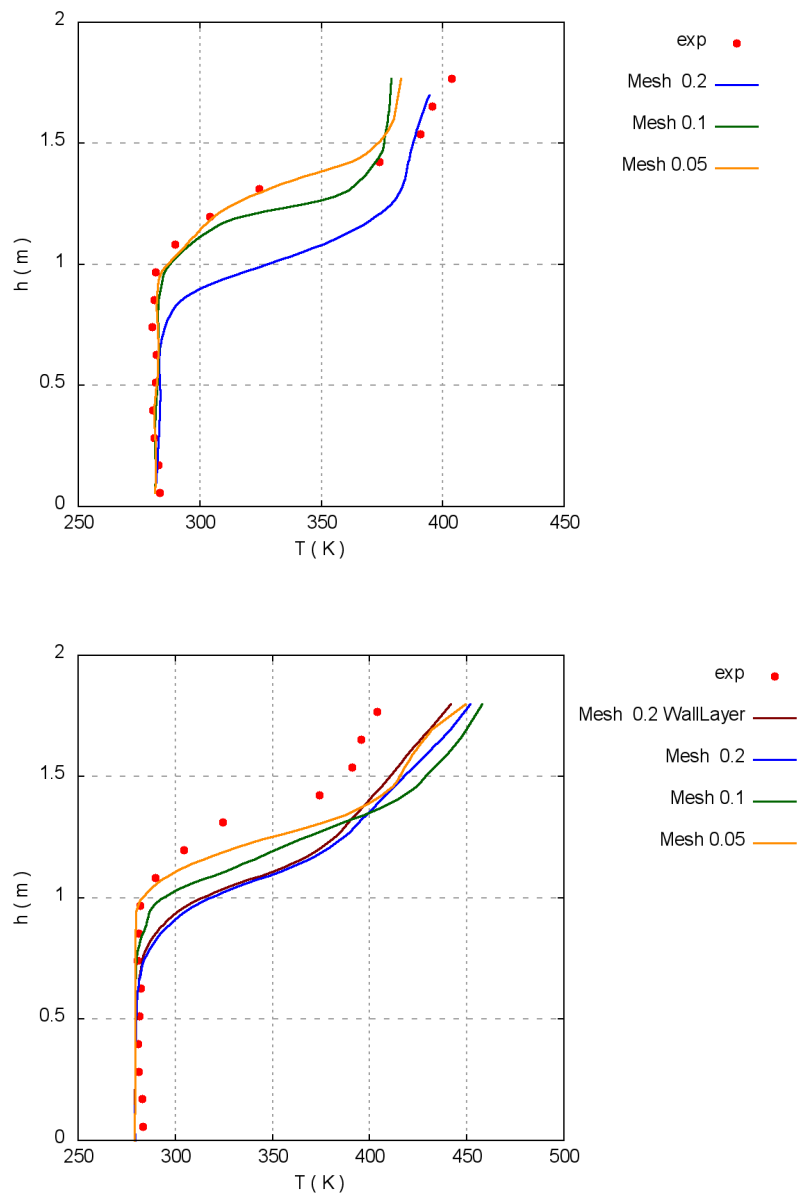


Figura 3.12: Profili di temperatura lungo l'altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - "caso Steckler"

Da tali grafici si nota che il confine tra i due strati termici si trova ad una altezza da terra di circa 1 m, superata la quale la temperatura incrementa velocemente. Si osserva inoltre la tendenza di OpenFOAM a sovrastimare le temperature, di circa 50 K, nella zona alta del vano porta. FDS tende, al contrario, a sottostimarle. Si è ipotizzato che tale differenza di comportamento fosse determinata dal diverso modo di trattare il soot nei due software CFD. (Tabella 2.1) Infatti, la resa di default in soot definita in FDS, $Y_{\text{soot}}=1\%$, determina un effetto di schermatura dei dispositivi di misura che rilevano quindi valori mediamente più bassi. Ovviamente tale effetto sarebbe più evidente nella parte alta del vano porta, dove il fumo tende a accumularsi. A verifica di tale ipotesi si sono ricondotte le medesime simulazioni imponendo una resa in soot nulla, $Y_{\text{soot}}=0\%$. Ciò non ha però portato a apprezzabili cambiamenti negli andamenti forniti da FDS. Il calcolo del GCI (Sotto sottosezione 2.1.4.6) non è stato possibile in questo caso studio in quanto la temperatura non presenta andamento monotono. Per valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti ci si è riferiti a un confronto diretto con i dati sperimentali valutandone lo scostamento relativo percentuale. Gli errori sono stati quindi diagrammati per i due software confrontando le diverse mesh. Per una lettura più immediata si è indicata la retta di coincidenza dei valori sperimentali a quelli simulati. Di conseguenza i punti che si trovano sulla retta centrale presentano dei valori simulati identici ai relativi valori sperimentali. Maggiore è la distanza dei punti da tale retta maggiore è l'errore associato. Per maggior chiarezza si sono evidenziate le rette a errore costante pari a $\pm 20\%$. (Figura 3.13)

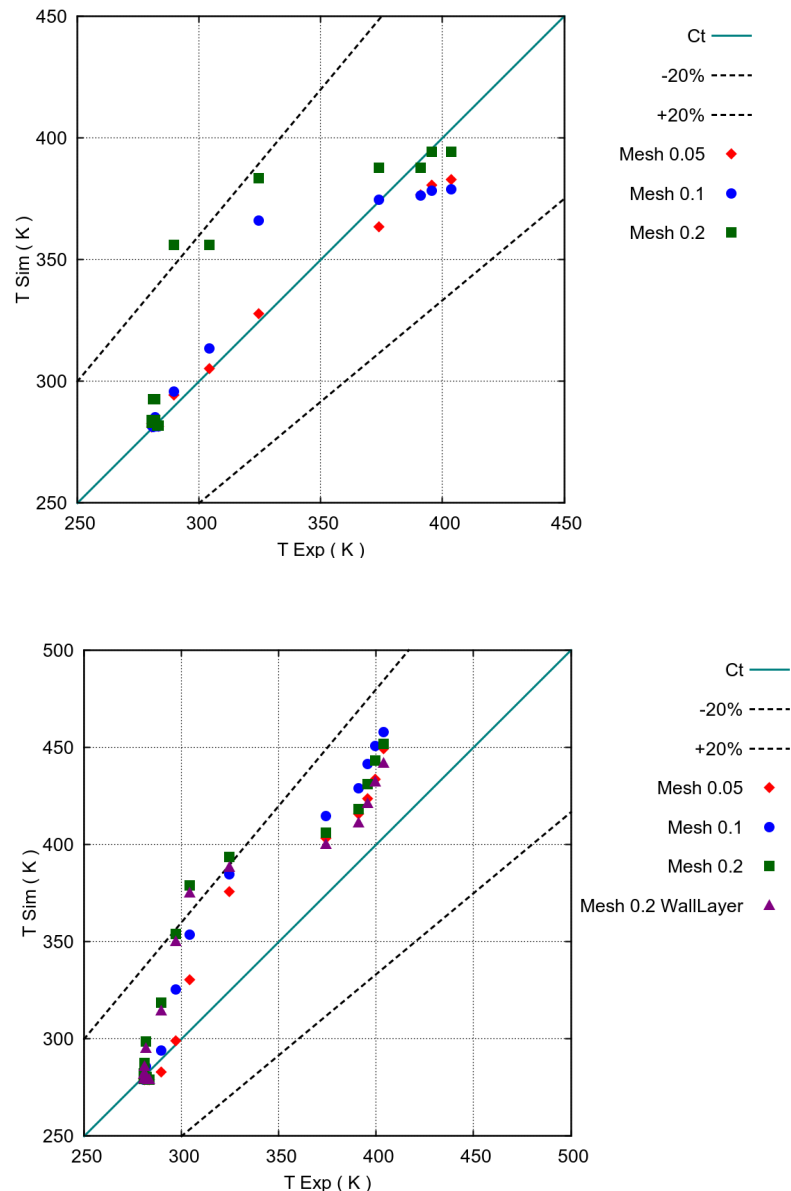


Figura 3.13: Errori relativi % sulla temperatura, per le diverse mesh, per FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”

Si osservano degli errori sotto il 20% per quasi tutte le misurazioni effettuata, per entrambi i software. FDS presenta inoltre dei valori di errore generalmente più bassi di OpenFOAM. Si nota una leggera diminuzione degli errori, grazie all’impiego del “wall layer”, tra le mesh 0,2 m e 0,2_{Wall Layer} m. FDS risente maggiormente del passaggio da una griglia di 0,1 m a una di 0,2 m, mentre il passare da una griglia di 0,05 m a una di 0,1 m non comporta significativi cambiamenti nell’attendibilità

dei dati raccolti. In OpenFOAM invece la diminuzione di accuratezza dei risultati è meno marcata all'aumentare del passo di griglia. Per entrambi i software gli errori maggiori sono stati riscontrati nella zona centrale degli andamenti. Tale zona corrisponde all'intorno dell'altezza di confine tra i due strati termici, dove la simulazione del fenomeno è più critica. Infine per quanto poco influente nel calcolo degli errori, si riporta l'incertezza dei dati sperimentali pari a $\pm 1K$.

Profili di velocità In modo analogo a quanto fatto per i profili di temperatura si prendono in considerazione le "slice file" a 250 s, ricavate da SMV per FDS e da ParaView e Blender per OpenFOAM. (Figura 3.14) Da esse si evince la formazione di due diversi flussi d'aria sul vano porta:

1. il primo, entrante, nella zona inferiore della stanza;
2. il secondo, uscente, nella zona superiore.

Si nota inoltre, dalle "slice file", la tendenza di FDS a fornire valori di velocità più alti rispetto OpenFOAM, per entrambi i flussi d'aria presenti. Ciò non è del tutto coerente con i grafici delle Figure 3.12 e 3.15. Viceversa è coerente con la sovrastima delle temperature in prossimità del soffitto in OpenFOAM.

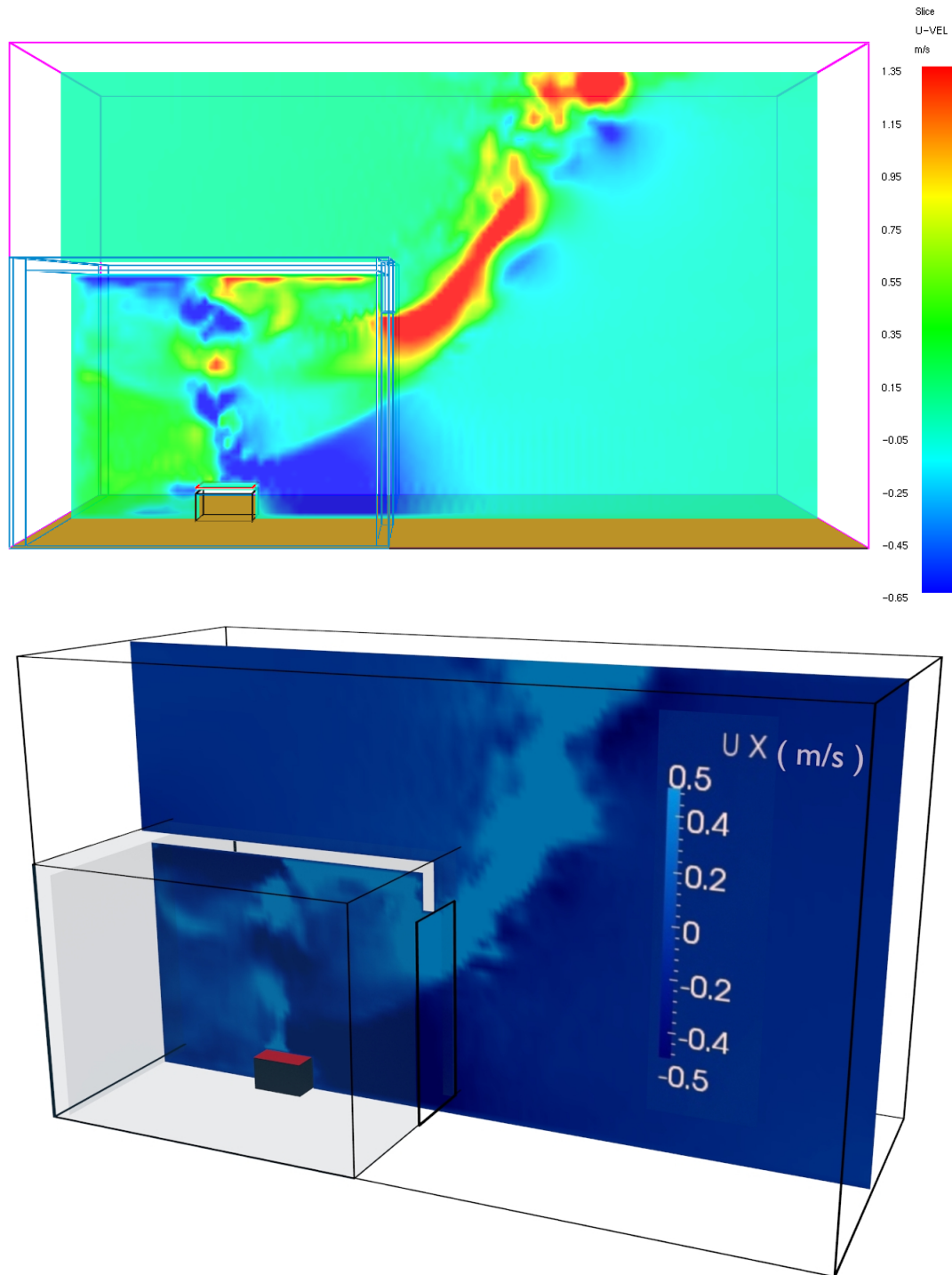


Figura 3.14: Slice file della velocità per FDS e OpenFOAM - “caso Steckler”

Si riportano i grafici dei profili di velocità in corrispondenza della mezzeria del vano porta, rispetto l’altezza del vano stesso. (Figura 3.15) Sono presentati i vari andamenti ricavati dalle diverse mesh utilizzate, per FDS e OpenFOAM, confrontati

con i dati sperimentali.

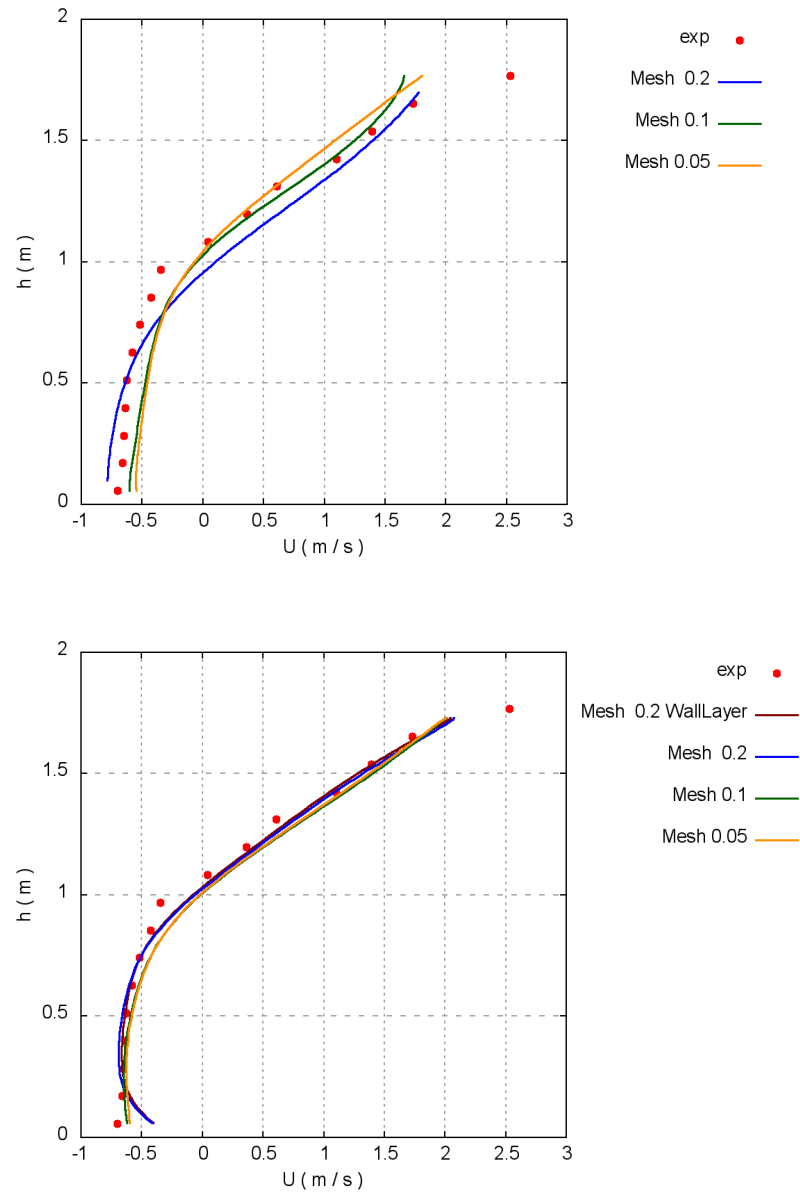


Figura 3.15: Profili di velocità lungo l'altezza della porta, per le diverse mesh utilizzate con FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - "caso Steckler"

Entrambi i software forniscono andamenti confrontabili con i dati sperimentali.

OpenFOAM presenta andamenti quasi identici per le diverse mesh usate, a differenza di FDS per cui il cambio di mesh influenza maggiormente gli andamenti ottenuti.

L'asse neutro^{VI} risulta essere posto, sia per FDS che per OpenFOAM, nell'intorno

^{VI}Asse per il quale la velocità sulla mezzera del vano porta si annulla

dell'altezza di 1 m in accordo con i dati sperimentali. Si osserva inoltre l'impossibilità di OpenFOAM a fornire dei valori numerici per la zona più alta del vano porta, in corrispondenza dell'ultimo valore sperimentale a disposizione. Ciò è probabilmente dovuto alla maggiore criticità di modellazione delle zone vicine le pareti. Si è nuovamente valutato lo scostamento relativo percentuale dei dati ottenuti rispetto ai valori sperimentali. Gli errori sono stati quindi diagrammati in modo analogo a quanto fatto per le temperature. In questo caso si sono evidenziate le rette a errore costante pari a $\pm 40\%$. (Figura 3.16) Si nota immediatamente che la valutazione della velocità è afflitta da errori ben più alti rispetto la valutazione della temperatura. Si osservano degli errori sotto il 40% per quasi tutte le misurazioni effettuate, per entrambi i software. In questo caso non si osserva un'apprezzabile diminuzione degli errori grazie all'impiego del "wall layer" tra le mesh 0,2 m e 0,2_{Wall Layer} m. Infine, decisamente più influente nel calcolo degli errori che non per le temperature, si riporta l'incertezza dei dati sperimentali pari ad un massimo del 13%.

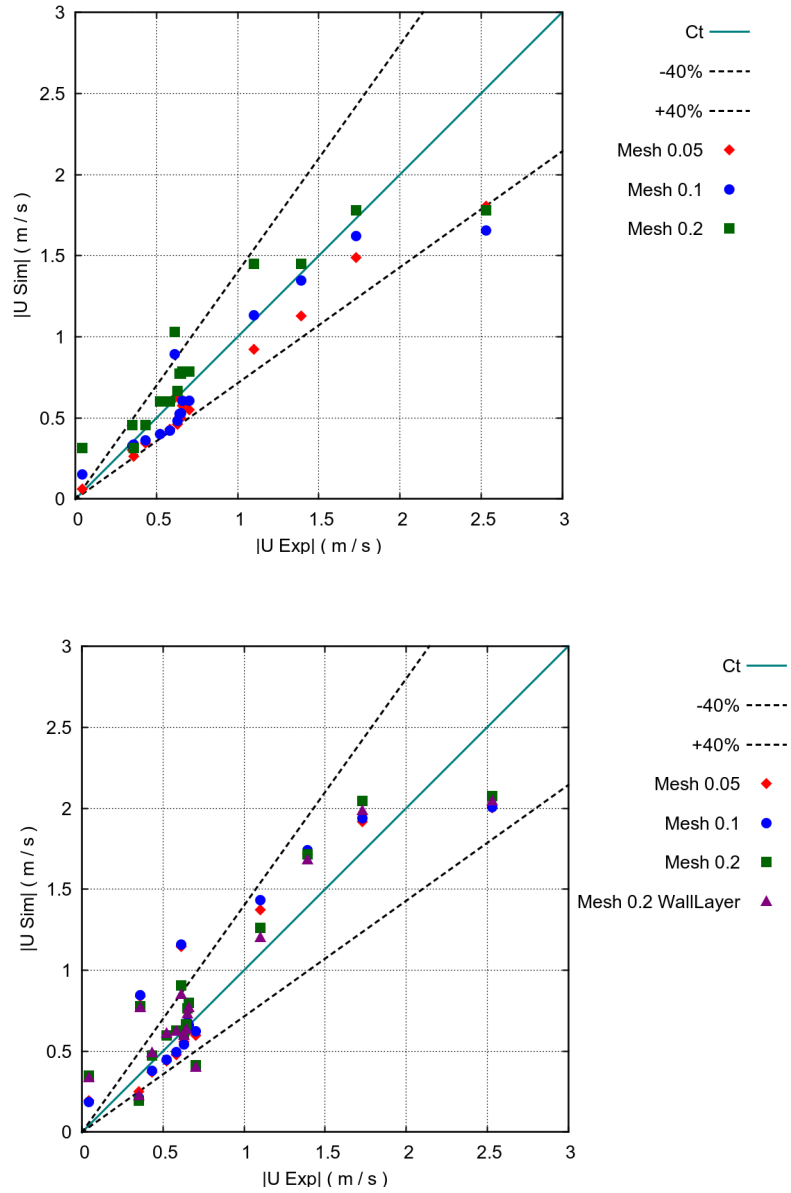


Figura 3.16: Errori relativi % sulla velocità, per le diverse mesh, per FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - “caso Steckler”

3.2 Caso tunnel

Nel “caso tunnel” si sono riprodotte alcune delle prove sperimentali condotte da Lee e Tsai nel loro lavoro “Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels”. [2] A differenza del primo caso studio affrontato, non è stato necessario effettuare le simulazioni con entrambi i software CFD ma solo con OpenFOAM. Erano infatti già disponibili delle simulazioni svolte con FDS nel lavoro di Tavelli, et al. [3].

Questo caso si scosta dal precedentemente per quanto riguarda le condizioni di ventilazione, non più naturali ma forzate, permettendo quindi una convalida del codice OpenFOAM su una più variegata tipologia di casi studio. Le dimensioni del dominio di calcolo sono abbastanza simili al “caso Steckler”. (Sezione 3.1) Si considera infatti un tunnel in scala di laboratorio, permettendo di mantenere dei tempi di calcolo ragionevolmente bassi e gestibili. Come per il “caso Steckler” le sue caratteristiche geometriche lo rendono molto generico. Le conoscenze acquisite tramite la sua simulazione sono quindi facilmente adattabili allo studio di casi anche più complessi.

Le prove sperimentali sono state condotte in scala da laboratorio portandosi in condizioni stazionarie. Lo studio si è concentrato sulla valutazione della velocità critica di ventilazione^{VII}, u_{cr} , tramite due diverse metodologie che verranno illustrate in seguito. Si è inoltre valutato l’effetto della presenza di ostacoli di diverse dimensioni sul valore di u_{cr} .

^{VII}Velocità di ventilazione a cui corrisponde retro diffusione di fumo nulla

lutazione a posteriori della potenza della pool fire stessa. Il tunnel è equipaggiato con due termocoppie T_a e T_b in prossimità del soffitto. T_a si trova in corrispondenza della mezzeria del tunnel sull'asse verticale della pool fire, mentre T_b è posta sulla stessa linea ma a monte della pool fire di 0,1 m. Sono inoltre presenti alcuni dispositivi di controllo, per verificare la buona conduzione delle prove. Infine sono stati considerati degli ostacoli distribuiti in file rettilinee a monte della pool fire, quindi interposti tra pool fire e sistema di ventilazione. Nel corso delle varie prove effettuate si è valutato il valore di u_{cr} al variare dei seguenti parametri: (Figura 3.18)

1. altezza del tunnel, 0,6 o 0,4 m;
2. dimensione, posizione e potenza della pool fire. In particolare si sono considerate due diverse dimensioni, $6,3 \times 6,3 \text{ cm}^2$ e $9 \times 9 \text{ cm}^2$, posizionate sulla mezzeria del tunnel o dietro gli ostacoli. La potenza è stata variata da 3,52 a 16,01 kW. Nella serie di prove C sono state inoltre considerate più pool fire contemporaneamente;
3. numero e dimensione degli ostacoli. Sono state considerate tre taglie di ostacoli, piccola $0,24 \times 0,09 \times 0,07 \text{ m}^3$, media $0,61 \times 0,13 \times 0,22 \text{ m}^3$ e grande $0,61 \times 0,13 \times 0,30 \text{ m}^3$.

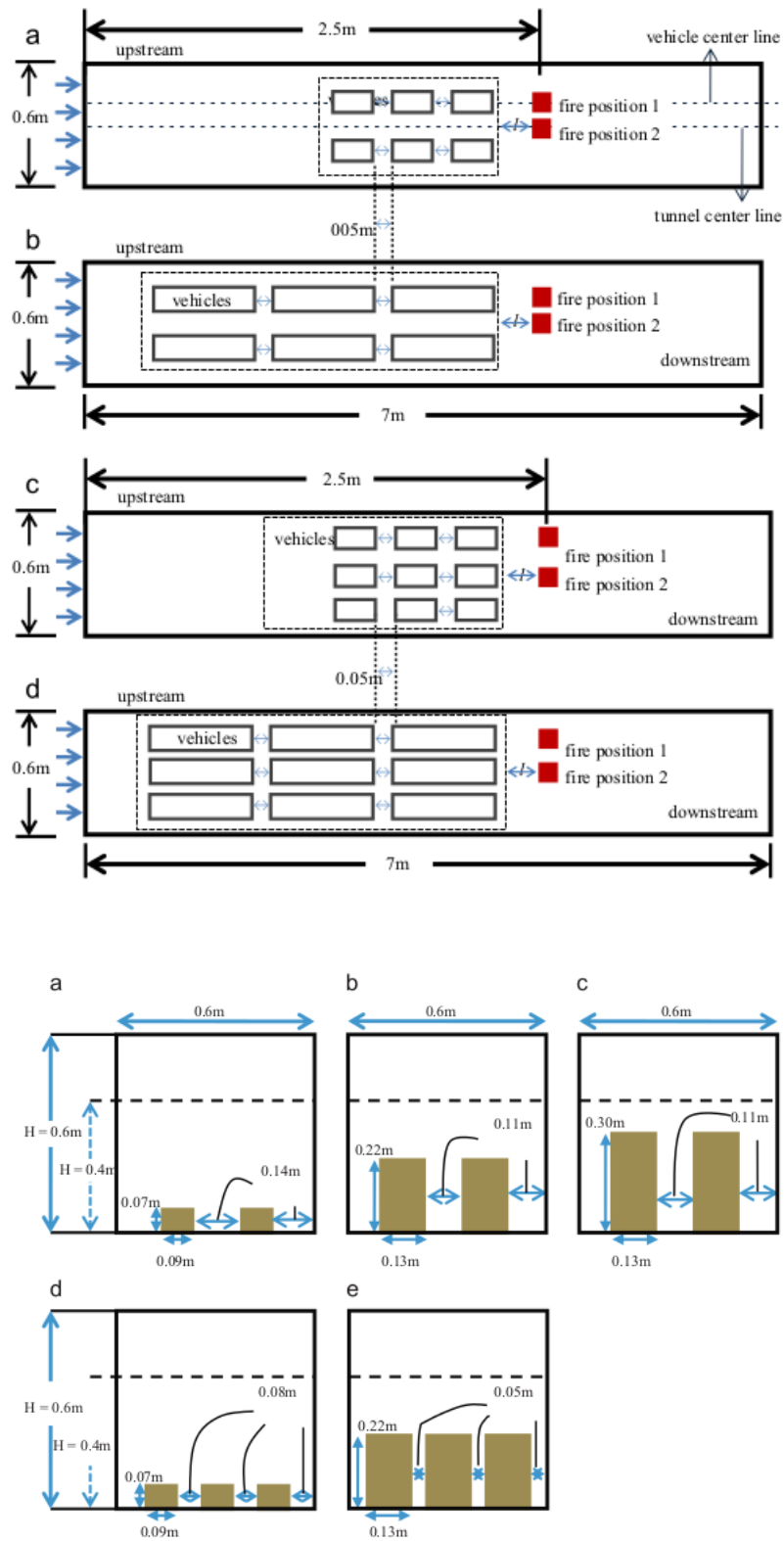


Figura 3.18: Posizioni e dimensioni della pool fire e degli ostacoli - "caso tunnel"

3.2.2 Simulazioni effettuate

Tra le varie prove sperimentali disponibili si è deciso di simulare le seguenti configurazioni (Tabella 3.2), tutte caratterizzate da:

1. altezza del tunnel pari a 0,4 m;
2. distanza tra gli ostacoli e la pool fire pari a 0,05 m, quando presenti gli ostacoli.

Prova	Dimensioni pool fire (cm ²)	Taglia ostacoli	Posizione pool fire	HRR (kW)	u_{cr} (m s ⁻¹)
A16	6,3 x 6,3	-	Mezzeria del tunnel	4,25	0,58
A17		Media		4,51	0,48
A18			Dietro gli ostacoli	5,03	0,50
A19		Grande	Mezzeria del tunnel	4,70	0,43
B16	9,0 x 9,0	-		9,50	0,70
B17		Media		9,85	0,63
B18			Dietro gli ostacoli	15,31	0,75
B19		Grande	Mezzeria del tunnel	10,42	0,54

Tabella 3.2: Simulazioni effettuate - "caso tunnel"

3.2.2.1 Modellazione in OpenFOAM

Si è considerato un dominio di dimensioni totali di 10,9 x 0,616 x 0,402 m³ comprendente, il tunnel in scala da laboratorio a cui è stato aggiunto lo spessore delle pareti e il sistema di distribuzione della ventilazione. È stata inoltre considerata una zona aggiuntiva davanti all'estremità destra del tunnel di lunghezza 1,5 m. (Figura 3.21) Così facendo la definizione delle condizioni al contorno necessarie è stata più

agevole. L'estremità destra del tunnel può infatti essere trattata in modo del tutto analogo al "caso Steckler".

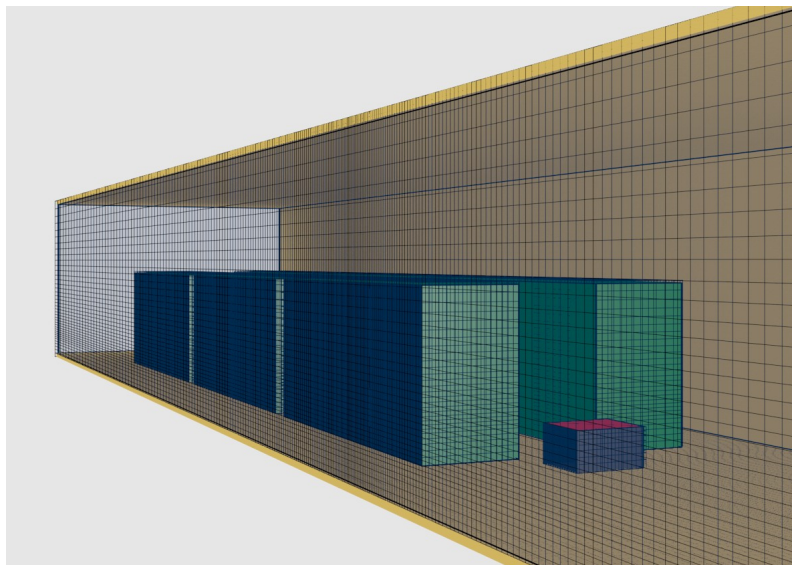
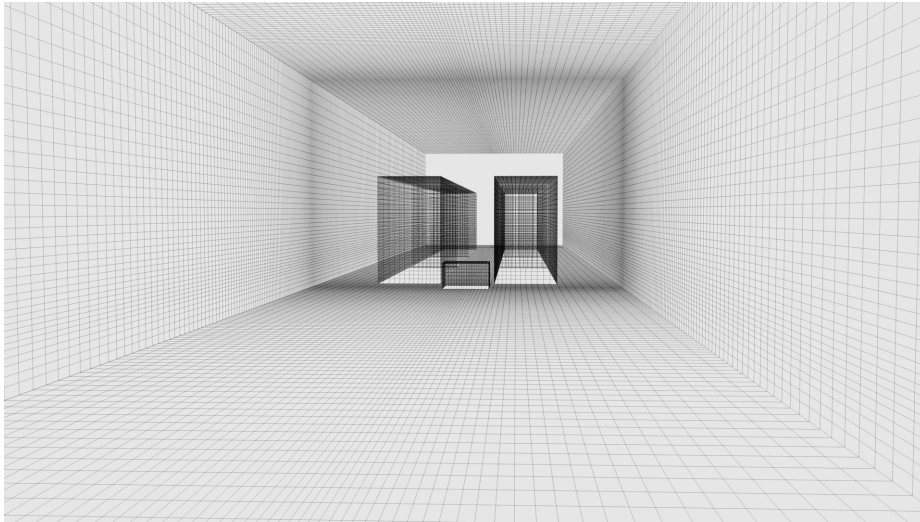


Figura 3.19: Geometria in OpenFOAM - "caso tunnel"

Si è deciso di lavorare con una griglia altamente non strutturata effettuando tre diversi grading nelle tre direzioni a partire dalla pool fire dove la griglia è più fitta. Con tale configurazione si è cercato di abbattere il più possibile i tempi di calcolo necessari, mantenendo comunque una sufficiente definizione della pool fire in termini di numero di celle. Sono stati presi in considerazioni tre diversi passi di griglia,

0,04 m, 0,02 m, $0,02_{\text{Wall Layer}}$ m e $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m, (Figura 3.20) definiti dalla dimensione di cella in corrispondenza della pool fire. Con tali mesh si sono svolti i test di analisi di sensitività della griglia utilizzando la configurazione del caso studio B16. Si è deciso di imporre come limite massimo al grading tra celle adiacenti il valore di 1,2 in modo da non avere un aumento troppo repentino del passo di griglia con conseguenti problemi di convergenza della soluzione. Si è inoltre aumentata la definizione della pool fire tramite l'impiego della funzione "refinement surface" che permette l'aumento del numero di facce di cella descriventi la patch considerata. Anche in questo caso si è valutato l'effetto del "wall layer", [11], sulla griglia avente il miglior compromesso tra tempo di calcolo e precisione dei dati ottenuti e sulla griglia più fitta. Queste due mesh sembravano infatti essere, già in partenza, le mesh di maggior interesse per le simulazioni. Si è quindi cercato di rifinirle ulteriormente usando il "wall layer".

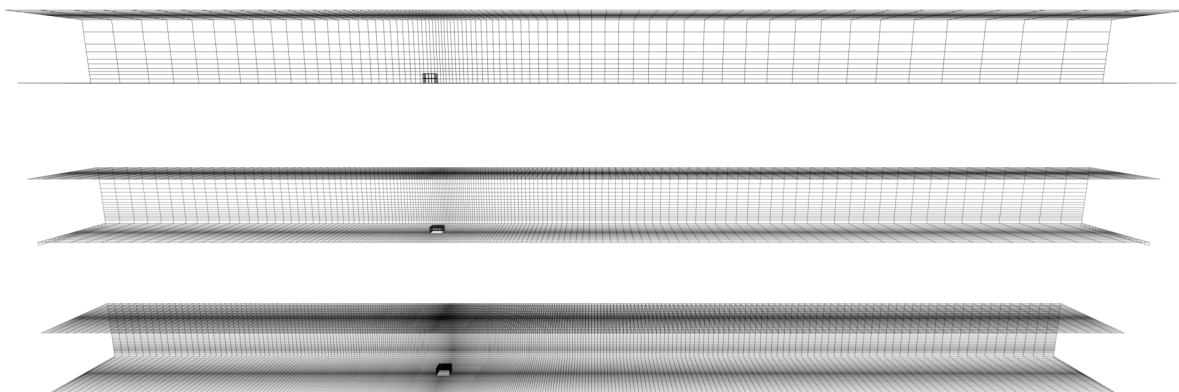


Figura 3.20: Mesh usate - A partire dall'alto 0,04 m, $0,02/0,02_{\text{Wall Layer}}$ m e $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m - "caso tunnel"

Il numero di celle totale delle diverse mesh è rispettivamente circa 8000 per la mesh 0,04 m, 39000 nei casi 0,02 m e $0,02_{\text{Wall Layer}}$ m e infine 213000 in quello a $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m. L'utilizzo della funzione "SnappyHexMesh" (Sotto sottosezione 2.5.2.1) elimina la mesh in corrispondenza delle pareti del tunnel e degli ostacoli. È opportuno disattivare l'opzione "snap" dello "SnappyHexMesh"[11], che andrebbe altrimenti ad arrotondare la mesh vicino agli spigoli solidi presenti nella geometria.

Le simulazioni non sono state effettuate usando più processori in parallelo, questo perché è risultato più facilmente gestibile assegnare una sola simulazione per processore. Avendo a disposizione più processori è comunque stato possibile svolgere più simulazioni contemporaneamente, ottimizzando così i tempi di calcolo.

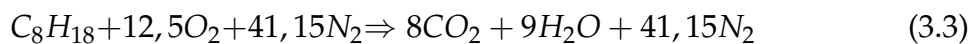
Nonostante OpenFOAM disponga della funzione "Sampling data"[11], che permette di ricavare dei dati di interesse a simulazione già terminata, si è deciso di posizionare ugualmente dei dispositivi di misura. Sono state poste le due termocoppie T_a e T_b nelle medesime posizioni dei casi sperimentali di riferimento e in aggiunta, dei dispositivi di misura della concentrazione di CO_2 lungo la mezzzeria del tunnel per la sua intera lunghezza in corrispondenza del soffitto.

In modo analogo al "caso Steckler" modellato in OpenFOAM, la scelta del "voxels size" è pressochè arbitraria.

Le pareti del tunnel e gli ostacoli sono stati considerati adiabatici e tale peculiarità la si è definita direttamente in Blender.

La pool fire, per semplicità, è stata rappresentata quadrata di dimensioni variabili in base alla prova svolta. (Figura 3.19) Si è inoltre approssimata la composizione del combustibile, originariamente benzina, a del n-ottano puro. La "patch" associata alla pool fire è stata trattata come un inlet di n-ottano nel dominio di calcolo.

La potenza della pool fire è stata quindi definita imponendo, tramite la funzione “flowRateInletVelocity” [15, 16], una portata di combustibile entrante adeguata per ottenere la potenza voluta. Bisogna porre attenzione nell’usare l’effettivo valore di ΔH_c che compare in OpenFOAM, opportunamente convertito, pari a $4,47834 \cdot 10^7$ J kg^{-1} . Al fine di rendere più facile la convergenza si è modellato l’innesco della pool fire utilizzando una rampa lineare di 50 s, che porta allo sviluppo della sua piena potenza. Si è esplicitata la stechiometria della reazione di combustione utilizzando una reazione di tipo “irreversibleInfiniteReaction”:



La “cella di carico” presente al di sotto della pool fire è stata modellata semplicemente come un ostacolo fisico nella medesima posizione. Essa nelle simulazioni non svolge di fatto alcuna funzione attiva.

Infine il sistema di ventilazione meccanico è stato modellato come una superficie di inlet di aria a condizioni ambiente, la cui velocità è imposta di volta in volta in base alla prova svolta.

In Tabella 3.3 sono riportate, a titolo d’esempio, le principali condizioni al contorno imposte alle diverse patch. (Figura 3.21) Dato che i primi 200 s di simulazione sono stati condotti con pool fire spenta, per permettere l’instaurarsi di un campo di moto stabile dovuto alla ventilazioni, alcune condizioni al contorno in tale fase saranno diverse rispetto quelle usate per il resto della simulazione a pool fire accesa. Nella modellazione bisogna dunque tener conto di tale aspetto.

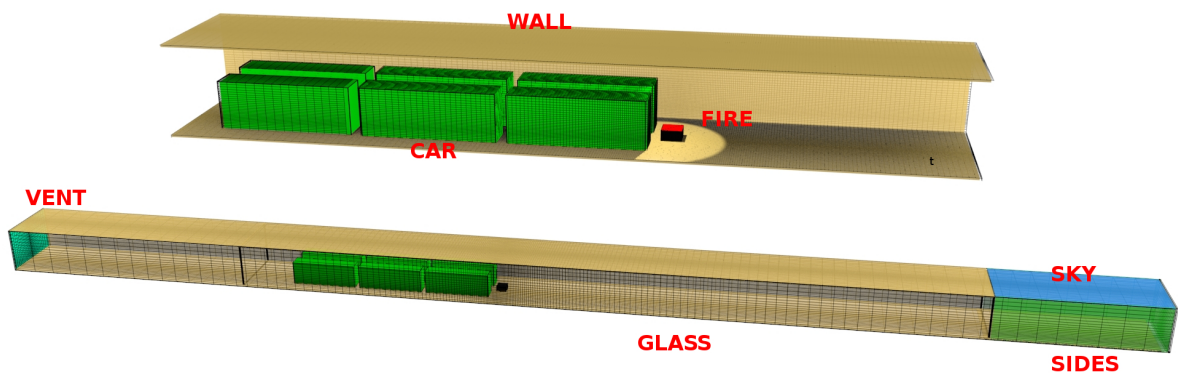


Figura 3.21: Definizione delle patch - “caso tunnel”

Patch	Variabile	Tipo	Valore
Fire	U	fixedValue	0 (Primi 200 s di simulazione)
	U	massFlowRate	table (Resto della simulazione)
Vent	U	fixedValue	(Ventilazione della prova svolta)
Sides	U	fixedValue	
	p_rgh	fixedFluxPressure	internalField
Sky	U	inletOutlet	
	p_rgh	fixedFluxPressure	internalField
Wall - Car - Glass	T	zeroGradient	

Tabella 3.3: Condizioni al contorno - “caso tunnel”

3.2.3 Metodologie e strategia risolutiva

Per affrontare il presente caso studio si è deciso di procedere applicando le seguenti metodologie e strategia risolutiva, al fine di ottenere dei risultati di buona qualità e altresì degli oneri computazionali ragionevoli.

In tutte le prova svolte ci si è posti come obbiettivo l'identificazione con due diversi approcci, del valore di velocità critica, u_{cr} , a cui corrisponde retro diffusione di fumo nulla. Tale parametro è di particolare interesse in sede di progettazione in quanto consente di mantenere le vie di fuga libere dal fumo. Le due metodologie impiegata per la sue determinazione sono rispettivamente:

1. approccio ΔT ;
2. approccio CO_2 .

3.2.3.1 Approccio ΔT

L'approccio ΔT si basa sul confronto dei valori di temperatura rilevati dalle due termocoppie T_a e T_b . La condizione di ventilazione critica viene raggiunta quando sia T_a che T_b rilevano temperatura ambiente, fornendo quindi un ΔT nullo. I generici profili di ΔT al variare della velocità di ventilazione, ricavati da tale approccio, presentano il seguente andamento a picco. (Figura 3.22)

La presenza del picco è facilmente giustificabile considerando la dinamica del fenomeno:

1. a bassi valori di u , ΔT ha valore positivo diverso da 0. Questo perchè siamo in condizioni di completa retrodiffusione di fumo. Entrambe le termocoppie T_a

e T_b rilevano la “temperatura di fumo”, che non essendo omogenea mantiene ΔT diverso da 0;

2. all'aumentare di u , ΔT aumenta fino al raggiungimento di un massimo corrispondente alla situazione di retrodiffusione parziale. In questo caso T_b , arretrata rispetto alla pool fire, è esente da fumo e rileva quindi temperatura ambiente mentre T_a , sull'asse della pool fire, rileva ancora la “temperatura di fumo”;
3. un ulteriore aumento di u determina la diminuzione di ΔT fino a che non si annulla. Tale condizione corrisponde a retrodiffusione nulla e il valore di u corrispondente è u_{cr} ;
4. successivi aumenti di u non influiscono su ΔT , che rimane costante e nullo.

Questo approccio presenta il grosso vantaggio di essere rigoroso, non avendo richiesto alcuna ipotesi semplificativa o approssimazione.

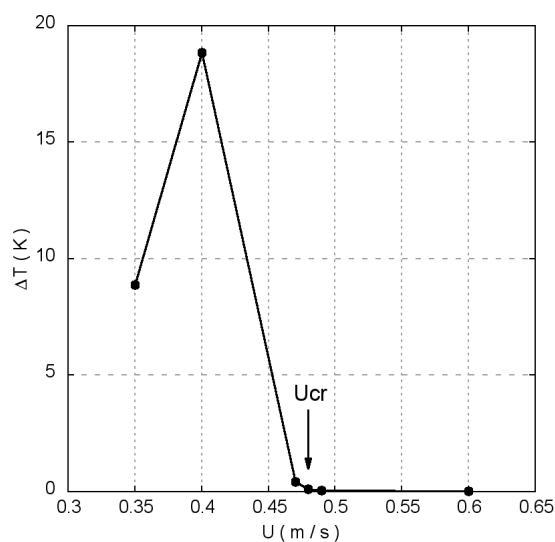


Figura 3.22: Andamento qualitativo di ΔT al variare della velocità di ventilazione - “caso tunnel”

3.2.3.2 Approccio CO₂

Obbiettivo di tale approccio è verificare se esiste un metodo alternativo e più immediato rispetto l'approccio ΔT , per effettuare una valutazione, anche grossolana, della presenza o meno di retrodiffusione di fumo. Si basa sulla valutazione della retrodiffusione a partire dai valori di concentrazione di CO₂ lungo il tunnel. Il metodo sfrutta infatti l'approssimazione che il fumo, cioè il soot, sia identificabile con la sola CO₂. Ciò ha permesso di confrontare i risultati ottenuti da FDS e da OpenFOAM anche se riferiti a parametri diversi. Si ricorda infatti che OpenFOAM non presenta un modello per il soot, richiedendo quindi l'utilizzo di un parametro diverso come la concentrazione di CO₂ per l'appunto. Inoltre così facendo è stato possibile fare riferimento alle simulazioni già disponibili in FDS, [3], nelle quali non era stata considerata la misurazione della concentrazione di CO₂, ma bensì si era utilizzato il soot per determinare la presenza o meno di fumo. Così facendo non è stato quindi necessario ripetere le simulazioni con FDS, facendo economia del tempo di calcolo. Per rilevare la concentrazione di CO₂ sono stati inseriti nelle simulazioni dei dispositivi di misura lungo la mezzeria del tunnel per la sua intera lunghezza in corrispondenza del soffitto. È stato quindi definito un valore di soglia di concentrazione di CO₂, con il quale si è determinata la presenza o meno di fumo. Il valore di riferimento scelto è stato 1000 ppm, essendo un valore normalmente utilizzato in letteratura per valutare l'efficienza dei sistemi di ventilazione. Di conseguenza si è considerato:

$$[\text{CO}_2] \begin{cases} \geq 1000 \text{ ppm} & \text{Presenza di fumo} \\ < 1000 \text{ ppm} & \text{Assenza di fumo} \end{cases} \quad (3.4)$$

Si nota immediatamente come tale approccio sia affetto dalla forte ipotesi iniziale di coincidenza del fumo, soot, e della CO₂ e di come la stessa scelta del valore di soglia sia arbitraria e introduca un margine di incertezza nel metodo. Tali approssimazioni sono in realtà ragionevoli e non influenzano in modo significativo i risultati ottenuti. La Figura 3.23 riporta gli andamenti di soot e di CO₂ per il caso B16 in FDS, al variare della velocità di ventilazione. Tali risultati sono stati ricavati appositamente tramite una simulazione svolta con FDS al fine di convalidare l'approccio CO₂. Si può osservare come i due andamenti siano praticamente uguali e di come anche i valori di u_{cr} determinati da essi, per intersezione con la retta a ordinata nulla, siano molto simili. Di conseguenza l'ipotesi alla base dell'approccio CO₂ di confrontare due parametri diversi, il soot in FDS e la concentrazione di CO₂ in OpenFOAM, risulta essere ragionevole. Infatti data l'estrema somiglianza dei due profili di soot e CO₂ per FDS, si effettua in realtà quasi un confronto tra le concentrazioni di CO₂ per entrambi i software. Tale comportamento di FDS è dovuto alla sua peculiarità di trattare in modo molto simile qualsiasi tipo di particolato indipendentemente dalla sua natura. Infine dalla Figura 3.24 si può osservare come in realtà la scelta del valore di riferimento, entro limiti di ragionevolezza, non sia così influente sulla valutazione della retrodiffusione. I diversi profili a isoconcentrazione di CO₂ tendono infatti a schiacciarsi, in particolare nella zona a monte della pool fire, dove risentono maggiormente dell'effetto della ventilazione e dove è nostro interesse valutarne la concentrazione. Tale condizione è pressoché costante al variare della velocità di ventilazione imposta.

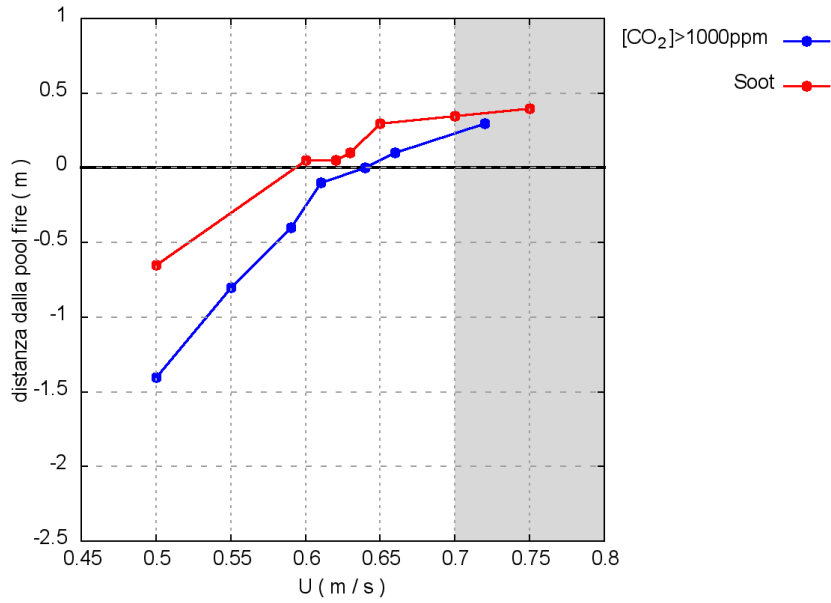


Figura 3.23: Confronto tra soot e concentrazione di CO₂ in FDS - prova B16 a ventilazione variabile - “caso tunnel”

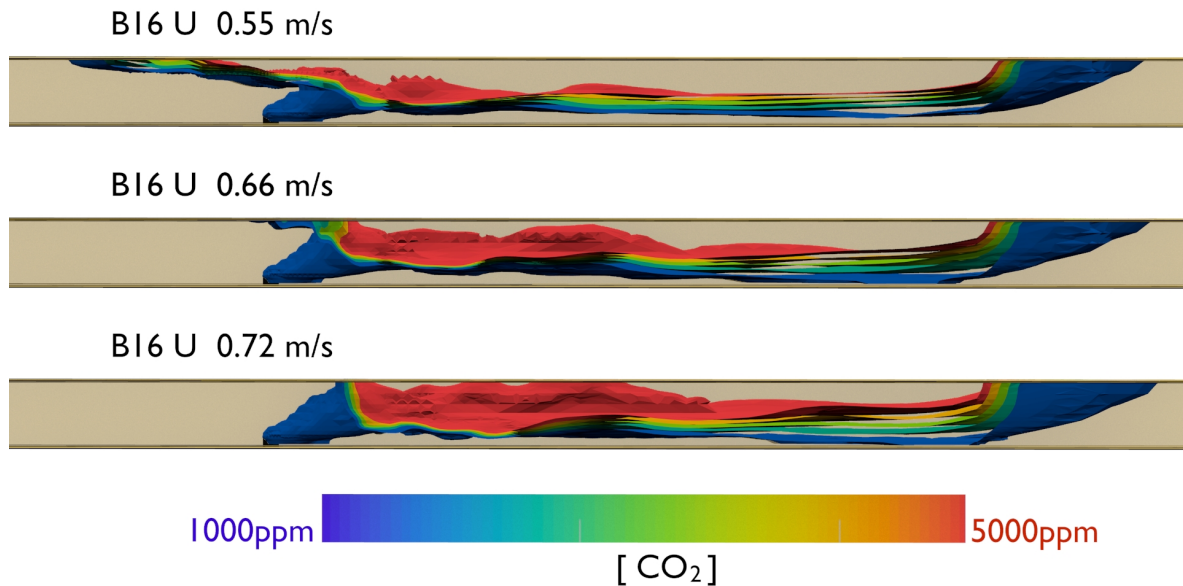


Figura 3.24: Profili di concentrazione di CO₂ - prova B16 a ventilazione variabile - “caso tunnel”

3.2.3.3 Strategia risolutiva

Obbiettivo del presente caso studio è ricavare i valori di u_{cr} cercati, ottenendo risultati attendibili e contenendo altresì i tempi di calcolo richiesti. Per poter fare ciò è stato inanzitutto necessario definire la mesh ottimale con la quale lavorare, a partire dalla rosa di mesh a disposizione, $0,04\text{ m}$, $0,02\text{ m}$, $0,02_{\text{Wall Layer}}\text{ m}$ e $0,01_{\text{Wall Layer}}\text{ m}$. Si è quindi svolta una fase preliminare di analisi di sensitività della griglia di calcolo in cui utilizzando tutte le mesh a disposizione si è simulato la prova B16. (Tabella 3.2) A partire dai valori di temperatura rilevati lungo il tunnel si è quindi valutato tramite l'impiego del GCI (Sotto sottosezione 2.1.4.6), il passo di griglia definitivo con il quale poter svolgere l'intera batteria di simulazioni. In particolare si è deciso di lavorare utilizzando la mesh $0,02_{\text{Wall Layer}}$ avente numero di celle 39000.

Con un numero di celle così basso ci si trova al limite tra l'effettuare una simulazione URANS e una LES, con conseguenti problematiche di precisione dei dati ottenuti. Considerando inoltre l'elevato numero di simulazioni che è necessario svolgere, si è deciso di dividere il lavoro in due fasi e altrettante batterie di simulazioni:

1. nella prima fase sono state effettuate la maggior parte delle simulazioni con la mesh $0,02_{\text{Wall Layer}}$. Così facendo è stato possibile identificare, anche se con un basso livello di precisione, il valore di u_{cr} di ogni prova usando entrambi gli approcci precedentemente illustrati. Questa prima valutazione ha fornito un valore iniziale di u_{cr} , da raffinare successivamente;
2. nella seconda fase si è cercato di eliminare la problematica legata al basso numero di celle della mesh utilizzata nella prima fase. Si è quindi aumen-

tato il passo di griglia impiegato passando a $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m per un totale di 213000 celle. Così facendo ci si è assicurati di svolgere una simulazione di tipo LES, garantendo quindi un livello di precisione maggiore. Con la mesh da $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m sono state svolte solo poche simulazioni, nell'intorno dei valori di u_{cr} trovati con l'approccio ΔT nella prima fase. Si è così raffinata la stima preliminare di u_{cr} , fatta nella prima fase, mantenendo altresì dei tempi di calcolo contenuti. Questa ultima fase di simulazione la si è applicata solo ai valori ricavati con l'approccio ΔT , essendo questo un approccio rigoroso.

Le varie simulazioni svolte sono state condotte imponendo diversi valori di ventilazione longitudinale e lasciando che il campo di moto si sviluppasse completamente in assenza di pool fire per 200 s. Dopo tale tempo si è innescata la pool fire utilizzando una rampa lineare di 50 s per svilupparne la completa potenza. La durata totale delle simulazioni è di 500 s. Al termine di ogni simulazione è stato quindi possibile verificare se il valore di ventilazione imposto soddisfacesse la condizione di retrodiffusione nulla e fosse quindi il valore di u_{cr} cercato. Se tale condizione è soddisfatta è possibile passare alla prova successiva, altrimenti è necessario proseguire le simulazioni della medesima prova cambiando il valore di ventilazione imposto. Il procedimento viene ripetuto fino a trovare il valore di u_{cr} . I valori di ventilazione imposti sono stati scelti in modo pressochè arbitrario. Si è partiti dai valori riportati nelle prove sperimentali (Tabella 3.2) e nelle simulazioni di FDS, [3], tenendo in considerazione il generico profilo della variazione di ΔT al variare dei valori di ventilazione imposti, u . (Figura 3.22)

3.2.4 Risultati

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni presentati in modo da rispettare la sequenza delle fasi di lavoro enunciate nella sottosezione 3.2.3. Sono trattati entrambi gli approcci ΔT e CO_2 , usati per la definizione dei valori di u_{cr} , dedicando una breve sotto sottosezione preliminare alla spiegazione di come i dati sono stati raccolti e trattati.

3.2.4.1 Determinazione dei valori medi di temperatura e concentrazione di CO_2

In questa analisi per poter determinare i valori di u_{cr} sono stati presi in considerazione dei valori medi di temperatura e concentrazione di CO_2 . È quindi necessaria una precisazione di come tali valori siano stati ricavati. Nelle varie simulazione sono stati posizionati due gruppi di dispositivi di misura, usati nei due diversi approcci ΔT e CO_2 . Rispettivamente le due termocoppie T_a e T_b e la serie di rilevatori di concentrazione di CO_2 lungo la mezzeria del tunnel. Con tali dispositivi si sono determinati i valori istantanei delle variabili di interesse, imponendo la scrittura dei valori rilevati ogni 1 s di simulazione. Inoltre i primi 200 s di simulazione sono stati adibiti all' sviluppo del campo di moto, dovuto alla ventilazione. Dopo tale tempo si è innescata la pool fire utilizzando una rampa lineare di 50 s per svilupparne la completa potenza. Si considera, a titolo d' esempio, l' andamento temporale dei valori rilevati da T_a nella simulazione B16 con mesh $0,02_{Wall Layer}$ m e velocità di ventilazione imposta pari a $0,05 \text{ m s}^{-1}$. (Figura 3.25) Si osserva come dopo circa 400 s la simulazione giunga a condizioni pseudostazionarie. È quindi valutato l' intervallo temporale di mediazione τ indicato in Figura 3.25 dall' area grigia. Esso

rappresenta il lasso di tempo per cui il valor medio della variabile considerata risulta circa costante. Nella maggior parte delle simulazioni si è osservato un valore di τ pari a circa 100 s. Lo si è quindi utilizzato per effettuare la media temporale dei valori istantanei rilevati in tale lasso di tempo.

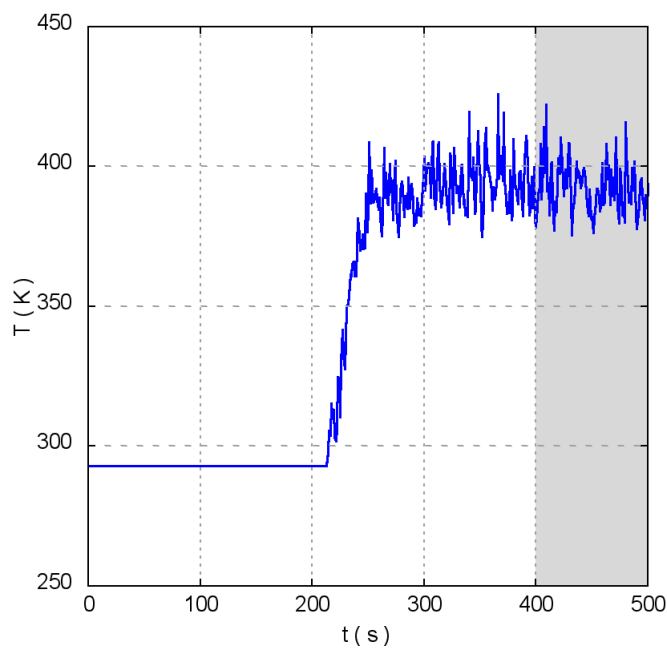


Figura 3.25: Andamento della temperatura nel tempo - “caso tunnel”

3.2.4.2 Analisi di sensitività della mesh

Come accennato in precedenza la prima fase preliminare del lavoro è l'analisi di sensitività della mesh. Essa consiste nella definizione della mesh ottimale con la quale svolgere l'intera batteria di simulazioni. Si è testata l'intera rosa di mesh a disposizione, 0,04 m, 0,02 m, 0,02_{Wall Layer} m e 0,01_{Wall Layer} m, simulando il caso B16. (Tabella 3.2) È stata scelta questa prova per le sue caratteristiche di semplicità della geometria sono infatti assenti ostacoli e per i valori sufficientemente alti di HRR e u_{cr} che rendono più facilmente notabili eventuali problemi nella simulazione. Si è quindi valutato tramite l'impiego del GCI (Sotto sottosezione 2.1.4.6) il passo di griglia ottimale. Il GCI è stato calcolato dai valori di temperatura ricavati con la funzione "Sampling data", [11], applicata lungo la mezzeria del tunnel a 0,1 m dal soffitto. I profili ottenuti, per le diverse mesh usate, sono riportati in Figura 3.26.

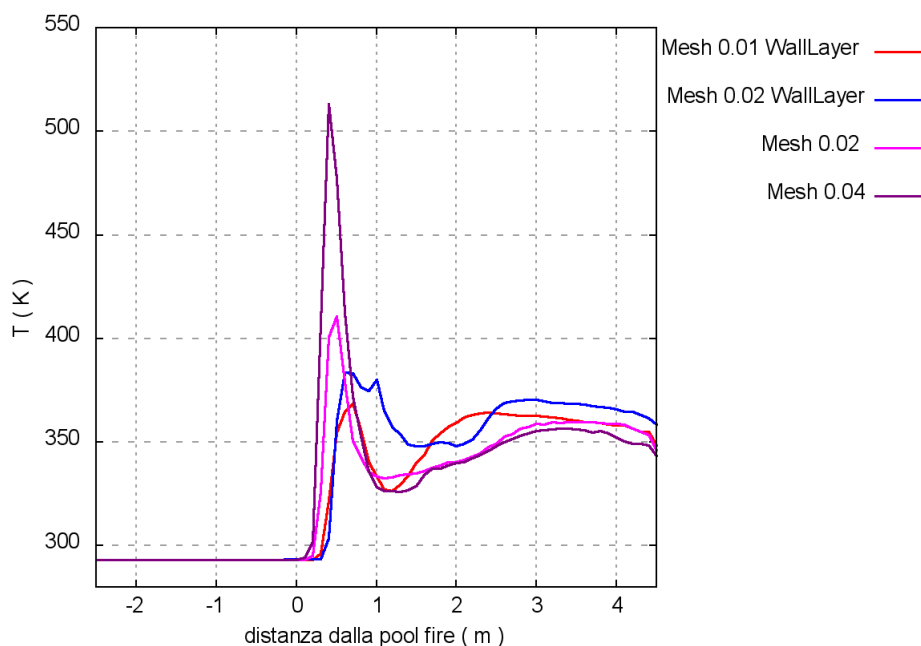


Figura 3.26: Profili di temperatura lungo la mezzeria del tunnel

Nel calcolo del GCI sono stati presi in considerazione solo i valori rilevati da 0,5 m a 2,5 m a valle della pool fire. Questo per evitare di considerare la zona a monte dove ci si trova a temperatura ambiente, per la quale il calcolo del GCI non avrebbe molto senso. I valori di GCI ottenuti sono riportati in Tabella 3.4. I pedici indicano le mesh considerate e confrontate tra loro, per il calcolo del GCI stesso. (1 = mesh $0,01_{\text{Wall Layer}}$ m, 2 = mesh $0,02_{\text{Wall Layer}}$ m, 3 = mesh 0,04 m)

GCI ₁₋₂	GCI ₂₋₃
4,90 %	6,41 %

Tabella 3.4: GCI% - "caso tunnel"

Tenendo conto dei valori numerici ottenuti e del netto divario tra i tempi di calcolo richiesti dalle diverse mesh, si è deciso di lavorare utilizzando la mesh $0,02_{\text{Wall Layer}}$ avente numero di celle 39000. Essa rappresenta infatti un buon compromesso tra tempi di calcolo richiesti e precisione dei dati ottenuti. Come già discusso precedentemente il basso numero di celle di tale mesh ha richiesto il successivo utilizzo di una mesh più fitta, per assicurarsi della bontà dei risultati ottenuti. (Sotto sottosezione 3.2.3.3)

3.2.4.3 Prima fase: valutazione preliminare di u_{cr}

Di seguito verranno riportati i risultati più significativi relativi la prima fase di simulazione caratterizzata dall'uso della mesh $0,02_{\text{Wall Layer}}$. In questa fase sono state effettuate la maggior parte delle simulazioni necessarie. Così facendo si sono identificati i valori di u_{cr} cercati, anche se con un basso livello di precisione, mantenendo delle tempistiche globali ragionevolmente basse. Sono riportati entrambi gli approcci di valutazione della u_{cr} , l'approccio ΔT e l'approccio CO_2 . Questa prima fase ha

fornito dei valori iniziali di u_{cr} , che sono stati raffinati nella fase successiva. Per consultare la serie completa di grafici relativi questa fase si rimanda all'Appendice a pagina 153.

Approccio ΔT

Sono riportate due diverse tipologie di grafici. Nella prima sono rappresentati gli andamenti delle temperature, rilevate rispettivamente da T_a e T_b , al variare della velocità di ventilazione imposta. Sono messi a confronto i risultati ricavati con FDS, relativi il lavoro di Tavelli, et al. [3], e quelli ricavati con OpenFOAM. La zona grigia nei grafici rappresenta l'area a velocità di ventilazione maggiore del valore di u_{cr} sperimentale, $u > u_{cr \text{ exp.}}$ (Tabella 3.2)

Nella seconda tipologia di grafici sono riportati gli andamenti di ΔT , scostamento tra le temperature rilevate da T_a e T_b , al variare della velocità di ventilazione imposta. Nuovamente sono confrontati i due software CFD e la zona grigia rappresenta l'area a $u > u_{cr \text{ exp.}}$ (Tabella 3.2) In tale approccio i valori di u_{cr} per i diversi software sono quei valori di velocità di ventilazione per cui ΔT è nullo e contemporaneamente, sia T_a che T_b rilevano temperatura ambiente.

Prova A17

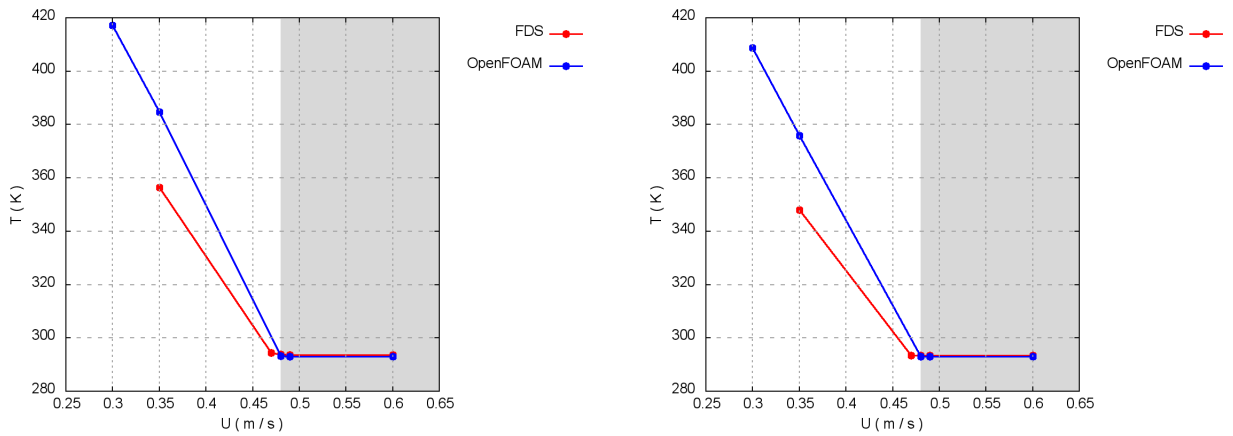


Figura 3.27: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"

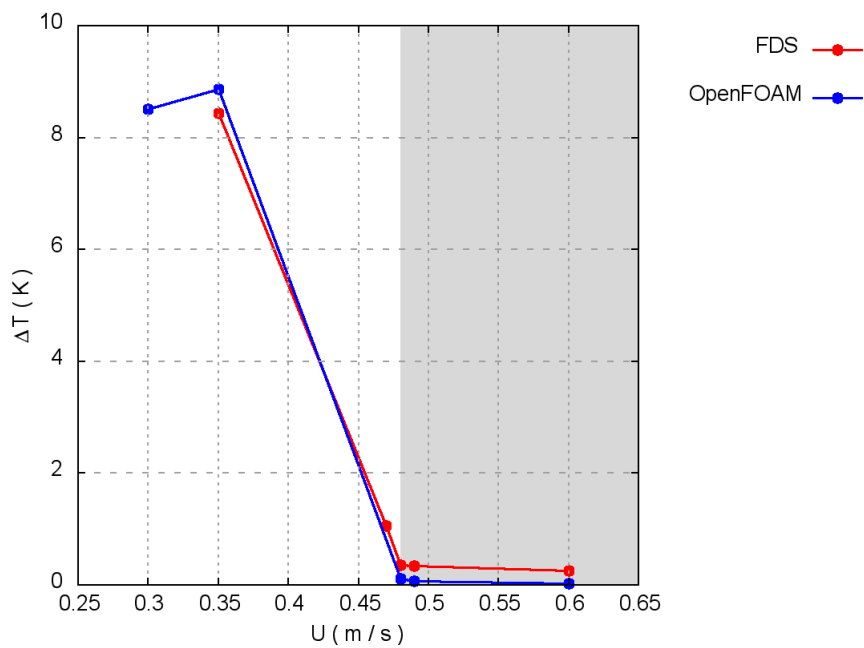


Figura 3.28: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"

Prova B16

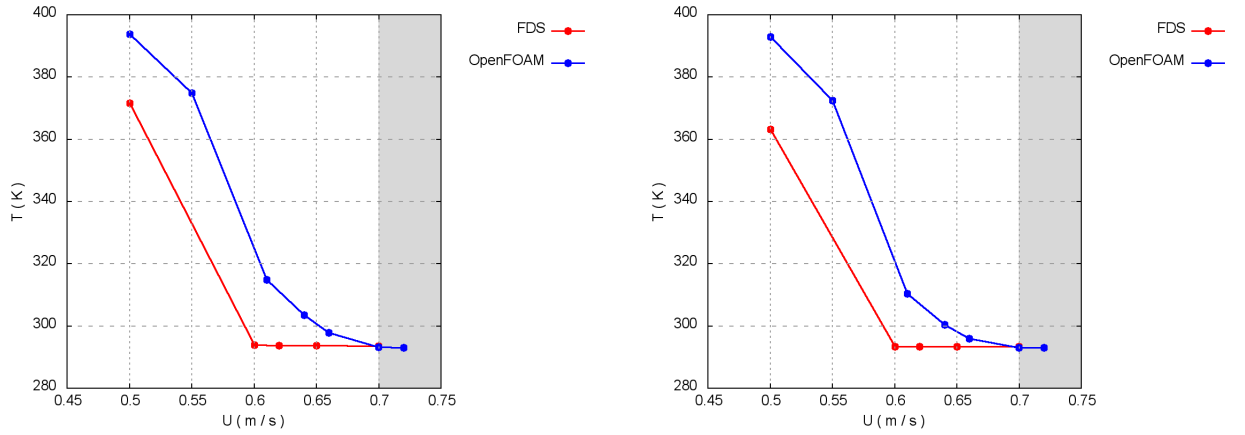


Figura 3.29: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"

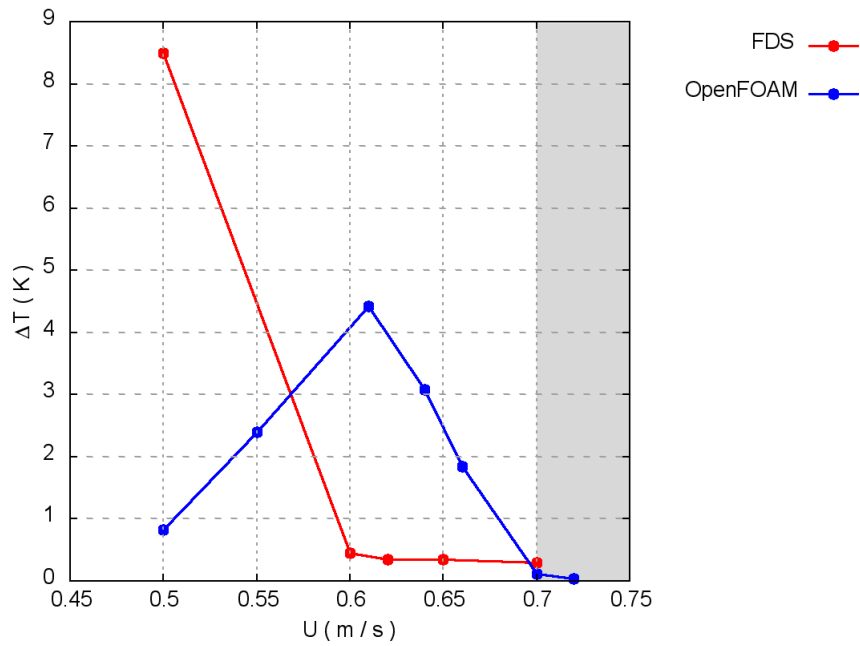


Figura 3.30: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"

Prova B19

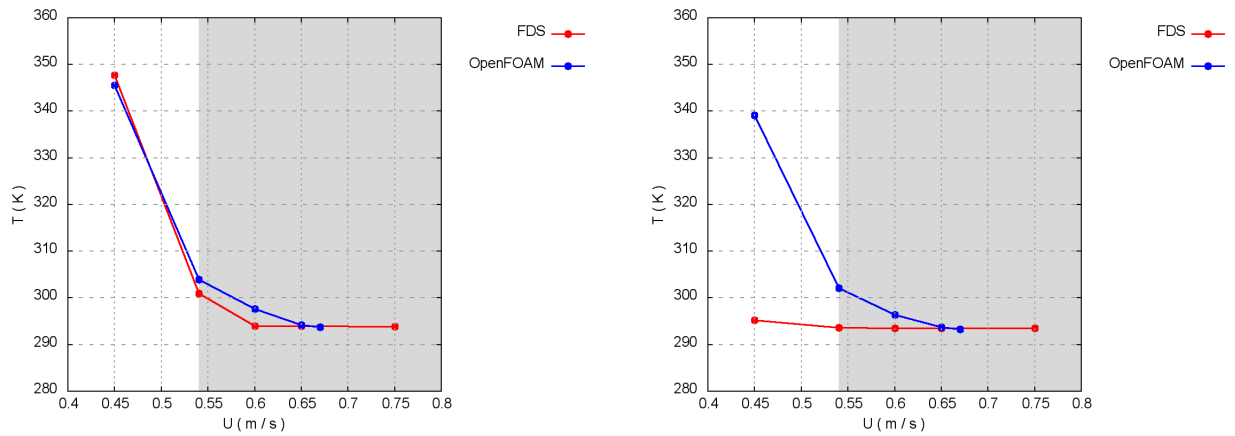


Figura 3.31: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - “caso tunnel”

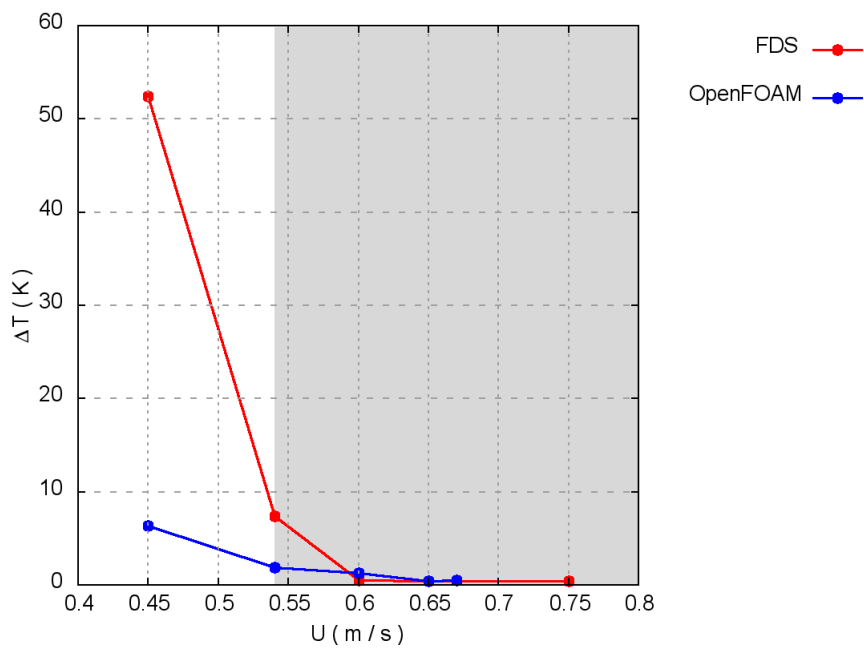


Figura 3.32: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - “caso tunnel”

Osservazioni

Globalmente si osserva una buona capacità di tale approccio nel fornire risultati attendibili. FDS e OpenFOAM presentano in quasi tutte le prove svolte, andamenti molto simili. Si nota uno scostamento tra i due software nel valutare i picchi massimi di ΔT , con la tendenza di FDS a fornire valori superiori a OpenFOAM. I valori di u_{cr} ricavati sono quasi sempre ragionevolmente simili per i due software. In maniera analoga essi forniscono dei valori nell'intorno degli u_{cr} sperimentali, ad eccezione di alcune prove come la A18 e la B19. Si osserva inoltre nella prova B16 una maggiore difficoltà di FDS rispetto OpenFOAM nel fornire il valore corretto di u_{cr} .

Approccio CO₂

Nei grafici relativi tale approccio viene riportato l'andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione. L'andamento del fumo è espresso tramite la distanza, rispetto la pool fire, del primo punto lungo il tunnel in prossimità del soffitto in cui si osserva presenza di fumo. Sono messi a confronto i risultati ricavati dai due software CFD, FDS e OpenFOAM. I risultati relativi FDS fanno riferimento al lavoro di Tavelli, et al. [3], in cui il fumo è stato identificato con il soot. Per OpenFOAM si è invece identificato il fumo utilizzando il valore di soglia di concentrazione di $CO_2 \geq 1000$ ppm. (Sotto sottosezione 3.2.3.2) La zona grigia nei grafici rappresenta l'area con velocità di ventilazione maggiore del valore di u_{cr} sperimentale, $u > u_{cr \text{ exp}}$. (Tabella 3.2) La pool fire si trova in corrispondenza del valore 0 delle ordinate, messo in evidenza da una linea tratteggiata. Per valori di ordinata positivi il fumo si propaga a valle della pool fire, non si ha quindi retrodiffusione. Per valori

negativi invece il fumo retrodiffonde propagandosi a monte della pool fire. I valori di u_{cr} per i due software CFD sono quindi identificati dai punti di intersezione dei rispettivi andamenti, con la linea tratteggiata di posizione della pool fire.

Prova A16

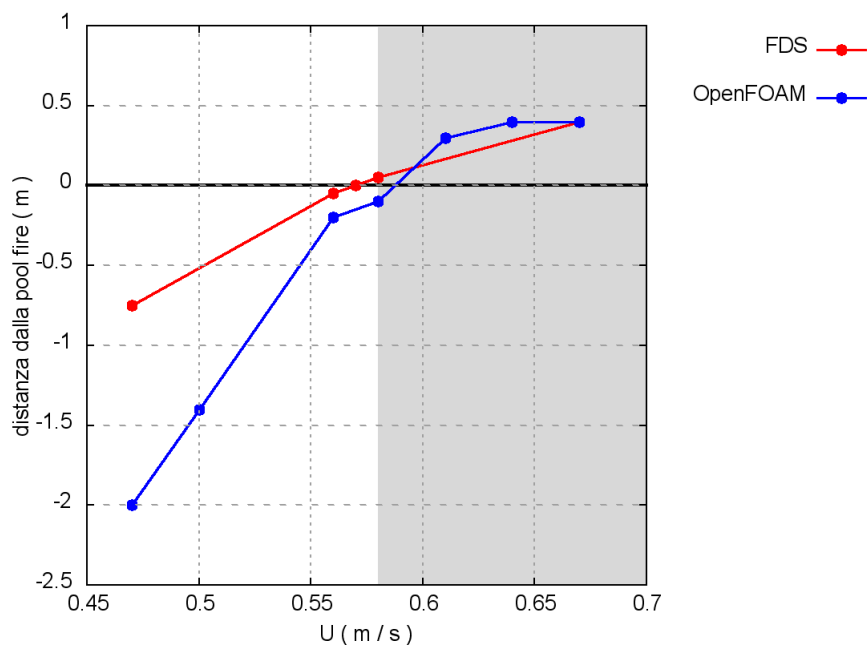


Figura 3.33: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"

Prova A18

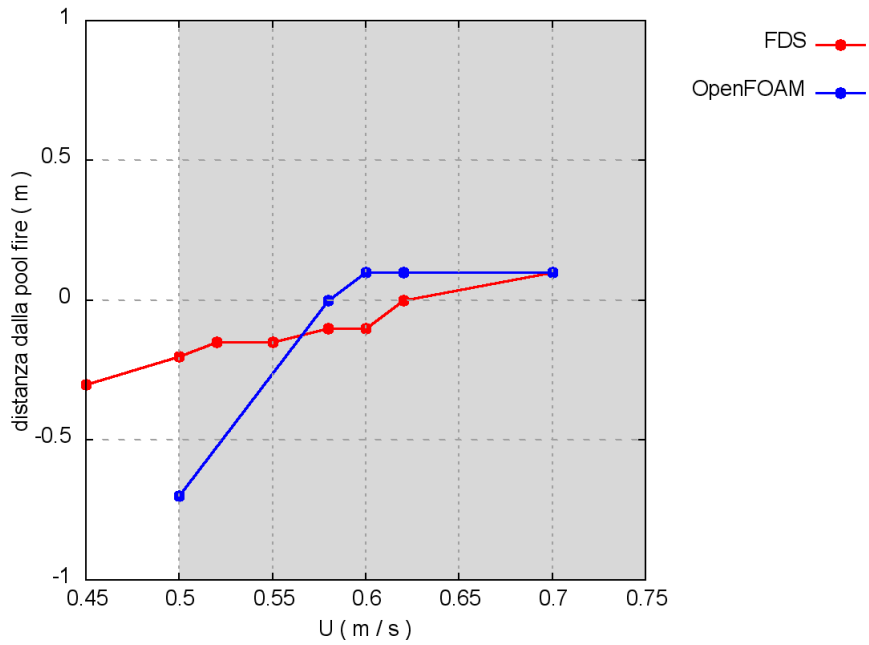


Figura 3.34: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - “caso tunnel”

Prova B16

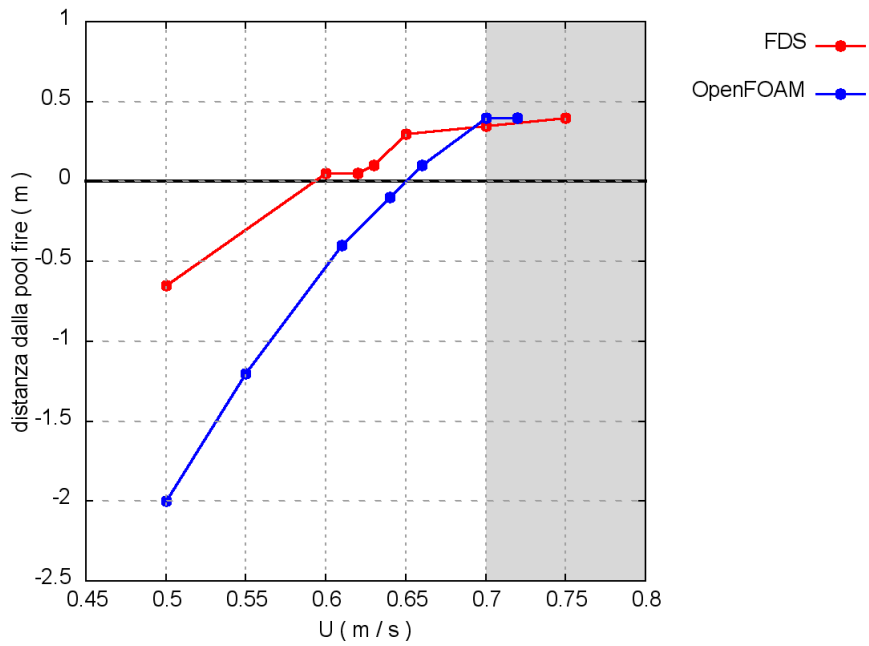


Figura 3.35: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - “caso tunnel”

Osservazioni

Globalmente meno attendibile rispetto l'approccio precedente, gli andamenti ricavati con FDS e OpenFOAM infatti non sempre sono simili. I valori di u_{cr} ricavati sono ragionevolmente confrontabili per i due software, eccezion fatta per le prove A17, B16 e B17. Essi non sempre si trovano nell'intorno degli u_{cr} sperimentali. In particolare nella prova B16 si ha una maggiore difficoltà di FDS rispetto OpenFOAM nel fornire il valore corretto di u_{cr} , viceversa nelle prove A17 e B17. Infine nella prova A18 entrambi i software non forniscono valori di u_{cr} vicini allo sperimentale.

3.2.4.4 Seconda fase: raffinamento di u_{cr}

Nella seconda fase di lavoro, caratterizzata dall'uso della mesh $0,01_{Wall Layer}$, si sono svolte solo alcune simulazioni nell'intorno dei valori di u_{cr} trovati nella fase precedente. In tal modo si è potuto raffinare la precedente stima di u_{cr} aumentandone il livello di precisione, contenendo il più possibile i tempi di calcolo. È stato approfondito solo l'approccio ΔT , in modo da limitare il numero di simulazioni e le tempistiche totali. Inoltre tale approccio essendo rigoroso gode di una maggiore attendibilità rispetto all'approccio CO_2 , motivo per cui è stato preferito a quest'ultimo. Ci si è infine assicurati di svolgere una simulazione con un numero di celle sufficientemente alto da essere senza dubbio di tipo LES, godendo quindi di una maggiore precisione dei risultati ottenuti, rispetto la fase precedente. Dato il basso numero di simulazioni svolte in questa fase non è stato possibile definire degli andamenti apprezzabili da riportare graficamente. Si propone quindi la Tabella riassuntiva globale 3.5 dove i valori definitivi di u_{cr} ricavati sono riportati, ordinati per

prova e distinguendo tra i diversi approcci utilizzati. I valori relativi l'approccio ΔT derivano, come detto, da questa fase di lavoro, mentre i valori relativi l'approccio CO_2 derivano dalla prima fase non essendo stati trattati ulteriormente nella seconda. Sono inoltre riportati i valori di u_{cr} relativi le prove sperimentali e quelli ricavati dalle simulazione svolte con FDS. [2, 3]

Prova	Exp	Approccio ΔT		Approccio CO_2	
		FDS	OpenFOAM	FDS	OpenFOAM
A16	0,58	0,58	0,62	0,57	0,61
A17	0,48	0,47	0,49	0,49	0,47
A18	0,50	0,55	0,60	0,62	0,58
A19	0,43	0,47	0,48	0,48	0,47
B16	0,70	0,60	0,72	0,60	0,66
B17	0,63	0,60	0,61	0,63	0,50
B18	0,75	0,75	0,75	0,77	0,75
B19	0,54	0,56	0,63	0,60	0,60

Tabella 3.5: Valori definitivi di u_{cr} (m s^{-1}) per i diversi software e approcci - "caso tunnel"

3.2.4.5 Analisi dei risultati ottenuti

Una volta ricavati i valori definitivi di u_{cr} è possibile procedere alla loro analisi. Si è innanzitutto valutato l'andamento di tali valori al variare del grado di congestione del tunnel, α , funzione del numero e delle dimensioni degli ostacoli presenti. I grafici propongono gli andamenti relativi i due software, FDS e OpenFOAM, in confronto con i valori sperimentali. Sono inoltre distinti in base all'approccio utilizzato per ricavare i valori di u_{cr} e in base alle dimensioni della pool fire. In particolare "small burner" indica la pool fire di dimensioni $6,3 \times 6,3 \text{ cm}^2$ mentre "big burner" quella di dimensioni $9 \times 9 \text{ cm}^2$. (Figure 3.36, 3.37)

Approccio ΔT

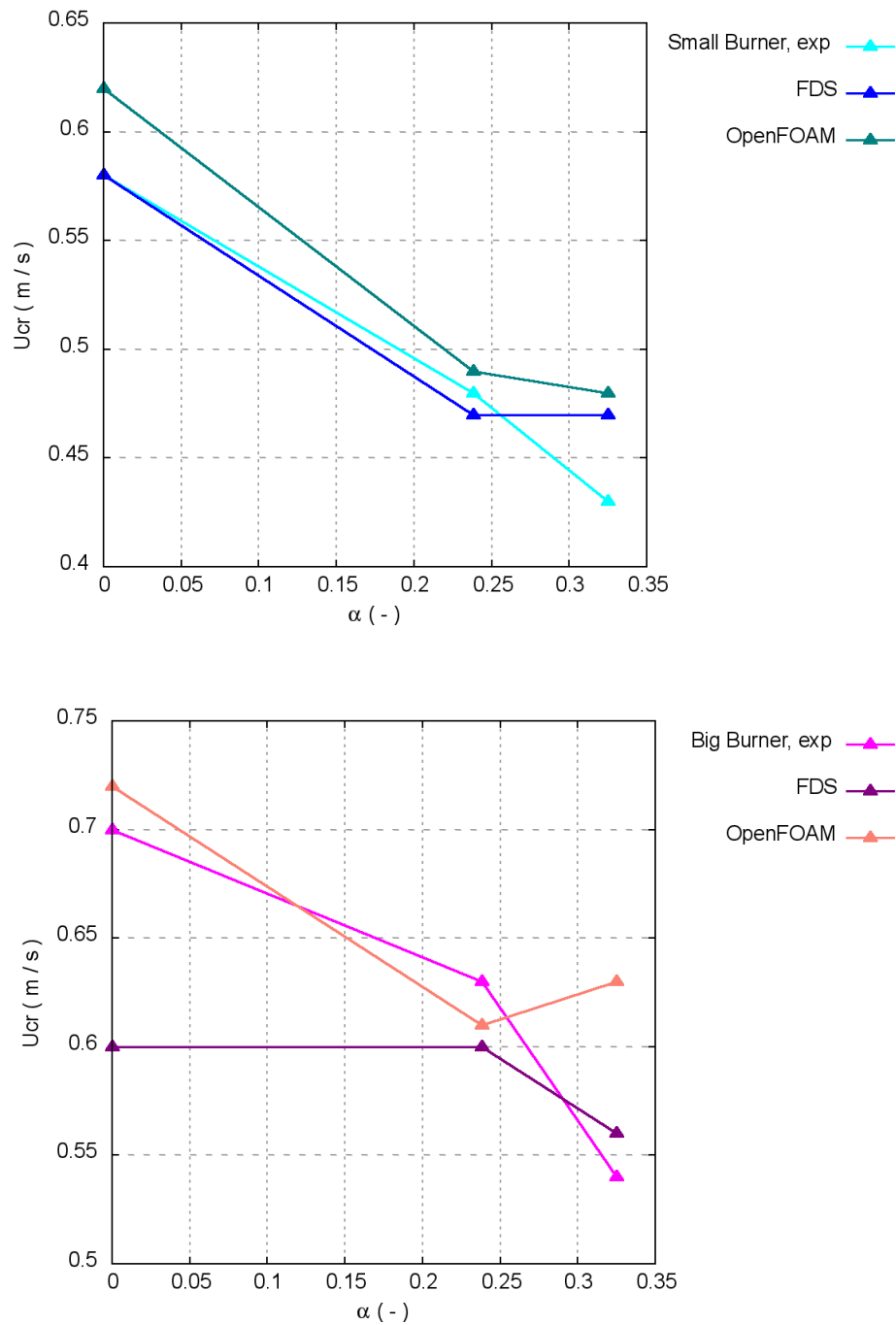


Figura 3.36: Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi "small burner" (Grafico in alto) e "big burner" (Grafico in basso) - Approccio ΔT

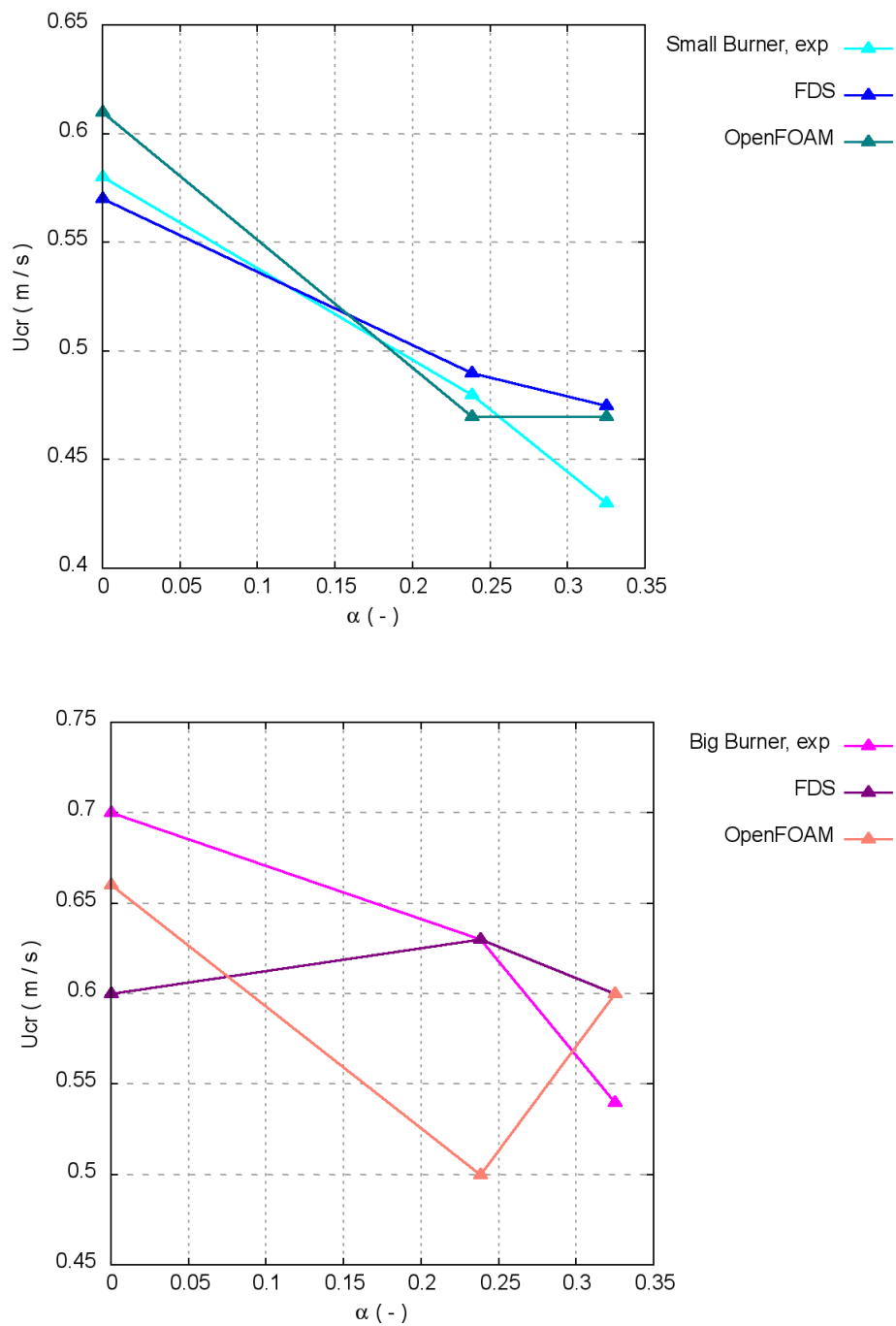
Approccio CO₂

Figura 3.37: Andamenti di u_{cr} al variare del grado di congestione del tunnel, per i casi "small burner" (Grafico in alto) e "big burner" (Grafico in basso) - Approccio CO₂

Si osserva come i diversi andamenti dei software non siano determinati dalla diversità di approccio, ma bensì dalla diversità di dimensioni della pool fire. Infatti si ripropongono i medesimi comportamenti con entrambi gli approcci considerati, mantenendo costante la dimensione della pool fire. Non è vero il contrario. Si distingue quindi tra i due casi a diverse dimensioni.

Small burner Entrambi i software presentano andamenti confrontabili con lo sperimentale, gli stessi valori di u_{cr} determinati sono ragionevolmente simili ai valori esatti. Si osserva la tendenza di OpenFOAM a sovrastimare il valore di u_{cr} per bassi α , mentre FDS è più aderente al valore sperimentale. All'aumentare di α i due software tendono a convergere verso il medesimo valore, sovrastimando quello esatto.

Big burner All'aumentare delle dimensioni della pool fire, gli scostamenti dei due software dallo sperimentale si accentuano nettamente. OpenFOAM presenta andamenti molto diversi dallo sperimentale, mentre FDS risulta più aderente. I valori di u_{cr} determinati presentano scostamenti, anche accentuati, dai valori esatti. Si osserva la tendenza di FDS a sottostimare in modo significativo il valore di u_{cr} per bassi α , mentre OpenFOAM è più aderente al valore sperimentale. I due software tendono a convergere verso il medesimo valore per α intermedi, nel caso dell'approccio ΔT . Diversamente convergono per alti valori di α , nel caso dell'approccio CO_2 .

Si è infine valutata l'attendibilità dei risultati ottenuti tramite il calcolo del loro scostamento percentuale dai valori sperimentali. Gli errori sono stati diagrammati evidenziando il confronto tra i due approcci ΔT e CO_2 per lo stesso software e altresì

confrontando i due software tra loro. Per una lettura più immediata si è indicata la retta di coincidenza dei valori sperimentali a quelli simulati. Di conseguenza i punti che si trovano sulla retta centrale presentano dei valori simulati identici al relativo valore sperimentale di u_{cr} . Maggiore è la distanza dei punti da tale retta maggiore è l'errore associato. Per maggior chiarezza si sono evidenziate le rette a errore costante pari a $\pm 20\%$. (Figure 3.38, 3.39) Si osservano buoni risultati per entrambi i confronti svolti. Quasi tutti i valori di u_{cr} rilevati sono affetti da un errore minore del 20%. Anche se decisamente non marcata si nota la tendenza di FDS a fornire un maggior numero di valori in perfetto accordo con gli sperimentali. L'approccio ΔT sembra fornire valori leggermente migliori rispetto l'approccio CO_2 , grazie alla natura rigorosa di cui il secondo metodo non gode. Si nota comunque come lo stesso approccio CO_2 , nonostante la sua non rigidità, sia in grado di fornire risultati sufficientemente attendibili.

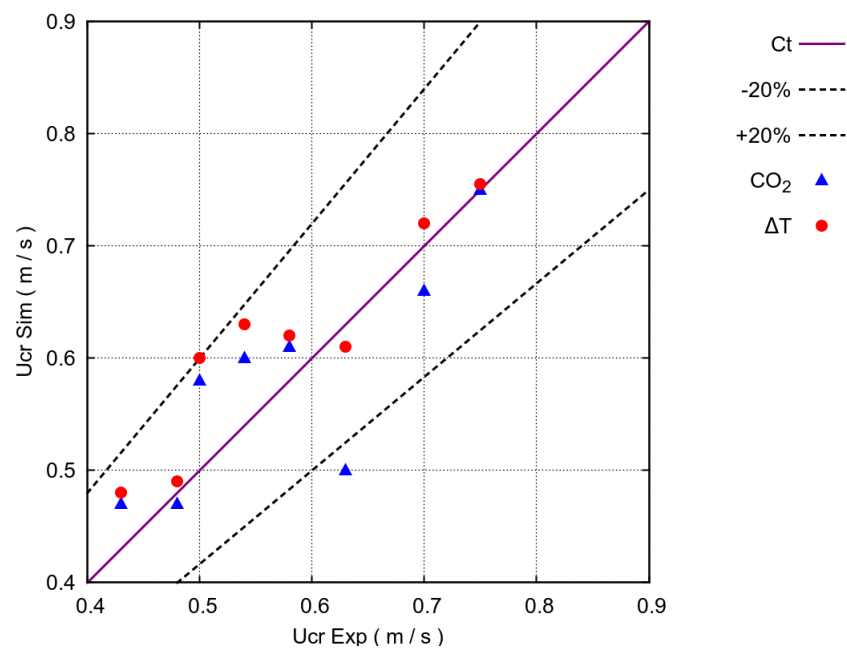
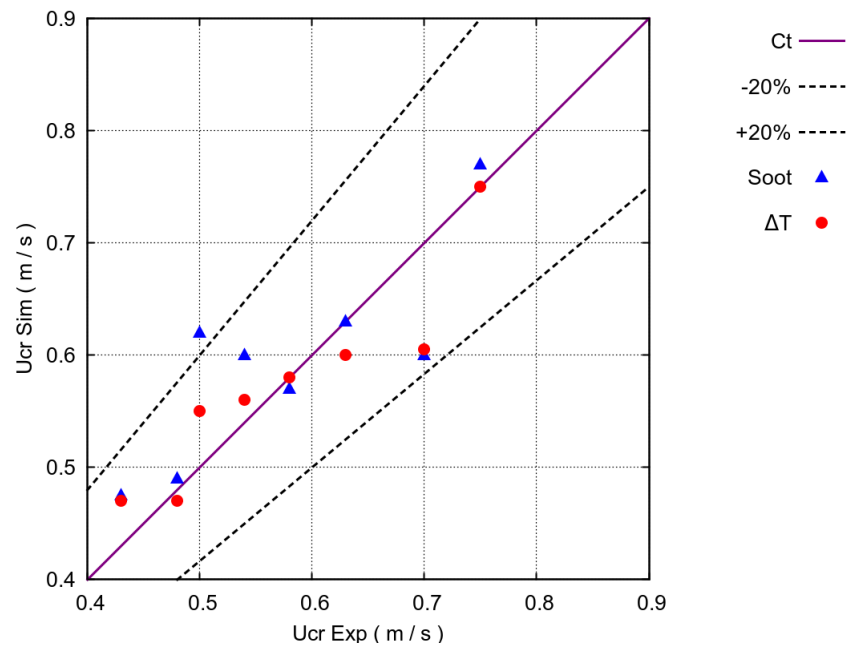


Figura 3.38: Errori % per i diversi approcci ΔT e CO₂- FDS (Grafico in alto) e OpenFOAM (Grafico in basso) - "caso tunnel"

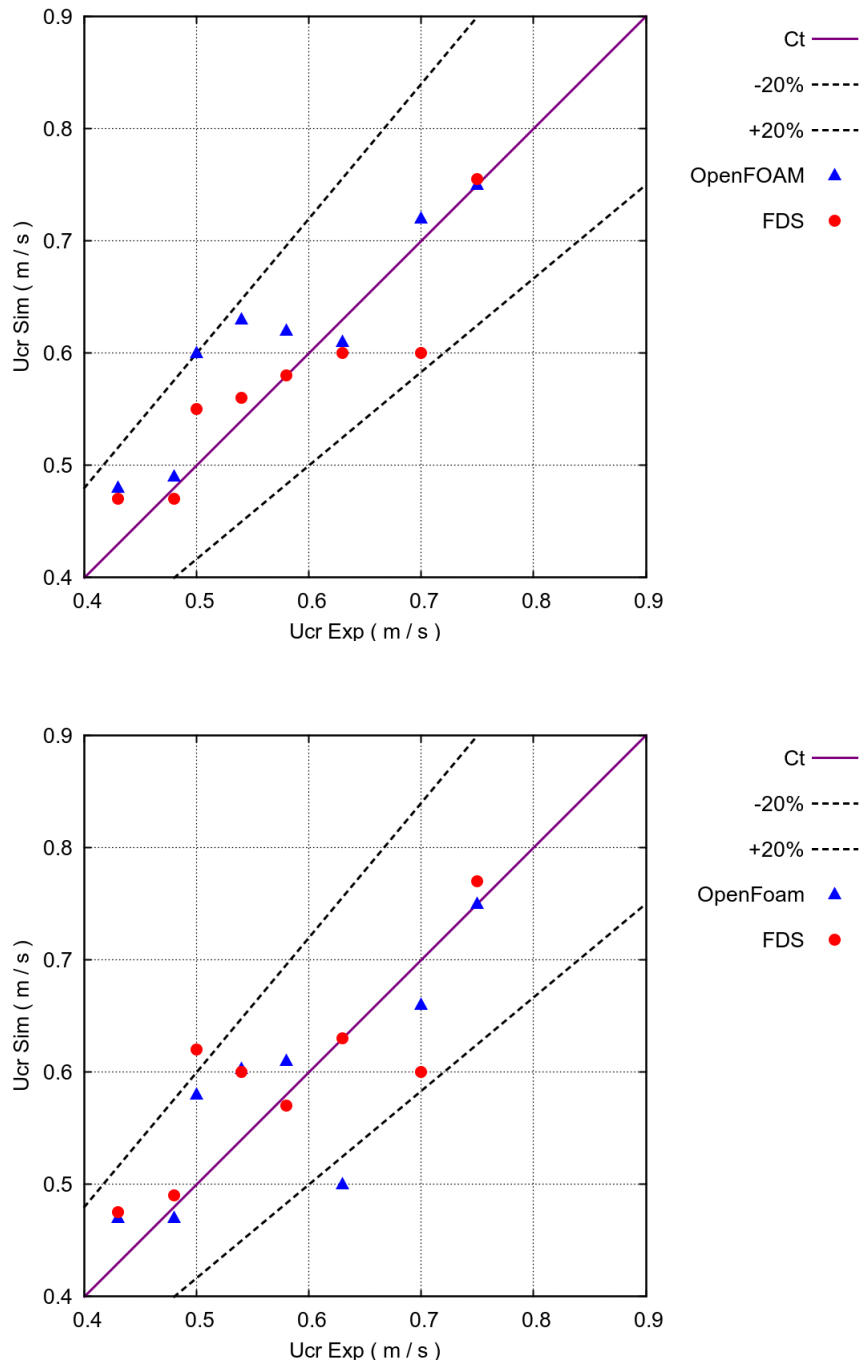


Figura 3.39: Errori % per FDS e OpenFOAM - Approccio ΔT (Grafico in alto) e Approccio CO_2 (Grafico in basso) - "caso tunnel"

Capitolo 4

Commenti conclusivi

In questo lavoro di tesi si sono effettuate delle simulazioni CFD per studiare la fluidodinamica di pool fire in ambienti confinati e congestionati. Si è inizialmente analizzato un caso studio molto comune in letteratura, descritto nel lavoro sperimentale di Steckler, et al. [1]. Tale caso ha avuto per lo più scopo propedeutico, per poter prendere confidenza con i codici CFD usati, FDS e OpenFOAM. Obiettivo principale del lavoro è stato la valutazione delle capacità di OpenFOAM e in particolare del suo solver standard FireFOAM. FDS è infatti un codice ormai largamente convalidato nello studio di fenomeni di questo tipo ed è stato quindi utilizzato come strumento di confronto e convalida di OpenFOAM, di uso decisamente meno comune soprattutto nella simulazione di pool fire. È stata simulata solo una delle 55 configurazioni geometriche presenti nel lavoro caratterizzata dalla presenza di un vano porta e dalla posizione sopraelevata del bruciatore. È stato possibile analizzare i profili di temperatura e di velocità in corrispondenza del vano porta fornendo così una prima verifica della capacità dei software di descrivere la fluidodinamica dell'incendio. Da questa prima fase del lavoro è emersa una buona capacità generale di

entrambi i software nel simulare il fenomeno. E' stata inoltre applicata la relazione di Quintiere per la definizione del passo di griglia [5], secondo la quale si ottiene una dimensione minima delle celle di calcolo di 0,05 m. Alla luce dello studio di sensitività effettuato, testando i passi di cella di 0,05, 0,01, 0,02 e $0,02_{\text{Wall Layer}}$ m, si è verificato che pur utilizzando la mesh più lasca, $0,02_{\text{Wall Layer}}$ m, non si compromette la bontà dei risultati ottenuti riducendo in modo significativo i tempi di calcolo. Entrambi i software hanno fornito risultati ragionevolmente aderenti ai dati sperimentali. In particolare OpenFOAM ha mostrato dei tempi di calcolo necessari decisamente superiori a FDS. Successivamente si è affrontato il secondo caso studio, riguardante incendi da pool fire in una riproduzione in scala da laboratorio, di un tunnel automobilistico. In questo caso si è fatto riferimento ai lavori sperimentali di Lee e Tsai e alle simulazioni già svolte in FDS da Tavelli, et al. [2, 3]. Obiettivo del caso è la definizione della velocità di ventilazione critica, u_{cr} , che assicuri l'assenza di retrodiffusione di fumo. Sono stati inoltre utilizzati due approcci diversi per la valutazione del valore di u_{cr} , approccio ΔT e approccio CO_2 . Si sono svolte un totale di circa 60 simulazioni, nelle quali si è testata l'influenza di alcuni fattori sul valore di u_{cr} . Tra questi la posizione, dimensione e potenza della pool fire, la velocità di ventilazione imposta, la presenza e dimensione di ostacoli a monte della pool fire. In questo caso, data la dimestichezza acquisita con i software si è deciso di lavorare con mesh fortemente non strutturate a passo di griglia non costante. Si è comunque utilizzata la "regola del pollice" presentata da Quintiere [5], per la definizione del passo di griglia sulla pool fire, che richiede la descrizione della sorgente termica da un minimo di 10×10 celle. Soddisfando tale requisito sono state utilizzate quattro diverse mesh, $0,01_{\text{Wall Layer}}$, 0,02, $0,02_{\text{Wall Layer}}$ e 0,04 m. Si è quindi effettuata

l'analisi di sensitività delle mesh calcolando il GCI [6, 7, 8], che ha confermato la possibilità di utilizzare la mesh $0,02_{\text{Wall Layer}} \text{ m}$ senza incorrere in problemi di precisione. In realtà si è deciso, dato il basso numero di celle di tale mesh di svolgere due batterie di simulazioni. Una prima serie usando questa mesh per identificare un primo valore anche grossolano di u_{cr} , pur correndo il rischio di non svolgere simulazioni di tipo LES ma bensì URANS. In seguito si è svolta una seconda serie di simulazioni nell'intorno dei valori di u_{cr} precedentemente trovati. Questa volta si è usata la mesh $0,01_{\text{Wall Layer}} \text{ m}$, garantendo così lo svolgimento di simulazioni di tipo LES. Tale strategia risolutiva ha permesso di ottenere risultati sufficientemente precisi contenendo il più possibile i tempi di calcolo necessari. Le conclusioni a cui si è giunti sono positive. Anche per questo caso studio OpenFOAM ha fornito risultati ragionevolmente attendibili. In base alla prova svolta si è osservata una forte variazione di comportamento tra i software. In alcuni casi FDS ha fornito valori più vicini agli sperimentali mentre in altri casi OpenFOAM si è rivelato migliore. Entrambi gli approcci di valutazione di u_{cr} si sono dimostrati attendibili, per quanto l'approccio ΔT più rigoroso. Si è inoltre convalidata la strategia risolutiva adottata. È stata verificata in modo netto la forte differenza di tempi di calcolo richiesti dai due software CFD. Alla luce di ciò si tende a preferire FDS rispetto OpenFOAM, per lo meno per avere dei primi risultati in tempi rapidi, seppur meno precisi. La qualità dei risultati ottenuti dai due software è comunque piuttosto simile. Si è osservato inoltre la possibilità di utilizzare OpenFOAM con mesh aventi numero di celle anche particolarmente basso, senza per questo ottenere risultati eccessivamente poco precisi. Infine si è avuta un'ottima risposta del software Blender con il quale sono state create tutte le geometrie dei casi studi e sono stati trattati i risultati ottenuti. Il

suo impiego ha semplificato molto il lavoro permettendo un considerevole risparmio di tempo e energie. Per quanto riguarda i possibili sviluppi futuri di tale lavoro, i principali sono:

1. convalida della strategia risolutiva per tunnel a dimensione reale;
2. implementazione in OpenFOAM di un modello per il soot, rendendo così rigoroso l'approccio CO₂;
3. riduzione dei tempi di calcolo di OpenFOAM, ottimizzando ulteriormente le mesh utilizzate e implementando modelli risolutivi alternativi di più veloce svolgimento.

Bibliografia

- [1] K. D. Steckler, J. G. Quintiere, W. J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, U. S. Department of commerce, NBSIR 82-2520, Symposium (International) on Combustion 19th, 1982.
- [2] Y. P. Lee, K. C. Tsai, Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal* 53 (2012) 35–42.
- [3] S. Tavelli, R. Rota, M. Derudi, Validation of FDS for predicting fire behavior in congested tunnels, Submitted to *Fire Safety Journal*, 2013.
- [4] Marco Bettelini, La sicurezza in galleria - Riduzione attiva del rischio, *Gallerie e grandi opere sotterranee*, Anno XXV, N° 1 gennaio-aprile 2003, pp. 45-66.
- [5] T. G. Ma, J. G. Quintiere, Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations, *Fire Safety Journal* 38 (2003) 467-492.
- [6] P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Hermosa Publishers, USA, 1998.
- [7] J. Franke, W. Frank, Application of generalized Richardson extrapolation to the computation of the flow across an asymmetric street intersection, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 1616–1628.
- [8] www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html

- [9] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport phenomena, John Wiley & Sons, 2007.
- [10] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, 2010.
- [11] OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 2.2.2, 2013.
- [12] http://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page
- [13] <http://wiki.blender.org/>
- [14] <https://code.google.com/p/fds-smv/>
- [15] <http://www.openfoam.org/>
- [16] <http://www.cfd-online.com/>
- [17] B. H. Hjertager, B. F. Magnussen, On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, 16th Symposium on Combustion, Cambridge, MA, 1976.
- [18] <https://code.google.com/p/blenderfds/>
- [19] <http://www.ods-engineering.com/tools/ods-studio/>

Appendice

In questa appendice si riportano tutti i grafici, ordinati per prova svolta e approccio utilizzato, relativi la “Prima fase: valutazione preliminare di u_{cr} ” del “caso tunnel”.

(Sotto sottosezione 3.2.4.3)

Prova A16

Approccio ΔT

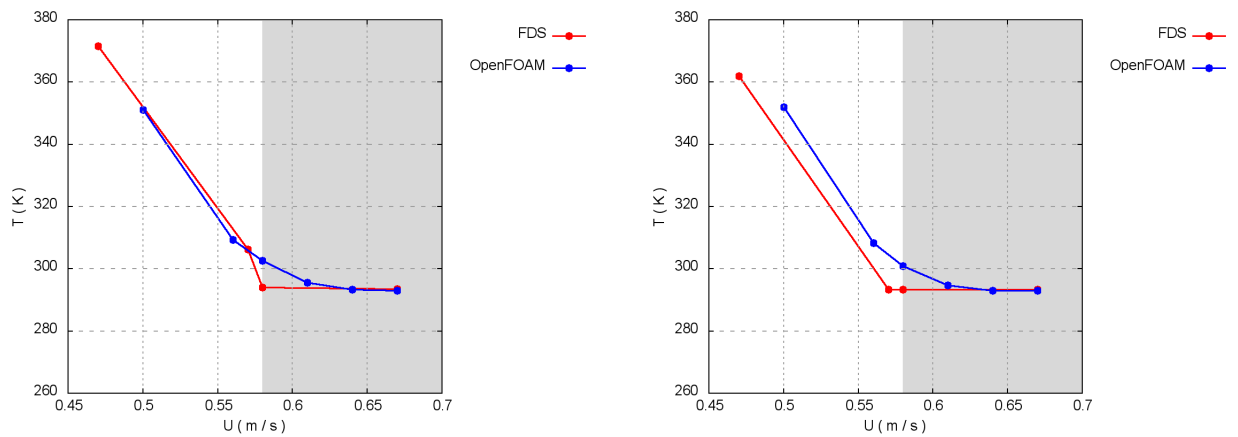


Figura 4.1: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - “caso tunnel”

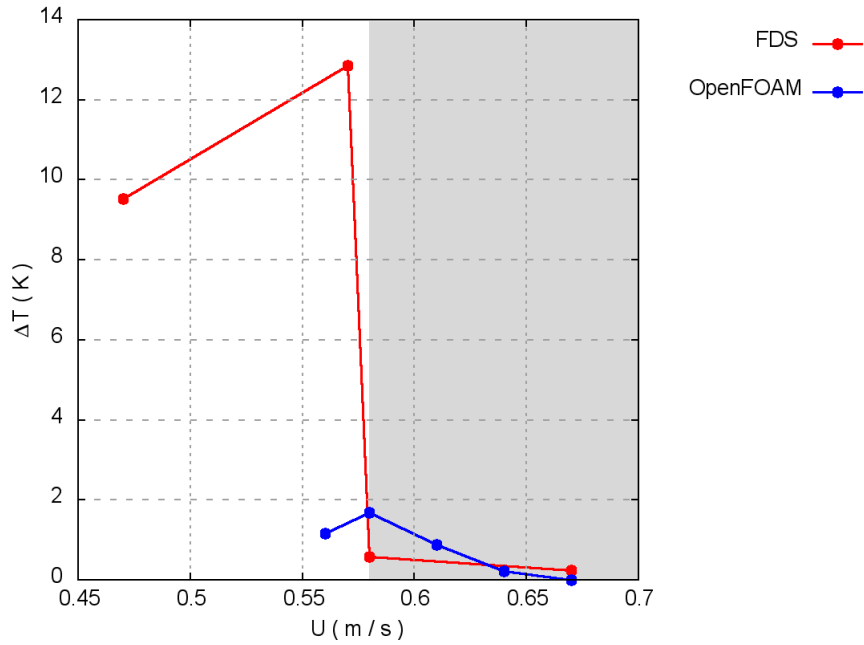


Figura 4.2: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"

Approccio CO_2

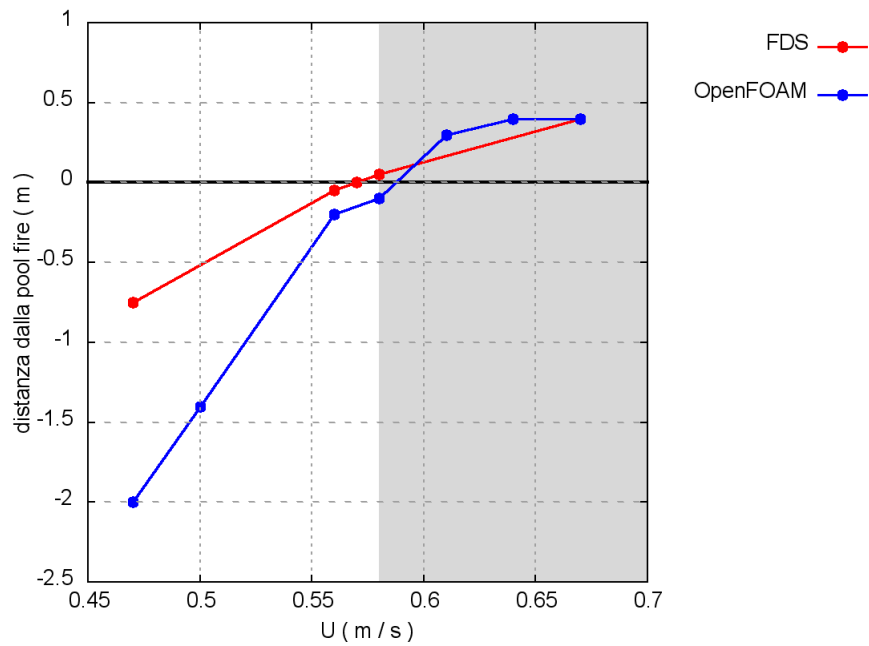


Figura 4.3: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A16 - "caso tunnel"

Prova A17

Approccio ΔT

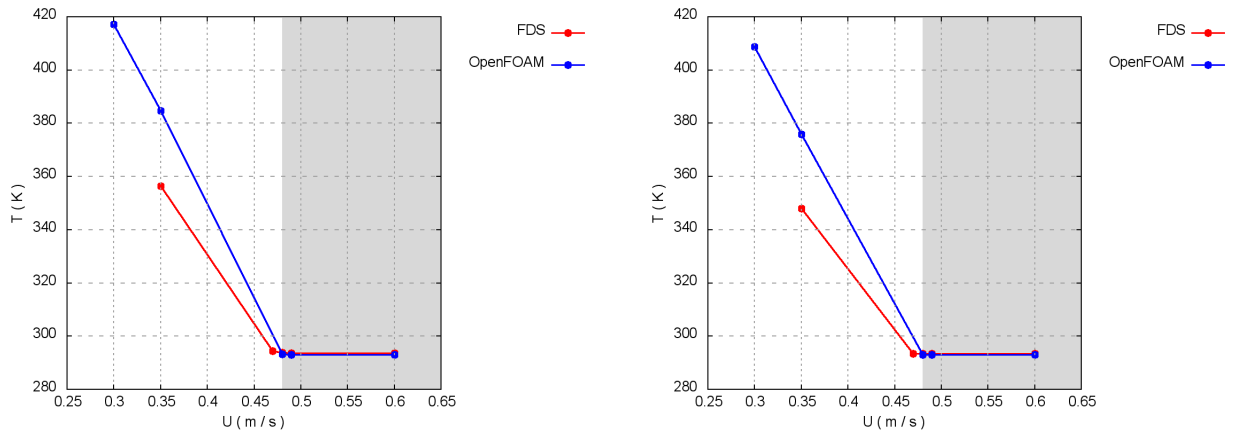


Figura 4.4: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"

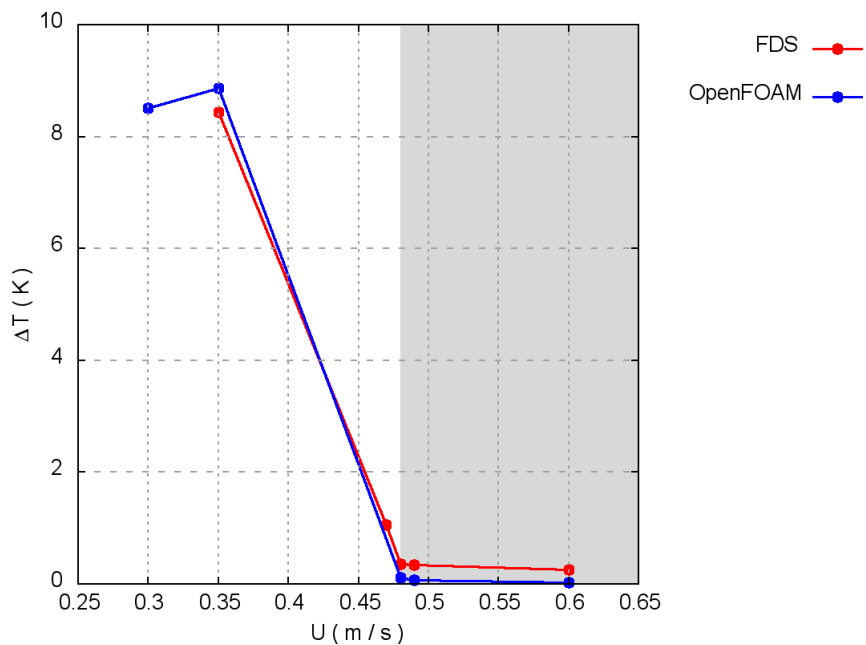


Figura 4.5: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - "caso tunnel"

Approccio CO₂

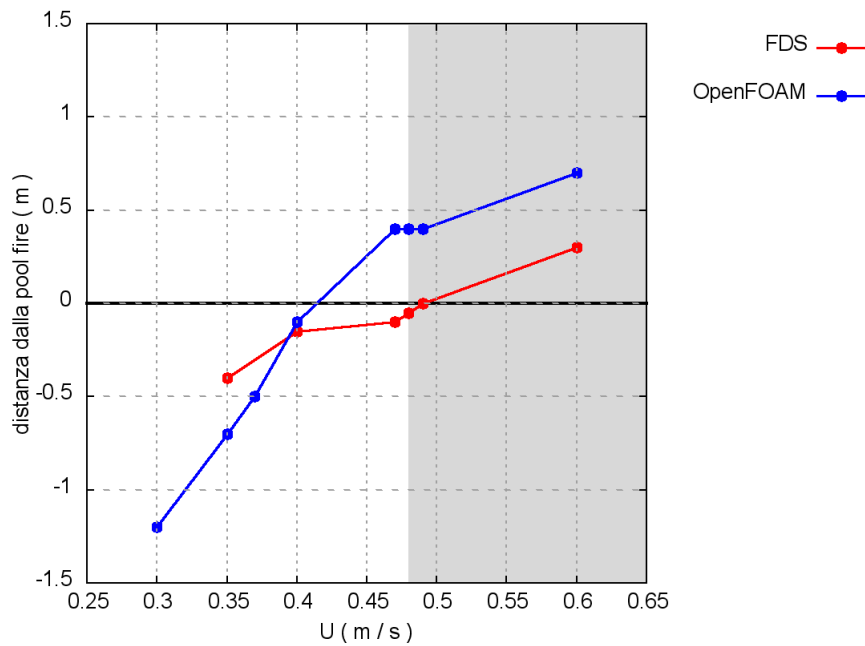


Figura 4.6: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A17 - “caso tunnel”

Prova A18

Approccio ΔT

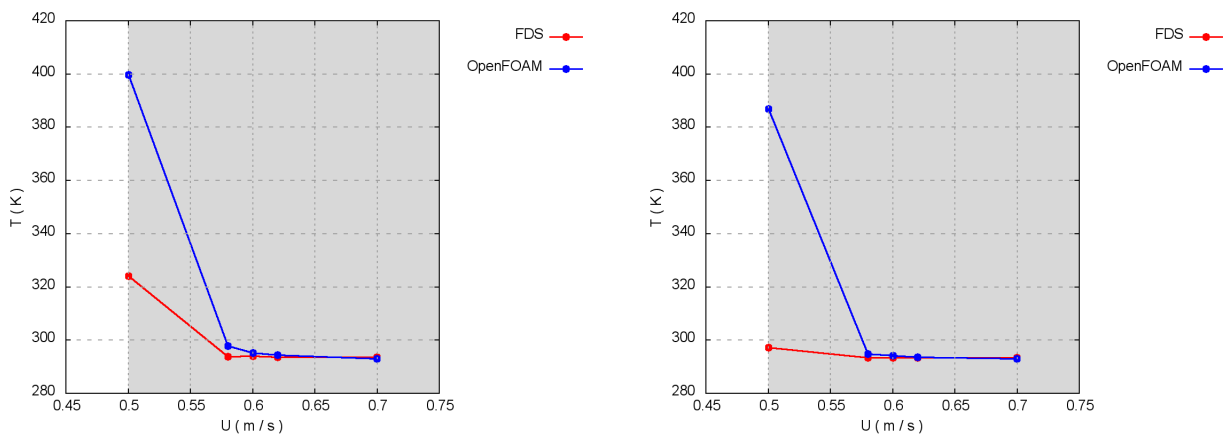


Figura 4.7: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - “caso tunnel”

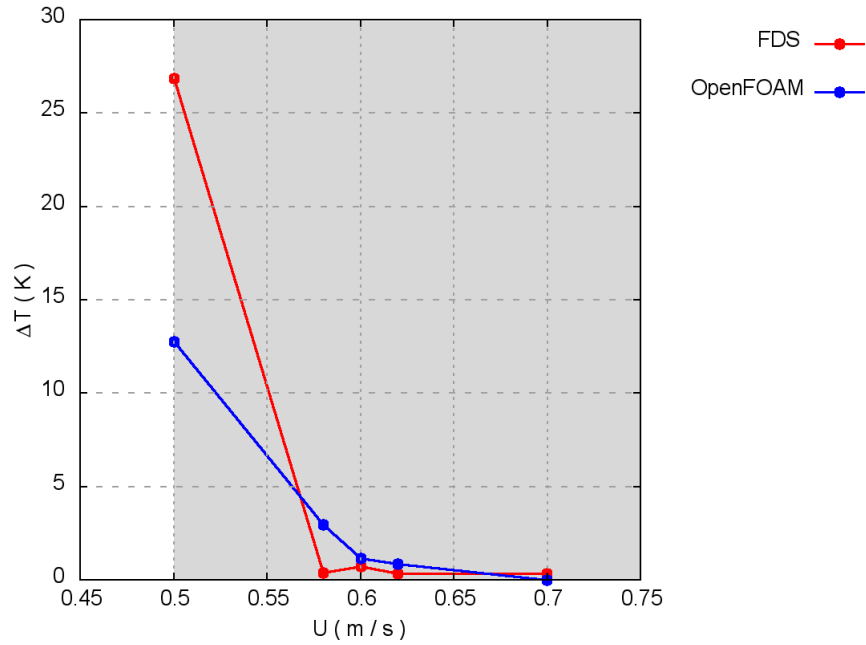


Figura 4.8: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"

Approccio CO₂

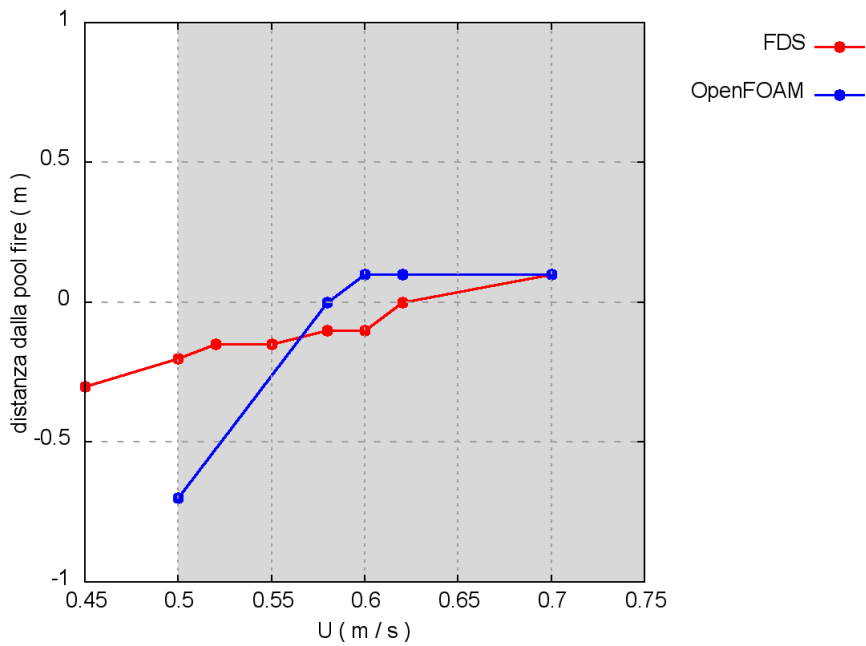


Figura 4.9: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A18 - "caso tunnel"

Prova A19

Approccio ΔT

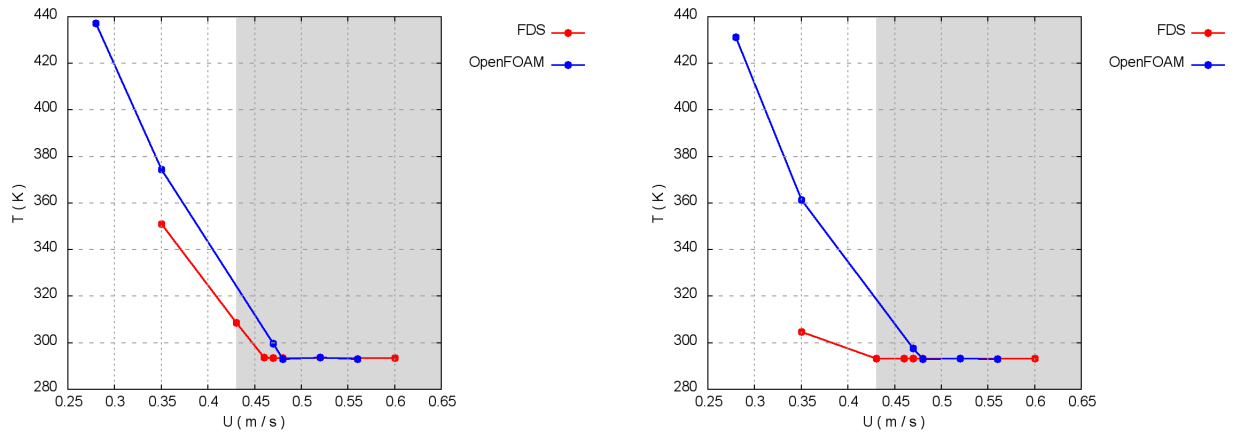


Figura 4.10: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - “caso tunnel”

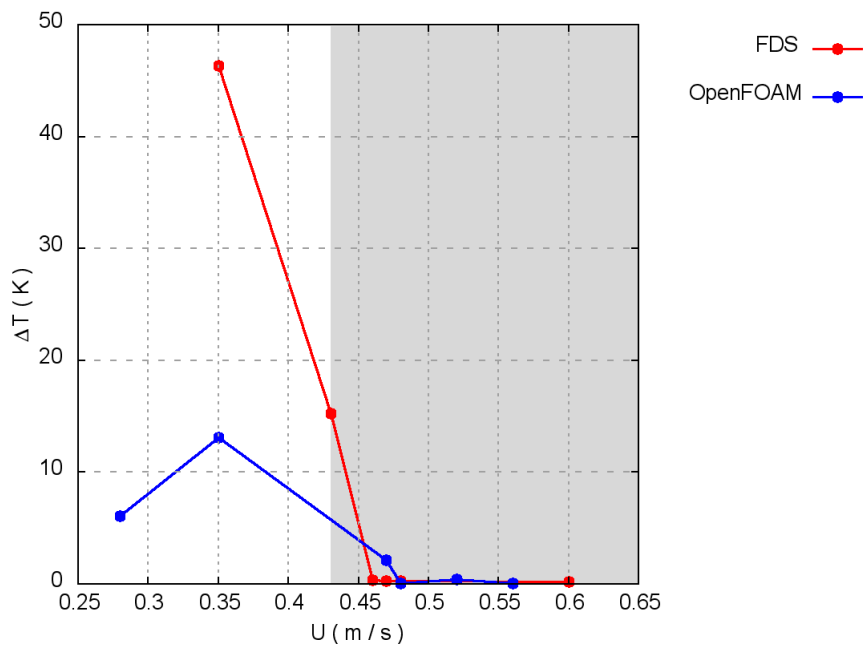


Figura 4.11: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - “caso tunnel”

Approccio CO₂

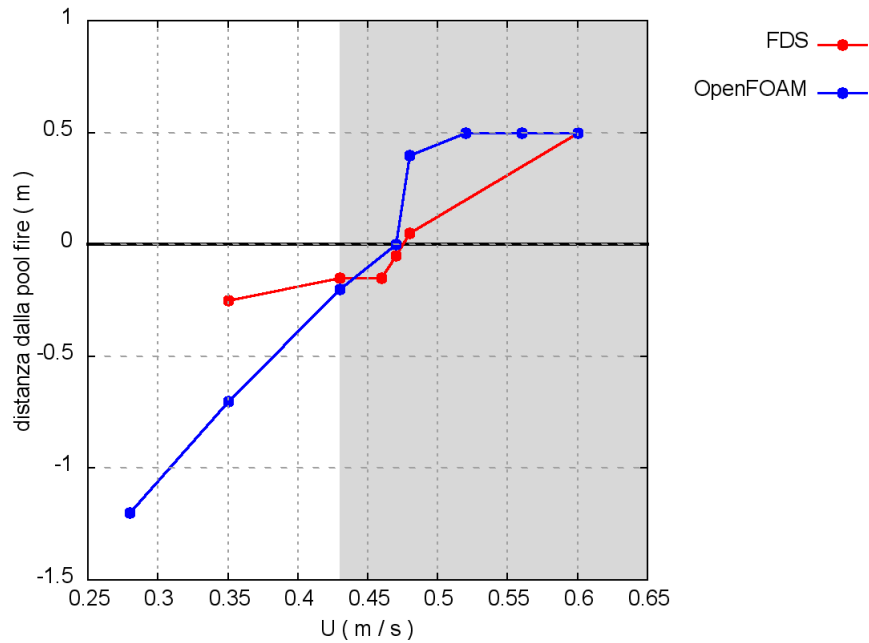


Figura 4.12: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova A19 - “caso tunnel”

Prova B16

Approccio ΔT

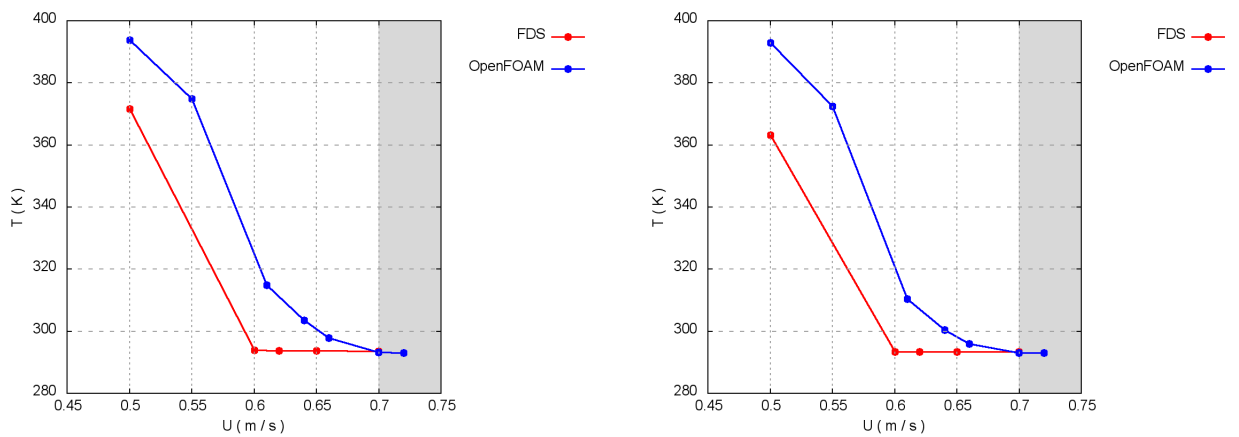


Figura 4.13: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - “caso tunnel”

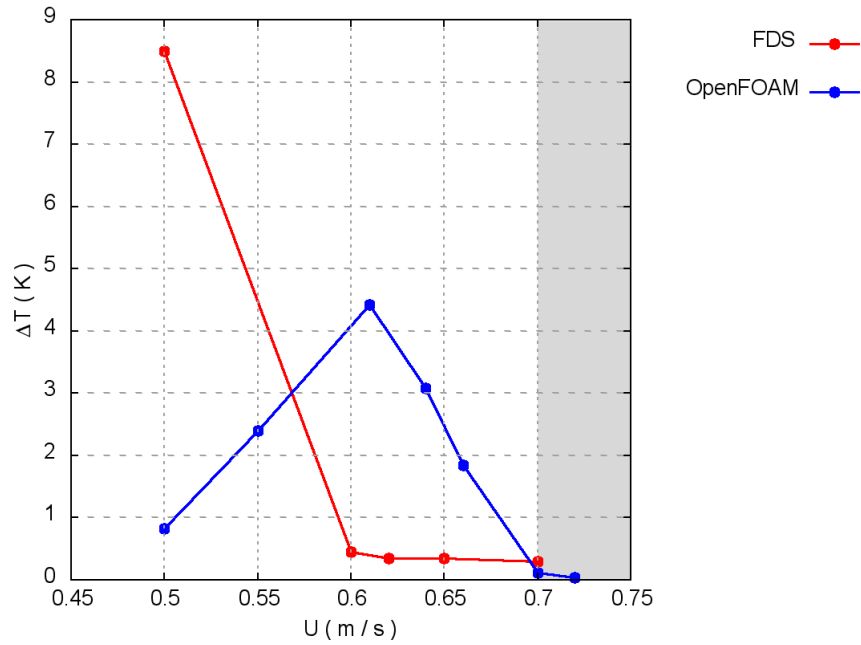


Figura 4.14: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"

Approccio CO₂

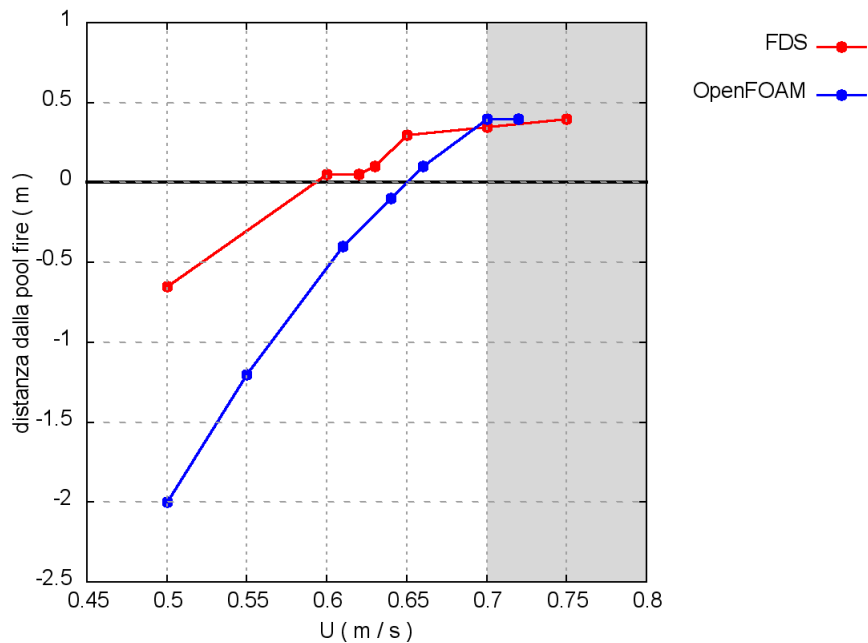


Figura 4.15: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B16 - "caso tunnel"

Prova B17

Approccio ΔT

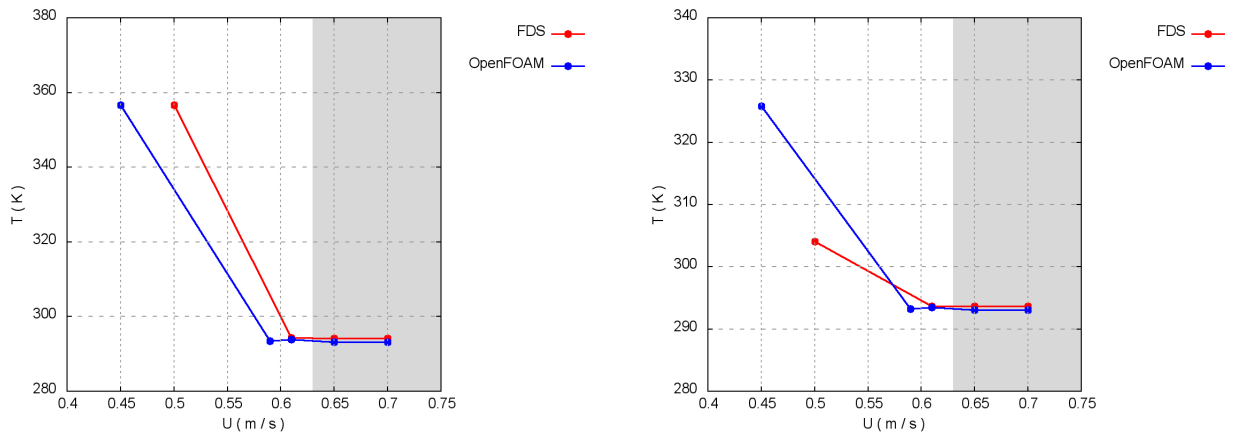


Figura 4.16: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - “caso tunnel”

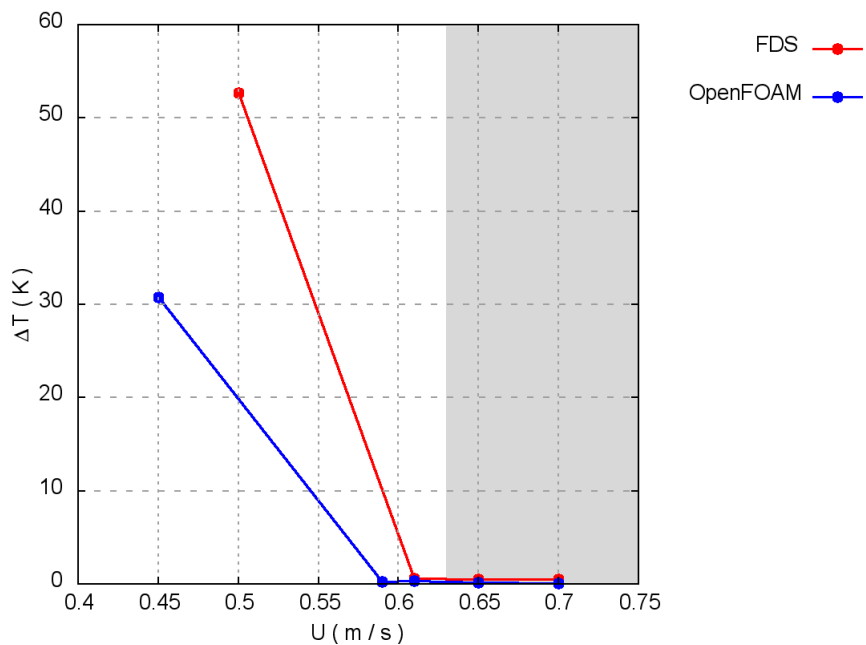


Figura 4.17: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - “caso tunnel”

Approccio CO₂

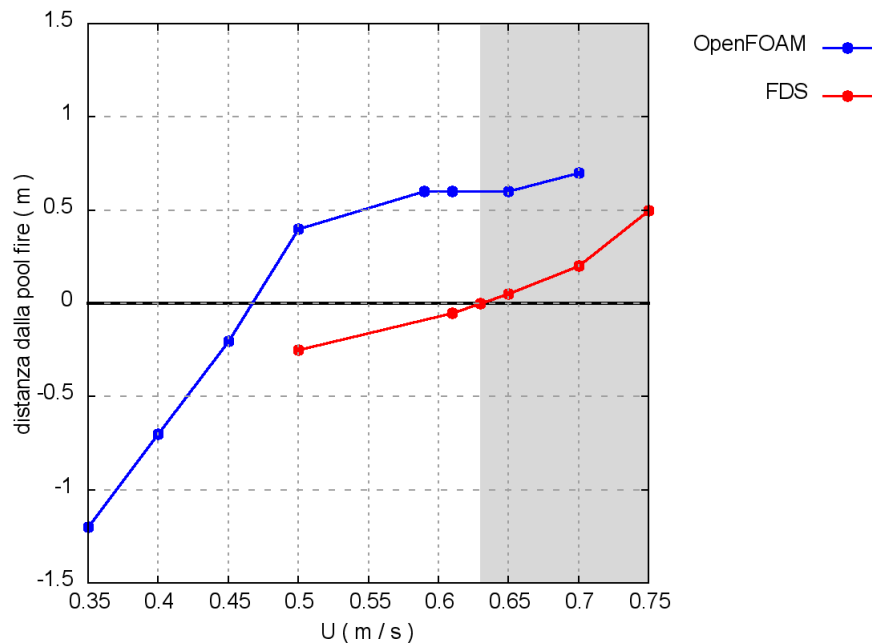


Figura 4.18: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B17 - "caso tunnel"

Prova B18

Approccio ΔT

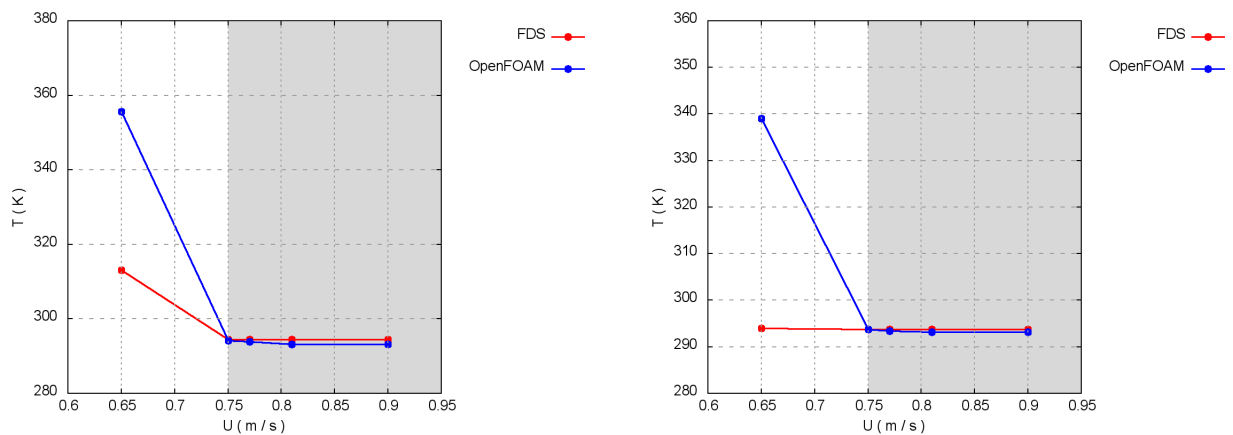


Figura 4.19: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"

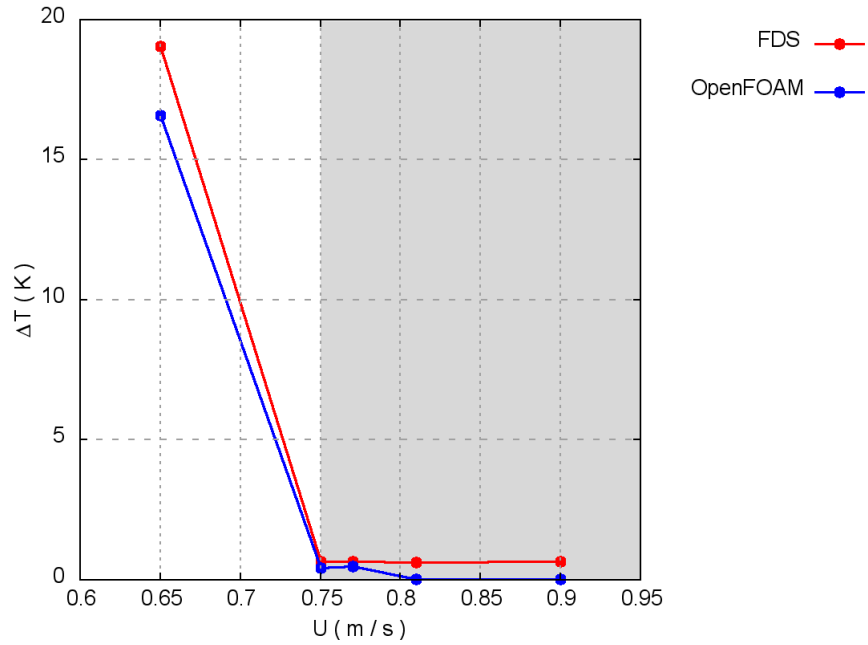


Figura 4.20: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"

Approccio CO₂

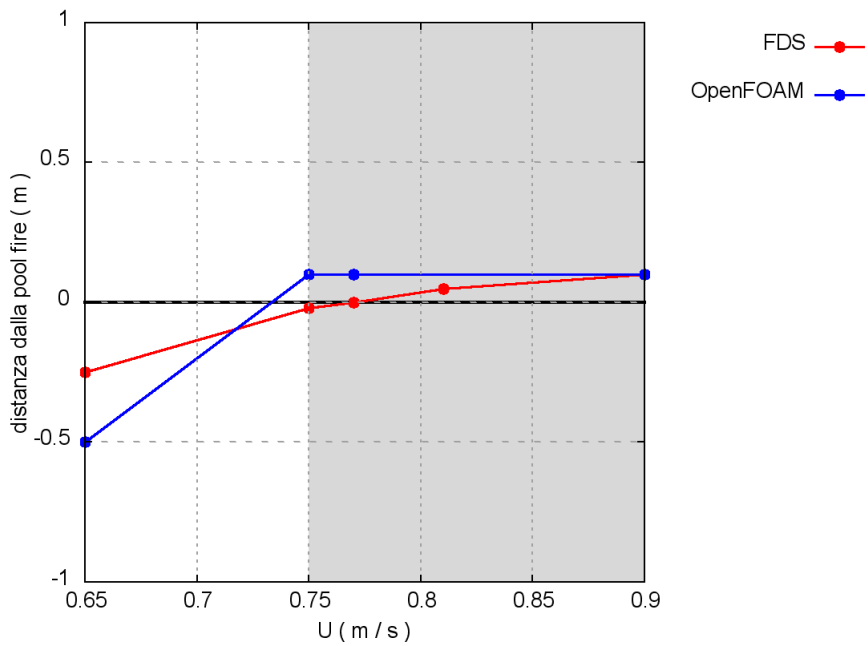


Figura 4.21: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B18 - "caso tunnel"

Prova B19

Approccio ΔT

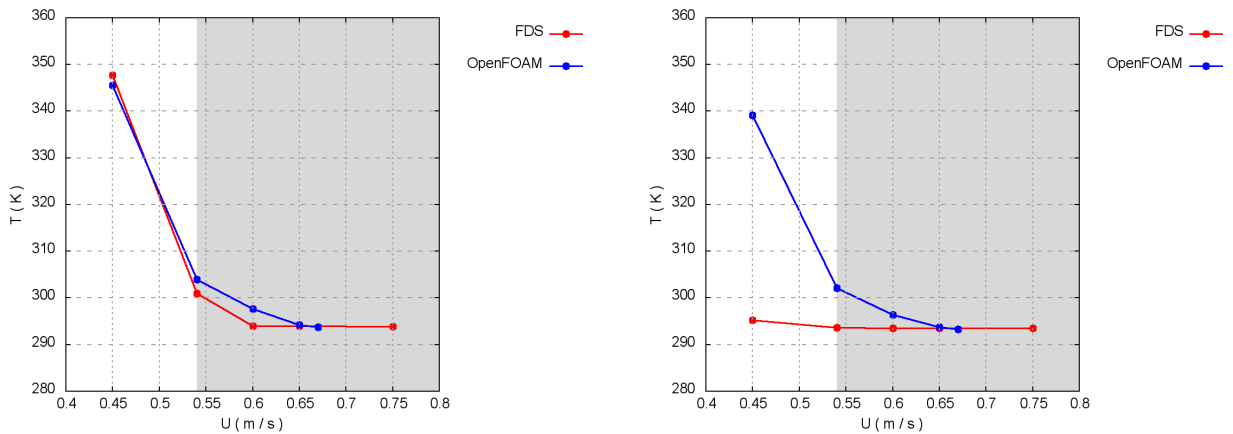


Figura 4.22: Profili di temperatura rilevati da T_a (Grafico a sinistra) e da T_b (Grafico a destra) al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - “caso tunnel”

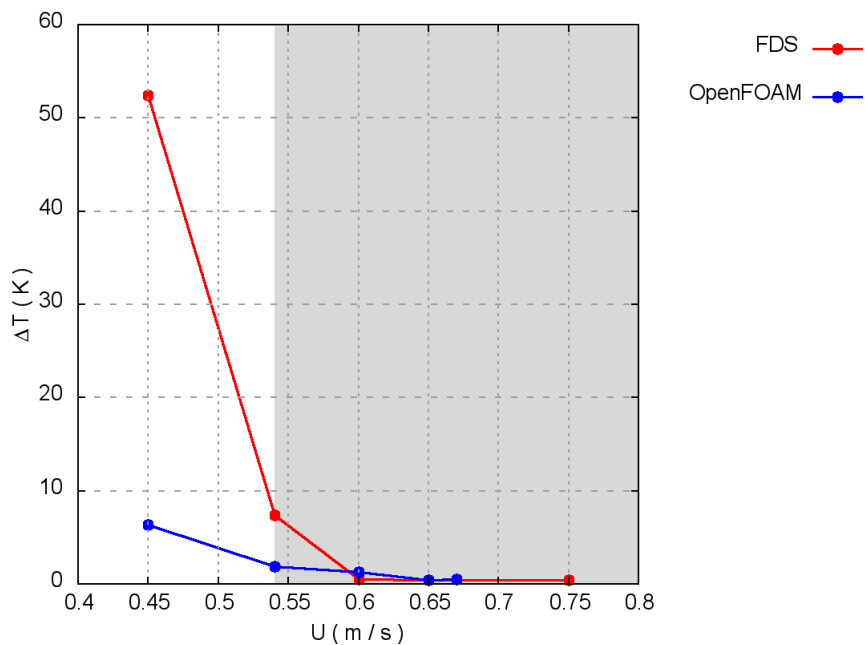


Figura 4.23: Andamento del ΔT al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - “caso tunnel”

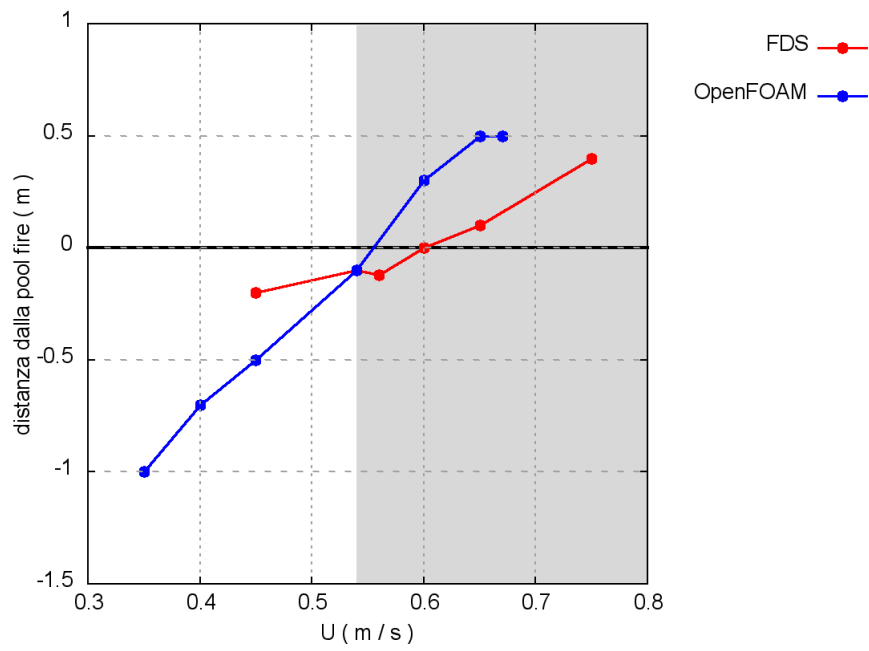
Approccio CO₂

Figura 4.24: Andamento dello strato di fumo al variare della velocità di ventilazione - Prova B19 - "caso tunnel"