

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Innovazione nella Produzione di Energia

A.A. 2017/2018



Simulazione fluidodinamica di incendio in una stazione
metropolitana mediante Firefoam e FDS

Relatore:

Prof. Marco Carlo Masoero

Ing. Michele Fronterre

Ing. Rugiada Scozzari

Candidato:

Paolo Palmisano

Abstract

La fluidodinamica computazionale, oggi, risulta una tecnica comunemente utilizzata in molti ambiti di studio. La progettazione è in fase di trasformazione: si passa da un mondo basato su formule analitiche ad uno su realizzazioni virtuali approssimando le equazioni comuni. Tra le applicazioni più importanti troviamo la modellazione CFD per l'antincendio, soprattutto per simulazioni di incendi in ambienti confinati. Lo scopo della tesi è riscontrare analogie e differenze nella modellazione di incendi tra due software: FDS e FireFoam. Il primo è uno dei programmi più utilizzati in quest'ambito ed il secondo invece è ad alta potenzialità sebbene non pienamente conosciuto. Il lavoro di tesi svolto prevede la generazione di un pool fire e la sua propagazione di fiamma all'interno di una stazione metropolitana: evento in grado di causare innumerevoli danni a persone, costruzioni e servizi. La tesi mira altresì a fondare le basi per un lavoro futuro di progettazione di tecniche di sicurezza efficienti in ambito antincendio: sistemi di aereazione e rimozione fumi, vie di fuga e relative uscite di sicurezza. Le simulazioni condotte sia con FireFoam che con FDS sono state eseguite in una geometria semplificata, riducendo il dominio dell'intera stazione, in modo da limitare l'eccessivo costo computazionale. Lo studio dei risultati ha evidenziato una analoga distribuzione della velocità all'interno della geometria ed una netta differenza nei profili termici. L'analisi condotta ha attribuito la causa principale di tale disparità alla modellazione della "open boundary". Per confermare o confutare quanto concluso si è svolta successivamente una nuova simulazione, variandone alcuni parametri: disposizione delle condizioni al contorno nella geometria, riduzione del volume dell'ambiente e dell'HRR dell'incendio, l'utilizzo di oggetti interni meno complessi. Tale geometria è stata denominata "ufficio" ed ha portato a confermare quanto precedentemente dedotto nello studio della "stazione". Le conclusioni convalidate rivelano che sulla parete aperta i profili termici si discostano notevolmente tra i due programmi applicati, mentre quest'ultimi performano in maniera analoga le grandezze termodinamiche in ambienti delimitati da pareti chiuse. Uno degli aspetti più rilevanti nel confronto tra i due software è l'eccessivo costo computazionale di FireFoam. Infatti la simulazione dell'incendio nella "stazione" dura circa 5 giorni invece di 7 ore con FDS.

Indice

Abstract.....

1. Introduzione
2. L'incendio
 - 2.1. Fenomenologia di un incendio
 - 2.2. Cause di un incendio
 - 2.3. Caratteristiche fisico e trattazione matematica
 - 2.4. Fire safety engineering
3. Modellazione termofluidodinamica degli incendi
 - 3.1. Equazioni di conservazione
 - 3.2. Le leggi costitutive
 - 3.3. Le equazioni di Navier-Stokes
4. Caso di studio
 - 4.1. Definizione del problema e della geometria
 - 4.2. Riduzione geometria: tempo computazionale
 - 4.3. Cause dell'incendio
 - 4.4. Incendio applicato
5. Modellazione del problema con il software: FDS
 - 5.1.
 - 5.2. Procedura del test
 - 5.2.1. Pre-processing con software: Pyrosim
 - 5.2.1.1. Creazione della mesh
 - 5.2.1.2. Definizioni delle condizioni iniziali
 - 5.2.1.3. Definizioni delle condizioni al contorno
 - 5.2.2. Post-processing utilizzando il programma: smokeview
6. Modellazione del problema con il software: FireFoam
 - 6.1. L'approccio LES
 - 6.2. Procedura del test
 - 6.2.1. Pre-processing
 - 6.2.1.1. Creazione mesh con il programma Blender
 - 6.2.1.2. Condizioni iniziali
 - 6.2.1.3. Condizioni al contorno
 - 6.2.2. Post-processing con il software Paraview
7. Confronto dei risultati

- 7.1. Aspettative
- 7.2. Risultati derivanti dai modelli
- 8. Conclusioni e sviluppi futuri

Riferimenti.....

Elenco delle figure.....

Ringraziamenti.....

Elenco delle Tabelle

6.1 Boundary Conditions applicate

6.2 Boundary Conditions ai Baffles

6.3 Proprietà termodinamiche

7.1 collocazione devices "stazione"

7.2 devices zona "central" lungo z

7.3 devices zona "central" lungo y

7.4 BC temperatura in FireFoam

7.5 BC velocità in FireFoam

7.6 collocazione devices "ufficio"

7.7 devices per lo studio temperatura 1D

Elenco delle Figure

Figura 2.1: Elementi di Combustione

Figura 4.1 Geometria Stazione

Figura 4.2 Geometria Stazione semplificata

Figura 4.3 Atrio

Figura 4.4 Lucernaio

Figura 4.5 zona "left" con scale di uscita

Figura 4.6 Mesh size 0.6m

Figura 4.7 Mesh size 0.4m

Figura 4.8 Mesh size 0.2m

Figura 4.9 Dominio computazionale

Figura 5.1 "Obstruction" scala

Figura 5.2 Elementi interni alla stazione

Figura 5.3 Grigio, adiabaticità come Condizioni al contorno

Figura 5.4 Posizione della superficie di fiamma

Figura 5.5 Devices in FDS

Figura 5.6 Slices in FDS

Figura 6.1 Richiamo geometria semplificata

Figura 6.2 Geometria stazione completa in Blender

Figura 6.3 Geometria semplificata Blender

Figura 6.4 Visualizzazione mesh "preview" in Blender

Figura 6.5 Visualizzazione mesh "previiew" semplificata in Blender

Figura 6.6 Creazione mesh semplificata con Paraview

Figura 6.7 Creazione mesh stazione intera con Paraview

Figura 6.8 Creazione Baffles geometria intera

Figura 6.9 Creazione Bafflles geometria semplificata

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

La modellazione CFD oggi svolge un ruolo fondamentale in molti ambiti di studio e di analisi. La progettazione va incontro a continue trasformazioni: si passa da un mondo basato sulle formule analitiche ad uno su progettazioni virtuali inerenti alla risoluzione delle equazioni matematiche in modo approssimato. Tramite l'utilizzo di software, capaci di elaborare i modelli sviluppati, si riesce a riprodurre ambienti che rispettino le leggi fisiche dei fluidi di qualsiasi tipo, solidi, gassosi o liquidi. [3] L'efficienza di questi programmi sta anche nel fatto di poter simulare condizioni critiche quali una geometria molto grande o delle condizioni termodinamiche estreme. L'impiego di modelli di calcolo permette, quindi, l'elaborazione facilitata di dati e la loro visualizzazione tramite il proprio calcolatore.

Le principali applicazioni della modellazione CFD sono:

- **Previsioni meteo:** la modellazione svolge un ruolo fondamentale poiché lavora con porzioni di spazio estese per rappresentare regioni geografiche con le loro condizioni atmosferiche. Ciò implica calcolatori molto performanti in seguito all'alto costo computazionale richiesto dalla simulazione.
- **Idraulica:** tramite questi modelli si studiano le portate passanti nei condotti con le loro caratteristiche termodinamiche. Una conseguenza di questi studi è stata il netto miglioramento dell'efficienza negli impianti industriali.
- **Trasmissione del calore:** in questo ramo svariate sono le applicazioni poiché lo studio della trasmissione di calore è alla base di innumerevoli fenomeni. Ad esempio in ambito meccanico si eseguono studi di dilatazione termica e resistenza di materiali su provini, in ambito edilizio gli scambi termici attraverso le pareti, nel settore industriale si analizzano i bilanci di energia nei reattori sia ad alta che a bassa temperatura.
- **Antincendio:** in questo campo la modellazione CFD svolge un ruolo molto importante per la pericolosità degli eventi incidentali: è possibile simulare ambienti ad alto rischio per persone ed oggetti in modo virtuale per poi attuare delle strategie che limitino il più possibile i danni e rendere così più efficienti le prevenzioni.

La modellazione CFD in ambito antincendio è maggiormente utilizzata per simulazioni di incendi in ambienti confinati ad alto rischio [4] Il lavoro di tesi svolto prevede la generazione di un *pool fire* e la sua propagazione di fiamma all'interno di una stazione metropolitana. Tale evento può

causare innumerevoli danni a persone, costruzioni e servizi. Il caso in oggetto comporterebbe notevole difficoltà nella progettazione di sistemi efficienti di aereazione e rimozione fumi, le vie di fuga e le relative uscite di sicurezza.

Negli ultimi anni si sono verificati eventi sgradevoli causati da incendi che hanno così spostato sempre più l'interesse verso queste tematiche. Tra gli incidenti più gravosi si ricordano:

- Il rogo del Traforo del Monte Bianco: il 29 marzo del 1999 il tir "Volvo Fh12" guidato da Gilbert Degrave, che trasportava farina e margarina, prese fuoco e si fermò dentro il traforo. Le fiamme, alimentate dalla merce trasportata, vennero anche sostenuta dall'effetto forno del tunnel. L'incendio in seguito a questi eventi raggiunse grandezze eccessive che impiegarono 53 ore per essere rimosse dai vigili del fuoco, causando la morte di 39 vittime. [5]
- Il tunnel della morte di Kaprun: nel novembre del 2000 in una cittadina austriaca dal nome Kaprun un treno con a bordo 180 persone percorse questo tunnel. L'incendio del mezzo di trasporto si sviluppò circa a metà del percorso della galleria provocando la morte di 168 vittime. Anche dopo la catastrofe del traforo del Monte Bianco il sistema di sicurezza continuava ad essere praticamente assente. Il giornale *la Repubblica* nel giorno 12 novembre del 2000 citava: "Bastavano due bombole antincendio, di quelle che si trovano in un qualsiasi ufficio, 1500 scellini in tutto" per attenuare l'incidente [6].
- L'incidente ferroviario di Viareggio: il 29 giugno 2009, un treno merci 50325 Trecate-Gricignan [7], con 14 cisterne contenenti GPL, deragliò a ridosso della stazione ferroviaria. Ciò provocò la rottura dei carri e l'innescò quasi immediato del GPL trasportato. Questo evento uccise 32 persone e decine rimasero ferite. Tale strage resta un fatto di cronaca davvero recente che ha colto molto interesse per le testate giornalistiche locali e nazionali. Anche la nota trasmissione televisiva *Le Iene* [8] ha redatto un servizio raccogliendo le testimonianze delle persone che abitavano vicino il luogo dell'incidente e dei familiari delle vittime. Quello che colpisce maggiormente di questi eventi è il fatto che i danni si possono ripercuotere anche nelle zone limitrofe. In questo specifico caso il gas fuoriuscito dalle cisterne, una volta vaporizzato, si è in parte accumulato nelle abitazioni prossime alla stazione causando, in seguito ad inneschi, ulteriori incendi. La necessità di sistemi adeguati ed efficienti di protezione sono il punto cardine per evitare incidenti di questa entità. Questo è il pensiero di uno dei testimoni intervistati da Giulio Golia che afferma: "avevamo

chiesto nel 2001 un muro fonoassorbente che avrebbe sicuramente attenuato l'invasione del gas e quindi delle fiamme". Infatti come conferma un'altra intervistata, il muro è stato costruito solo dopo la strage.

Per rendere un rischio "accettabile" è necessario tener conto nello studio di sicurezza di innumerevoli variabili che vanno dalla pericolosità dei materiali trasportati alla velocità dei treni. La causa principale di questo incidente è stata l'elevata velocità del veicolo nelle vicinanze della stazione. Dopo questo evento, infatti, i treni di Viareggio, trasportanti materiale infiammabile, non possono superare i 50 km/h in confronto ai 90 km/h del giorno del deragliamento.

Data l'importanza sociale di questi incidenti è altresì necessaria una profonda e particolare attenzione del mondo scientifico.

La tesi svolta mira a fondare le basi per un lavoro futuro di progettazione di tecniche efficienti di sicurezza in ambito antincendio. Riuscire a simulare in modo corretto lo sviluppo, la propagazione e l'intensità di una fiamma, è fondamentale per l'analisi di sicurezza in quest'ambito.

Come detto precedentemente la modellazione CFD adempie pienamente allo studio di sicurezza. Tramite modelli è possibile risolvere le equazioni di Navier-Stokes e quelle ad esse correlate. La soluzione analitica di queste equazioni è possibile solo per casi particolarmente semplici, esempio flussi laminari, e soprattutto per geometrie semplificate come quelle piane o sferiche. Nelle situazioni reali, invece, quando ci si trova a lavorare con flussi turbolenti e geometrie via via più complesse si necessita di metodi numerici. I principali modelli utilizzati sono:

- Simulazione Numerica Diretta (DNS): rappresenta l'approccio più semplice, si discretizza lo spazio e il tempo attraverso griglie con dimensione caratteristica desiderata. Questa tecnica genera delle soluzioni molto accurate ma con un costo computazionale elevato. Ciò implica l'utilizzo di super calcolatori. Questa è la motivazione principale per cui questo modello non è molto utilizzato in ambito industriale.
- Equazioni mediate alla Reynolds (RANS): si assume il flusso turbolento come formato da un moto medio e da una sua fluttuazione nel tempo. Le equazioni di partenza verranno così mediate in un intervallo temporale scelto permettendo una riduzione notevole del costo computazionale. Per risolvere il problema altre equazioni come per esempio il modello k-ε sono richieste.

- Large Eddy Simulation (LES): risolve numericamente le scale turbolente più grandi e modella coerentemente quelle più piccole chiamate “scale di Kolmogorov”. Il matematico Kolmogorov riteneva che le scale più piccole fossero universali, ovvero simili per ogni flusso turbolento e che dipendessero solo dalla quantità media di energia dissipata per unità di massa nell’unità di tempo (ϵ) e dalla viscosità cinematica (ν). [10] Per modellare le scale più piccole si utilizzano filtri numerici particolari. I risultati di questo modello sono più accurati dei RANS e hanno un costo computazionale inferiore dei DNS. Tutto ciò ha permesso un rapido sviluppo e un interesse crescente per questo metodo. [11] Tale modello sarà quello utilizzato in questo lavoro di tesi.

La modellazione CFD attualmente viene eseguita da molti software in commercio, “OpenFoam” è quello impiegato nella tesi. Esso è un programma open source per la fluidodinamica computazionale CFD distribuito sotto la licenza GPL (General Public License). Ciò permette agli utenti in modo libero di poter modificare e perfezionare il programma rispettando i termini della licenza. [9] OF utilizza come linguaggio di scrittura il codice C++ e contiene al suo interno innumerevoli *solvers*, tra cui FireFoam, utilizzato in questo lavoro. FireFoam è un codice CFD specifico per la modellazione della soppressione degli incendi.

Per poter confrontare i risultati ottenuti con questo solver, si è studiato un altro software open source che attualmente è il più adottato in ambito antincendio di nome FDS (Fire Dynamics Simulator). L’attendibilità dei risultati ottenuti con quest’ultimo programma è dovuta al fatto che FDS sia una applicazione ampiamente studiata, dotata di ottimi programmi per il pre e post-processing, ad esempio Pyrosim, che semplificano la compilazione del codice e l’analisi dei risultati. La caratteristica più rilevante è il suo basso costo computazionale comparato con gli altri simulatori.

Per portare a termine il progetto di tesi in ogni singola fase, diversi software sono stati utilizzati:

- FireFoam 2.2.x contenuto nel pacchetto OpenFoam 2.2.2.
- FDS: spiegato ampiamente nelle righe precedenti.
- Pyrosim 2017: programma utilizzato per il pre-processing di FDS. Facilita l’elaborazione dello script e permette il lancio di FDS sulla sua piattaforma.
- SmokeView: è contenuto di default nel pacchetto di FDS, permette di realizzare il post-processing visualizzando dettagliatamente i risultati della simulazione.

- Blender 2.66: è stato utilizzato per una fase del pre-processing in FireFoam ovvero per la creazione del file "*BlockMeshDict*". Nel file sono collezionati gli input richiesti per la creazione della mesh.
- ParaView 5.4.1: programma in grado di svolgere il post-processing di FireFoam.

Un'ulteriore differenza tra i due programmi di modellazione utilizzati, OpenFoam e FDS, è nel tipo di sistema operativo utilizzato. Infatti OpenFoam nasce per lavorare con il kernel Linux e nelle ultime versioni (5.0) è possibile installarlo anche su Windows con accorgimenti particolari.

La versione impiegata di OF è la 2.2.2. necessita l'installazione di una macchina virtuale sul calcolatore in modo da utilizzare Ubuntu 12.04LTS.

Per quanto riguarda la simulazione condotta con FDS, invece, si è utilizzato il sistema operativo Windows 10.

Nei successivi capitoli saranno esplicitate in maniera dettagliata tutte le argomentazioni finora riassunte.

CAPITOLO 2: L'INCENDIO

2.1. Fenomenologia di un incendio

Per ottenere una descrizione soddisfacente e accurata della fenomenologia dell'incendio si è preso in esame un documento "Chimica e fisica di un incendio" rilasciato dal Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile. [12]

L'incendio è un processo che rilascia energia termica in ambiente attraverso una reazione di combustione tra un combustibile e un comburente. Tale reazione è di tipo esotermico in quanto i reagenti hanno maggiore energia dei prodotti. L'ossigeno, agente ossidante della reazione di combustione, svolge un ruolo fondamentale data la sua elevata elettronegatività, capacità di strappare elettroni dagli altri elementi.

Il calore rilasciato da un incendio innalza la temperatura delle specie che partecipano alla reazione, portandole ad emettere una luce nel campo del visibile generando la fiamma. Questa è un fenomeno di tipo chimico. Non tutte le fiamme risultano visibili, in quanto alcuni elementi emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso o raramente nell'ultravioletto. Il movimento della fiamma è dovuto ai gas combustibili, i quali essendo molto caldi, tendono a raggiungere le zone di alta atmosfera più fredde. [14]

La combustione è una reazione spontanea dal punto di vista termodinamico, ma presenta una velocità di reazione molto bassa a temperatura ambiente. Ciò determina il fatto che non tutte le molecole, scontrandosi in presenza di ossigeno, riescano a raggiungere l'energia di attivazione necessaria per ottenere la combustione.

Per generare un incendio sono necessarie tre condizioni fondamentali, ma non sufficienti:

- combustibile
- comburente
- fonte di calore per l'innescio



Figura 2.1: Elementi di Combustione

I combustibili coinvolti possono trovarsi in qualsiasi stato fisico, gassoso, liquido o solido. La reazione di combustione avviene principalmente in fase gassosa: se il combustibile analizzato

non è allo stato gassoso, è necessaria una fase preliminare per renderlo allo stato di gas. Una volta raggiunta questa condizione il fenomeno di combustione si potrà sviluppare.

La presenza contemporanea delle tre condizioni fondamentali non garantisce una reazione di combustione: bisogna tener conto anche dell'intervallo di infiammabilità. Il rapporto effettivo tra il volume di combustibile e quello della miscela (combustibile + comburente), ad una data temperatura e pressione, deve cadere all'interno di un particolare range di infiammabilità delimitato da due limiti estremi:

- LFL (Lower Flammability Limit): rappresenta il rapporto minimo in volume al di sotto del quale la miscela risulta troppo povera di combustibile.
- UFL (Upper Flammability Limit): rappresenta il valore massimo di concentrazione di combustibile all'interno della miscela affinché la combustione avvenga.

La propagazione di fiamma è influenzata, oltre che dall'intervallo di infiammabilità, anche dalla temperatura di infiammabilità (Flash point) e dalla temperatura di auto-ignizione. Nel dettaglio, il punto di infiammabilità corrisponde alla più bassa temperatura alla quale un combustibile liquido emette vapori in grado di poter bruciare, in seguito ad un innesco. [12] La temperatura di auto-ignizione, invece, è quella al di sopra della quale il combustibile, a contatto con l'aria, brucia senza necessità di un innesco.

2.1.1 Parametri della combustione

I parametri che influenzano maggiormente la combustione sono:

- Potere calorifico del combustibile
- Temperatura teorica di combustione
- Aria teorica di combustione

Si definisce *potere calorifico* di un combustibile il calore, misurato in Joule, generato dalla reazione di combustione completa per unità di massa o di volume del fuel. [15] Il calore rilasciato da un combustibile è influenzato dalla quantità di acqua in esso contenuto chiamata *umidità del combustibile*. L'umidità fa diminuire la velocità della reazione perché parte dell'energia viene utilizzata per la vaporizzazione dell'acqua. Data l'importanza di questo fenomeno esistono due tipi di definizione di potere calorifico:

- Potere calorifico superiore: considerando i prodotti di reazione tutti alla temperatura e pressione standard e con acqua allo stato liquido. Questo ci permette di non considerare l'energia per la vaporizzazione dell'acqua.
- Potere calorifico inferiore: per il quale invece si considera l'acqua nei prodotti sotto forma di vapore.

La *temperatura teorica di combustione* è la temperatura massima che si può raggiungere, in seguito ad una combustione, se tutto il calore fosse speso soltanto per riscaldare i prodotti del processo di combustione stesso. In seguito a problemi di irreversibilità del processo, tale temperatura non si raggiungerà mai. Essa è però utile per la scelta del combustibile da utilizzare. [16]

L'*aria teorica di combustione* è invece il volume di aria necessario per ottenere una combustione completa del combustibile. [17]

2.1.2. Prodotti di combustione

I prodotti di combustione sono i gas combusti, la loro composizione è funzione di diversi fattori quali: temperatura raggiunta durante la reazione, il tipo di combustibile impiegato e la quantità in percentuale di ossigeno presente. I principali prodotti sono: anidride carbonica, monossido di carbonio, acido cianidrico, anidride solforosa, idrogeno solforato, aldeide acrilica, ammoniaca, acido cloridrico e ossidi di azoto. L'inalazione dei gas prodotti da una combustione sono uno dei fattori più incriminanti della mortalità per incendio. Tale fenomeno incide con i processi di respirazione cellulare o può causare danni all'apparato respiratorio. [18]

Le particelle solide come aerosol e liquide come nebbie o vapori condensati, contenuti all'interno dei gas di combustione formano i fumi. [12] La formazione di fuliggine impedisce la visibilità per gli addetti alla rimozione dell'incendio e ostacola altresì l'esodo delle persone coinvolte nell'incidente. Per uno studio in ambito antincendio è di principale interesse dunque: occuparsi di un corretto incanalamento dei fumi per facilitarne l'eliminazione, la riduzione il più possibile della formazione di essi con pratiche di prevenzione, e progettazione di sistemi di ventilazione adeguati.

I fumi sono principalmente formati da:

- Particelle solide: sostanze incombuste come particelle di carbonio, ceneri e catrame. A seguito della presenza di questi composti i fumi presentano un colore scuro.
- Particelle liquide: formate principalmente da vapore d'acqua derivato dalla combustione dell'idrogeno e dall'umidità presente nel combustibile. Sotto la temperatura di vaporizzazione dell'acqua, ovvero 100 gradi Celsius, l'acqua nei fumi condensa provocando un fumo di colore bianco.

Gli impatti principali sull'uomo dei fumi sono il loro effetto irritante sulle mucose degli occhi e delle vie respiratorie e la riduzione dell'ossigeno presente nell'ambiente circostante. [12]

2.1.3. Fasi di un incendio

L'incendio viene distinto in tre fasi:

- fase di accensione;
- fase a velocità di combustione costante;
- fase di raffreddamento.

La *fase di accensione* è determinata da grande instabilità. L'alimentazione del fuoco avviene per fenomeni in parallelo come: rottura di finestre e l'incendio degli oggetti interni alla stanza. Quando la temperatura della fiamma supera i 600 °C e tutti i materiali esposti emettono gas infiammabili, l'incendio si sviluppa a pieno, così le temperature crescono velocemente. Questo stadio della fase di accensione si chiama *flashover* (infiammazione generalizzata). Una volta raggiunta la condizione di flashover si è in uno stato di irreversibilità in cui difficilmente si sopprime l'incendio prima che il combustibile si esaurisca.

La *fase a velocità di combustione costante* è caratterizzata da: una temperatura media molto elevata, quantità notevole di calore e grandi portate di gas infiammabili. La seconda fase termina quando la temperatura media raggiunge il valore massimo.

L'ultima fase, *raffreddamento*, è caratterizzata dalla diminuzione più o meno rapida della temperatura. Quest'ultima è influenzata dalla potenza termica generata dai residui dei materiali

combustibili. In generale si parla di combustione senza fiamma. L'estinzione termina quando la temperatura media raggiunge i 300°C circa. [12]

2.1.4. Classificazione incendi: Pool Fire

Gli incendi nell'analisi di rischio si possono raggruppare in:

- Incendi da pozze o serbatoi liquidi infiammabili (pool, tank o trench fire);
- Jet fire: l'incendio dei getti di vapore infiammabili da rottura serbatoio pressurizzato;
- Flash fire: incendi di nubi di vapori;
- Fire ball: sfere di fuoco.

La formazione di un incendio specifico tra questi dipende da innumerevoli fattori tra cui, quelli più importanti sono: il tipo di sostanza stoccata e il suo stato fisico, le modalità di rilascio, le condizioni di stoccaggio e l'innescò. L'identificazione corretta del tipo di fenomeno determina la scelta ottimale del modello matematico associato.

Il lavoro di tesi è basato sulla simulazione di un *pool fire* in ambiente confinato. Nel dettaglio un pool fire si verifica quando:

- in seguito a rotture di serbatoi di stoccaggio o di tubazioni un liquido infiammabile si deposita sul terreno o sull'acqua;
- la pozza è innescata da una sorgente esterna ad energia sufficiente. [13]

In base al tipo di rottura (catastrofica o limitata) si parla di rilascio istantaneo o continuo. Nella trattazione di tesi si lavora con un rilascio continuo di combustibile: si ipotizza che la pozza di combustibile sia sempre rigenerata in ogni istante di tempo in modo da tener costante l'HRR.

L'HRR è la potenza termica di un incendio ovvero la velocità di rilascio del calore. Questa grandezza è spesso espressa in kW. L'HRR nella realtà è un parametro molto difficile da determinare poiché è funzione della quantità di ossigeno nell'ambiente il quale varierà durante lo sviluppo dell'incendio. Questo parametro cambia dunque nelle tre fasi dell'incendio: cresce con il quadrato del tempo fino al flashover, successivamente aumenta più rapidamente fino a raggiungere il valor massimo, ed infine decresce linearmente nella fase di decadimento. [33]

Un incendio da pozza determina una fiamma diffusiva turbolenta sopra la superficie orizzontale del combustibile. Una caratteristica importante di questi tipi di incendi è il fenomeno della retroazione tra fiamma e combustibile: il trasferimento di calore dalla fiamma alla pozza di liquido influenza e controlla la velocità di evaporazione del combustibile, a sua volta fonte di alimento della fiamma. [32]

CAPITOLO 3: MODELLAZIONE TERMOFLUIDODINAMICA DEGLI INCENDI

Una volta compresa la fisica dell'incendio e l'effettiva importanza dello studio condotto all'interno di questo lavoro di tesi, si è passati alla modellazione vera e propria. La base di questo concetto è l'opportuno utilizzo delle relazioni matematiche a conoscenza. Per essere certi delle equazioni risolte e dei modelli applicati da FDS e FireFoam, tre progetti già conclusi sono stati adottati come ulteriore fonte:

- “Analisi e modellazione del test SBI di reazione al fuoco di un pannello solare fotovoltaico” di Giovanni Egisto del politecnico di Milano;
- “Convalida di un modello CFD per l'analisi delle conseguenze di incendi in ambienti confinati” di Giovanni Costingo e Lucio Zampollo del politecnico di Milano.
- “Simulazione di incendi: confronto tra modelli di fluidodinamica computazionale” di Stefano Citterio e Francesca Spessi del politecnico di Milano.

Si ringraziano anticipatamente gli autori in questione.

3.1. Equazioni di conservazione

Le grandezze estensive rispettano le equazioni di conservazione che generalmente sono riferite al volume di controllo complessivo. Il metodo dei volumi finiti, utilizzato da entrambi i programmi, afferma che le equazioni di trasporto vengano discretizzate per poi essere integrate su ogni volumetto elementare in cui è stato suddiviso il dominio. Tramite un processo iterativo si calcola la grandezza estensiva al centro di ogni cella computazionale. Si ottiene matematicamente poi il valore della grandezza estensiva per il volume globale. La risoluzione dell'equazioni di trasporto così ottenuta non è influenzata quindi dalla griglia computazionale applicata alla geometria.

$$(3.1) \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dV + \int_S \rho \phi \underline{u} \cdot \underline{n} dS = \int_S \underline{Q}_S(\phi) \cdot \underline{n} dS + \int_V Q_V(\phi) dV$$

Nell'equazione precedente, ϕ indica una qualsiasi proprietà estensiva. In particolare si possono esaminare nel dettaglio tutti i membri:

- primo addendo indica la velocità di variazione della grandezza studiata nel volume di controllo;
- il secondo indica, invece, il flusso convettivo della grandezza attraverso le superfici esterne del volume di controllo;
- Il primo termine al secondo membro rappresenta il flusso diffusivo di ϕ ;
- L'ultimo addendo indica l'accumulo volumetrico.

Data l'influenza del volume considerato e il teorema di Gauss si può ricavare la forma differenziale di tale equazione:

$$(3.2) \quad \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) = \nabla \cdot \mathbf{Q}_s(\phi) + Q_V(\phi)$$

Le equazioni di conservazione studiate sono:

- continuità;
- quantità di moto;
- conservazione delle specie;
- conservazione dell'energia.

L'analisi in dettaglio di tutte le equazioni di conservazione viene svolta sia in termini integrali sia in termini differenziali.

3.1.1. Equazione della continuità

In fluidodinamica, quest'equazione, è da attribuire alla conservazione della portata che passa all'interno di un volume definito. [20]

La forma integrale è:

$$(3.3) \quad \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \partial V + \int_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

La forma differenziale è:

$$(3.4) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u}) = 0$$

Si nota come il secondo termine dell'equazione è nullo in entrambe le forme.

3.1.2. Conservazione della quantità di moto

La conservazione della quantità di moto afferma che se la risultante di tutte le forze agenti su un corpo è nulla, allora la quantità di moto resta costante, ovvero quella iniziale pari a quella finale.
[21]

Le forze agenti sul volume di controllo che si tengono in considerazione sono: le forze superficiali e le forze derivanti dai campi presenti, come per esempio gravità e forza di Coriolis, dette anche volumetriche.

La forma integrale è:

$$(3.5) \quad \int_V \frac{\partial(\rho \underline{u})}{\partial t} dV + \int_S \rho \underline{u} \underline{u} \cdot \underline{n} dS = \int_S \bar{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n} dS + \int_V \rho \underline{f} dV$$

All'interno di questa formula abbiamo in particolare:

- $\bar{\underline{\sigma}}$ è il tensore degli sforzi;
- ρ definito dalla seguente equazione

$$(3.6) \quad \rho \underline{f} = \rho \sum_{i=1}^{N_c} \underline{f}_i \omega_i$$

Con questo termine si tiene conto della forza di volume di ogni singola specie (\underline{f}) pesata per la sua frazione massica.

La forma differenziale è:

$$(3.7) \quad \frac{\partial(\rho \underline{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u} \underline{u}) = \nabla \cdot \underline{\sigma} + \rho \underline{u}$$

3.1.3. Conservazione delle specie:

Quando si lavora con fluidi composti da più specie chimiche, si può applicare l'equazione ad ogni specie singola.

La forma integrale è:

$$(3.8) \int_V \frac{\partial (\rho \omega_i)}{\partial t} dV + \int_S \rho \omega_i \underline{u} \cdot \underline{n} dS = - \int_S \underline{J}_i \cdot \underline{n} dS + \int_V \dot{\Omega}_i dV \quad i = 1, 2, 3 \dots N_c$$

La forma differenziale è:

$$(3.9) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega_i) + \nabla \cdot (\rho \omega_i \underline{u}) = -\nabla \cdot \underline{J}_i + \dot{\Omega}_i \quad i = 1, 2, 3 \dots N_c$$

Dove in particolare:

- \underline{J}_i flusso diffusivo molecolare, che è spesso definito così:

$$(3.10) \quad \underline{J}_i = \rho \omega_i \underline{V}_i$$

- \underline{V}_i la velocità di diffusione riferita alla specie i -esima.

- $\dot{\Omega}_i$ velocità di formazione della specie

3.1.4. Conservazione dell'energia

Tale equazione deriva dalla prima legge della termodinamica e può essere scritta in vari modi a partire dall'energia totale contenuta in volume di controllo studiato. Questa grandezza è la somma di tutte le componenti energetiche del sistema ed in particolare: l'energia cinetica specifica associata al moto del fluido e dell'energia interna che è funzione della pressione, temperatura e composizione del sistema. [22]

$$(3.11) \quad \hat{E} = \hat{E}_t + \hat{U}(T, p, \omega_i) = \frac{1}{2} \vec{u} \cdot \vec{u} + \hat{U}(T, p, \omega_i)$$

La forma integrale è:

$$(3.12) \quad \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) dV + \int_S \rho h \underline{u} \cdot \underline{n} dS =$$

$$= - \int_S \underline{Q} \cdot \underline{n} dS + \int_S \underline{\sigma u} \cdot \underline{n} dS + \int_V \dot{q} dV + \int_V \rho \sum_{i=1}^{N_c} \omega_i f_i \cdot (\underline{u} + \underline{V}_i) dV$$

Dove in particolare:

- \dot{q} rappresenta la sorgente volumetrica d'energia
- \underline{Q} è il flusso termico
- L'ultimo addendo rappresenta la potenza termica sviluppata dalle forze di volume specifico per la specie in esame.

La forma differenziale è:

$$(3.13) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \underline{u}) = \nabla \cdot \underline{Q} + \nabla \cdot (\underline{\sigma u}) + \dot{Q} + \rho \sum_{i=1}^{N_c} \omega_i f_i \cdot (\underline{u} + \underline{V}_i)$$

3.2. Le leggi costitutive

Dato il numero elevato di incognite definite all'interno dell'equazioni di continuità si utilizzano le così dette leggi costitutive per poter rendere il numero di incognite pari al numero di equazioni, in modo da poter risolvere il problema.

3.2.1. Legge di Newton

La legge di Newton è utilizzata per calcolare il tensore degli sforzi per i fluidi Newtoniani. Esso è un fluido la cui viscosità non varia in funzione della velocità e presenta un legame di proporzionalità tra il tensore degli sforzi e delle velocità di deformazione; la costante di proporzionalità è la viscosità. [23]

La forma generale dell'equazione è:

$$(3.14) \quad \bar{\sigma} = 2\mu\bar{D} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla\bar{\mu}\right)\bar{I} = \left(2\mu\bar{D} - \frac{2}{3}\mu\nabla\bar{\mu}\right)\bar{I} - p\bar{I} = \bar{\tau} - p\bar{I}$$

Dove nel dettaglio si spiegano i vari elementi:

- μ viscosità dinamica
- $\bar{\mathbf{I}}$ tensore identità
- p pressione statica
- $\bar{\mathbf{D}}$ tensore delle deformazioni ed è definito tramite la seguente equazione:

$$(3.15) \quad \bar{\mathbf{D}} = \frac{1}{2} (\nabla \cdot \vec{\mu} + (\nabla \cdot \vec{\mu})^T)$$

- $\bar{\tau}$ Parte viscosa del tensore degli sforzi è definito tramite la seguente equazione:

$$(3.16) \quad \bar{\tau} = 2\mu\bar{\mathbf{D}} - \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{\mu}\bar{\mathbf{I}}$$

Si può esprimere la legge di Newton in forma cartesiana:

$$(3.17) \quad \sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij} = \left(2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - p\delta_{ij}$$

Dove in particolare:

- δ_{ij} è il delta di Kronecker che assume il valore: 1 se $i=j$ e 0 se i è diverso da j ;
- il tensore D_{ij} viene calcolato:

$$(3.18) \quad D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

3.2.2. Legge di Fick

Introducendo la legge di Fick è possibile calcolare la velocità di diffusione o il flusso diffusivo molecolare come di seguito:

$$(3.19) \quad \omega_i \vec{V}_i = - \Gamma_{i,mix} \nabla \omega_i$$

$$(3.20) \quad \vec{J}_i = -\rho \cdot \Gamma_{i,mix} \nabla \omega_i$$

Dove in particolare $\Gamma_{i,mix}$ rappresenta il coefficiente di diffusione della specie i -esima nella miscela

3.2.3. Legge di Fourier

La legge di Fourier viene utilizzata per calcolare il flusso energetico. Quest'ultimo è ottenuto tramite la seguente equazione:

$$(3.21) \quad \vec{q} = -\lambda \nabla T + \rho \sum_{i=1}^{N_c} \hat{H}_i \omega_i V_i$$

In particolare al secondo membro vi sono:

- primo addendo: è la legge di Fourier con λ pari alla conducibilità termica;
- il secondo, invece, è attribuibile alla diffusione delle specie ad entalpia differente, dove \hat{H}_i è l'entalpia specifica della specie *i-esima*

3.2.4. L'equazione di stato

Le condizioni termodinamiche di lavoro ed i materiali utilizzati permettono di rendere accettabile le condizioni di idealità dei gas, ciò permette l'impiego dell'equazione di stato dei gas perfetti:

$$(3.22) \quad p = \rho RT$$

Dove R rappresenta la costante universale dei gas ideali.

Sotto le assunzioni di gas ideale è possibile calcolare l'energia interna come:

$$(3.23) \quad \hat{U} = \hat{c}_v T$$

Dove, in particolare, \hat{c}_v rappresenta il calore specifico a volume costante.

3.3. Le equazioni di Navier-Stokes

La risoluzione dell'equazioni di Navier-Stokes è uno dei principali utilizzi della modellazione CFD.

Appartengono ad esse l'equazione di continuità (3.4) e quella di conservazione della quantità di moto (3.6) descritte precedentemente. Le equazioni vengono riportate di seguito con il termine di sorgente modificato in relazione al metodo dei volumi finiti.

$$(3.24) \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{u}) = 0 \\ \rho \frac{D\underline{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \underline{u}) + S_M \end{cases}$$

Il sistema proposto è applicabile ad ogni fluido Newtoniano isotropo esistente con la complicazione riferita alla turbolenza. Uno dei parametri di maggiore indicazione per la turbolenza di un fluido è il numero di Reynolds (Re). Il numero è adimensionato espresso come il rapporto tra le forze d'inerzia (Fi) e le forze viscosi (Fv). [24]

$$(3.25) \quad \begin{cases} F_i = \rho S L \frac{L}{t^2} \\ F_v = \frac{\mu S \Delta U}{\Delta L} \\ Re = \frac{F_i}{F_v} \end{cases}$$

Tramite il calcolo di Re è possibile definire il tipo di moto di un fluido e sperimentalmente esiste un valore sopra del quale il fluido inizia la transizione verso un moto turbolento o caotico.

Si definisce decomposizione di Reynolds la possibilità di definire una grandezza come la somma di una stazionaria media ($\bar{\Phi}$) e una derivante dalla fluttuazione statistica della grandezza ($\Phi'(t)$). Ciò è visualizzabile nell'equazione successiva:

$$(3.26) \quad \Phi(t) = \bar{\Phi} + \Phi'(t)$$

Un flusso turbolento, a differenza di uno laminare, presenta al suo interno delle strutture vorticosi (o Eddies) di grandezza e velocità differenti che portano il flusso a non essere predicibile nel tempo anche se il moto è comunque di tipo deterministico. L'effetto di mescolamento determina un aumento dei coefficienti di diffusione delle equazioni di conservazione.

Tutte le proprietà fluttuanti in regime turbolento contengono energia all'interno di un largo spettro di frequenze o numeri d'onda κ , definito tramite l'equazione di seguito:

$$(3.27) \quad \kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Dove con λ si richiama la lunghezza d'onda dei vortici. L'energia cinetica riferita alla massa e al numero d'onda è definita energia spettrale. Quest'ultima raggiunge i valori massimi per grandi valori di lunghezza d'onda (o piccoli κ); ciò determina i Large Eddies.

Il comportamento dell'energia spettrale in funzione del numero d'onda è fortemente dipendente da due fenomeni che si sviluppano in un moto turbolento:

- *vortex stretching*: è il fenomeno di allungamento dei vortici associato ad una estrazione di energia dal flusso medio. Il momento angolare durante lo stiramento si conserva e quindi un aumento di velocità si traduce in una diminuzione della grandezza. Questa energia è necessaria per il mantenimento della turbolenza.
- *energy cascade*: trasferimento di energia da grandi scale a piccole scale, questo movimento è detto cascata. [25] L'energia cinetica viene dissipata e convertita in termica, perciò i moti turbolenti generano una dissipazione di energia maggiore di quelli laminari.

I Large Eddies sono caratterizzati da un effetto predominante dei contributi inerziali rispetto a quelli viscosi. Infatti la lunghezza caratteristica e la velocità dei vortici sono dello stesso ordine di grandezza del flusso medio, quindi presentano dei numeri di Reynolds simili tra loro.

Il fenomeno dello stiramento dei vortici, incidendo sulla diminuzione del raggio del vortice, rende eguali le forze viscosi a quelle inerziali, ovvero il numero di Reynolds tende a uno. Tale fenomeno è stato osservato da Kolmogorov che afferma l'isotropia delle scale piccole. Si utilizza un valore di $\kappa=1000$ per definire il passaggio da una scala grande ad una piccola senza tener conto di scale intermedie.

In commercio i modelli di simulazione della turbolenza più utilizzati sono:

- URANS;
- LES;
- DNS.

3.4. Modelli per la simulazione della turbolenza

I tre modelli si basano sulla risoluzione più o meno semplificata dell'equazioni di Navier-Stokes dell'energia e della specie e in particolare: il DNS risolve tutte le scale turbolenti, il LES solo quelle grandi e modella le piccole, l'URANS, infine, risolve tutte le scale tramite mediazione temporale.

Si passa ad analizzare nel dettaglio i tre metodi di simulazione della turbolenza.

3.4.1. URANS

Questo metodo calcola i valori medi delle grandezze che riguardano il flusso. Le equazioni applicate nell'URANS sono ricavate tramite mediazione temporale dell'equazioni di Navier-Stokes, delle specie e dell'energia. Tale processo introduce alcuni termini all'interno dell'equazioni che dovranno essere anch'essi modellati. La risoluzione dell'equazioni mediate determina un costo computazionale basso rispetto agli altri metodi, perciò è molto interessante il suo utilizzo per le geometrie più complesse. Il metodo URANS, per questo motivo, è il più adoperato nel settore industriale.

Una grande limitazione di questo metodo è la non distinzione dei vortici di grande e piccola taglia in quanto questi presentano differenze sostanziali: i vortici di piccola dimensione sono isotropici secondo la teoria di Kolmogorov; mentre quelli grandi sono fortemente anisotropi e funzione della geometria e delle boundary conditions.

3.4.2. DNS

Il metodo DNS rappresenta quello più minuzioso tra i tre in quanto risolve le equazioni di Navier-Stokes delle specie e dell'energia così come sono senza introdurre alcuna semplificazione.

Il calcolo delle grandezze termodinamiche avviene costruendo *mesh* con un numero di nodi elevato.

Tale metodo risolve esplicitamente tutte le scale della turbolenza determinando così un costo computazionale elevato. Mesh meno fitte permettono di ridurre il costo computazionale quando applicate a moti aventi Re moderato.

L'approccio DNS risulta quello con soluzioni più accurate e si limita ad applicazioni puramente universitarie.

3.4.3. LES

Dato l'elevato costo computazionale del metodo DNS e la non accurata descrizione dei vortici del modello URANS, è necessario introdurre e quindi applicare un nuovo metodo capace di risolvere

queste problematiche. L'approccio LES permette innanzitutto la distinzione tra vortici piccoli e grandi attraverso un'azione di filtraggio sull'equazione di conservazione e di trasporto.

Il metodo LES risolve esplicitamente, tramite una simulazione non stazionaria, i vortici di grande dimensione e gestisce attraverso un modello matematico quelli di piccola taglia. [26]

L'operazione di filtraggio richiede uno studio specifico sull'ampiezza caratteristica del filtro, detta "cut off width" (Δ). I vortici piccoli ottenuti dopo il filtraggio sono descritti tramite i modelli di sottogriglia (*SGS models, Sub-Grid Scale*) in cui si introducono degli sforzi turbolenti direttamente nelle equazioni filtrate.

Quando l'approccio LES è accoppiato con il metodo dei volumi finiti la dimensione Δ coincide con la size della mesh. Nei casi tridimensionali nei quali la cella computazione non è cubica si definisce Δ come:

$$(3.28) \quad \Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

L'azione del filtro garantisce una semplificazione del moto riducendo il costo computazionale approssimando i vortici di piccola dimensione. La scelta di un Δ grande comporta però una perdita notevole di informazioni generando una soluzione poco accurata del flusso associato.

L'esattezza della soluzione sulla turbolenza è ottenuta quando Δ è pari alla lunghezza di Kolmogorov l_k simulando, però, il comportamento come nel modello DNS. Di qui l'utilità dell'applicazione del metodo LES per Δ maggiori di l_k .

In particolare si definisce la scala di lunghezza di Kolmogorov l_k :

$$(3.29) \quad l_k = C \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Dove ε è l'energia cinetica turbolenta, ν la viscosità cinematica e C una costante. [26]

L'applicazione del filtro avviene attraverso una convoluzione con una Kernel o filter function \mathbf{K} applicata alla generica grandezza ϕ :

$$(3.30) \quad \phi(\vec{x}, t) = L(\phi) = \iiint \mathbf{K}(\vec{x}, \vec{x}', \Delta) \phi(\vec{x}', t) d\vec{x}'$$

La funzione filtro \mathbf{K} più diffusa lavorando con il metodo dei volumi finiti è il *top-hat* (o *box filter*):

$$(3.31) \quad K(\vec{x}, \vec{x}', \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & |\vec{x} - \vec{x}'| \leq \frac{\Delta}{2} \\ \mathbf{0} & |\vec{x} - \vec{x}'| \geq \frac{\Delta}{2} \end{cases}$$

Si prende in considerazione un cubo centrato in \vec{x} e di lato Δ , si eguaglia la variabile filtrata nella posizione \vec{x} alla media delle variabili all'interno del volumetto e si annulla l'effetto delle variabili all'esterno.

Di seguito si riporta l'equazione di Navier-Stokes filtrata nello spazio: [31]

$$(3.32) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \text{div}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{p}_i) + \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \bar{u}_i) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Dove in particolare

- Γ è il coefficiente di diffusione, funzione della viscosità;

- \bar{u}_i è la velocità filtrata;

- \bar{p}_i è la pressione filtrata;

- τ_{ij} è il tensore degli sforzi definito dalla seguente relazione:

$$(3.33) \quad \tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} + \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$$

Successivamente al filtraggio si passa alla modellazione dei vortici di piccola scala definendo i parametri μ , k e D presenti nelle equazioni. La manipolazione di questi parametri quantifica l'impatto dei fenomeni di sottogriglia sull'equazioni filtrate.

Il modello SGS modifica il tensore degli sforzi τ_{ij} definendo quello di sottogriglia proporzionale al tensore della velocità di deformazione secondo l'ipotesi di Boussinesq.

$$(3.34) \quad \tau_{ij}^{SGS} = -\mu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{il}^{SGS} \delta_{ij}$$

Dove in particolare μ_{SGS} è la viscosità del campo di moto, una grandezza tensoriale.

Uno dei modelli di sottogriglia più noti è quello Smagorinsky-Lilly, un modello algebrico, che calcola la viscosità turbolenta μ_{SGS} :

$$(3.35) \mu_{SGS} = \rho(C_{SGS} \Delta)^2 \left| \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \right|$$

Dove C_{SGS} è una costante compresa tra 0.19 e 0.24.

Una volta calcolata la viscosità turbolenta è possibile determinare gli altri parametri diffusivi tramite le seguenti relazioni:

$$(3.36) k_{SGS} = \frac{\mu_{SGS} c_p}{Pr_t} \quad (\rho D)_{l,SGS} = \frac{\mu_{SGS}}{Sc_t}$$

Dove Pr_t è il numero di Prandtl e Sc_t è il numero di Schmidt che sono assunti costanti per un dato scenario, i più utilizzati sono $Pr_t=Sc_t=0,5$. [26]

3.5. Confronto modelli utilizzati in FDS e FireFoam

Una volta descritte tutte le equazioni che partecipano alla modellazione fluidodinamica di un incendio, si passa ad analizzare nel dettaglio i modelli utilizzati effettivamente nelle simulazioni svolte per i due programmi.

3.5.1 Modello di combustione:

I modelli di combustione utilizzati nei due programmi sono:

- In FDS è quello a frazione di miscela (*mixture fraction*), dove si calcola una quantità scalare Z che stabilisce se la combustione avviene oppure no in ogni cella ad ogni istante temporale: se il processo chimico ha luogo, il centro del volumetto viene riscaldato e colorato in modo da mostrare la presenza della fiamma. La reazione viene controllata tramite la miscela di combustibile e ossigeno, ed avviene in modo infinitamente veloce. [27] e [29]

$$(3.37) \quad Z = \frac{sY_f - Y_o + 1}{1+s}$$

- In FireFoam il modello di combustione utilizzato è il “*infinitelyFastChemistry*” a singolo stadio: i tempi della cinetica chimica rispetto a quelli di mescolamento [28]. Con questo modello il combustibile non appena a contatto con l’ossidante genera immediatamente la combustione. La reazione chimica così definita garantisce il valore nominale dell’HRR e che i prodotti intermedi non vengano predetti.

La velocità di consumo dei reagenti, in seguito all’ipotesi di miscelazione turbolenta, viene descritta tramite la seguente equazione:

$$(3.38) \quad \overline{\rho\dot{\omega}} = C\overline{\rho} \frac{1}{\tau_t} \min\left(Y_f, \frac{Y_o}{s}, \beta \frac{Y_p}{(1+s)}\right) = C\overline{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min\left(Y_f, \frac{Y_o}{s}, \beta \frac{Y_p}{(1+s)}\right)$$

Dove in particolare:

- $\rho\dot{\omega}$ Indice sul consumo di combustibile
- Y_o Frazione in massa dell’ossigeno
- Y_f Frazione in massa 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 è fortemente influenzata dal reagente a minore concentrazione e limitata dalla indipendenza dalla temperatura. Per ovviare a questo problema un largo *range* di temperatura è stato utilizzato come campo di validità del modello.

3.5.2. Modello radiativo:

- In FDS si modella lo scambio termico tramite la risoluzione della equazione di trasporto RTE (*radiative transport equation*) per un gas grigio: gas ad emissività costante su tutto lo

spettro elettromagnetico. A volte l'assunzione di gas grigio viene sostituita con un modello *wide band* che ne migliora la soluzione. La risoluzione dell'equazione di trasporto RTE avviene tramite il metodo ai volumi finiti. Il modello radiativo tiene conto anche dell'effetto delle gocce d'acqua all'interno del dominio computazionale che assorbono e diffondono la radiazione a differenza delle specie di gas e della fuliggine che non vengono tenute in conto.

- In FireFoam l'intensità radiativa viene trattata come una funzione sia della posizione spaziale sia della direzione angolare, e viene calcolata risolvendo l'equazione di trasporto RTE mediante il modello di *fvDOM* (*finite volume Discrete Ordinates Method*). Sotto le assunzioni di gas grigio, fiamma otticamente sottile, trascuratezza dello scattering, il flusso termico radiativo viene calcolato come segue:

$$(3.39) \quad \nabla \cdot \underline{Q}_R = A_p \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) = A_p (4 \sigma_{SB} T^4 - G)$$

Dove in dettaglio:

- σ_{SB} si indica la costante di Stephan-Boltzman,
- A_p è il coefficiente di assorbimento di Plank
- I_b è l'intensità radiativa totale del corpo nero
- G è l'energia radiativa incidente calcolabile così:

$$(3.40) \quad G(\underline{x}) = \int_{4\pi} I(\underline{x}, \Omega) d\Omega$$

3.5.3. Modello della turbolenza

In entrambi i programmi studiati per la modellazione della turbolenza viene eseguita tramite l'approccio LES ed in particolare:

- In FDS il metodo utilizzato per la modellazione delle basse scale turbolente è: *Smagorinsky-Lilly* che è stato ampiamente descritto nel capitolo 3.4.1.
- In FireFoam, invece, la turbolenza è stata modellizzata tramite il metodo "*oneEqEddy*" (*one-equation eddy viscosity model*), uno dei più utilizzati nell'ambiente FireFoam, in cui viene risolta la seguente equazione di trasporto per l'energia cinetica della SGS (k): [30]

$$(3.41) \quad \frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho}\tilde{u}k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla k \right] + P - \bar{\rho}\varepsilon$$

Dove in particolare:

- μ_t , il termine di viscosità è stato calcolato come segue:

$$(3.42) \quad \mu_t = \bar{\rho} c_k \Delta \sqrt[3]{k}$$

Dove Δ è sempre calcolata come la radice cubica del volume della cella e c_k è una costante parametrica del modello che nella simulazione è posta pari a 0.07

- P è il tasso di produzione dell'energia cinetica della SGS e definito come:

$$(3.43) \quad P = -\frac{2}{3} \left(\bar{\rho} k + \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} + 2\mu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}$$

- ε è il rateo di dissipazione pari a:

$$(3.44) \quad \varepsilon = \frac{c_\varepsilon}{\Delta} k^{\frac{3}{2}}$$

con c_ε pari a 1.048.

3.5.4. Schemi numerici e strategie risolutive

Sia FDS che FireFoam usano il metodo ai volumi finiti per risolvere il sistema di equazioni. La differenza è che in FDS la mesh è di tipo *strutturata rettilinea di forma poligonale 3D*, mentre per quanto riguarda FireFoam si utilizza una *mesh poliedrica non strutturata 2D o 3D*. Questo garantisce l'utilizzo di FireFoam anche per geometria molto complesse.

In particolare in FireFoam il metodo di soluzione è basato su metodi impliciti del secondo ordine: per lo spazio si usa *Gauss linear* e per il tempo *Cranck-Nicolson*. Il campo di pressione viene definito utilizzando un metodo *PISO* o *PIMPLE* che risulta sufficientemente stabile. Anche se usufruiamo di un metodo implicito per garantire la convergenza, utilizziamo una strategia risolutiva quale l'assegnazione di un *numero massimo di Courant*: esso esprime la relazione tra la velocità del flusso, la *size* della griglia e il passo temporale. È definito tramite questa equazione:

$$(3.45) \quad Co = \bar{v} \frac{\Delta t_{max}}{\Delta x}$$

Il numero massimo utilizzato è 0.5 in modo da garantire la risoluzione dell'algoritmo *PIMPLE*.

CAPITOLO 4: CASO STUDIO

4.1 Definizione del problema e della geometria:

Lo studio condotto ha lo scopo di analizzare e studiare l'evoluzione di un incendio all'interno di una metropolitana, con l'obiettivo di prevedere le zone più pericolose. Questo lavoro potrà fungere da base per un successivo studio di sicurezza in ambito anti-incendio.

La geometria assunta rispecchia una realistica stazione metropolitana, infatti nella geometria in studio, la rappresentazione degli oggetti e dell'ambiente di lavoro sono in scala 1:1. Il volume della stazione è pari circa a 8400 m³.

L'area studiata è una stazione metropolitana formata da 4 stanze:

1. Nella zona più bassa sono collocati i binari. Questa area è delimitata superiormente dal pavimento dell'atrio.
2. L'area centrale, più estesa, è l'atrio definito dal colonnato e dall'ingresso al lucernario.
3. La zona disposta più in alto è il lucernario, nel quale i fumi vengono convogliati e scaricati all'esterno attraverso delle aperture.
4. Nell'area sulla sinistra sono presenti le scale di uscita della metropolitana

Per osservare più facilmente queste aree nel dettaglio, di seguito si utilizza una immagine estrapolata dal programma Pyrosim, usato per il pre-processing di FDS.

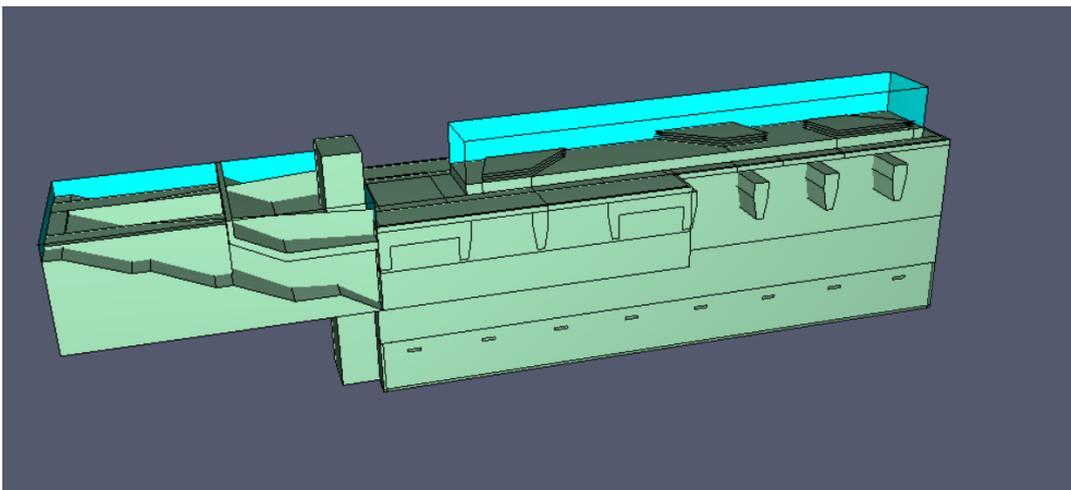


Figura 4.1 Geometria Stazione

Si possono ora visualizzare le differenti zona sopra citate.

Nella area dei binari sono presenti nello specifico: due scalinate che permettono alle persone di raggiungere i binari ferroviari ed il pavimento dell'atrio, che in questa zona funge da soffitto.

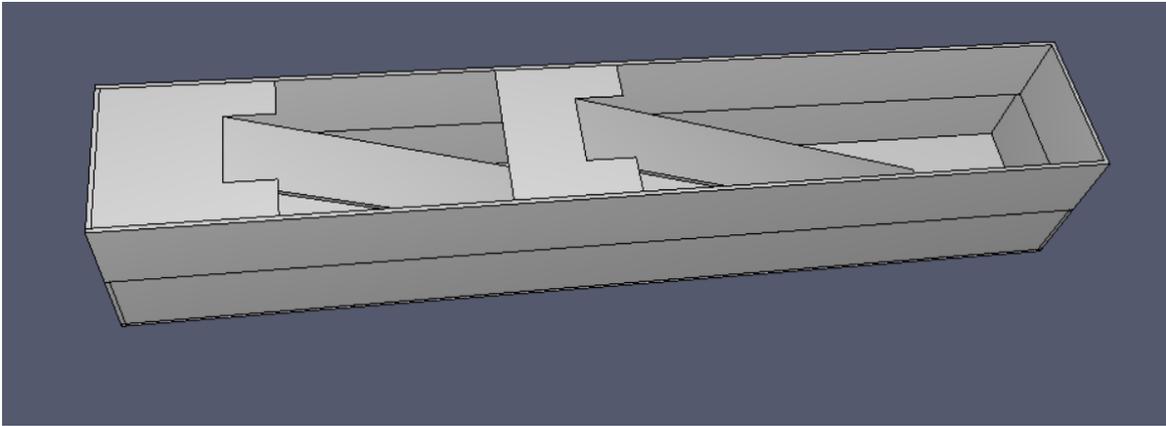


Figura 4.2 Geometria Stazione semplificata

Nell'atrio sono presenti: le colonne, lo sbocco per la zona del lucernario, il pavimento dell'atrio e i due controsoffitti laterali. Di seguito si può osservare una vista dal basso dell'area analizzata.

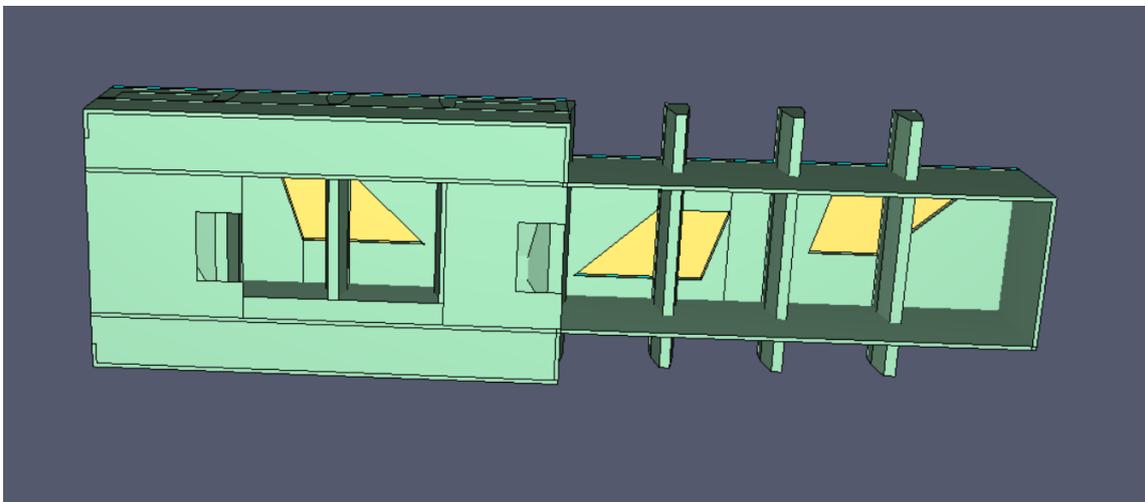


Figura 4.3 Atrio

Il lucernario, invece, ha pochi elementi: il pavimento e delle chiusure a ventaglio. Quest'ultime, in base alla quantità di fumi da smaltire, tendono meccanicamente a sollevarvi permettendo così un aumento di portata di fumi in uscita.

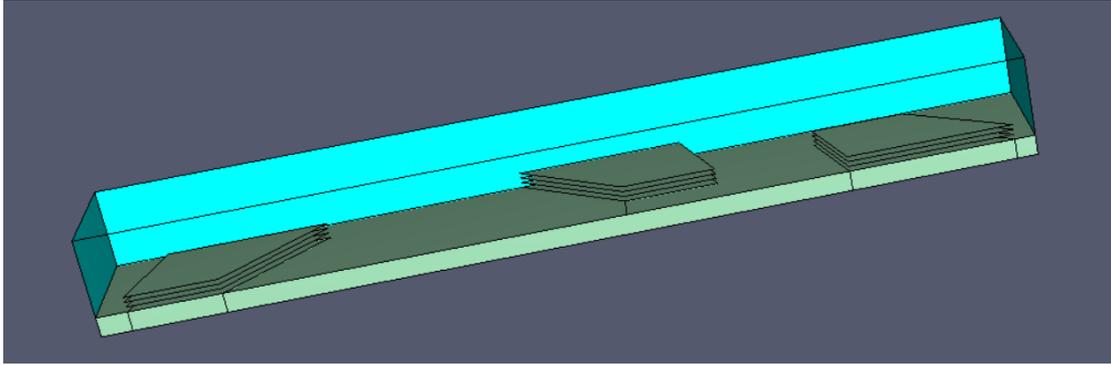


Figura 4.4 Lucernaio

Nella zona sulla sinistra dell'intera geometria sono presenti, oltre le scale di uscita, anche dei muri divisorii e un ascensore che collega direttamente l'ambiente esterno al piano con i binari ferroviari.

La colonna che sporge sulla destra dell'immagine sottostante corrisponde alla fossa dell'ascensore.

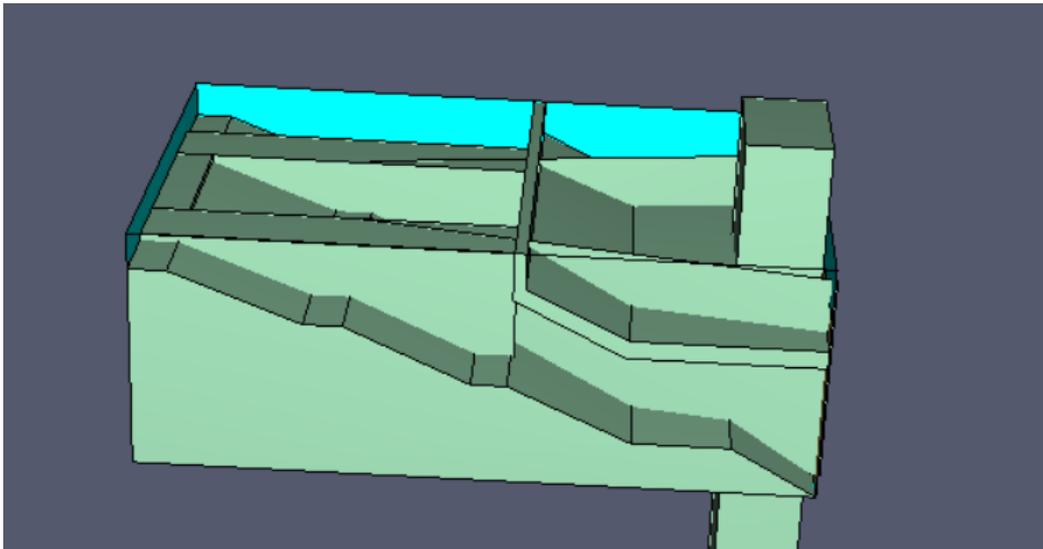


Figura 4.5 zona "left" con scale di uscita

4.2 Riduzione geometria: problema del tempo computazionale:

La scelta accurata della dimensione della mesh computazionale influenza, in un'analisi di tipo fluidodinamico, i profili delle grandezze studiate e l'accuratezza della soluzione.

Il volume complessivo dell'ambiente di lavoro qui ridotto è pari a circa 2650 m³.

Per questo caso studio è stata condotta un'analisi parametrica sulla lunghezza caratteristica della cella computazionale: essa ha condizionato i profili di temperatura, il tempo computazionale e la visualizzazione degli oggetti in FireFoam. In particolare più la mesh sarà fitta e più accurate saranno le soluzioni e la risoluzione degli oggetti della stanza.

Di seguito sono visualizzabili, tramite scatti da Paraviwe, le differenze tra le mesh applicate e le loro rispettive "size".

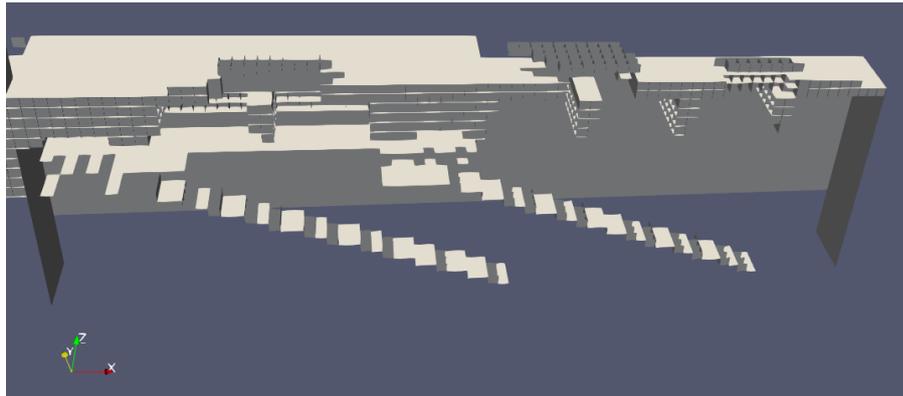


Figura 4.6 Mesh size 0.6m



Figura 4.7 Mesh size 0.4m

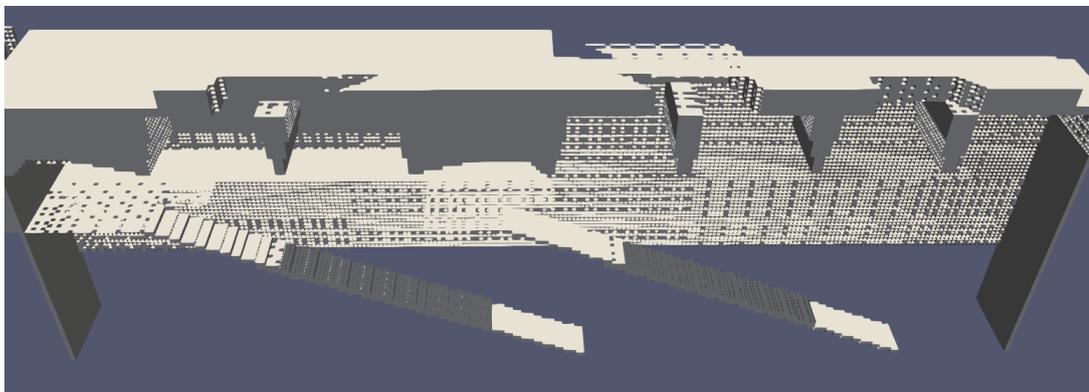


Figura 4.8 Mesh size 0.2m

Si osserva che una lunghezza caratteristica, detta “size”, di 0.2m potrebbe essere una scelta ottimale dal punto di vista della visualizzazione corretta degli elementi caratteristici della geometria. Questa però non risulta la scelta migliore dal punto di vista del tempo computazionale, poiché la simulazione necessita di un tempo eccessivamente lungo e di un calcolatore con hardware altamente performante.

Dato che lo scopo della tesi è confrontare i due software indipendentemente dalla geometria utilizzata, si sceglie di studiare l’evoluzione dell’incendio solo nella zona a ridosso dei binari.

La riduzione del dominio computazionale ha permesso di impiegare una dimensione caratteristica della mesh piccola e pari a 0.2 m in modo da rendere le soluzioni accettabili conservando un tempo di simulazione ragionevole.

Con queste ipotesi finali il tempo richiesto per la simulazione con FireFoam è stato pari circa a cinque giorni, mentre con FDS circa 8 ore.

Si può visualizzare nell’immagine sottostante il dominio computazionale utilizzato effettivamente nella simulazione nei due software:

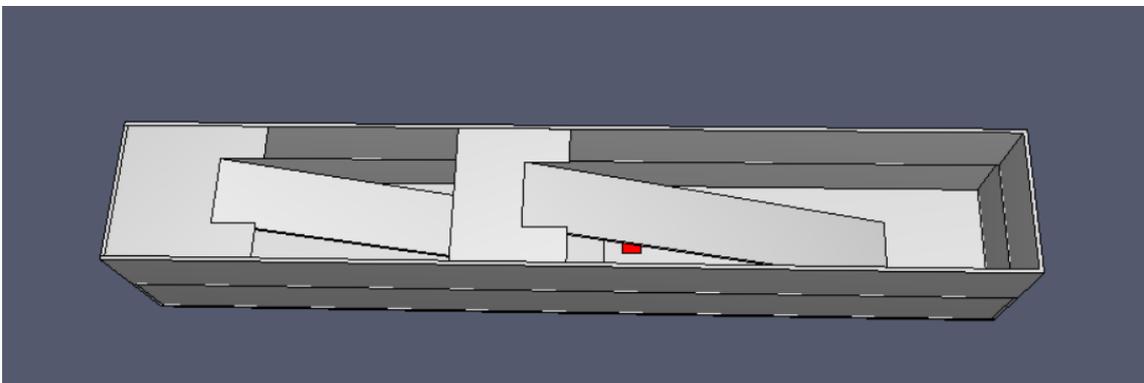


Figura 4.9 Dominio computazionale

4.3 Cause dell’incendio

Le cause di un eventuale incendio in una metropolitana possono essere molteplici. Gli scenari più importanti in ambito di sicurezza possono essere estrapolati dal “DM 21/10/2015 Metropolitane” [1] e sono:

- Incendio a bordo di un treno fermo in galleria;
- Incendio di un’attività commerciale all’interno dell’atrio;

- Incendio in un locale tecnico.

Lo scenario più probabile è costituito dal materiale rotabile, quindi corrispondente al primo scenario. [2]

4.4 Incendio applicato

L'incendio applicato è un Pool Fire parametrizzato, nei due programmi di studio, in modo differente:

- In FDS si è usato l'HRRPUA pari a 1000 kW/m² e la superficie di fiamma pari a 0.6 m².
- In FireFoam si sono usati come parametri: la velocità di ingresso del combustibile pari a 0.0347 m/s e la superficie di fiamma pari a 0.6 m².

L'HRR risultante dalla parametrizzazione è di 600 kW, comparabile ad una fiamma emessa da piccole cataste in legno o materiali cellulosici.

La simulazione dell'incendio nei due programmi, grazie a questi parametri, può essere considerata simile: partendo dal valore dell'HRRPUA si calcola la velocità del combustibile attraverso il potere calorifico del metano e/o viceversa.

Si riportano le equazioni utilizzate per il calcolo della velocità:

$$(4.1) \quad HRR = HRRPUA \cdot S_{poolfire} = \left[\frac{kW}{m^2} \right] \cdot [m^2]$$

$$(4.2) \quad \dot{V} = \frac{HRR}{PCI} = \frac{\left[\frac{kJ}{s} \right]}{\left[\frac{kJ}{Nm^3} \right]}$$

$$(4.3) \quad v = \frac{\dot{V}}{S_{poolfire}} \cdot \left(\frac{T_{op}}{T_N} \right) = \left[\frac{m}{s} \right]$$

Dove in particolare:

-PCI= 31.65 MJ/Nm³

-S_{poolfire}=0.6 m²

-T_{op}=300 K

-T_N=273.15 K

-HRRPUA=1000 kW/m²

CAPITOLO 5: MODELLAZIONE DEL PROBLEMA CON IL SOFTWARE FDS

5.1. Procedura del test

Il test svolto con il programma FDS prevede due macro fasi:

- ❖ Pre-processing: fase precedente al lancio della simulazione;
- ❖ Post-processing: fase in cui si elaborano i risultati.

5.1.1 Pre-processing con software Pyrosim:

L'intero processo è stato elaborato utilizzando un precompilatore di FDS, Pyrosim.

La fase del pre-processing comprende una serie di step intermedi:

- Descrizione del dominio computazionale e creazione della mesh;
- Definizione della reazione di combustione;
- Inserimento degli elementi all'interno della geometria, tra cui oggetti e pareti interne;
- Applicazione delle condizioni al contorno per le pareti esterne e proprietà termodinamiche delle pareti interne;
- Introduzione della superficie di fiamma.

5.1.1.1 Descrizione del dominio computazionale e la creazione della mesh:

La prima fase del pre-processing è stata svolta sia per geometria completa della stazione e sia per il dominio computazionale semplificato.

Nella modellazione CFD la scelta della dimensione caratteristica della griglia di calcolo svolge un ruolo importante. La soluzione derivata dal modello è una soluzione approssimata; con l'obiettivo di ridurre sempre di più la differenza tra la soluzione computata rispetto a quella effettiva, si dovrà ridurre il più possibile la dimensione della cella ("size"). Dopo un'analisi parametrica, come spiegato precedentemente nel capitolo 4, si è considerato accettabile una mesh cubica di lato 0.2m.

Nelle simulazioni di incendio tramite FDS, in genere si preferisce utilizzare una mesh più fine nelle zone prossime alla fiamma in modo da poter visualizzare un profilo di temperatura più accurato nella zona in cui la temperatura è più alta. Nel lavoro svolto però si è usata una dimensione

caratteristica uniforme in tutta la geometria, in modo da confrontare, più fedelmente possibile, le curve ottenute dai due programmi.

5.1.1.2. Definizione della reazione di combustione:

In Pyrosim all'interno del menu "*Edit reactions*" si può scegliere il combustibile da utilizzare nella simulazione. Per il lavoro svolto è stata scelta "METHANE" in fase gassosa. La composizione del combustibile è considerata come metano puro senza ulteriori gas in miscela.

Rispetto ai parametri predefiniti la voce "*soot yield*" è stata modificata ad un valore di 0.055 (adimensionato). Questo valore quantifica la fuliggine prodotta.

5.1.1.3. Inserimento degli elementi all'interno della geometria, tra cui oggetti e pareti interne:

Gli elementi che costituiscono la stazione al suo interno sono stati simulati in Pyrosim tramite "*obstruction*" inserendo le dimensioni e le coordinate di ogni singolo elemento. Tali superfici fungeranno da ostacolo per il passaggio dei fumi e causeranno diramazioni e stagnazioni di essi all'interno del dominio. Questi fenomeni saranno chiariti nel capitolo dei risultati.

Le superfici delle ostruzioni vengono simulate come adiabatiche per poter confrontare coerentemente le soluzioni con FireFoam dove si è utilizzata la condizione di "*zeroGradient*".

La superficie di fiamma è inserita al di sotto della scala destra; questa ostruzione risulterà la più interessante per la visualizzazione dell'evoluzione del pennacchio.

Un'ulteriore considerazione va fatta sulle superfici oblique e inclinate degli oggetti: FDS non riesce a simulare queste ostruzioni perché impostato per lavorare con griglie computazionali rettilinee. Infatti le superfici angolate vengono risolte, ove possibile, come somma di segmenti orizzontali e verticali. Nella stazione, per costruire le due scale, è stato creato un parallelepipedo e, posto in obliquo, genera dei gradini di altezza 0.2 m.

Nell'immagine sottostante: sulla sinistra è rappresentato il parallelepipedo obliquo mentre a destra il suo risultato interpretato da FDS.

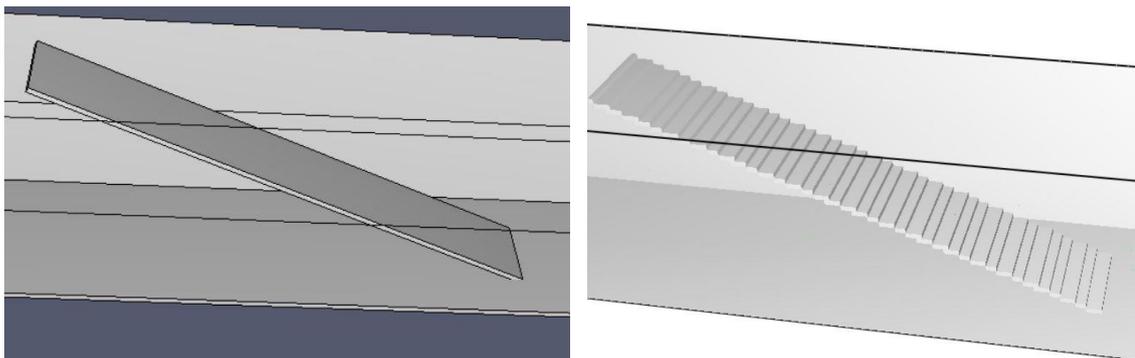


Figura 5.1 "Obstruction" scala

5.1.1.4. Applicazione delle condizioni al contorno per le pareti esterne:

Le condizioni al contorno applicate sulle pareti che delimitano il dominio computazionale sono di due tipi:

- *Adiabatic*: utilizzata per simulare le proprietà adiabatiche dei muri della stazione;
- *Open*: utilizzata per le superfici che sono in contatto con ambienti esterni al dominio computazionale, ovvero l'ambiente esterno o zone limitrofe della stazione non studiate.

Per poter applicare le Boundary Conditions alle superfici esterne è necessario inserire le rispettive superfici "vent".

Le BC variano a seconda della geometria computata, perciò nel dettaglio si analizzano i due casi precedentemente riportati. Nella geometria completa le superfici adiabatiche sono applicate per quasi la totalità delle pareti esterne. Le pareti aperte esterne applicate sono quelle al lucernario (superfici laterali e soffitto) e alla parte sinistra a ridosso delle scale di uscita (superfici laterali e soffitto). Nell'immagine seguente l' "open vent" è in celestino, ed in grigio l' "adiabatic vent".

Il soffitto nell'immagine viene nascosto per permettere l'osservazione degli elementi interni della stazione.

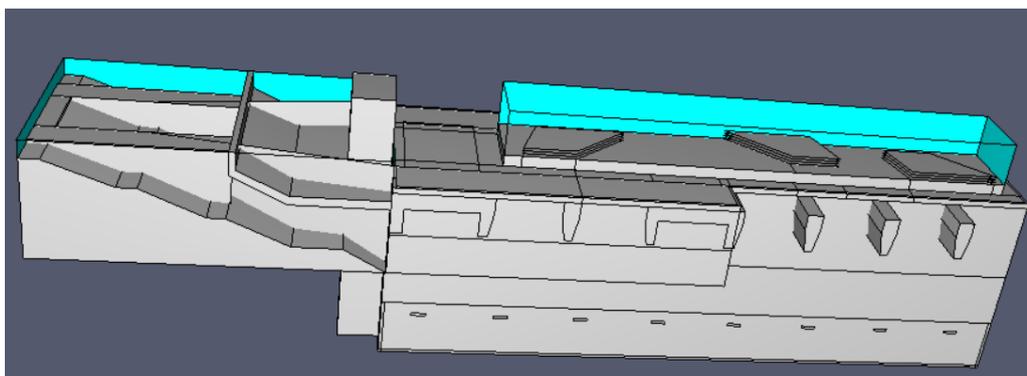


Figura 5.2 Elementi interni alla stazione

Per quanto riguarda invece la geometria semplificata solo il soffitto verrà simulato come aperto, mentre le restanti pareti saranno adiabatiche. Il soffitto in questa geometria funge da superficie di confine, mentre nella stazione completa corrisponde ad una zona interna del dominio computazionale. Questa motivazione è alla base per l'applicazione di una BC al soffitto nel caso semplificato. Nell'immagine seguente le pareti adiabatiche sono in grigio, ed il soffitto in celestino, per comodità, viene oscurato.

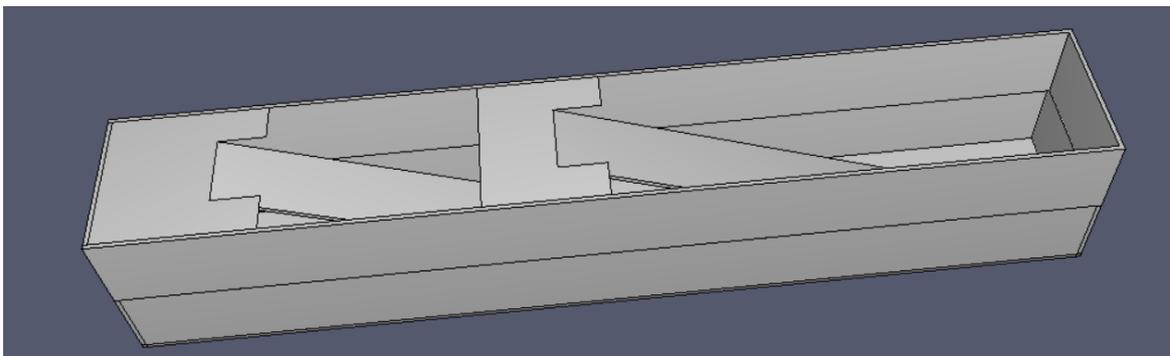


Figura 5.3 Grigio, adiabaticità come Condizioni al contorno

5.1.1.5. Introduzione della superficie di fiamma

L'incendio all'interno della stazione viene generato da una superficie di fiamma posta sul pavimento nella zona dei binari. La superficie è una "vent" di tipo "fire" che ha come paramento caratteristico l'HRRPUA pari a 1000 kW/m^2 . Tale coefficiente determina l'heat release rate della reazione una volta definita una superficie. La dimensione della superficie di fiamma studiata è di 0.6 m^2 e determina un HRR di 600 kW .

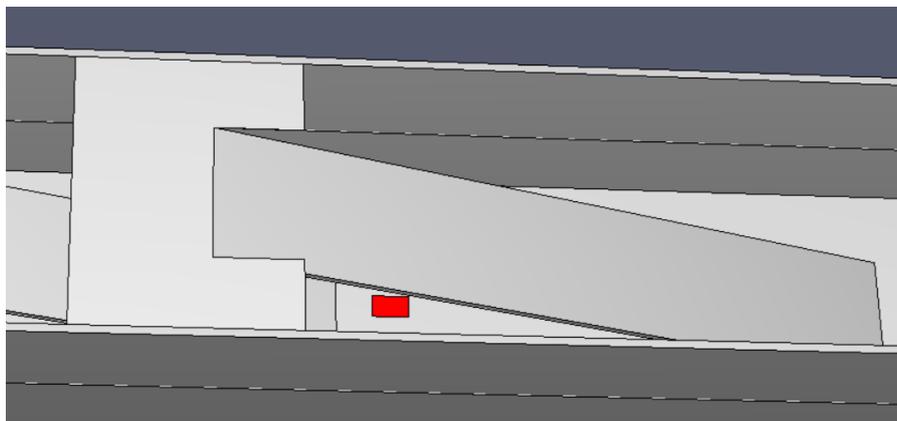


Figura 5.4 Posizione della superficie di fiamma

Tramite questo zoom dall'alto possiamo osservare il punto di ingresso del combustibile, in rosso, collocato al di sotto della scala destra.

5.1.1.6. Parametri della simulazione: definizioni delle condizioni iniziali e durata simulazione:

In Pyrosim, i parametri della simulazione vengono modificati e imposti nella sezione "*Simulation Parameters*".

Alcuni parametri sono ad esempio: "end time", "Ambient Temperature" e "Ambient Pressure".

Si è definita la fine della simulazione pari a 500s ed impostata la temperatura dell'ambiente computazionale per $t=0s$ pari a 26,85 °C (ovvero 300 K).

I restanti coefficienti sono tenuti invariati rispetto la condizione di default.

5.1.1.7. Introduzione dei *devices* e delle *slices*:

Nello studio di tesi condotto sono state utilizzate alcune abilità del software FDS per studiare in seguito i risultati della simulazione: i *devices* e le *slices*. I *devices* sono dei rilevatori di temperatura puntiforme di tipo *gas-phase device*. Le *slices* sono dei piani passanti per il dominio computazionale in grado di annotare le temperature e le velocità fissata una coordinata x, y o z.

Al contrario di FireFoam il software FDS, per analizzare i risultati tramite *devices* e *slices*, necessita l'inserimento di tali strumenti all'interno del dominio computazionale prima che la simulazione venga lanciata. Ciò è un punto a favore di FireFoam: esso permette di manipolare i risultati in maniera più elastica quando la simulazione è già terminata.

Per confrontare i risultati dei due programmi, in FDS sono stati inseriti nella fase di pre-processing, gli strumenti prima descritti nelle coordinate.

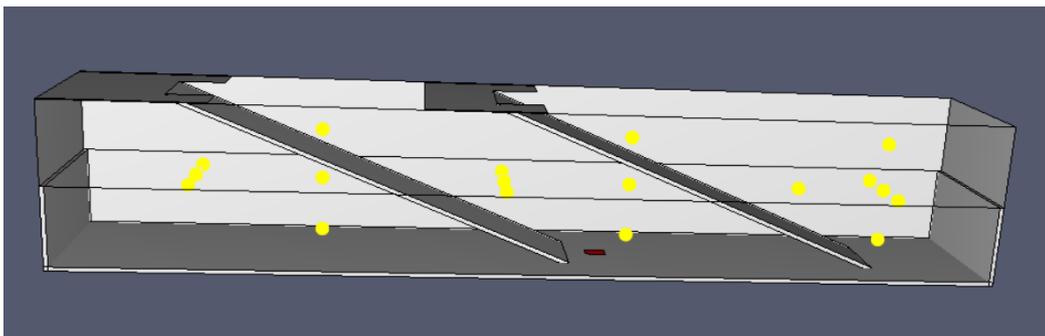


Figura 5.5 Devices in FDS

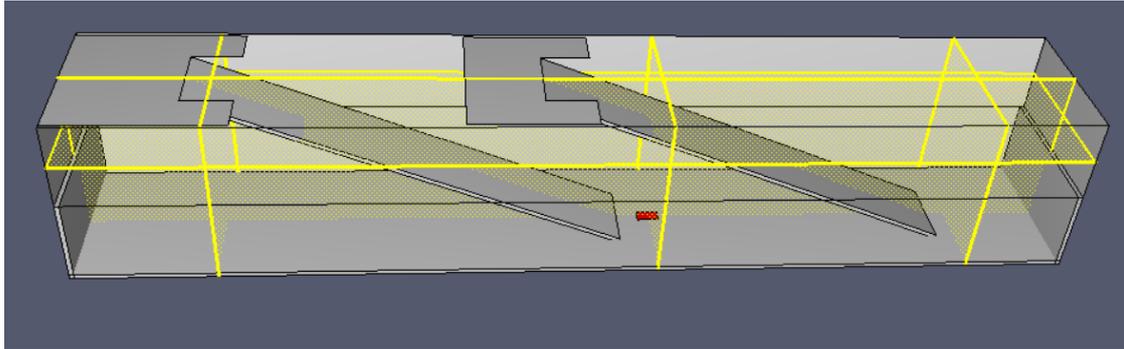


Figura 5.6 Slices in FDS

5.1.1. Post-processing utilizzando il programma: smokeview

La fase del post-processing di FDS è stata svolta con il programma Smokeview, tramite il quale si visualizzano i profili di temperatura e di velocità lungo le slices. Inoltre è stato possibile osservare la corretta propagazione dei fumi generati dalla modellazione con FDS.

I risultati ricavati dai devices vengono tabulati da FDS all'interno di un file chiamato "nomeprogetto_devc.csv", facilmente maneggiabile utilizzando il software Excel contenuto all'interno del pacchetto Microsoft Office.

Con il comando "Plot time History Results" contenuto all'interno del menu "FDS", nella schermata di lavoro di Pyrosim, è possibile visualizzare direttamente l'andamento della temperatura registrata dai devices nel tempo. Questo procedimento non è stato invece adoperato per elaborare il confronto tra FDS e Firefoam: si è preferito utilizzare Matlab per la creazione di plot contenenti entrambi gli andamenti.

CAPITOLO 6: MODELLAZIONE DEL PROBLEMA CON IL SOFTWARE: FireFoam

6.1 Procedura del test

Il test svolto con il programma FDS prevede due macro fasi:

- ❖ Pre-processing: fase precedente al lancio della simulazione;
- ❖ Post-processing: fase in cui si elaborano i risultati.

Per l'esecuzione del test è inserita nuovamente l'immagine della geometria semplificata in modo da poter individuare più facilmente le condizioni al contorno successivamente espresse.

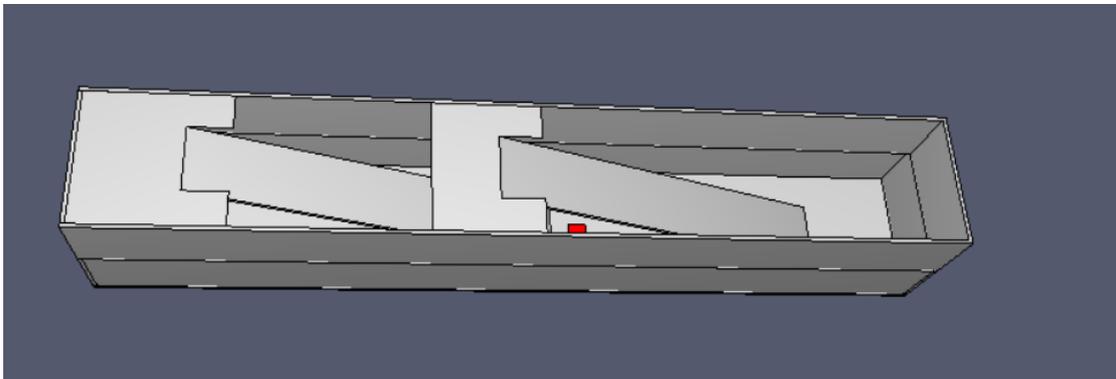


Figura 6.1 Richiamo geometria semplificata

6.1.1 Pre-processing:

Questa fase del test in FireFoam viene svolta compilando alcuni file all'interno di tre directory fondamentali: cartella "0", "system" e "constant".

FireFoam è un solver contenuto all'interno di OpenFoam e quindi utilizza la stessa sintassi e lo stesso modus operandi di quest'ultimo. La presenza o l'assenza di alcuni file all'interno delle varie directory dipende oltre alla necessità di simulare alcuni parametri di studio, anche dal tipo di versione del programma installato.

Di seguito si andranno ad analizzare e spiegare più nel dettaglio le tre cartelle principali e i file al loro interno nel ruolo e nelle modifiche apportate.

6.1.1.1 Cartella "0":

La directory "0" contiene i file relativi ai parametri modellizzabili. All'interno di ogni file è possibile impostare le condizioni a contorno relativa a ciascuna grandezza specifica.

In FireFoam le Boundary Conditions vengono applicati alle "patches", raggruppamenti di superfici esterne accumulate dalle stesse proprietà termodinamiche. Le "patches" utilizzate nella simulazione sono:

- outlet: superficie aperta, simile alla condizione "open" di FDS;
- Wall_station: muri esterni della stazione;
- Inlet: superficie di ingresso del combustibile.

Di seguito in tabella sono riportate le BC applicate (Tabella 6.1):

FIREFOAM		
Nome	Superfici	Boundary conditions sulla Velocità
Wall_station	sud	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	est	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	nord	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	pavimento	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	ovest	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
outlet	soffitto	type inletOutlet; inletValue uniform (0 0 0); value uniform (0 0 0);
inlet	fiamma	type fixedValue; value uniform (0 0 0.0347);

FIREFOAM		
Nome	Superfici	Boundary condition sulla Temperatura
Wall_station	sud	ZeroGradient
	est	ZeroGradient
	nord	ZeroGradient
	pavimento	ZeroGradient
	ovest	ZeroGradient
outlet	soffitto	type inletOutlet; inletValue uniform 300; value uniform 300;
inlet	fiamma	type fixedValue; value uniform 300;

L'orientazione scelta come sistema di riferimento per interpretare la tabella è quello mostrato nella figura 6.1. .

All'interno della directory "0" troviamo un'ulteriore cartella (directory "include") aggiunta per associare le proprietà termodinamiche alle superfici interne, che in OF vengono simulate tramite "baffles".

I dati riferiti alle BC dei baffles sono contenuti nel file "WallBafflesPatches" all'interno della cartella "include". (Tabella 6.2):

		FIREFOAM	
		Boundary condition	
		Velocità	Temperatura
baffle1DWall_master	muro interno	type	fixedValue;
		value	uniform (0 0 0);
baffle1DWall_slave	muro interno	type	fixedValue;
		value	uniform (0 0 0);
			ZeroGradient
			ZeroGradient

Le proprietà prima elencate sono adesso descritte per completezza (Tabella 6.3):

Properties	SI unit	Comments
α_{sgs}	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	Mass density times the Sub-Grid Scale diffusivity
I	$kg \cdot s^{-3}$	Radiation
K	$m^2 \cdot s^{-2}$	Kinetic energy
μ_{sgs}	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$	Sub-Grid Scale dynamic viscosity
P	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	Pressure
P_{rgh}	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	$P_{rgh} = P - \rho gh$
T	K	Temperature
U	$m \cdot s^{-1}$	Velocity
Y	-	Mass fraction

6.1.1.2. Cartella “constant”:

All'interno della directory “constant” sono presenti tutti i file relativi alle varie costanti durante la simulazione, come per esempio il file “g” che indica l’accelerazione gravitazionale. Tutti i file contenuti in questa cartella sono stati presi dal tutorial “3Dsmallpoolfire” presente nella cartella “tutorial” di OpenFoam 2.2.x. I file di maggior interesse sono:

- “combustionProperties”: dove si introduce il modello di combustione applicato, ovvero il modello a cinetica infinitamente veloce (“infinitelyFastChemistry”).
- “turbulenceProperties”: dove si sceglie il tipo di simulazione da condurre, “LESmodel”;
- “LESProperties”: dove si specifica il modello LES della turbolenza, “oneEqEddy”;
- “radiationProperties”: in cui è esplicitato il modello radiativo, “fvDOM”.

All'interno della directory “constant” risiede un’ulteriore cartella, “polyMesh”. In quest’ultima è presente un file che, in seguito alla sua stesura, permette la generazione della mesh quando lanciato da linea di comando del “terminale”.

Il file in questione è “blockMeshDict”, documento di complessa scrittura. Al fine di facilitare questa procedura si è utilizzato un software di grafica 3D, “Blender”. Grazie a questo programma è possibile costruire la geometria dell’intera stazione partendo da un semplice cubo elementare e modificandolo man mano. Le innumerevoli modifiche tramite estrusioni, spostamenti e tagli hanno condotto al dominio desiderato come mostrato nella figura sottostante.

La rappresentazione seguente presenta la geometria completa enunciata precedentemente.

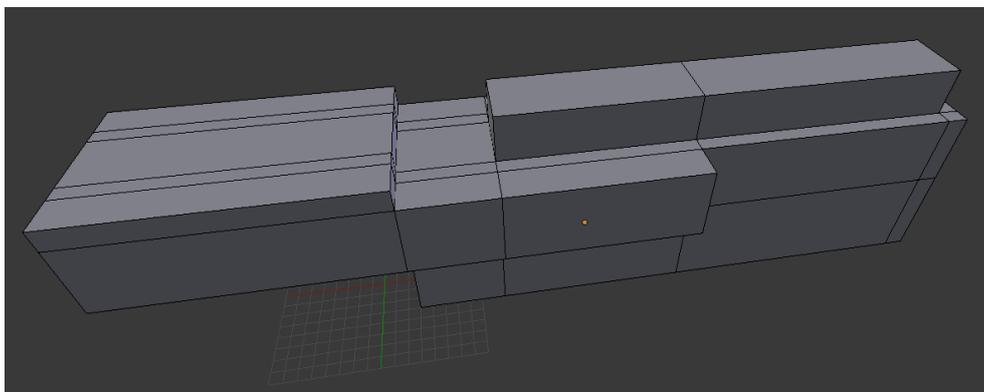


Figura 6.1 Geometria stazione completa in Blender

Lo stesso lavoro è stato poi condotto per la geometria semplificata ottenendo:

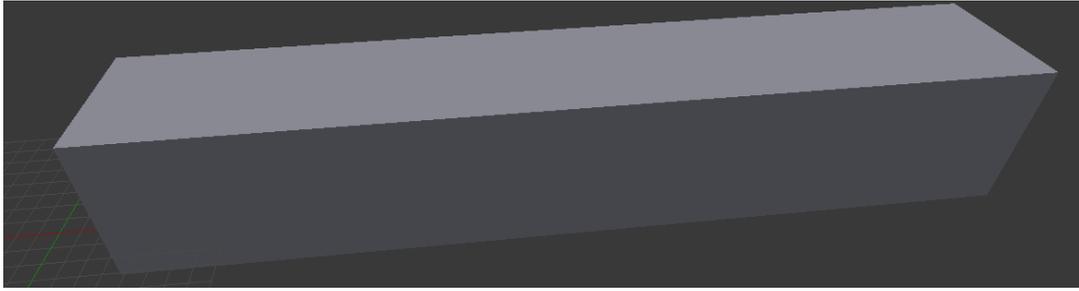


Figura 6.2 Geometria semplificata Blender

Grazie ad una implementazione del programma, *“swiftBlock”*, che permette di generare il file *“BlockMeshDict”* impiegabile per qualsiasi solver in OpenFoam. Si è scelta la dimensione caratteristica della mesh pari a 0.2 m. Blender permette di poter visualizzare in modalità *“preview”* i risultati derivabili dalla compilazione del *“blockMeshDict”*.

Di seguito, le figure dei due domini, completo e semplificato, della mesh-size selezionata.

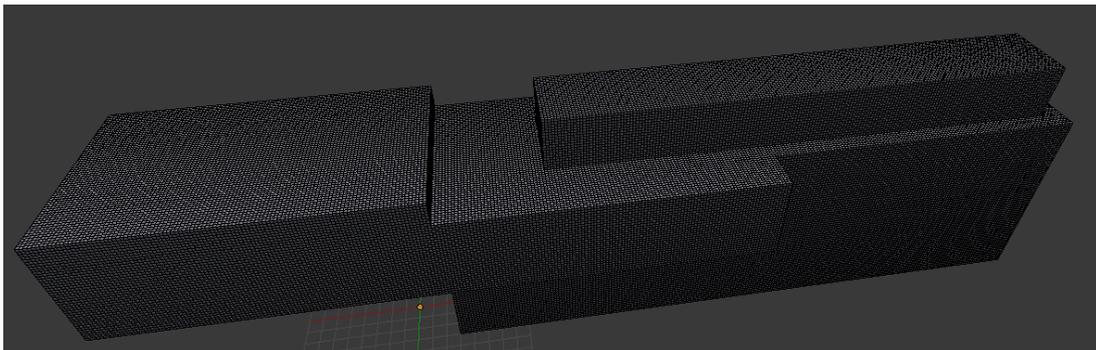


Figura 6.3 Visualizzazione mesh “preview” in Blender

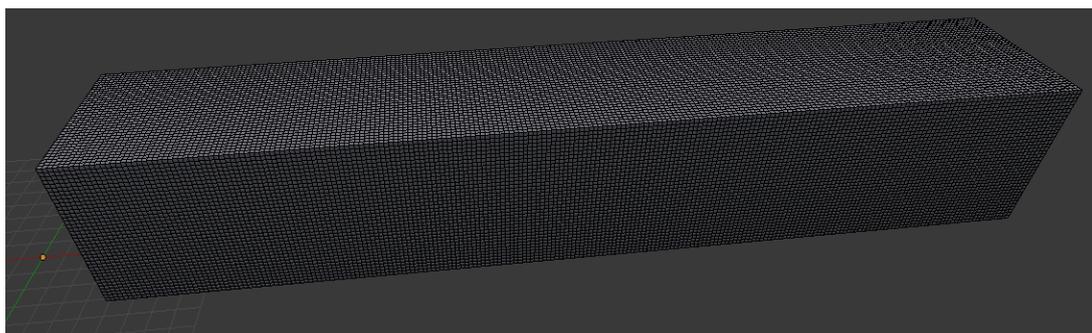


Figura 6.4 Visualizzazione mesh “previiew” semplificata in Blender

Tramite il comando *“write”* si è scritto, infine, il file *“blockMeshDict”*. All’interno di questo documento si assegnano le superfici esterne alle rispettive *“patches”*. Questa procedura è stata eseguita creando due patches: *outlet* e *Wall_station*. Sulle patches verranno poi applicate le condizioni al contorno.

6.1.1.3. Cartella “system”:

All'interno di questa directory sono ubicati file molto importanti per la modellazione del caso studio affrontato. I file elencati di seguito sono stati modificati in modo opportuno:

- “*controlDict*”: utilizzato per impostare l'inizio (0s) e la fine della simulazione (500s). E' stato aggiunto l'intervallo di tempo in cui i risultati devono essere stampati (ogni 5 s) e in che tipo di formato scritti (ASCII);
- “*topoSetDictBurner*”: crea la superficie di fiamma all'interno della geometria;
- “*topoSetDictCompartment*”: utilizzato, inizialmente, per generare tutte le superfici interne della stazione e successivamente per assegnarle ad un'unica zona chiamata “*baffleFaces*”.
- “*createPatchDict*”: converte la superficie di fiamma precedentemente creata in una patch chiamata “*inlet*”, a cui verranno assegnate le condizioni al contorno per l'ingresso del combustibile (nella directory “0”).
- “*createBafflesDict*”: serve per formare i baffles, corrispondenti a tutte le pareti interne della stazione e applicarvi le Boundary Conditions con la lettura in input del file “*WallBafflesPatches*” nella directory “0”.
- “*decomposeParDict*”: La mesh viene decomposta utilizzando l'utilità *decomposePar*. La geometria è suddivisa quindi in pezzi e assegnati a processori separati. Si garantisce dunque una soluzione economica. Questo processo di scissione avviene assegnando dei parametri specificati nella libreria “*decomposeParDict*”. [34]
- I restanti file non sono stati modificati e mantenuti costanti rispetto al tutorial preso in esempio (“*SmallPoolFire3D*”).

6.1.1.4 Avvio simulazione:

La simulazione per essere eseguita ha bisogno di alcuni step intermedi di compilazione che possono essere descritti in quattro fasi:

- Prima fase: con il comando “*blockMesh*” si legge il file *blockMeshDict* in input e si crea la mesh desiderata, visualizzata di seguito con Paraview utilizzato successivamente anche per il post-processing di FireFoam;

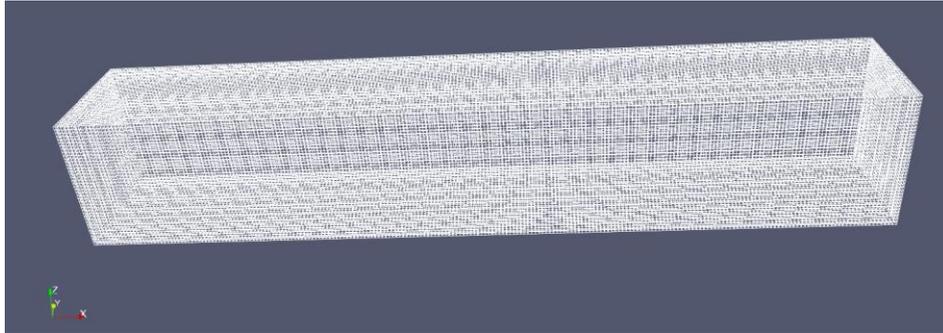


Figura 6.5 Creazione mesh semplificata con Paraview

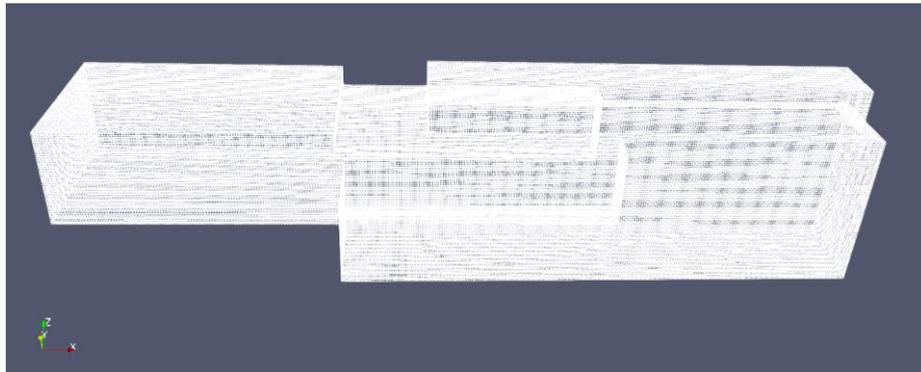


Figura 6.6 Creazione mesh stazione intera con Paraview

- Seconda fase: attraverso il comando `"topoSet -dict system/topoSetDictBurner"` si compila il file `"topoSetDictBurner"` generando la superficie di fiamma.

In seguito lanciando `"topoSet -dict system/topoSetDictCompartment"` da linea di comando si legge il file `"topoSetDictCompartment"` che genera la zona delle superfici chiamata `"baffleFaces"`;

- Terza fase: con i comandi `"createPatch -overwrite"` e `"createBaffles -overwrite"` si creeranno la patch del combustibile e i baffles e si sovrascriveranno i file nella cartella `"0"` che contengono le informazioni relative alle condizioni al contorno. Una volta completata questa fase è possibile visualizzare, sempre utilizzando Paraview, i risultati fino ad ora ottenuti, prima di poter lanciare la simulazione.

Per osservare più in profondità la geometria completa sono state oscurate le pareti esterne del dominio in modo da poter mettere in risalto tutte le superfici interne create e la patch del combustibile. Si può notare quest'ultima, in piccolo, al di sotto della scala destra.

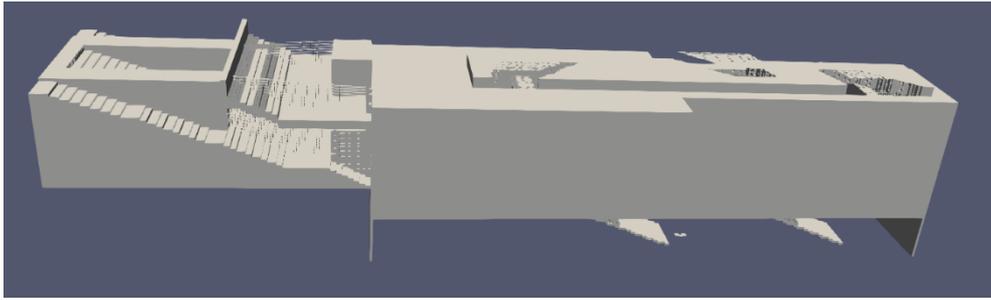


Figura 6.7 Creazione Baffles geometria intera

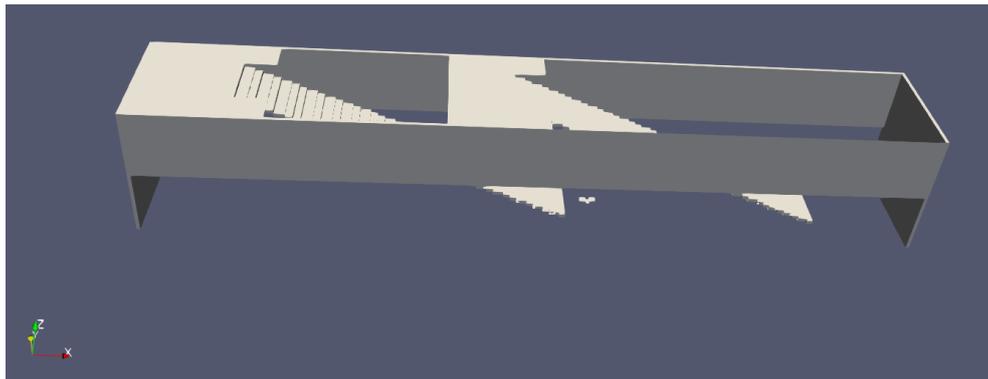


Figura 6.8 Creazione Baffles geometria semplificata

- Quarta fase: la decomposizione della geometria è svolta lanciando il comando *“decomposepar -force”*.
- Quinta fase: all’interno della quinta fase è possibile finalmente lanciare *“FireFoam”* che leggerà tutti i restanti file in input, generando in output quelli da analizzare nella fase del post-processing.

6.1.2. Post-processing con il software Paraview:

Il post-processing di FireFoam è stato svolto utilizzando il programma Paraview, molto pratico per la manipolazione dei dati nella modellazione CFD. Esso permette di svolgere molte funzioni, in particolare per il lavoro di tesi condotto, si utilizzano le *“slices”* e lo *“spreadsheetview”*. Per quanto riguarda le prime, i risultati si visualizzano nella stessa maniera di *“smokeview”* per FDS.

Tramite *spreadsheetview*, invece, si possono osservare i risultati delle grandezze termodinamiche studiate tabulati per ogni punto della mesh. Affinché il confronto dei profili risolti con FireFoam e FDS sia coerente, solo alcuni punti sono stati selezionati dalla tabella di *spreadsheetview*. In

conclusione, quelli selezionati in FireFoam sono quelli corrispondenti alle coordinate dei devices inserite in Pyrosim durante la fase di pre-processing di FDS.

CAPITOLO 7: CONFRONTO E RISULTATI

7.1. Aspettative

Il progetto di tesi svolto mira a osservare e confrontare i profili di temperatura e velocità tra i software FireFoam e FDS. Le aspettative che si vogliono convalidare attraverso lo studio svolto sono:

- ottenere degli andamenti di temperatura e velocità il più possibile simili;
- verificare che, a parità di tutte le condizioni sia di combustione che di geometria, FireFoam necessiti effettivamente un tempo computazionale maggiore;
- verificare l'elevata complessità della programmazione con FireFoam rispetto a quella più facilitata di FDS.

Tramite l'elaborazione e manipolazione dei dati è possibile valutare, confutare e suggerire, dove possibile, eventuali percorsi di studio più attendibili.

7.2. Risultati derivanti dai modelli

L'elaborazione dei risultati ricavati dai due diversi modelli fluidodinamici di simulazione di incendio rappresenta il punto cardine di questo lavoro di tesi. Data la particolare importanza di tale fase di studio si sono utilizzati vari software per ottenere un riscontro il più efficiente possibile. Oltre ai programmi impiegati per la fase di post-processing di FDS e FireFoam, si è adoperato Matlab ed Excel. Questi ultimi programmi hanno avuto un ruolo fondamentale soprattutto per il confronto puntiforme delle grandezze termodinamiche nel tempo.

Per ottenere una spiegazione più proficua e dettagliata dei risultati ottenuti è necessario richiamare, all'interno di questo capitolo, alcuni concetti già descritti precedentemente. Il confronto tra i due programmi è stato condotto sulla geometria semplificata per i problemi computazionali esplicitati nel capitolo 4.2. .

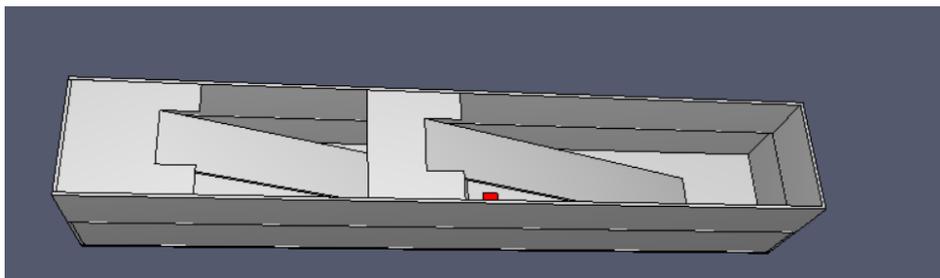


Figura 7.1 Geometria semplificata: richiamo

La riduzione della geometria ha determinato, oltre alla riduzione del tempo computazionale, la variazione delle condizioni al contorno. Osservando la figura sottostante si notano le Boundary Conditions effettivamente applicate durante la simulazione: in verdino si identifica la parete aperta, in grigio le restanti superfici adiabatiche.

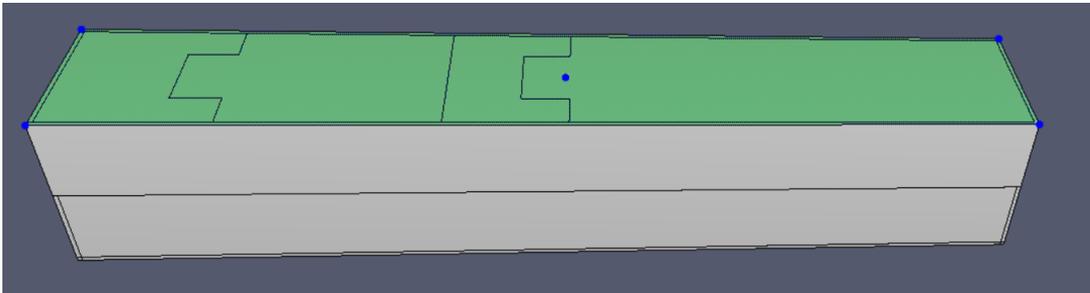


Figura 7.2 Boundary Conditions: grigio e verde

Dopo aver richiamato questi concetti fondamentali per il proseguo della trattazione si riassumono gli studi condotti sui risultati dalle simulazioni:

- Studio dei profili di temperatura puntiforme registrata dai devices lungo l'arco dell'intera simulazione;
- Studio dei profili di temperatura 1D nell'intera simulazione;
- Visualizzazione della temperatura in due dimensioni attraverso le slices;
- Confronto dei profili della velocità totale in due dimensioni utilizzando le slices.

7.2.1. Studio dei profili di temperatura puntiforme

La griglia di calcolo studiata contiene 331520 cubetti elementari, ognuno di esso costituito da 8 vertici; le proprietà termodinamiche nei due software studiati vengono calcolate al centro di ogni cubo. Nello studio svolto solo 18 punti saranno presi in considerazione per ottenere un confronto termodinamico tra i due programmi corrispondenti alla posizione dei devices. Le posizioni di questi strumenti all'interno del dominio computazionale si osserva tramite la figura seguente. Si è nascosta (comando "hide") una delle quattro pareti laterali per permettere una visualizzazione migliore dei detector.

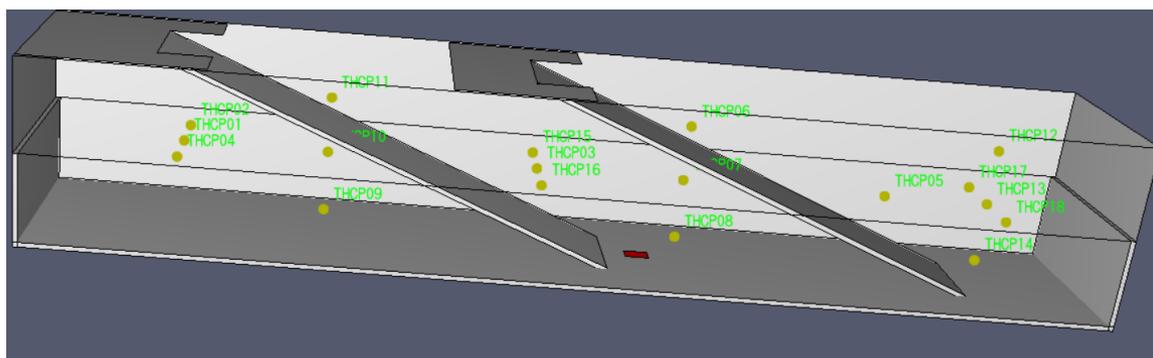


Figura 7.3 Posizione devices in 3D

Vista in pianta nella figura seguente:



Figura 7.4 Vista dall'alto dei devices

La posizione dei rivelatori all'interno della stanza è stata pensata in modo da coprire il maggior numero di aree della mesh possibili. Per semplificare la trattazione seguente, la geometria semplificata è suddivisa nelle seguenti tre zone:

- "left": zona a sinistra della prima rampa;
- "central": zona intermedia tra le due rampe;
- "right": zona a destra della seconda rampa.

I detectors analizzati sono localizzati nelle seguenti posizioni (Tabella 7.1):

Nome devices	Coordinata X[m]	Coordinata Y[m]	Coordinata Z [m]
THCP01	9.0	2.0	2.0
THCP02	9.0	4.0	2.0
THCP03	23.8	2.0	2.0
THCP04	9.0	0.0	2.0
THCP05	38.6	2.0	2.0
THCP06	30.0	2.0	4.4
THCP07	30.0	2.0	2.0
THCP08	30.0	2.0	-0.6

THCP09	15.0	2.0	-0.6
THCP10	15.0	2.0	2.0
THCP11	15.0	2.0	4.4
THCP12	43.0	2.0	4.4
THCP13	43.0	2.0	2.0
THCP14	43.0	2.0	-0.6
THCP15	23.8	4.0	2.0
THCP16	23.8	0.0	2.0
THCP17	43.0	4.0	2.0
THCP16	43.0	0.0	2.0

Si visualizza con un grafico la temperatura in gradi Celsius registrata nella stanza in quei punti specifici durante l'intera simulazione. L'elaborazione condotta utilizzando sia FDS che FireFoam dura complessivamente 500s. Di seguito verranno analizzate le risposte dei devices inseriti nei due programmi raggruppati per profili simili.

I primi detectors analizzati si localizzano all'estremità delle due rampe all'interno delle zone "left" e "right" come mostrato in figura:

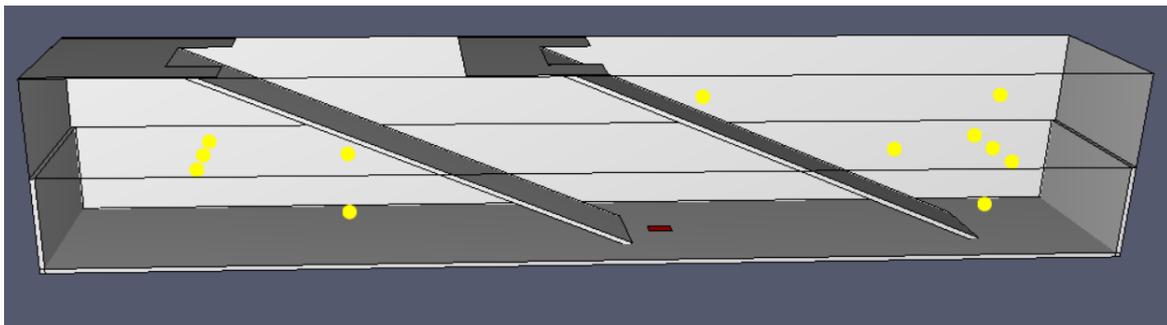


Figura 7.5 Posizione devices zona "right" e "left" 3D

Successivamente lo studio viene condotto nella zona centrale, detta "central", all'interno della quale la fiamma è situata.

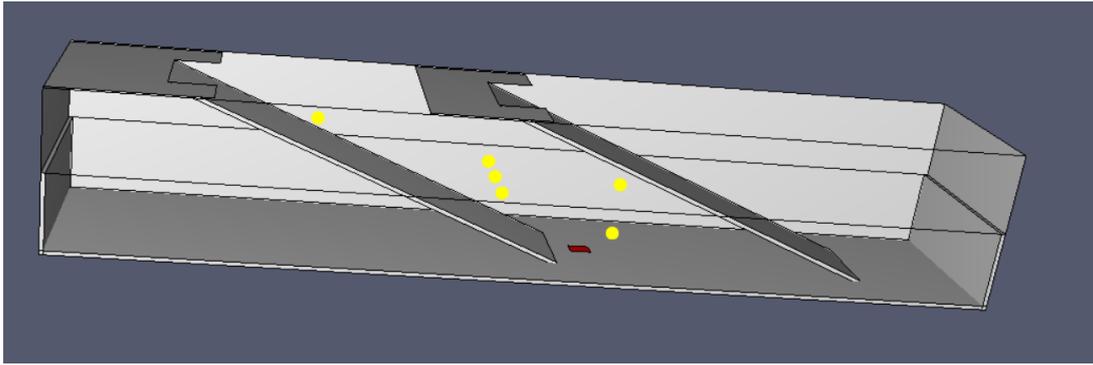


Figura 7.6 Posizione devices zona "central" 3D

7.2.1.1. Andamento delle temperature: zona "left"

Nell'area "left" troviamo cinque detectors: THCP01, THCP02, THCP04, THCP10 e THCP09 visualizzabili tramite il seguente zoom.

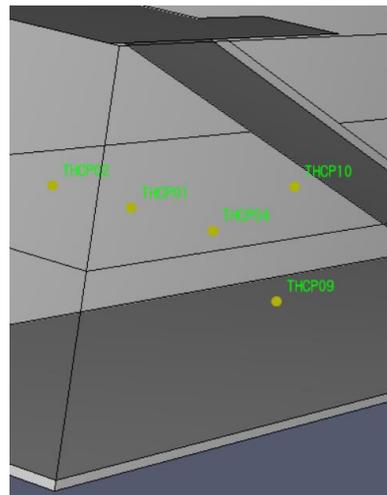


Figura 7.7 Zoom devices zona "left"

Nei seguenti grafici è possibile visualizzare i profili di temperatura letti dai devices in questione per entrambi i programmi studiati.

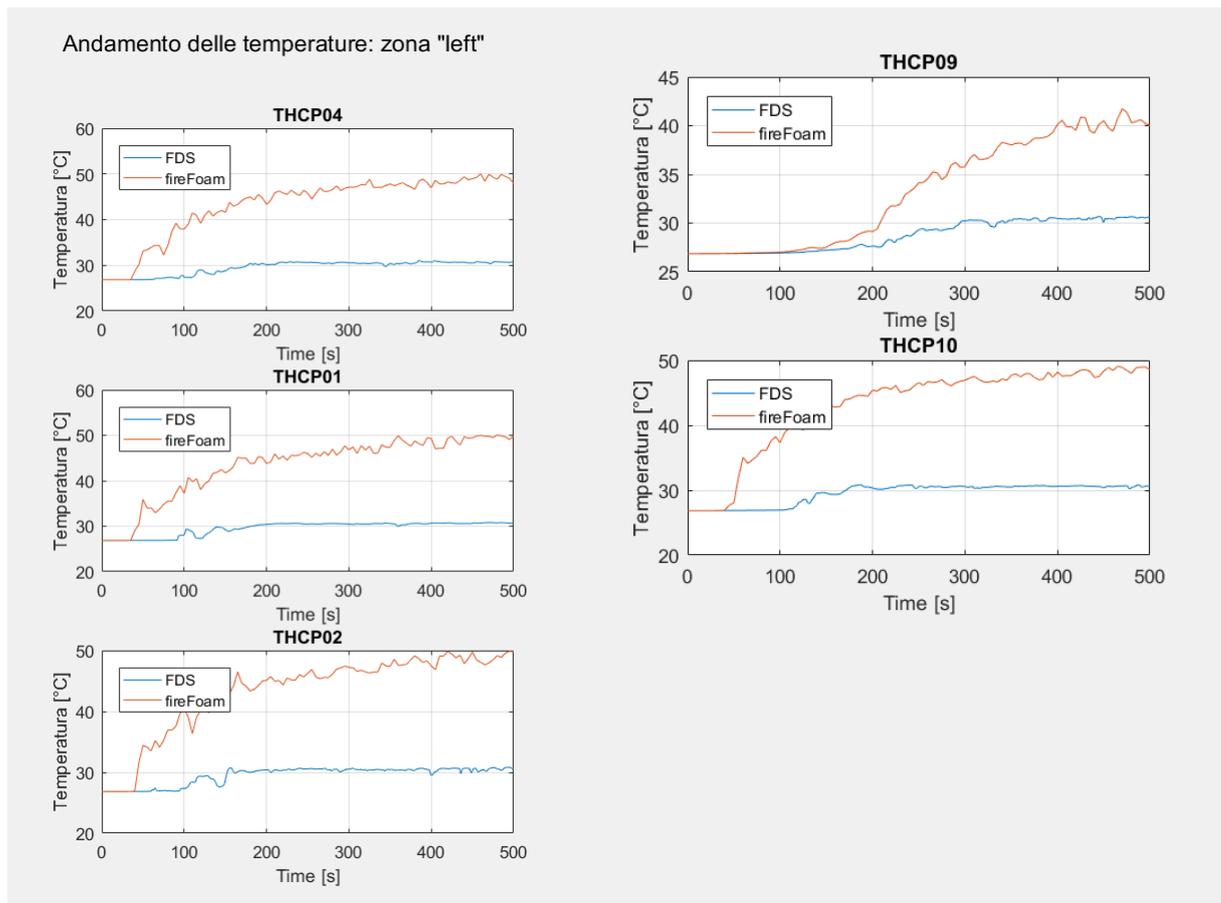


Figura 7.8 Andamento Temperature zona "left"

Dai grafici precedenti si nota che in tutti i cinque devices il comportamento è pressoché simile, ovvero: la temperatura registrata in FireFoam è sempre maggiore di quella in FDS con una differenza di una 20ina di gradi Celsius. Inoltre in tutte le immagini si raggiunge la condizione di stazionarietà a circa 200s ad eccezione del detector THCP09 ottenuta a circa 400s. Dati i risultati nella zona "left" la simulazione potrebbe essere condotta solo fino a metà del tempo prestabilito in modo da ridurre il costo computazionale.

In tutti i devices la variazione di temperatura, tra inizio e fine simulazione, registrata con FDS risulta molto piccola, ciò implica un andamento costante già dai primi istanti di tempo.

Una seconda considerazione consta del fatto che le due curve, in ogni detectors, coincidano fino a 30 – 50 secondi a partire dall'istante iniziale ($t=0$): in entrambi i programmi i fumi simulati non riescono a raggiungere la zona in oggetto. Dunque per i primi 50s la temperatura associata rimane pari a quella iniziale.

Il mancato raggiungimento dei gas combustibili nei detectors è dovuto in parte alla lontananza della sorgente, ed in secondo luogo alla fuoriuscita dei fumi dal volume di controllo attraverso la

parete aperta (“soffitto aperto”). La percezione sensibile di una variazione di temperatura in FDS si verifica solo dopo 100s di simulazione: FDS simula più velocemente la fuga di gas dalla zona centrale.

7.2.1.2. Andamento delle temperature: zona “right”

Nella zona “right” si analizzano sette devices: THCP06, THCP05, THCP14, THCP13, THCP17, THCP18 e THCP12 visualizzabili tramite lo zoom sottostante.

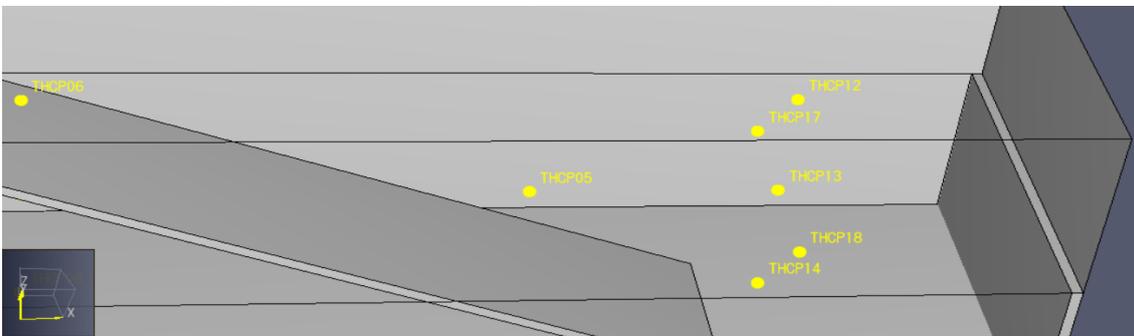


Figura 7.9 Posizione devices zona “right” 3D

Nella pagina seguente si mostrano i profili di temperatura ottenuti per entrambi i programmi studiati.

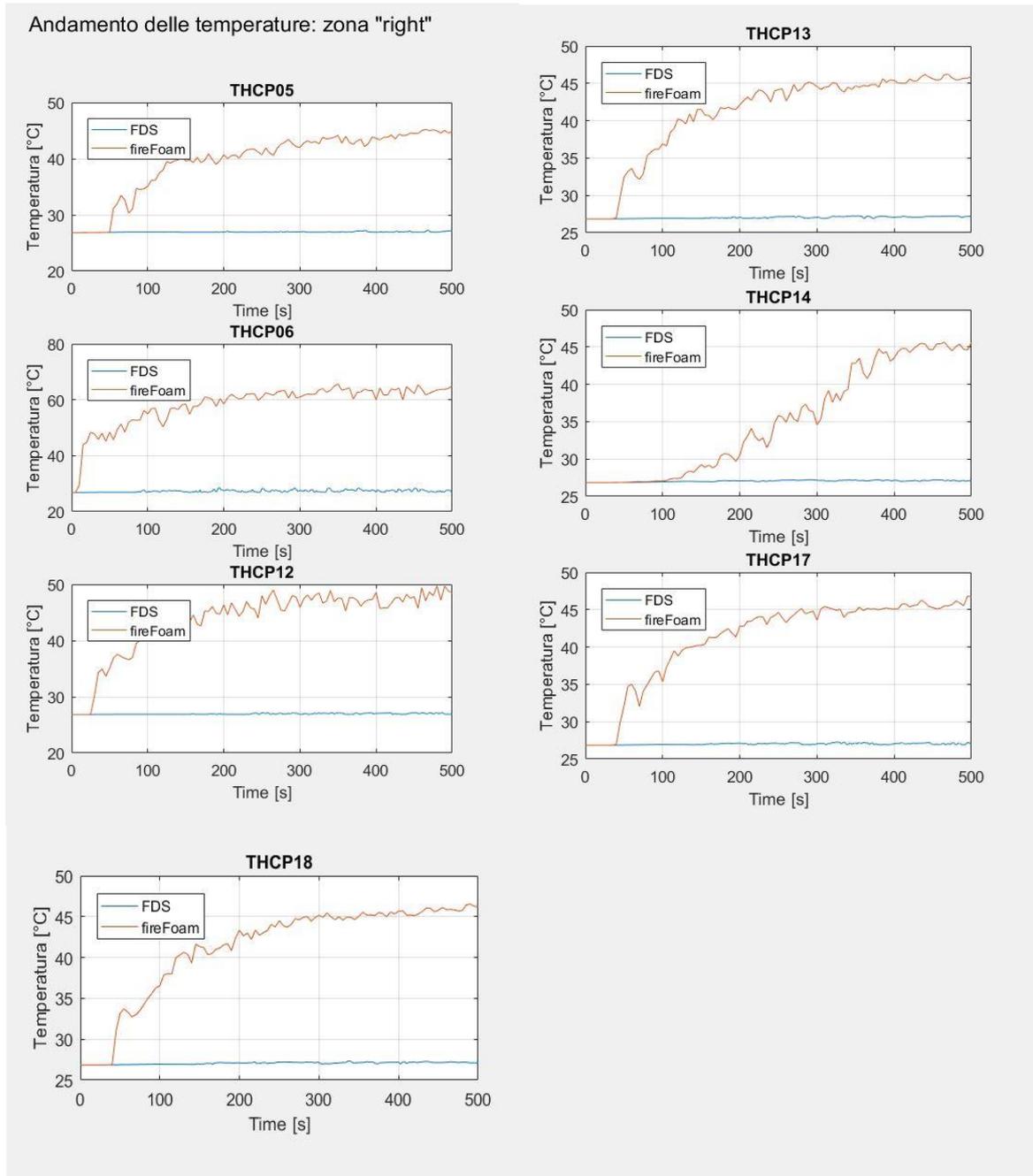


Figura 7.10 Andamento Temperature zona "right"

Dai grafici precedenti si può notare come in tutti i detectors gli andamenti delle curve risultino molto simili: la temperatura in FDS è pressoché pari a quella iniziale della stazione (26.85 °C), mentre quella registrata in FireFoam, dopo un iniziale incremento di temperatura, tende in modo asintotico a 45 °C. L'unica eccezione a questa descrizione è nel device THCP06 dove la temperatura in FireFoam è leggermente superiore raggiungendo i 60 °C: esso è il più vicino in assoluto alla fiamma e prossimo alla quota x della superficie dell'incendio.

Il comportamento con FDS è possibile spiegarlo prendendo in considerazione delle immagini scattate, all'interno dell'area di lavoro di Smokeview, a diversi istanti temporali.

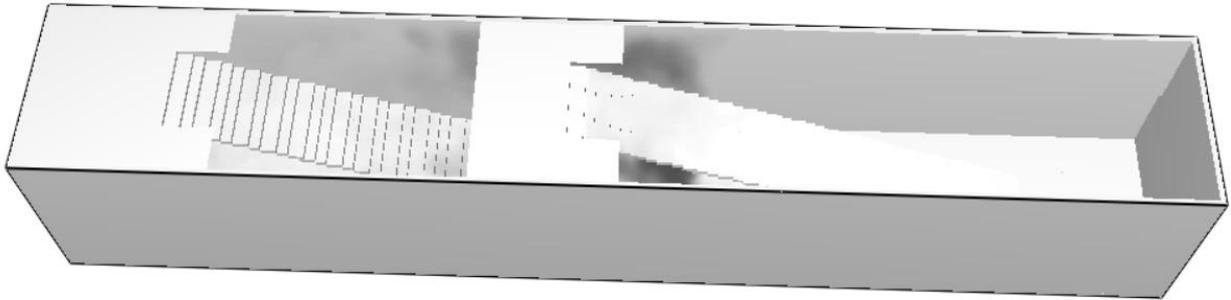


Figura 7.11 Visualizzazione dei fumi con Smokeview a $t=100s$

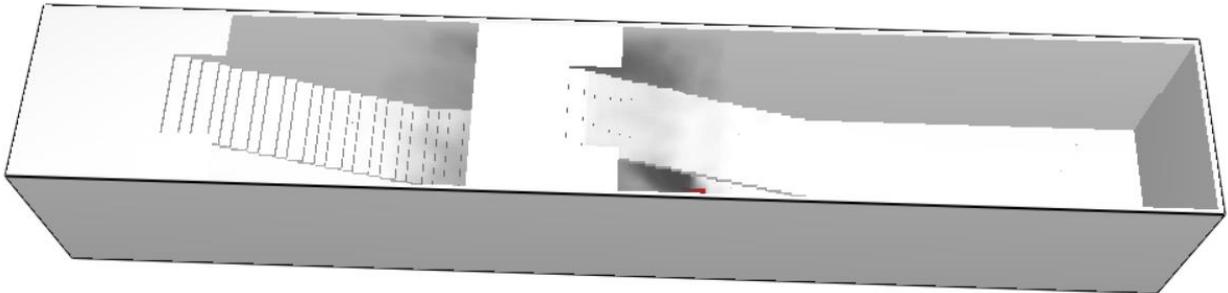


Figura 7.12 Visualizzazione dei fumi con Smokeview a $t=300s$

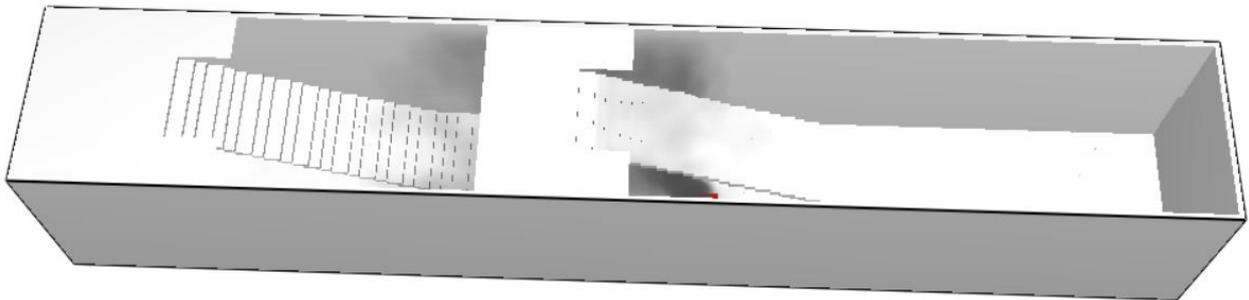


Figura 7.13 Visualizzazione dei fumi con Smokeview a $t=500s$

Un vantaggio dell'uso di Smokeview è quello di visualizzare l'andamento temporale della fuliggine nella geometria 3D.

Dagli istanti temporali estrapolati si osserva che i fumi, una volta incontrata la rampa destra, fungente da ostruzione, tendono a salire nella zona superiore, più fredda. In FDS i fumi fuoriescono dal volume di controllo più velocemente rispetto alla simulazione eseguita con FireFoam. L'analisi con FDS rispecchia più fedelmente la diffusione reale del fumo: i prodotti della combustione non riescono a raggiungere le zone più a destra della stanza poiché facilitati dalla rapida fuoriuscita attraverso la parete aperta sovrastante.

Rispetto ai profili termici ottenuti nella zona "left", quelli a destra della stanza risultano tutti inferiori di circa 5 °C. Nella sezione di sinistra il soffitto non è completamente aperto ma presenta una zona di copertura ampia corrispondente a parte del pavimento dell'atrio della stazione. Questa ostruzione causa un maggiore accumulo dei fumi, quindi un incremento di temperatura.

7.2.1.3. Andamento delle temperature: zona "central"

Nella zona "central" si analizzano gli ultimi sei devices: THCP03, THCP15, THCP16, THCP07, THCP08, THCP11 visualizzabili tramite lo zoom sottostante.

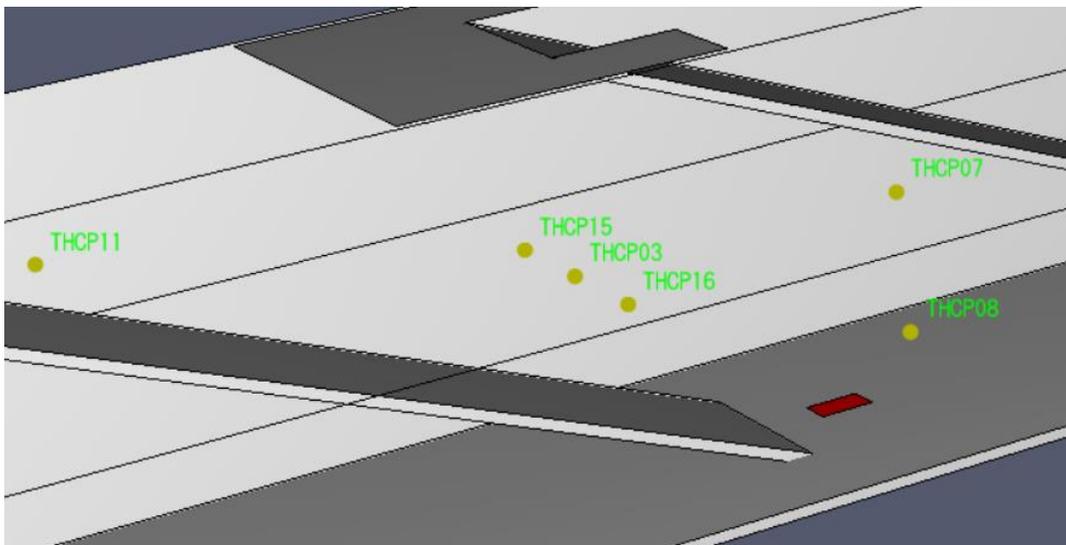


Figura 7.14 Posizione devices zona "central" 3D

Nei seguenti grafici è possibile visualizzare i profili di temperatura letti dai devices in questione per entrambi i programmi studiati.

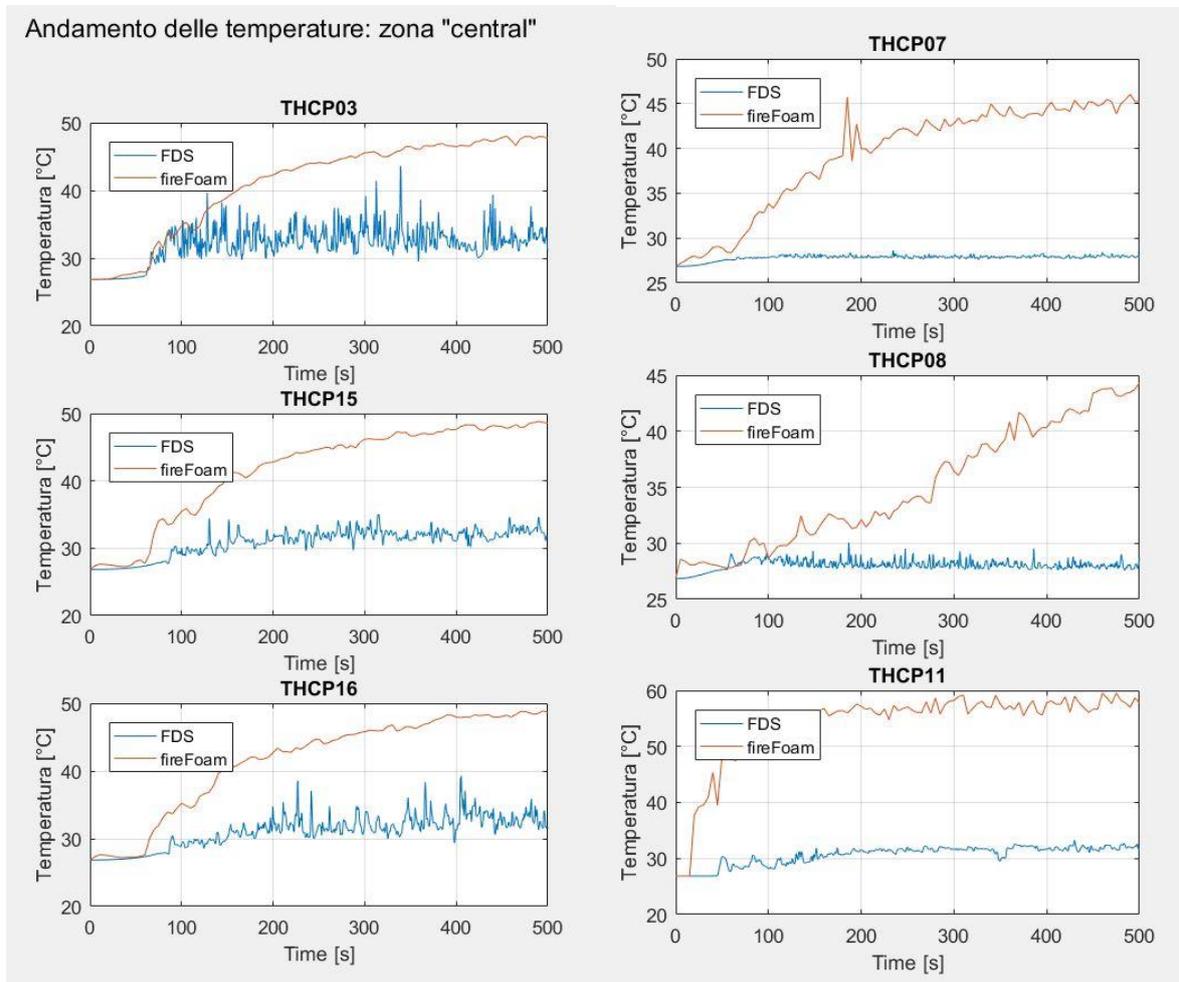


Figura 7.15 Andamento Temperature zona "central"

I grafici nella zona centrale rivelano un comportamento differente rispetto alle zone estreme della geometria. All'interno di questo raggruppamento notiamo che, in base alla posizione nella zona centrale, i profili variano:

- i detectors THCP07 e THCP08 posti ad una quota x maggiore rispetto alla sorgente di fiamma registrano in FireFoam un incremento di temperatura più lento rispetto agli altri rilevatori. In FDS, invece, il profilo è pressoché costante e simile agli andamenti registrati nella zona "right".
- i detectors THCP03, THCP15 e THCP16 sono localizzati nella zona di passaggio dei fumi; ciò determina un aumento di temperatura più rapido rispetto al punto descritto prima. In FireFoam i tre andamenti risultano tra di loro molto simili con una temperatura massima di circa 47 °C a fine simulazione. Per quanto riguarda FDS, invece, si può osservare come

l'incertezza della misurazione sia molto elevata causando un andamento molto frastagliato della curva. Tale fenomeno è accentuato nel device THCP03 posizionato ad una coordinata y intermedia tra i tre misuratori e inoltre prossima a quella della fiamma. La variazione tra la temperatura minima e massima in questo device è di quasi 13 gradi disegnando un profilo molto incerto: l'oscillazione del profilo termico di FDS, intorno ai 100 secondi, interseca l'andamento con FireFoam fino a superarlo.

- L'ultimo device analizzato, THCP11, si trova invece al di sopra della rampa sinistra a ridosso della zona "left". Infatti questo grafico assomiglia ai plot della zona di sinistra soprattutto per il profilo di FDS. L'andamento della temperatura in FireFoam risulta invece leggermente maggiore rispetto a quelli nella zona "left": la portata circolante di fumi, al di sopra della scala, è più grande rispetto a quella passante ai suoi piedi.

7.2.2. Studio del profilo di temperatura 1D

Lo studio monodimensionale della temperatura è stata condotta in tutte e tre le regioni della geometria semplificata. Per effettuare l'analisi 1D è necessario scegliere e fissare due istanti di tempo, quali $t=100$ s e $t=400$ s per coerenza con gli studi fatti in precedenza. Lo studio è condotto plottando le temperature registrate nei devices adiacenti lungo le tre direzioni principali x, y e z. Si sono così delineati 7 diversi profili di temperatura: per ogni zona vi è un grafico lungo z e uno lungo y, ed un ultimo lungo x che percorre tutte le regioni di studio.

Date le considerazioni effettuate in precedenza sulle zone "left" e "right", si è scelto di riportare soltanto gli andamenti delle temperature 1D nella zona centrale dove è collocata la sorgente di fiamma. Le direzioni studiate sono quindi l'asse z e l'asse y plottando i risultati nei due istanti temporali scelti.

7.2.2.1. Andamento della temperatura lungo z: zona "central"

I devices coinvolti in questa trattazione sono i seguenti: THCP06, THCP07 e THCP08 (Tabella 7.2).

Nome devices	Coordinata X[m]	Coordinata Y[m]	Coordinata Z [m]
THCP06	30.0	2.0	4.4
THCP07	30.0	2.0	2.0
THCP08	30.0	2.0	-0.6

Dall'immagine sottostante si nota che THCP06 non appartiene effettivamente alla zona "central", bensì a quella detta "right" poiché collocato fisicamente al di là della scala destra.

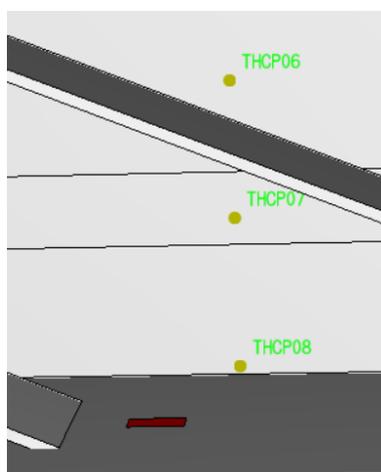


Figura 7.16 Devices zona "central" lungo z

Si è pensato di analizzare anche il device THCP06 per poter vedere effettivamente quanto la scala, che funge da ostruzione al passaggio dei fumi, incida sul valore effettivo della temperatura.

Ci si aspetta che la temperatura dei fumi decresca con la quota dato il progressivo allontanamento dalla sorgente quando l'ambiente in analisi è privo di una parete fisica che funge da soffitto. Questa riduzione di temperatura ci si aspetta sia lieve in quanto la colonna dei detectors non sia posizionata esattamente sopra la superficie di fiamma.

Di seguito i risultati computati per $t=100$ s e per $t=400$ s.

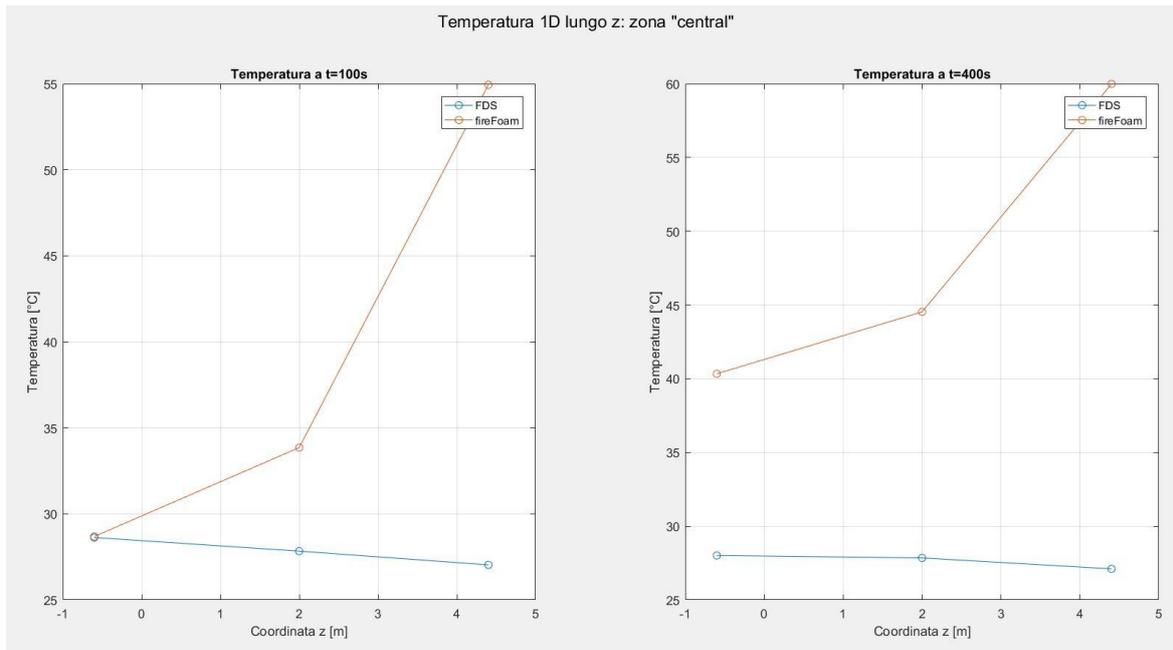


Figura 7.17 Andamento Temperatura zona "central" lungo z

Da i grafici precedenti si può notare come la temperatura registrata in FireFoam cresca con l'aumentare della quota e rimanga circa costante per FDS.

Questo conferma quanto detto riguardo le temperature computate dai devices nel capitolo precedente in cui si visualizzano le temperature a fine simulazione pari a circa 45°C per i primi due devices e di 60 °C per il terzo. La temperatura del device posto aldilà della scala in FireFoam risulta eccessivamente alta rispetto alla vera dinamica del problema. Data l'adiabaticità della rampa, che impedisce il passaggio di calore all'interno del proprio spessore, la temperatura può aumentare soltanto se la portata dei fumi lambisce il detector in questione. Il passaggio della fuliggine al di sopra della rampa è ostacolato sia dall'ostruzione della scala stessa, sia della impossibilità di accumulo dovuto alla parete aperta sovrastante.

In conclusione il profilo termico più veritiero è quello di FDS che denota una tenue diminuzione di temperatura con la quota.

7.2.2.2. Andamento della temperatura lungo y: zona "central"

Successivamente si andranno ad analizzare le risposte dei seguenti detectors: THCP16, THCP03 e THCP15 (Tabella 7.3).

Nome devices	Coordinata X[m]	Coordinata Y[m]	Coordinata Z [m]
THCP16	23.8	0.0	2.0
THCP03	23.8	2.0	2.0
THCP015	23.8	4.0	2.0

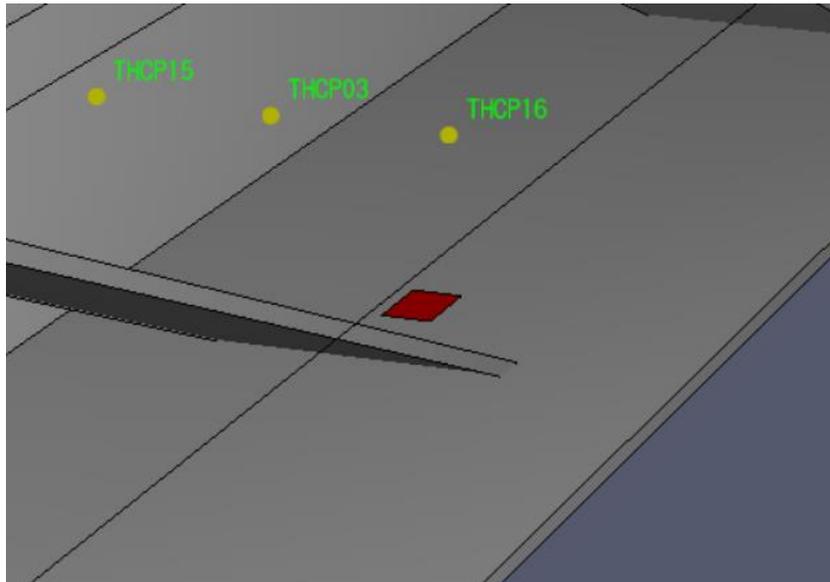


Figura 7.18 Devices zona "central" lungo y

Da questo studio ci si aspetta che l'andamento delle temperature nei tre misuratori sia pressoché costante con un leggero picco per il device centrale poiché avente la stessa coordinata y dell'incendio modellizzato.

Di seguito i risultati computati per $t=100$ s e per $t=400$ s.

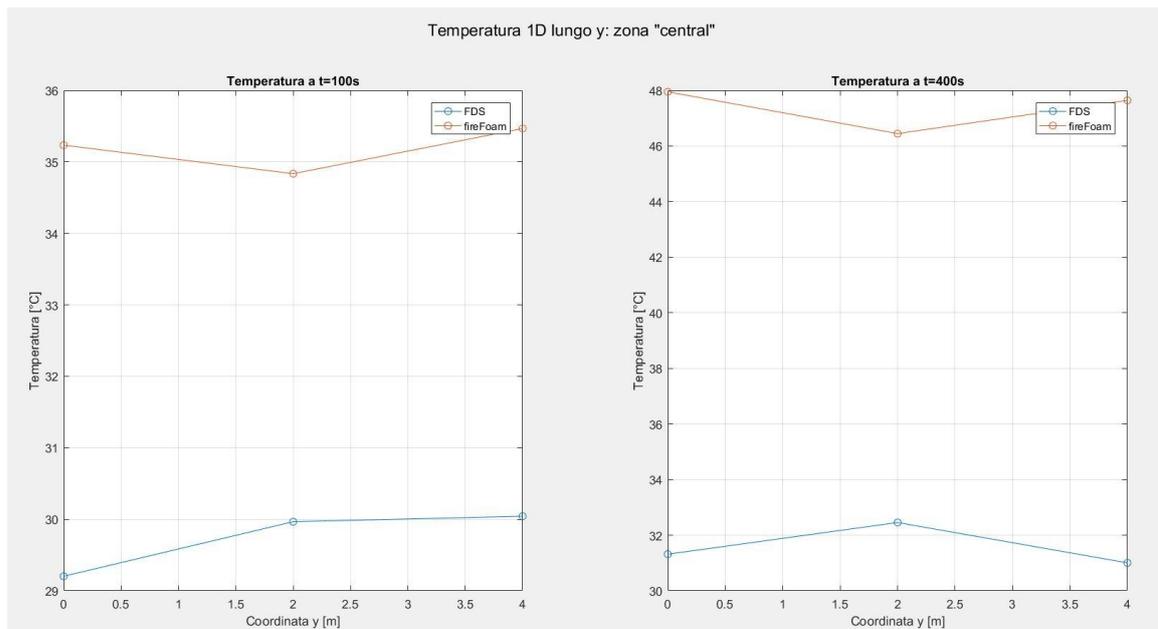


Figura 7.19 Andamento Temperatura zona "central" lungo y

I grafici precedenti rispecchiano il comportamento descritto tra le aspettative a meno del picco nella zona centrale dovuto all'incertezza nella rilevazione dei dati di THCP03, descritta nel paragrafo 7.2.1.3. .

Si può notare che la differenza di temperatura nei tre strumenti analizzati sia di circa 1 °C sia per FDS sia per FireFoam. Lo scostamento dei due profili di temperatura aumenta con il corso della simulazione passando da circa 5 °C per t=100s a 15 °C per t=400s.

7.2.3. Visualizzazione della temperatura in due dimensioni attraverso l'utilizzo delle slices

Lo studio 2D condotto sulla geometria semplificata è stato eseguito in entrambi i software utilizzando il comando "slice", il quale permette di generare un plot 2D per un piano passante per il volume di controllo. In modo da analizzare e confrontare le zone più interessanti della stanza in questione si scelgono questi piani di studio:

- X=9.2m: passante per la zona "left" del dominio computazionale;
- X=28.6m: passante per la zona "central";
- X=43.0m: intersecante la zona "right";
- Y=2.2m: piano che taglia tutte le zone di studio;
- Z=4.2m: piano interessante per la lettura dei dati ad una certa quota dalla fiamma.

Tramite il comando “slices” è possibile visualizzare più grandezze termodinamiche, quelle approfondite nel lavoro di tesi sono: temperatura (°C) e la velocità (m/s).

Per confrontare coerentemente i risultati tra i due software si sono scelti tre istanti di tempo: 100s, 300s e 500s.

Di seguito si analizzano i comportamenti 2D delle temperature nei diversi istanti temporali nei piani di analisi.

7.2.3.1. Slice passante per $x=9.2m$

La figura seguente mette in risalto la posizione del piano di studio descritto:

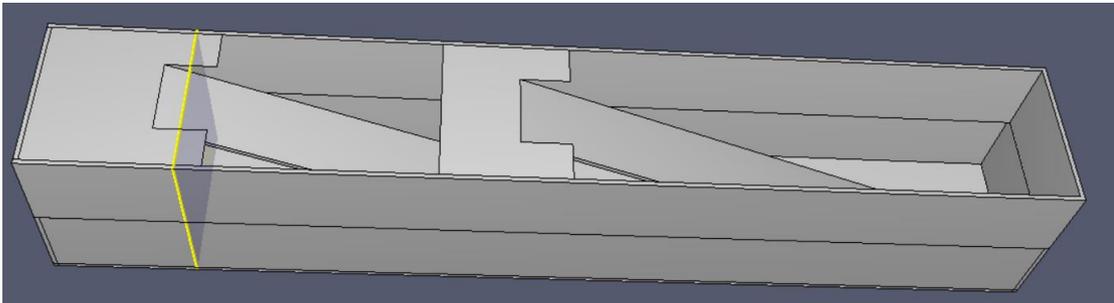


Figura 7.20 piano $x=9.2m$

Di seguito verranno riportati gli andamenti 2D per la slice analizzata nei tre diversi istanti temporali. Per la rappresentazione grafica si è preferito nascondere i muri laterali in modo da poter focalizzare l'attenzione sull'effetto della scala che funge da ostruzione al passaggio dei fumi. Questo accorgimento verrà utilizzato per tutte i piani passanti per le coordinate x .

- analisi per t=100s:

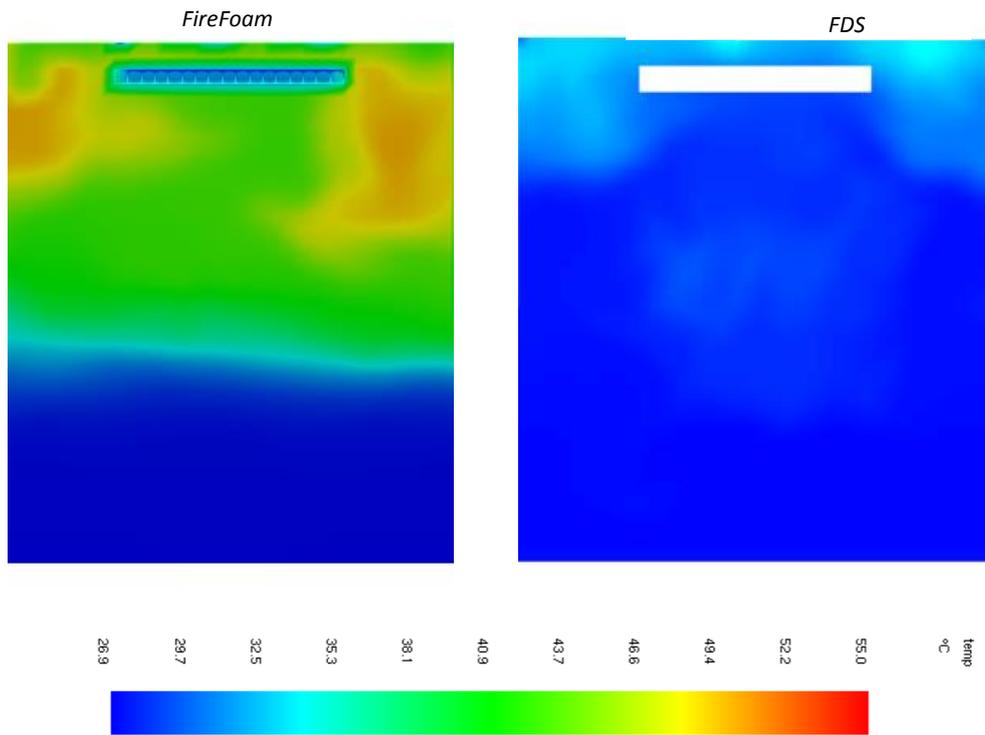


Figura 7.21 Temperatura: slice x=9.2m t=100s

- analisi per t=300s:

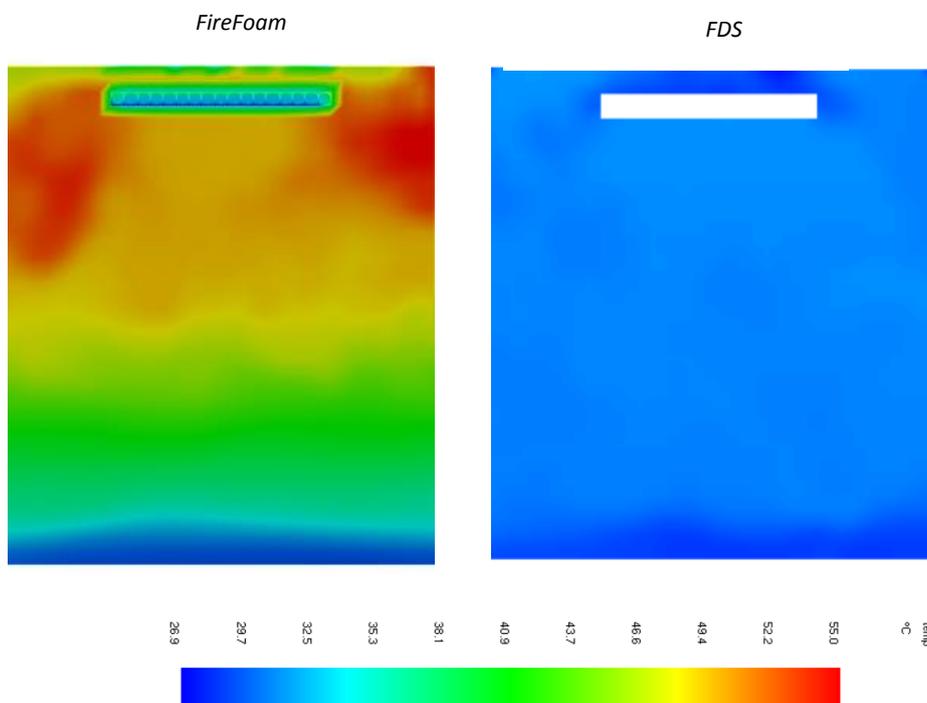


Figura 7.22 Temperatura: slice x=9.2m t=300s

- analisi per t=500s:

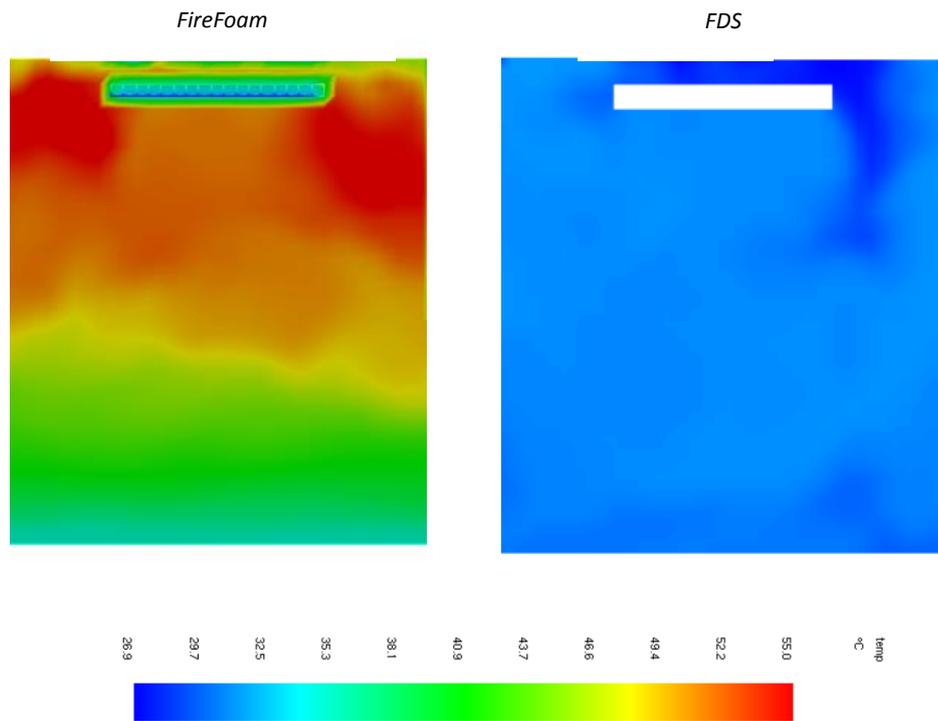


Figura 7.23 Temperatura: slice x=9.2m t=500s

✓ Considerazioni:

La slice passante per la coordinata x=9.2m interseca la zona della geometria denominata “left”. Tramite questi grafici si è confermato quanto detto precedentemente tramite l’analisi puntiforme del capitolo 7.2.1.1. In FireFoam si osserva sempre una temperatura mediamente più alta di FDS dove in dettaglio:

- dopo 100s si osserva, per il primo software, una temperatura tendente al verdino nella zona alta, corrispondete a circa 40 °C, ed una zona fredda inferiore pari circa alla temperatura di inizio simulazione. In FDS, invece, si può notare che in alcune zone a basse quote è presente un’area di colore celestino, a differenza del blu scuro letto nel grafico di FireFoam. Ciò mette in luce una temperatura di FDS maggiore in queste zone.
- Con l’avanzare del tempo di simulazione le temperature aumentano in tutti i punti della slice in questione per entrambi i programmi. Si può notare come l’aumento di temperatura vada ad intaccare anche le zone più basse della stanza. Tale fenomeno è più accentuato in FireFoam rispetto a FDS.

- In FDS a $t=500s$ si osserva una temperatura circa uniforme.
- Come ultima considerazione, passando da 300s a 500s, la grandezza termodinamica di studio non aumenta di tanto poiché, dopo metà simulazione, si è raggiunta la condizione di stazionarietà.

Da queste sei rappresentazioni possiamo notare una differenza sostanziale in merito alla modellazione delle ostruzioni interne dei due programmi: FDS non va a calcolare le grandezze termodinamiche all'interno del suo spessore, mentre FireFoam sì. In quest'ultimo programma però la rappresentazione di esse non svolge un ruolo importante date le condizioni a contorno di adiabaticità applicate.

7.2.3.2. Slice passante per $x=28.6m$

L'immagine di seguito mette in risalto la posizione del piano di studio descritto:

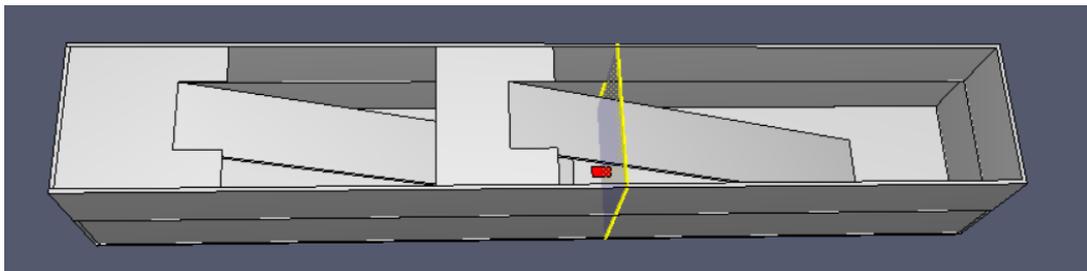


Figura 7.24 Piano $x=28.6m$

La posizione di questa slice è di particolare importanza per osservare il comportamento delle temperature in prossimità della sorgente di fiamma. Si può quindi analizzare l'evoluzione del pennacchio e prestare particolare attenzione all'effetto della scala sulla risalita dei fumi.

Di seguito si analizza il particolare comportamento a $t=500s$: si preferisce non riportare altri risultati poiché non aggiungono ulteriori informazioni rilevanti allo studio.

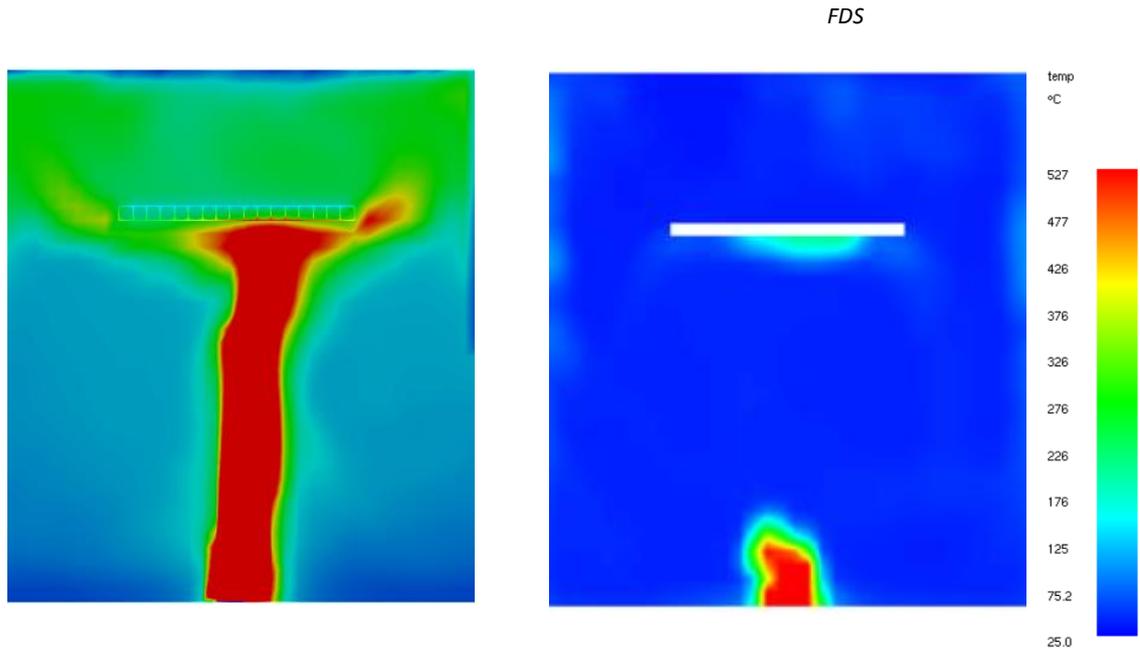


Figura 7.25 Temperatura: slice $x=28.6m$ $t=500s$

Dai grafici precedenti si nota la peculiare differenza dei pennacchi simulati in relazione alla scala di temperatura adottata. Si evince che l'effetto della combustione in FireFoam produca un profilo termico ad alta temperatura più esteso sino a raggiungere la parte superiore della stanza. In FDS le elevate temperature sono registrate soltanto nella zona prossima alla fiamma. I due profili risultano differenti poiché FDS tratta la sorgente di fiamma come una superficie d'ingresso a HRR costante, mentre in FireFoam si simula realmente la reazione chimica di combustione. [19]

In entrambe le mappature è presente un piccolo accumulo di fumi al di sotto dell'ostruzione che simula la corretta fisica del problema.

7.2.3.3. Slice passante per $x=43.0m$

Di seguito si visualizza il piano di studio per questo paragrafo.

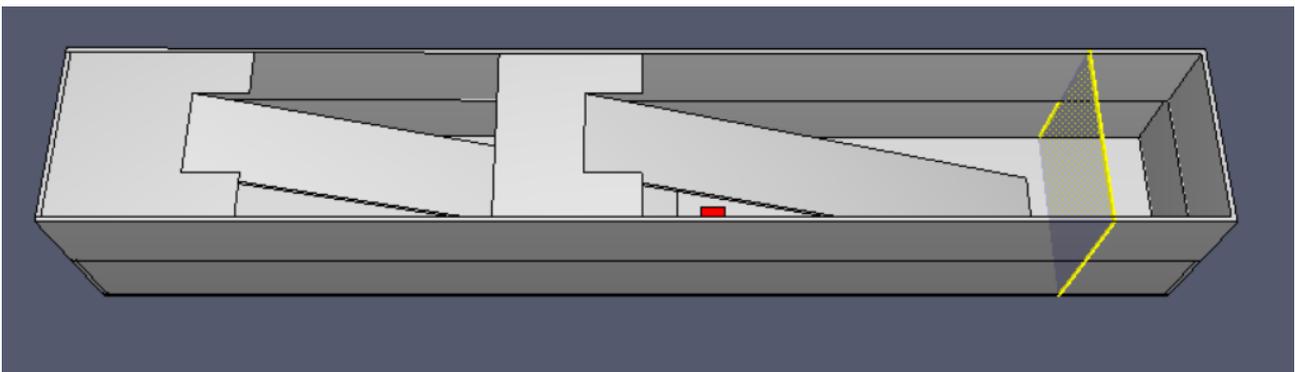


Figura 7.26 Piano $x=43.0m$

La slice analizzata passa per la zona “right” dove le temperature, dall’elaborazione svolta nel capitolo precedente, risultano le più basse in assoluto. Tramite i grafici successivi, a diversi istanti temporali, si vuole confermare quanto detto.

- analisi per t=100s:

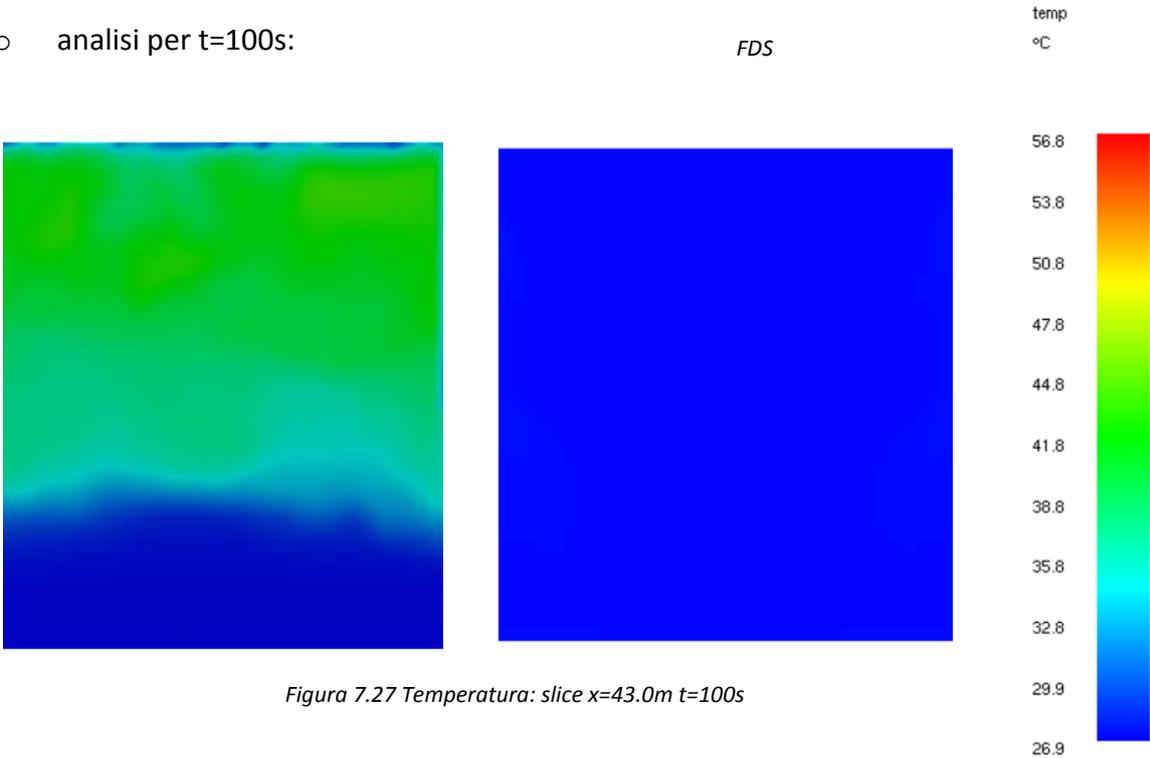


Figura 7.27 Temperatura: slice x=43.0m t=100s

- analisi per t=300s:

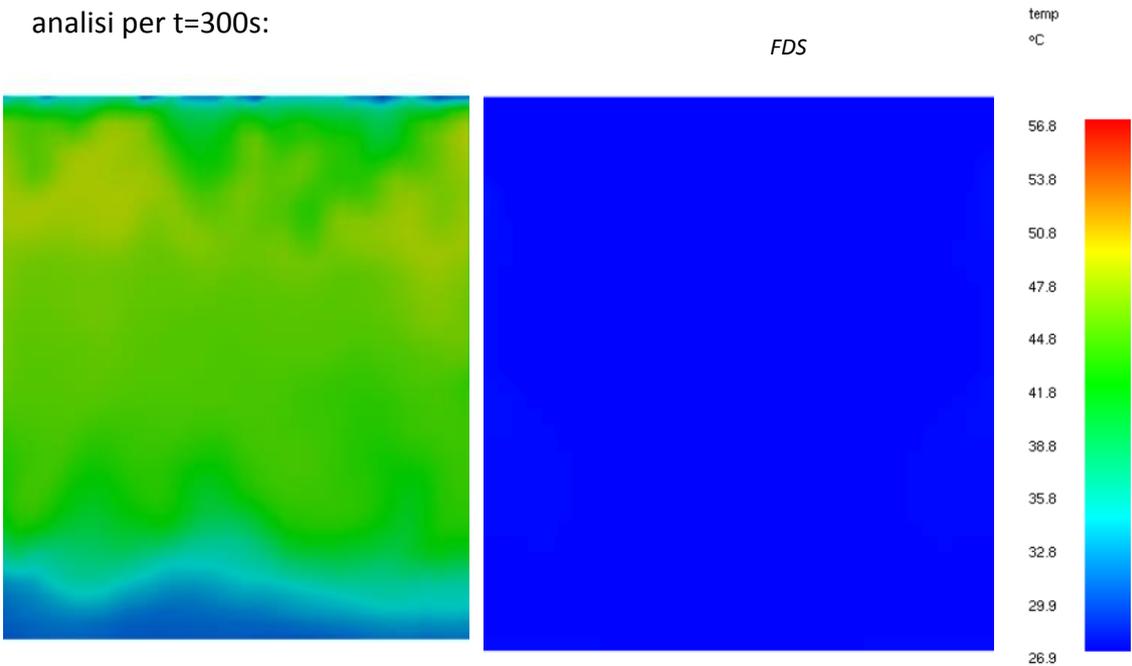


Figura 7.28 Temperatura: slice x=43.0m t=300s

○ 7.2.3.3.3. analisi per t=500s:

FDS

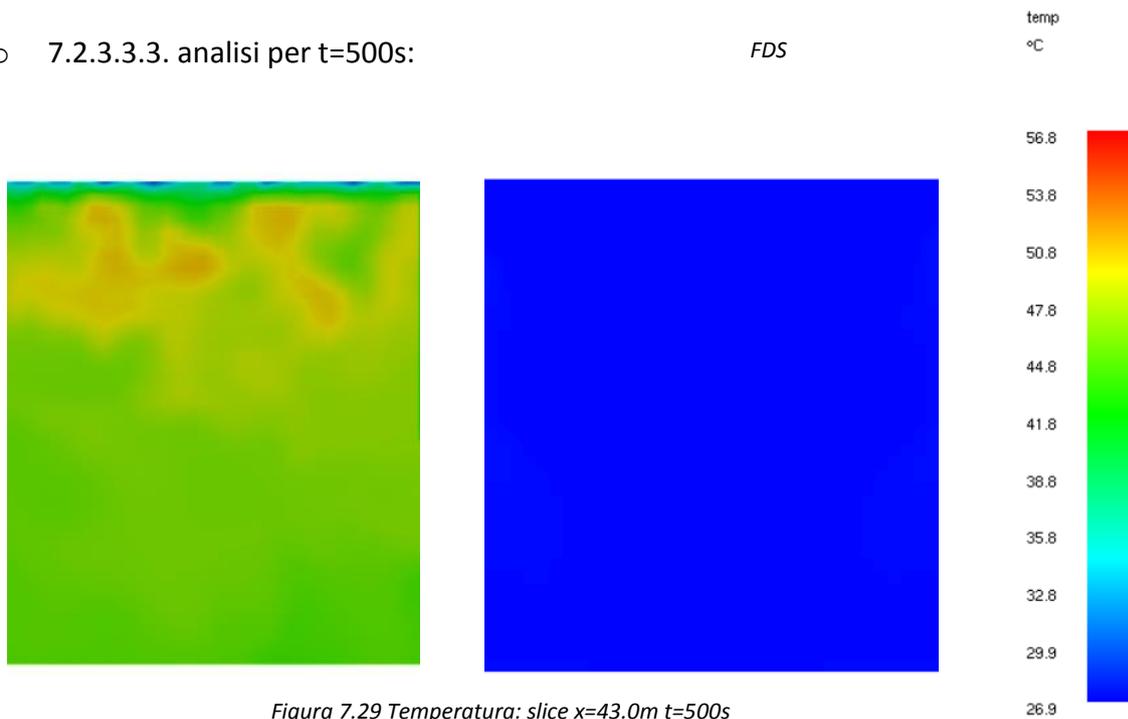


Figura 7.29 Temperatura: slice x=43.0m t=500s

✓ considerazioni:

Il piano di studio conferma quanto visto nell'analisi puntiforme, ovvero: in FDS l'accumulo dei fumi è pressoché assente determinando una temperatura costante pari circa a quella d'inizio simulazione (26.85°C). In FireFoam invece si annota un aumento di temperatura che cresce nell'avanzare della simulazione fino a raggiungere una condizione di stabilità intorno ai 45°C.

Con l'avanzare della simulazione la mappatura in FireFoam tende al verdino anche nelle zone basse della stanza.

7.2.3.4. Slice passante per y=2.2m

Di seguito si visualizza il piano di studio inserito all'interno della geometria semplificata.

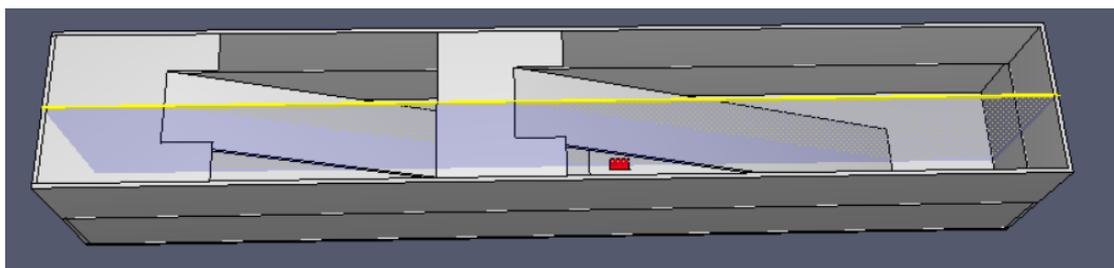


Figura 7.30 Piano y=2.2m

Questa slice risulta particolarmente interessante in quanto passante per tutti gli ambienti studiati della geometria: "left", "central" e "right". A maggior ragione essa attraversa il pennacchio sviluppato garantendone la visualizzazione.

I plot successivi riportano gli andamenti 2D della temperatura per la slice in questione nei tre istanti di tempo.

- analisi per t=100s:

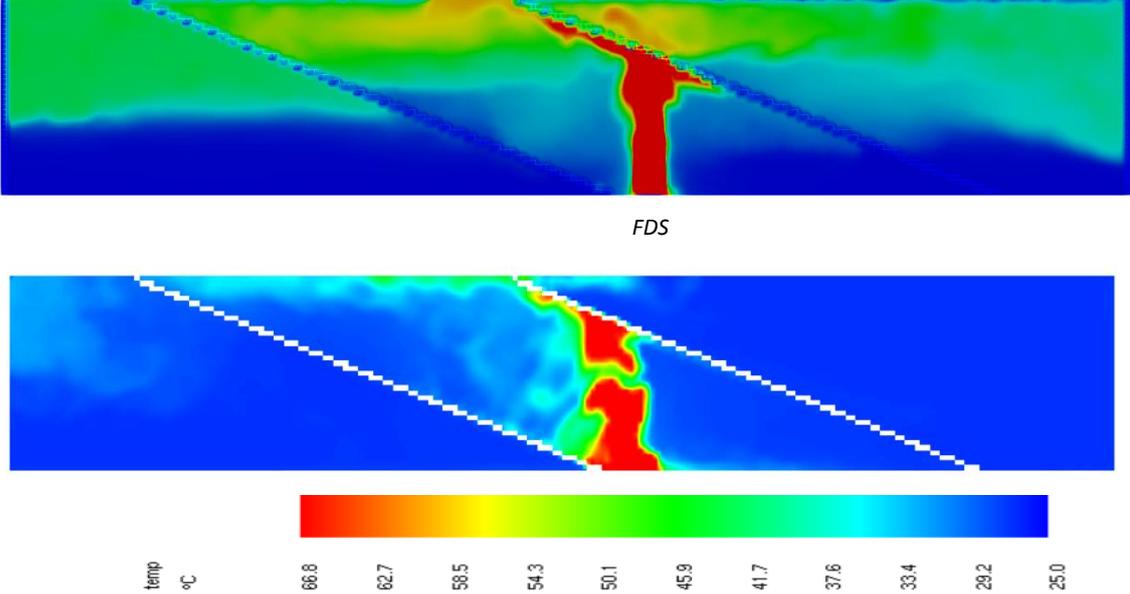


Figura 7.31 Temperatura slice y=2.2m t=100s

- analisi per t=300s:

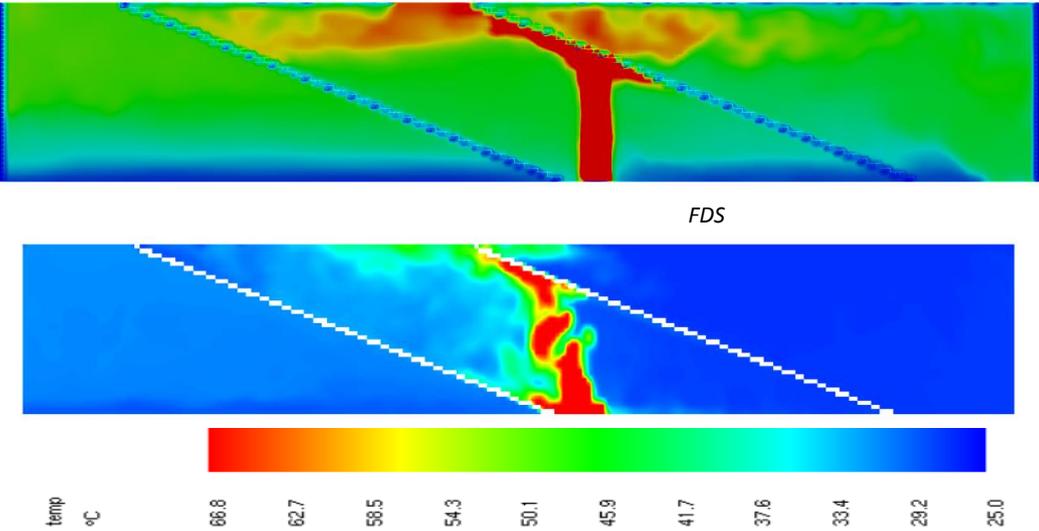
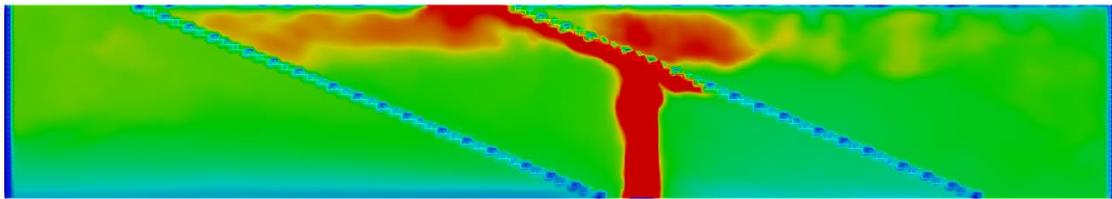


Figura 7.32 Temperatura slice y=2.2m t=300s

- analisi per t=500s:



FDS

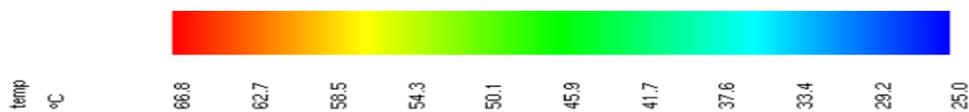
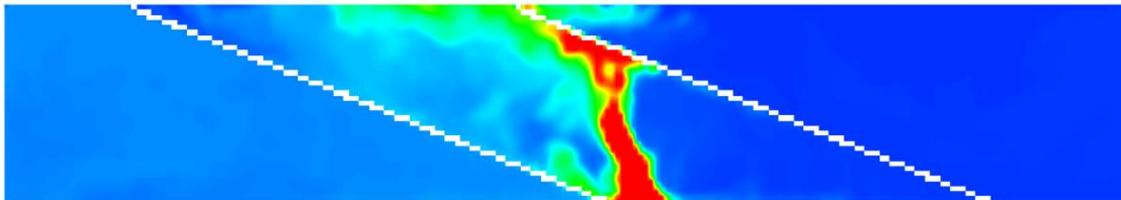


Figura 7.33 Temperatura slice y=2.2m t=500s

- ✓ considerazioni:

Con questi sei grafici, tre per FDS e tre per FireFoam si riassumono tutti i profili termici per le tre zone di studio. Si analizzano nel dettaglio separatamente:

- zona “left”: FireFoam e FDS sembrano comportarsi nello stesso modo a meno di una differenza di temperatura di una ventina di gradi già spiegata dallo studio puntiforme.
- zona “central”: qui la presenza del pennacchio influisce notevolmente sull’andamento della temperatura: in FireFoam le zone ad alta temperatura sono più estese che in FDS, come sottolineato già dagli studi precedenti. Inoltre la scala, fungendo da ostruzione, causa una “risalita frastagliata” dei fumi a ridosso degli spigoli. Questo comportamento rispecchia la reale dinamica del problema.
- Zona “right”: in quest’area i due programmi si comportano in modo molto differente in quanto vi è la presenza più estesa della superficie aperta. Infatti FDS risulta non descrivere l’aumento di temperatura causato dalla più rapida dispersione della fuliggine in questa zona.

7.2.3.5. Slice passante per $z=4.2\text{m}$:

Di seguito si visualizza il piano di studio per questo paragrafo.

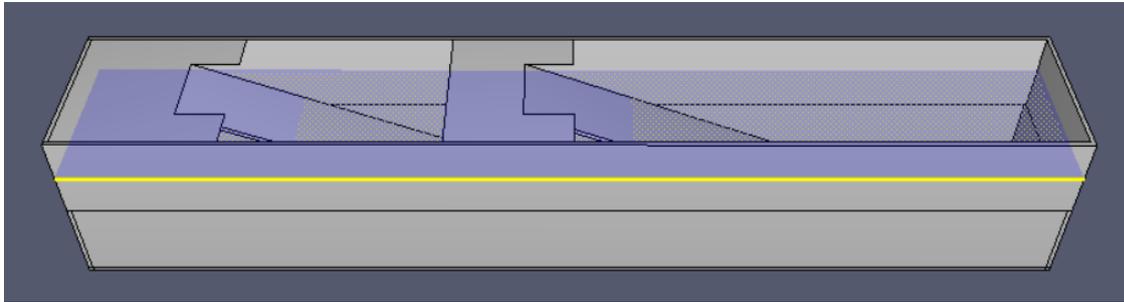
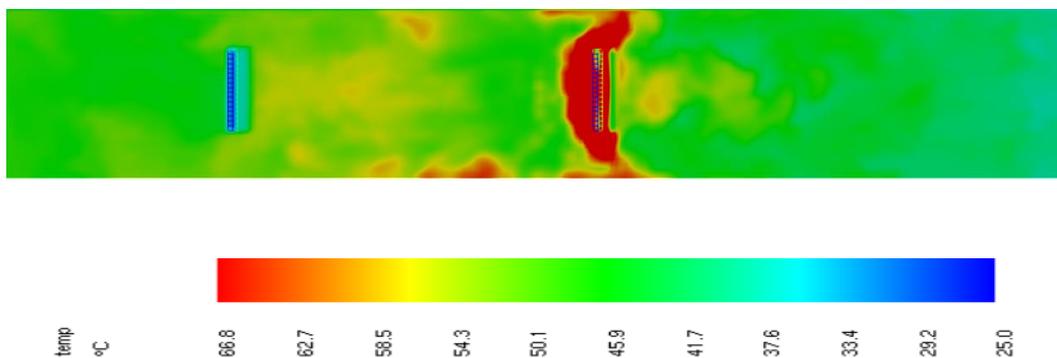


Figura 7.34 Piano $z=4.2\text{m}$

La slice in considerazione ha il compito di visualizzare le temperature in due dimensioni ad una elevata quota dalla fiamma. Anche questo piano è passante per tutte le zone di studio. Quest'ultima analisi di temperatura risulta una delle più adoperate per osservare gli effetti di un incendio: in ambienti confinati si verificano fenomeni di accumulo che determinano l'incremento di temperatura nelle zone alte della struttura. Nel lavoro di tesi, però, questo fenomeno non si compie pienamente per via della geometria semplificata adottata. Se si fosse riuscito a completare lo studio dell'intera stazione il fenomeno dell'accumulo dei fumi avrebbe avuto un peso maggiore nei risultati.

Nelle figure successive si può quindi ammirare come si distribuiscono le temperature fissata la quota z .

- analisi per $t=100\text{s}$:



FDS

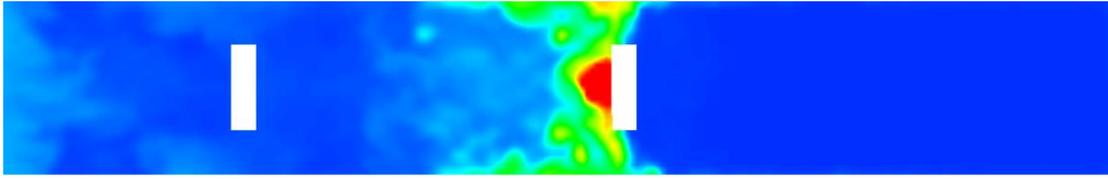
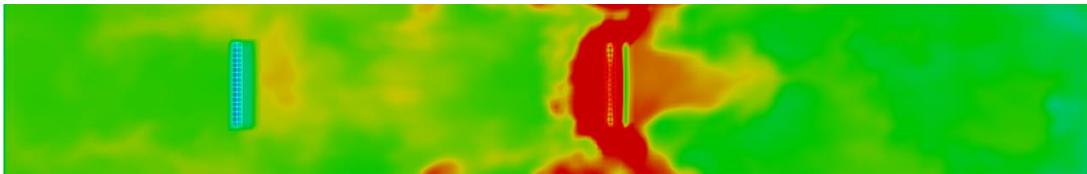


Figura 7.35 Temperatura slice z=4.2m t=100s

- 7.2.3.5.2. analisi per t=300s:



FDS

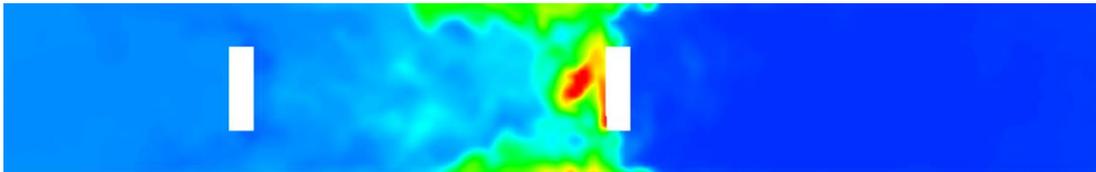
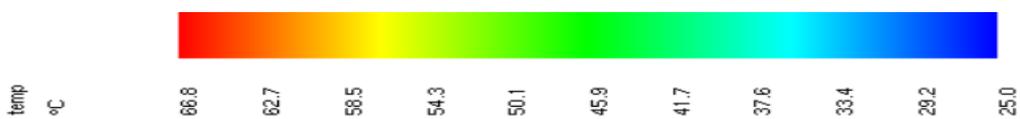
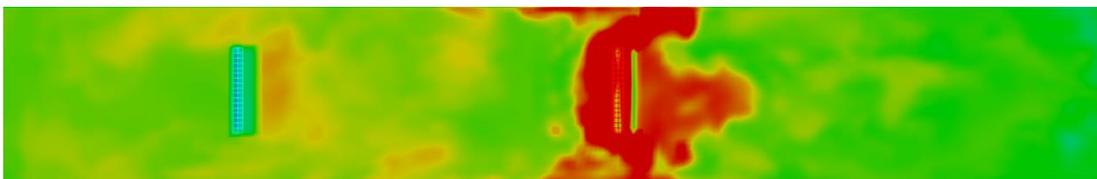


Figura 7.36 Temperatura slice z=4.2m t=300s

- analisi per t=500s:



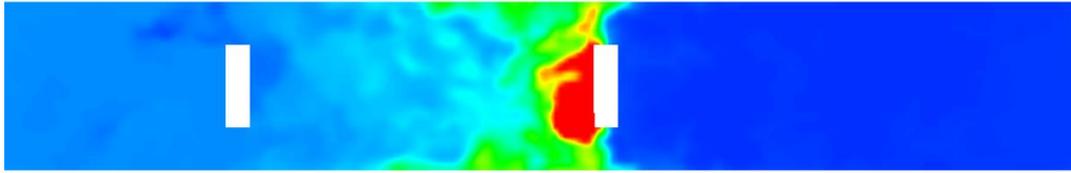


Figura 7.37 Temperatura slice $z=4.2m$ $t=500s$

✓ considerazioni:

Dalle mappature si può notare che l'“hot spot”, per entrambi i programmi, risiede in prossimità dell'ostruzione di destra. La zona in cui si raggiunge la temperatura massima corrisponde circa a quella con la stessa coordinata x della sorgente di fiamma. La differenza che si evidenzia al primo sguardo/impatto è sicuramente la zona “right” performata come già detto in modo differente dai due programmi. La presenza di una macchia a temperatura elevata, in entrambi i programmi, nella zona centrale dell'immagine denota il ridotto accumulo di fumi dovuto alla presenza parziale del soffitto. Esso funge da tappo per la fuoriuscita dei gas dal volume di controllo. Man mano che ci si allontana verso sinistra lungo la coordinata x dall'hotspot, la temperatura tende a diminuire fino a raggiungere una colorazione uniforme di celestino per FDS e giallo-verde per FireFoam.

7.2.4. Confronto dei profili della velocità in 2D:

Una volta completato lo studio sulla temperatura si passa all'analisi della seconda grandezza termodinamica: la velocità. Questa grandezza è stata studiata tramite le slices quindi visualizzando le velocità 2D. Una motivazione a ciò è da ritrovare nella caratteristica vettoriale della velocità. Paraview e Smokeview, i due programmi impiegati per il post-processing, calcolano in maniera automatizzata la norma del vettore velocità facendo la media quadratica delle componenti, quando si utilizza il comando “slice”. Nell'analisi puntiforme invece, per quanto riguarda Paraview, si necessita di un calcolo “a mano” per ricavare la velocità totale.

Per l'analisi della velocità in 2D si usufruiscono degli stessi piani utilizzati per l'analisi sulla temperature (cap. 7.2.3) negli stessi istanti temporali.

7.2.4.1. Slice passante per x=9.2m

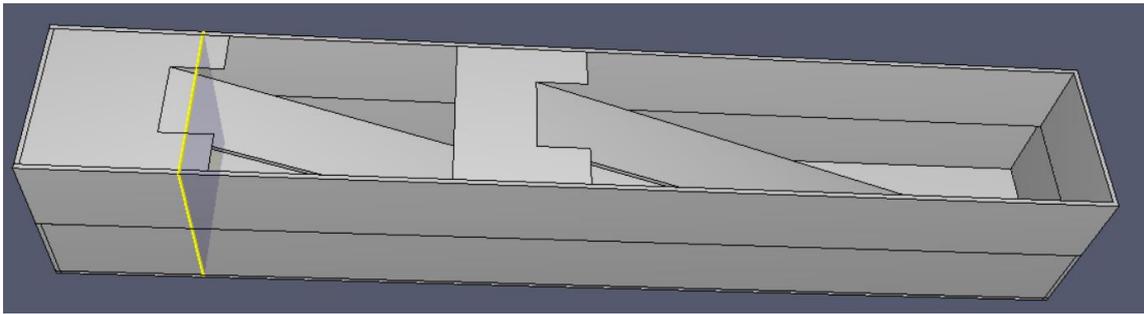


Figura 7.38 Piano x=9.2m

Di seguito si analizzano gli andamenti di velocità nella zona "left" nei tempi indicati.

- tempo di studio t=100s:

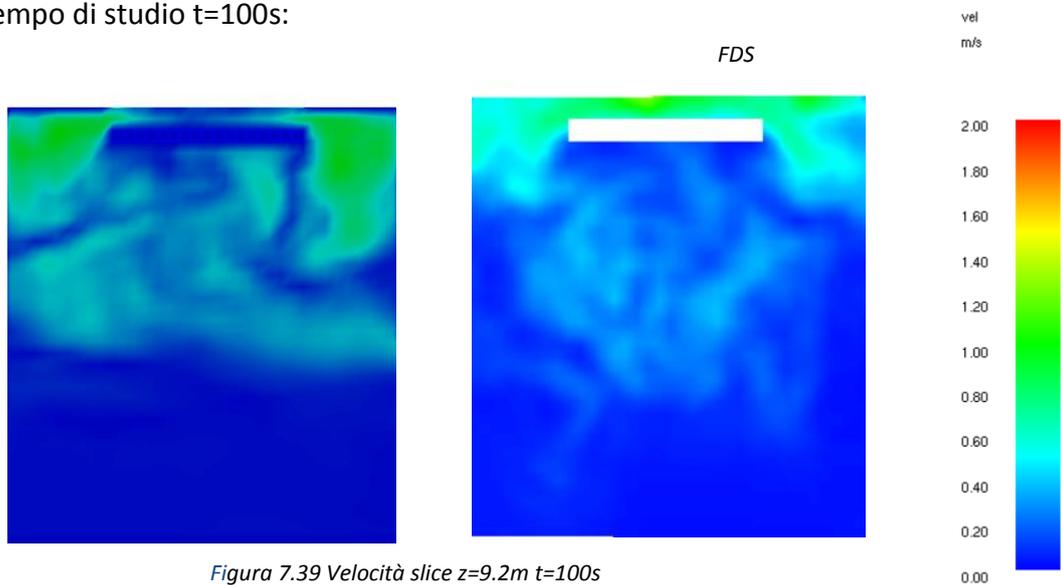


Figura 7.39 Velocità slice z=9.2m t=100s

- tempo di studio t=300s:

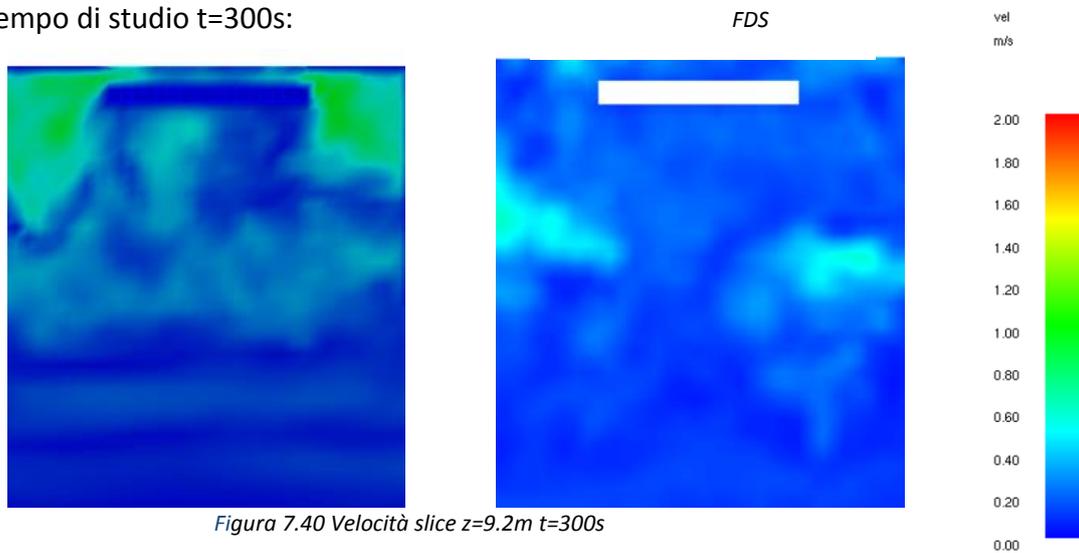
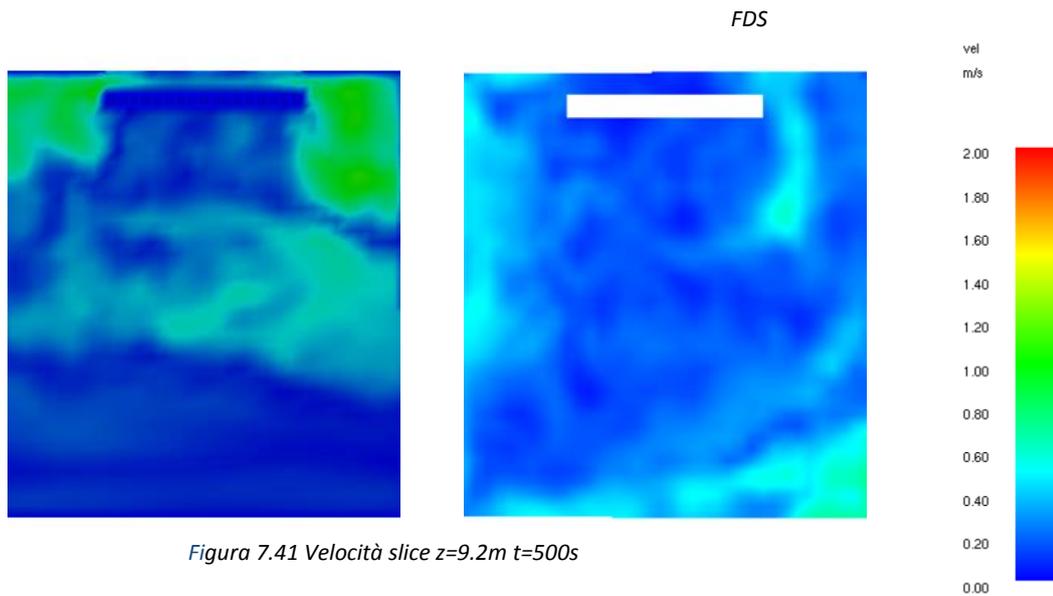


Figura 7.40 Velocità slice z=9.2m t=300s

- tempo di studio t=500s:



- ✓ considerazioni:

I grafici precedenti danno delle informazioni sull'effettiva velocità dei fumi all'interno della zona "left". A 100 secondi dall'inizio della simulazione si osserva come i profili nei due programmi siano simili, sia come velocità massima, di colore verde localizzata a ridosso dell'ostruzione, e sia come distribuzione nella restante area del grafico. Una differenza importante riguarda il valore della velocità al di sopra della rampa: in FDS la velocità è molto più alta rispetto a quella con FireFoam. Con quest'ultimo programma si osserva dunque una piccola stagnazione di fumi.

Con l'avanzare della simulazione si osserva come FireFoam mantenga circa costante il suo profilo di velocità, tranne per la parte più bassa dove, a fine analisi, si individua un'accelerazione delle particelle. In FDS a t=500s la velocità tende ad uniformarsi in tutta la stanza apparendo di colore celestino chiaro.

7.2.4.2. Slice passante per x=28.6m

La posizione del piano di studio è rappresentato nella figura sottostante:

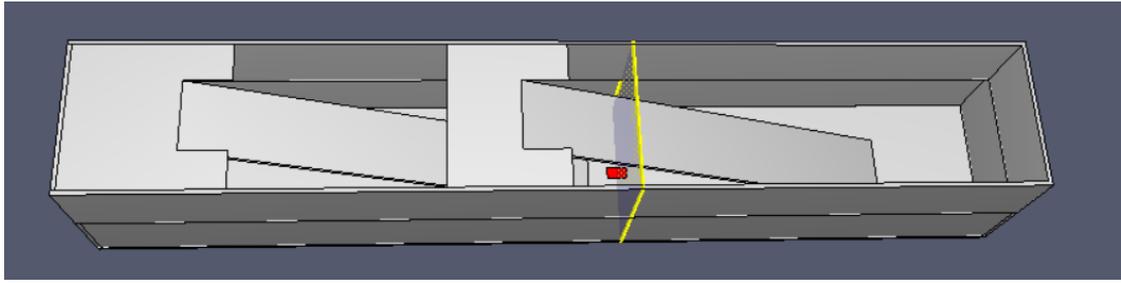


Figura 7.42 Piano $x=28.6m$

La slice in questione è posizionata nella zona “central” ed è molto utile per capire quanto la presenza della sorgente di fiamma incida sulla velocità delle particelle nella stanza.

Successivamente si riportano i grafici, per entrambi i programmi, relativi ai tre istanti temporali.

- tempo di studio $t=100s$:

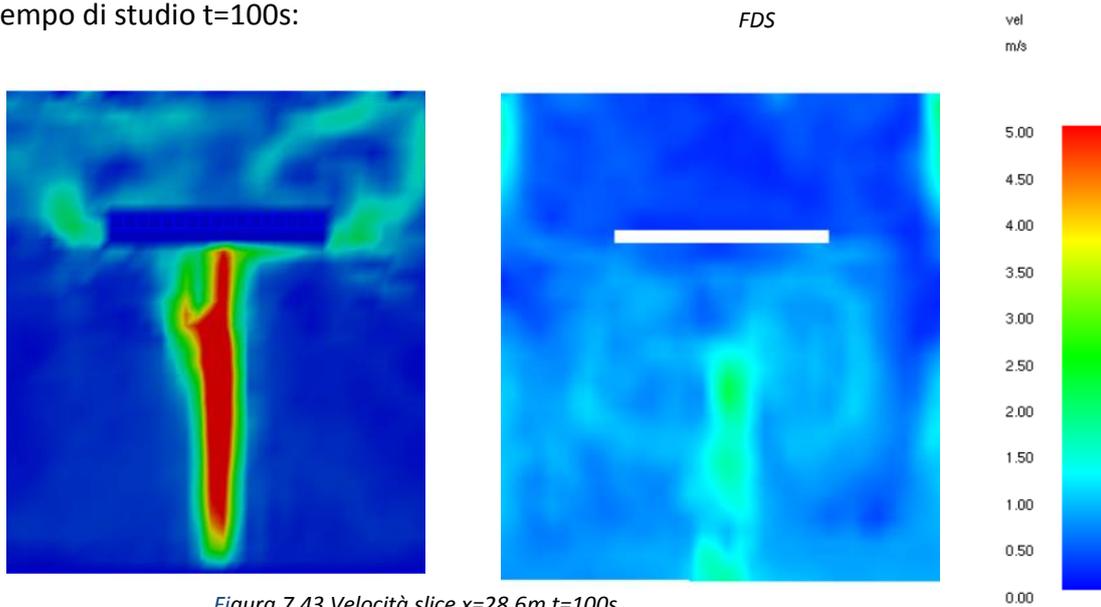


Figura 7.43 Velocità slice $x=28.6m$ $t=100s$

- tempo di studio $t=300s$:

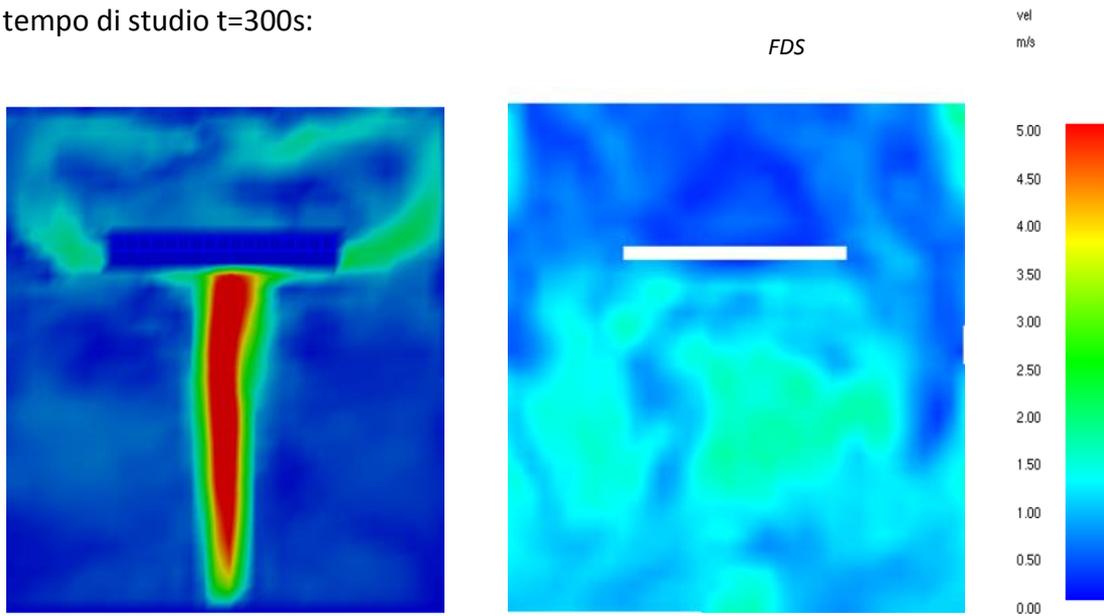


Figura 7.44 Velocità slice $x=28.6m$ $t=300s$

- tempo di studio $t=500s$:

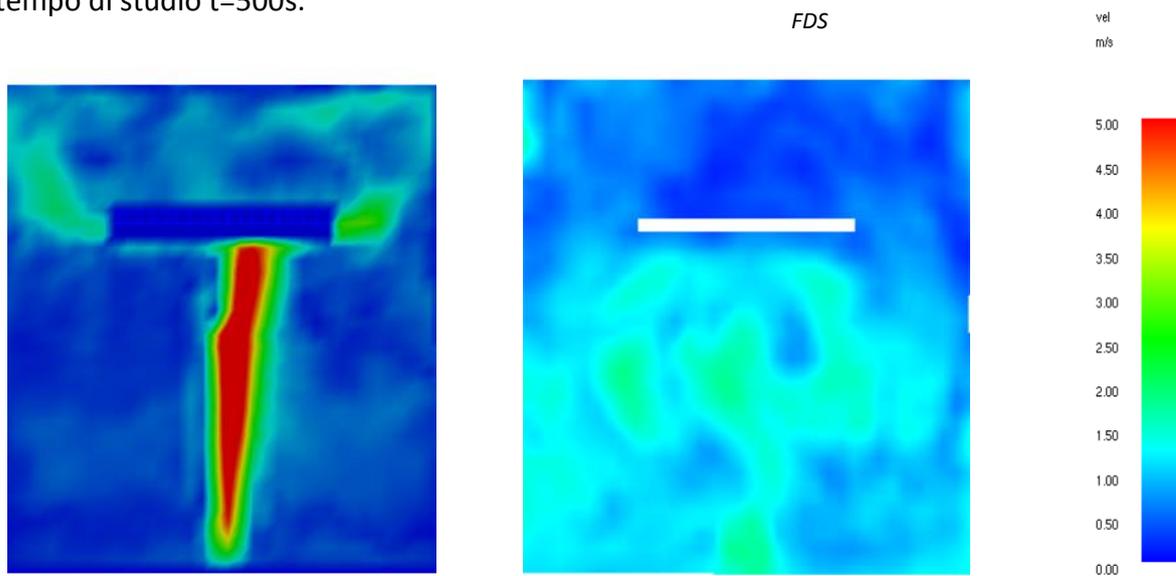


Figura 7.45 Velocità slice $x=28.6m$ $t=500s$

- ✓ considerazioni:

Dall'analisi di questa slice possiamo subito notare come la velocità raggiunta con FireFoam, in prossimità della fiamma, sia molto più alta rispetto a quella di FDS con una differenza di circa 2.5 m/s. L'elevata velocità registrata però non sembra condizionare molto le zone laterali dell'immagine poiché i fumi, una volta incontrata l'ostruzione, risultano bloccati.

In FDS si osserva che la zona in basso presenta una velocità pressoché uniforme tendente al celestino acceso che risulta in alcune zone superiore di quella registrata dall'altro software.

Come in precedenza si riscontra un profilo circa costante nel tempo per FireFoam.

7.2.4.3. Slice passante per $x=43.0m$

La posizione del piano di studio è rappresentato nella figura sottostante:

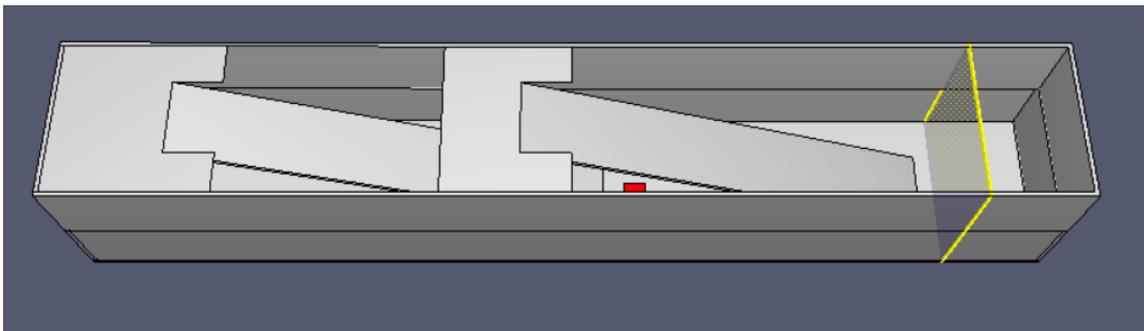


Figura 7.46 Piano $x=43.0m$

La slice in questione è posizionata nella zona "right" della stanza in cui nessuna copertura o ostruzione al passaggio dei fumi è costruita.

Di seguito si riportano i plot elaborati:

- tempo di studio $t=100s$:

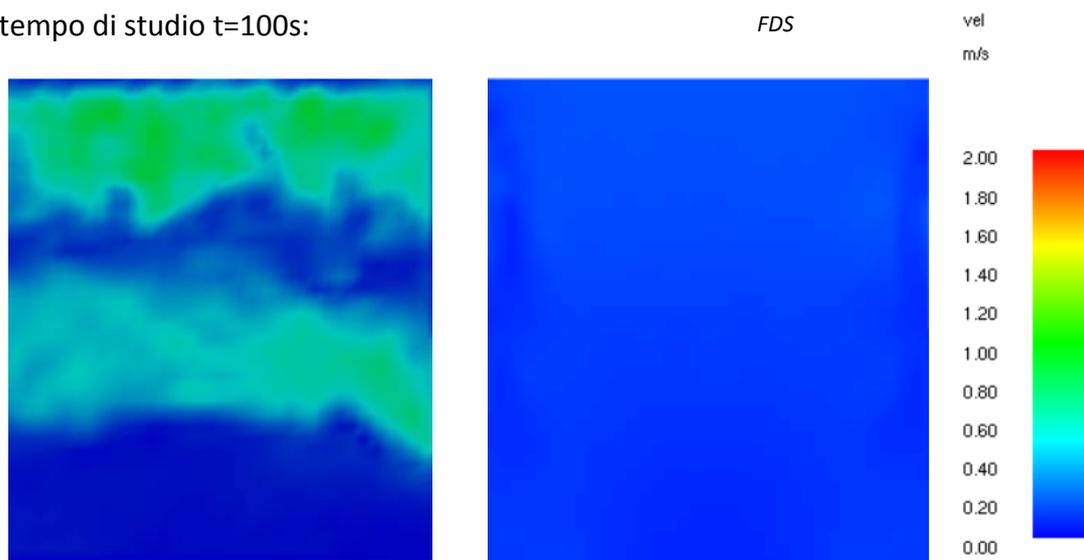


Figura 7.47 Velocità slice $x=43.0m$ $t=100s$

- tempo di studio t=300s:

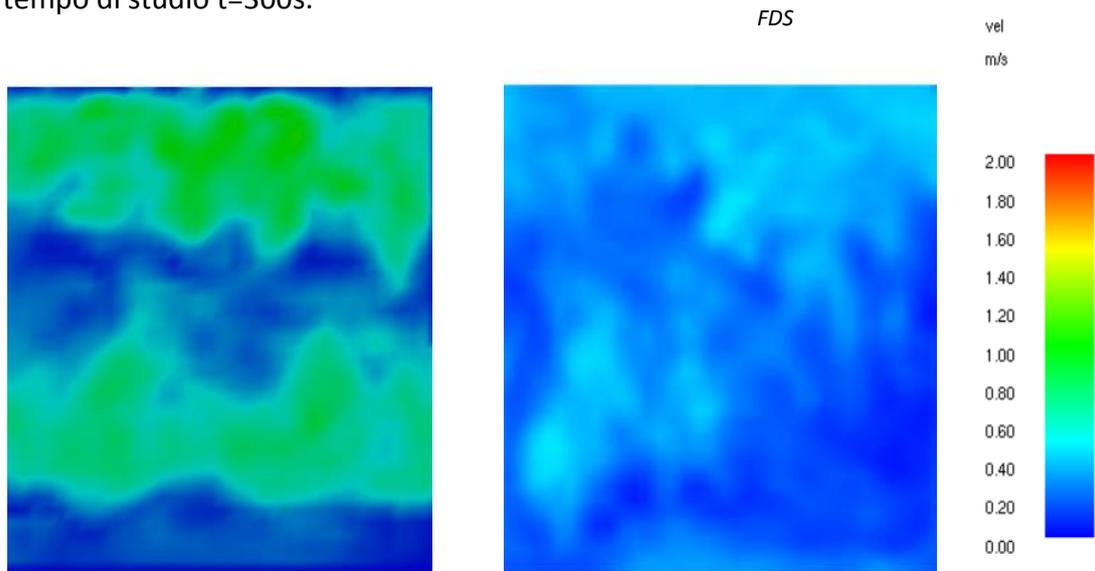


Figura 7.48 Velocità slice x=43.0m t=300s

- tempo di studio t=500s:

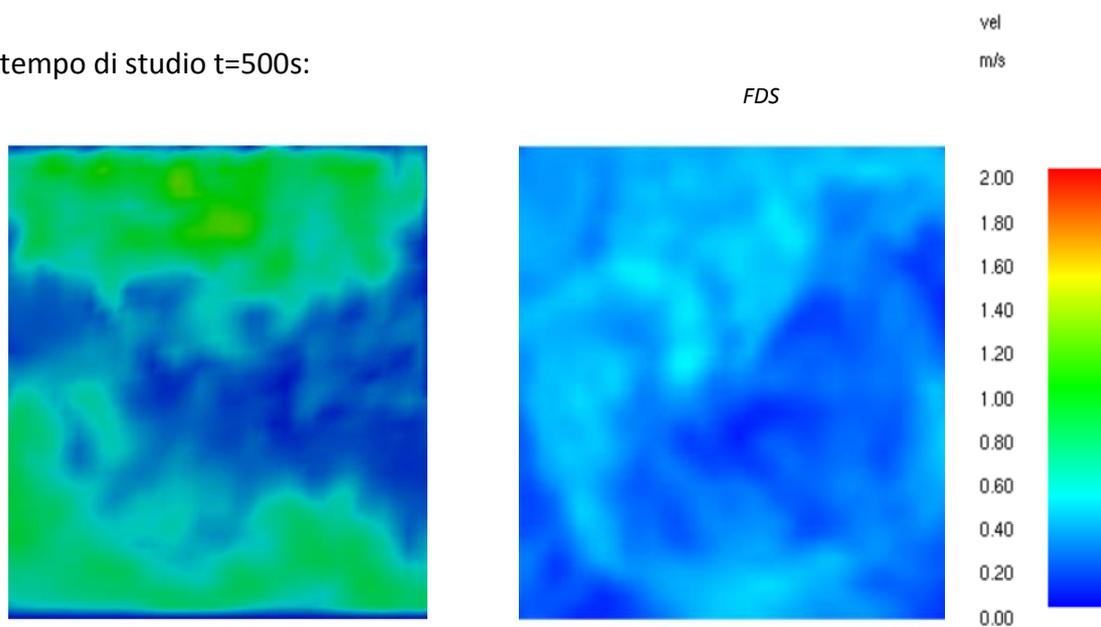


Figura 7.49 Velocità slice x=43.0m t=500s

- ✓ considerazioni:

Dopo i primi 100 secondi di simulazione possiamo notare un comportamento differente dei profili di velocità tra i due programmi in oggetto. In FireFoam si notano macchie a velocità maggiore dovute al transito dei fumi in questa zona, mentre in FDS otteniamo un grafico che segnala una velocità pressoché pari a 0 m/s. Con l'avanzare del tempo anche in quest'ultimo programma si registra una velocità in aumento fino a raggiungere gli 0.6 m/s in colore celestino.

In entrambe le mappe si nota una zona centrale a velocità leggermente minore rispetto alle altre zone della slice: questo comportamento può essere dovuto alla presenza della scala molto prossima al piano di studio analizzato. Oltre alla discrepanza di circa 0.8 m/s, a fine simulazione, tra i due grafici si legge anche una lieve differenza sullo strato più in alto dell'immagine, ovvero: in FireFoam si osserva un bordo di colore blu frastagliato, e in FDS una velocità pressoché tendente al celestino. Questo può confermare il fenomeno della più rapida fuoriuscita dei fumi in FDS, in quanto il blu scuro indica una velocità prossima allo zero. Ciò identifica in FireFoam una zona di accumulo che causa l'aumento della temperatura locale.

7.2.4.4. Slice passante per $y=2.2\text{m}$

La locazione del piano è rappresentata dalla figura sottostante:

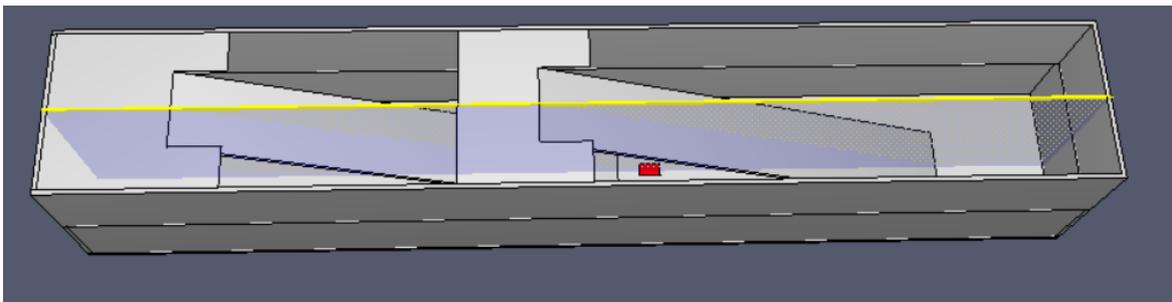


Figura 7.50 Piano $y=2.2\text{m}$

La slice analizzata permette di visualizzare le velocità in tutte le zone e sottolineare le affinità e le dissomiglianze dei due programmi. All'interno di questo paragrafo si apprezza l'aumento della velocità quando prossimi alla sorgente di fiamma.

I plot successivi riportano gli andamenti 2D della velocità per la slice in questione nei tre istanti di tempo.

- tempo di studio $t=100s$:

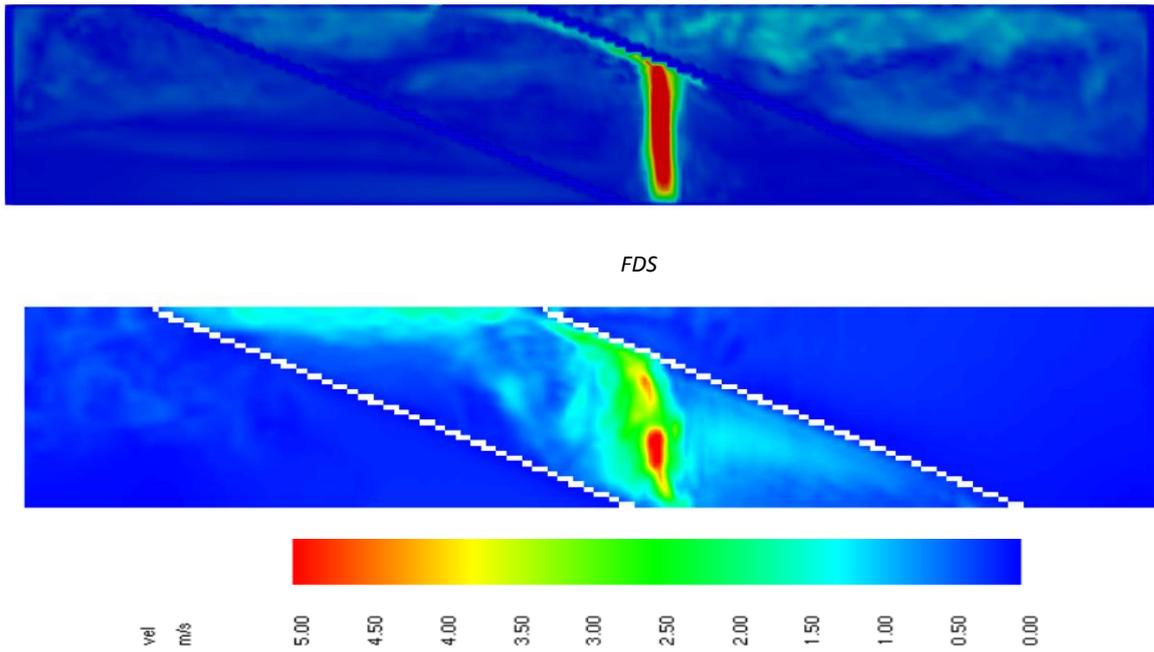


Figura 7.51 Velocità slice $y=2.2m$ $t=100s$

- tempo di studio $t=300s$:

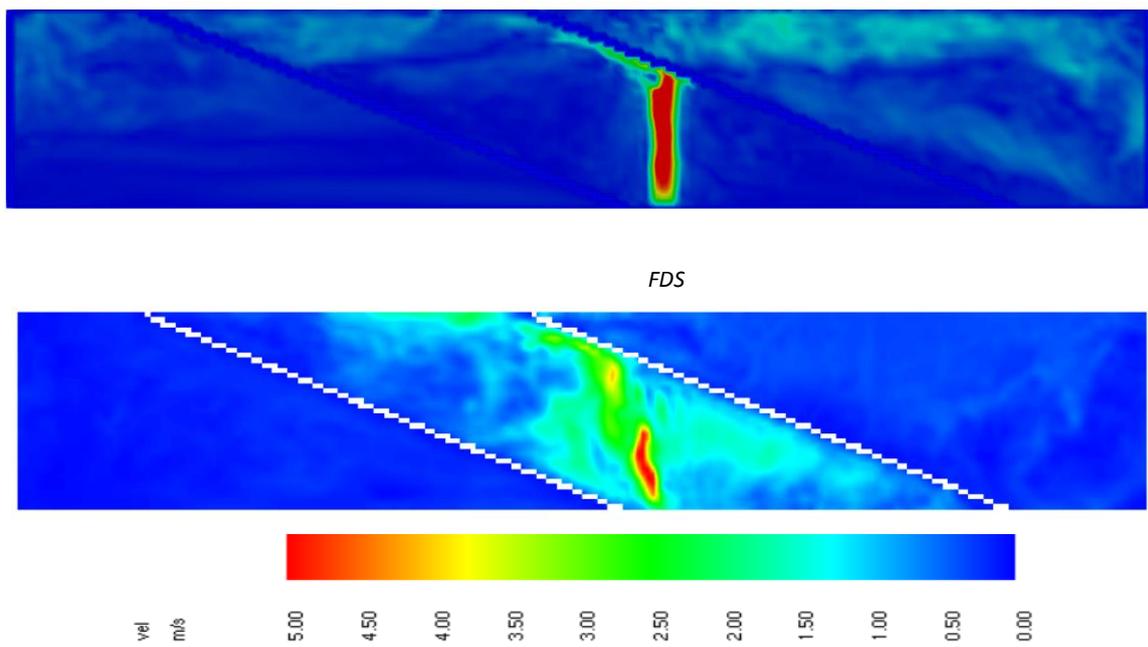


Figura 7.52 Velocità slice $y=2.2m$ $t=300s$

- tempo di studio t=500s:

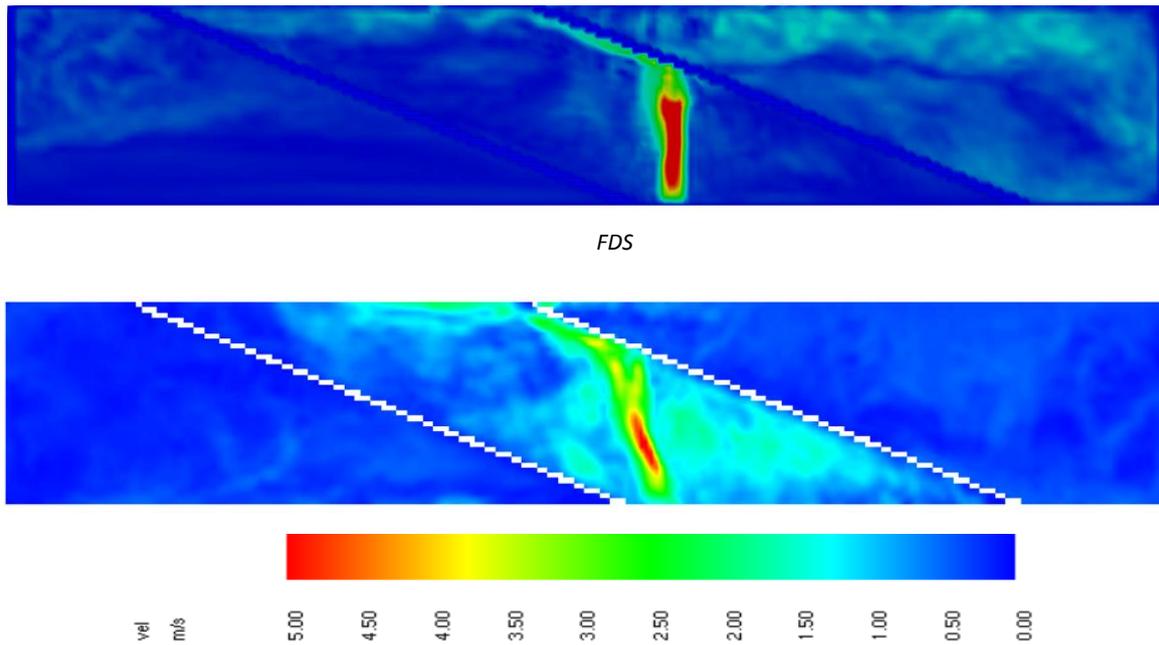


Figura 7.53 Velocità slice y=2.2m t=500s

- ✓ considerazioni:

La slice analizzata conferma quanto detto per i singoli piani passanti per le tre zone della geometria. In dettaglio si esplicitano i profili zona per zona:

- zona “left”: per l’intera simulazione la velocità ottenuta per entrambi i modelli è molto simile
- zona “central”: Nell’intero arco di simulazione FireFoam evidenzia una velocità molto elevata anche a ridosso della scala; FDS non descrive questo comportamento ma limita la velocità massima ad una quota prossima alla superficie di fiamma. Questo fenomeno è circoscritto: è valido per una ridotta variazione della coordinata x dalla sorgente e non intacca le zone laterali alla fiamma. In FDS, al contrario di FireFoam, la velocità registrata in tutta la zona al di sotto della scala destra, risulta importante ed anche più uniforme nello spazio.

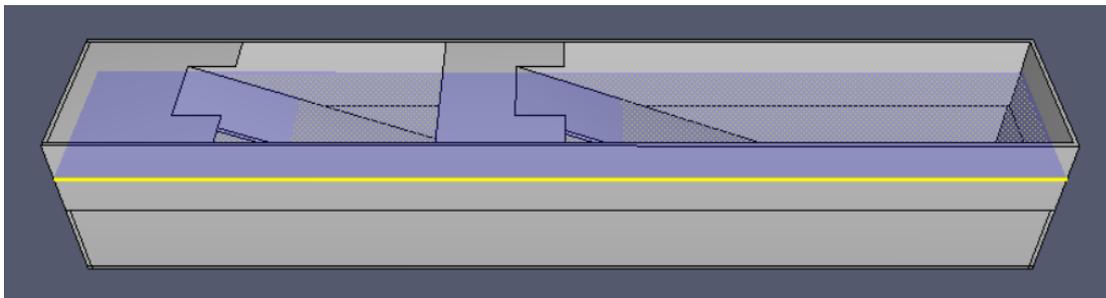
Il rallentamento dei fumi, una volta incontrata l’ostruzione, è più incisivo con Firefoam: infatti la velocità che lambisce i gradini in alto, sia per FireFoam che per FDS è simile, sebbene la velocità del pennacchio in FireFoam sia molto più alta.

L’ultima considerazione importante riguarda la velocità dei fumi prossima alla parete aperta, percepibile in maniera più evidente all’istante 100 secondi: in FDS, nella zona alta, le velocità siano molto elevate ed uniformi sul bordino esterno, a differenza di FireFoam, che presenta

un'alternanza di blu scuro e celestino. Ciò conferma quanto detto sulla più rapida fuoriuscita dei fumi in FDS.

- zona "right": si osserva un comportamento pressoché costante di FireFoam nel tempo, mentre in FDS si verifica un progressivo incremento di velocità fino a raggiungere, a fine simulazione, una condizione di quasi omogeneità.

7.2.4.5. Slice passante per $z=4.2\text{m}$

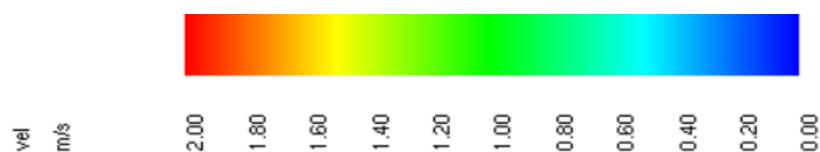
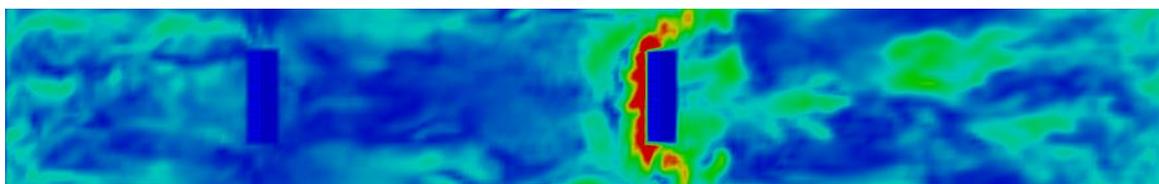


7.54 Piano $z=4.2\text{m}$

La slice in considerazione ha il compito di visualizzare le velocità in due dimensioni al una certa quota elevata dalla fiamma. Questo piano risulta passante per tutte le zone di studio della geometria.

Nelle figure successive si può quindi ammirare come, nel caso studio analizzato, si distribuiscono le velocità fissata la quota z .

- tempo di studio $t=100\text{s}$:



FDS

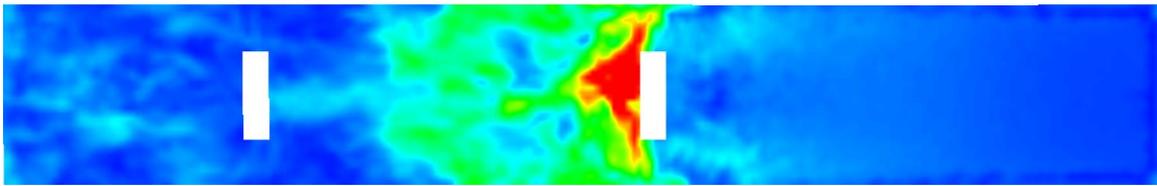
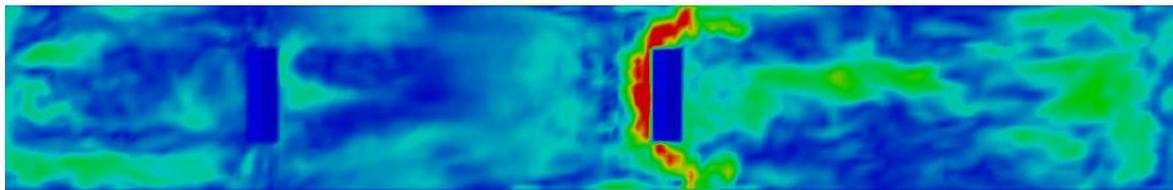


Figura 7.55 Velocità slice z=4.2m t=100s

- tempo di studio t=300s:



FDS

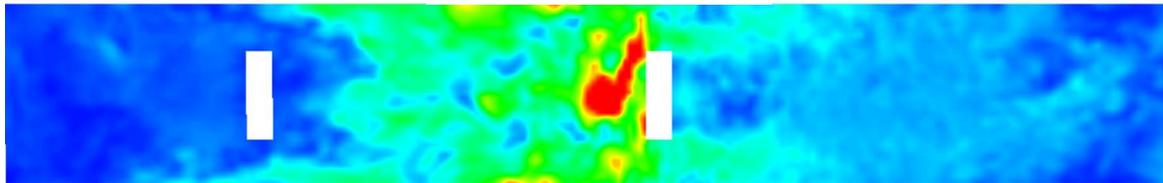
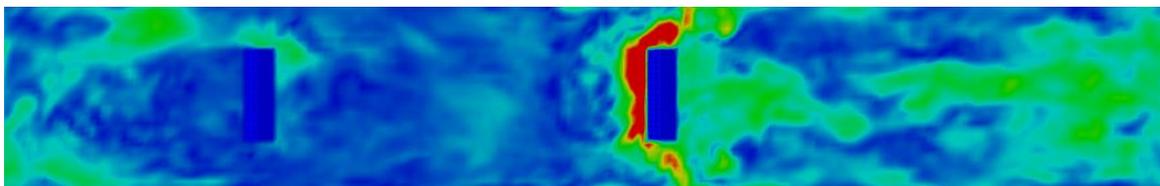


Figura 7.56 Velocità slice z=4.2m t=300s

- tempo di studio t=500s:



FDS

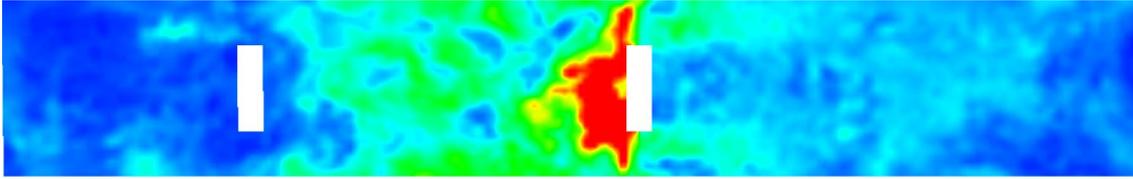


Figura 7.57 Velocità slice $z=4.2m$ $t=500s$

✓ considerazioni:

Dalla visualizzazione delle sei immagini precedenti possiamo apprezzare la velocità dei fumi nella zona alta della stanza. Tra i due programmi notiamo molte affinità e alcune differenze soprattutto nelle zone “central” e “right” come avevamo già descritto prima. In FDS, nella zona centrale, si evidenzia una macchia rossa a velocità maggiore più estesa rispetto a quella con FireFoam. Inoltre tutta la zona centrale risulta avere mediamente una velocità maggiore.

Nella zona “right” si ottiene un comportamento opposto con un profilo di velocità più elevata in FireFoam più marcato nella parte centrale.

7.3. Osservazioni conclusive sul confronto tra FireFoam e FDS

L'intera analisi condotta nel capitolo 7 ha messo in risalto alcune differenze e analogie tra i due software applicati. All'interno di questo paragrafo si vogliono riassumere alcuni concetti in modo da trarre conclusioni adeguate.

Per la geometria analizzata la temperatura mediamente risulta sempre maggiore in FireFoam tranne in qualche punto specifico della stanza e per qualche tempo di analisi. I due modelli generano una differenza di temperatura di circa 20 gradi in quasi tutti i punti del dominio computazionale.

Il pennacchio di fumo in FireFoam occupa un volume maggiore rispetto a FDS a parità di scala temperatura scelta per la rappresentazione delle slices.

Una delle differenze più importanti emerse da questo lavoro di tesi è la differente modellazione della “Open Boundary”. In FDS i fumi riescono a evadere in modo più rapido dal volume di controllo generando una riduzione media della temperatura della stanza. Ciò è stato poi

confermato dall'effettivo valore registrato di velocità in prossimità del bordo di uscita dal volume di controllo.

La simulazione della velocità nei due programmi ha mostrato notevoli analogie rispetto all'analisi condotta sulla temperatura. Le velocità maggiori sono riscontrate per FDS nelle zone "central" e "left", mentre FireFoam le legge nella zona "right".

Data la particolare importanza della simulazione della parete aperta sui risultati ottenuti si è pensato di sviluppare un ulteriore studio su un'altra geometria meno elaborata con l'obiettivo di confermare o confutare quanto detto fin qui.

Il lavoro condotto sulla nuova geometria è illustrato nel capitolo successivo 7.4.

7.4. Geometria nuova: ufficio con divisorio

La geometria utilizzata per sottolineare l'effetto delle condizioni al contorno sui risultati dei due programmi analizzati è un ufficio. Al suo interno è presente soltanto un elemento che funge da ostruzione al passaggio dei fumi: un muro divisorio (identificato nella trattazione come "splitting wall") con una porta.

Per comodità nella trattazione si identifica come "ufficio" la geometria appena introdotta, e "stazione" la geometria semplificata studiata fino ad ora.

Il dominio computazionale è possibile visualizzarlo tramite la seguente immagine.

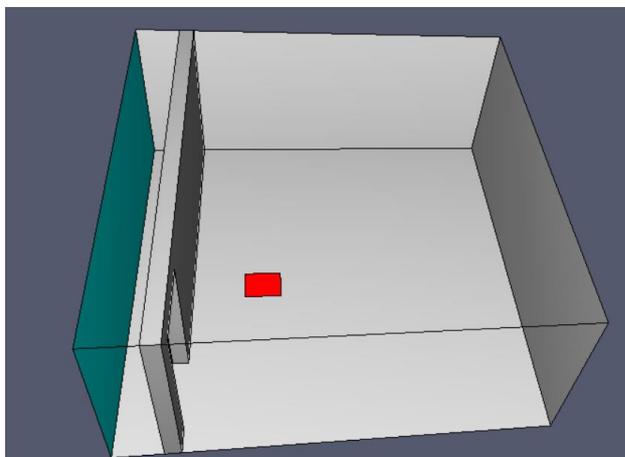


Figura 7.58 Geometria "ufficio"

Le procedure di pre-processing e post-processing vengono condotte in entrambi i programmi nella stessa maniera della stazione. Gli unici elementi che differiscono sono:

- L'HRR della sorgente di fiamma è stato diminuito notevolmente fino al valore di 100 kW, poiché il volume dell'ambiente di lavoro è anch'esso diminuito fino a 67.4 m³;
- La dimensione caratteristica della cella computazionale è pari a 0.1m;
- La simulazione è stata condotta fino a 300 secondi.
- Le condizioni al contorno imposte nei due programmi variano e si possono visualizzare con le tabelle seguenti (Tabella 7.4 e Tabella 7.5)

FIREFOAM		
Nome	Superfici	Boundary condition sulla Temperatura
Muri_stanza	sud	ZeroGradient
	est	ZeroGradient
	nord	ZeroGradient
	pavimento	ZeroGradient
	soffitto	ZeroGradient
Wallopen	ovest	type inletOutlet; inletValue uniform 300; value uniform 300;
Divisorio_baffle_master	muro interno	ZeroGradient
Divisorio_baffle_slave	muro interno	ZeroGradient
inlet	fiamma	type fixedValue; value uniform 300;

FIREFOAM		
Nome	Superfici	Boundary conditions sulla Velocità
Muri_stanza	sud	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	est	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	nord	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	pavimento	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
	soffitto	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
Wallopen	ovest	type inletOutlet; inletValue uniform (0 0 0); value uniform (0 0 0);
Divisorio_baffle_master	muro interno	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
Divisorio_baffle_slave	muro interno	type fixedValue; value uniform (0 0 0);
inlet	fiamma	type fixedValue; value uniform (0 0 0.01735);

L'orientazione scelta come sistema di riferimento per interpretare la tabella è quello mostrato nella figura 7.58 .

Rispetto al caso stazione la superficie aperta è collocata sulla parete ovest e non più nella zona alta rappresentante il "soffitto".

Per quanto riguarda FDS le condizioni al contorno vengono inserite, come fatto in passato, tramite il comando "vent", tenendo solo in considerazione la diversa collocazione della "open vent" alla parete ovest. Le restanti superfici sono simulate come "adiabatic vent".

- Il numero dei devices e le loro coordinate non corrispondono a quelli inseriti nella stazione data la totale diversità delle due geometrie.

La nuova geometria, rispetto alla quella della stazione, presenta una minore complessità dovuta alla diminuzione del volume computazionale, la riduzione degli oggetti interni alla stanza e della loro difficile realizzazione. L'unico oggetto che funge da ostruzione, come detto in precedenza, è il divisorio: a differenza delle rampe nella stazione, esso non blocca l'evoluzione del pennacchio sopra la fiamma. Infatti nella stazione la scala taglia in modo perpendicolare il fumo proveniente dal basso, invece nell'ufficio lo "splitting wall" risulta parallelo al pennacchio.

Sebbene nei due casi studio condotti (stazione e ufficio) si utilizzino gli stessi parametri di combustione, turbolenza e le definizioni delle condizioni al contorno, variandone la complessità geometrica, la simulazione comporta la modellazione di due fenomeni fisici diversi:

- quello simulato per la stazione prevede che i fumi una volta generati, muovendosi verso l'alto, vengano deviati dalla presenza della scala per poi fuoriuscire dalla parete aperta sovrastante;
- quello per l'ufficio risulta il seguente: i fumi di combustione generati, salendo verso l'alto nelle zone più fredde, si accumulano, si diffondono lateralmente fino a raggiungere la porta per poi fuoriuscire grazie all' "open vent" adiacente al divisorio.

Dopo aver introdotto le motivazioni della scelta della nuova geometria, si riassumono in breve gli studi condotti sui risultati ottenuti dalle simulazioni:

- Studio dei profili di temperatura puntiforme fino a 300s.
- Studio dei profili di temperatura 1D nell'intera simulazione;
- Visualizzazione della temperatura in due dimensioni attraverso le slices;

- Confronto dei profili della velocità totale in due dimensioni utilizzando le slices.

7.4.1 Studio dei profili di temperatura puntiforme:

La posizione dei detectors all'interno della stanza è stata pensata in modo da coprire il maggior numero di aree della mesh possibili.

I detectors analizzati sono localizzati nelle seguenti posizioni (Tabella 7.6):

Nome devices	Coordinata X[m]	Coordinata Y[m]	Coordinata Z [m]
THCP	2.7	-0.4	0.5
THCP01	1.7	1.4	0.5
THCP02	0.7	1.4	0.5
THCP03	3.7	1.4	0.5
THCP04	4.7	1.4	0.5
THCP05	2.7	1.4	1.0
THCP06	2.7	1.4	1.5
THCP07	2.7	1.4	2.0
THCP08	4.8	4.0	1.0
THCP09	2.7	1.4	0.5
THCP10	2.7	2.4	0.5
THCP11	2.7	3.4	0.5
THCP12	0.8	4.0	1.0
THCP13	0.8	-0.4	1.0
THCP14	4.8	-0.4	1.0

La posizione dei devices si visualizza attraverso queste immagini scattate direttamente nella schermata di lavoro di Pyrosim; la prima è una vista dall'alto e la seconda è una vista laterale in 3D.

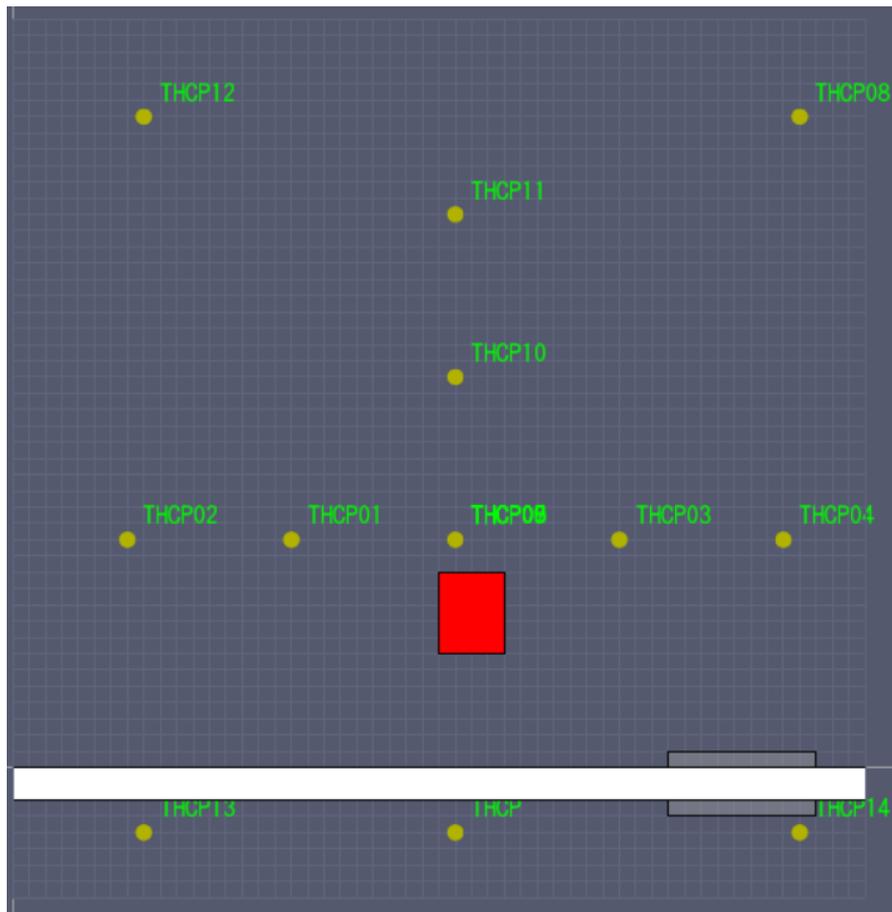


Figura 7.59 Devices in Pianta

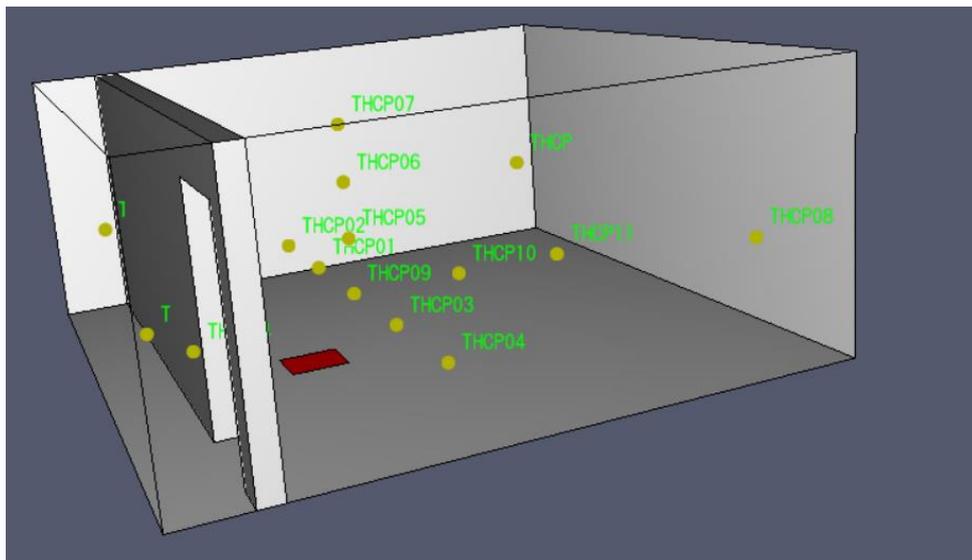


Figura 7.60 Devices in 3D

Per facilitare la comprensione dei risultati sono state denominate: zona “right splitting wall” quella a destra divisorio e zona “left splitting wall” quella a sinistra dello stesso.

All’interno della zona “right splitting wall” troviamo i seguenti devices raggruppati di sei in sei a partire dall’estrema destra dell’immagine. Nel primo grafico troviamo i detectors: THCP08, THCP12, THCP11, THCP10, THCP09 e THCP07 visualizzabili tramite il seguente zoom.

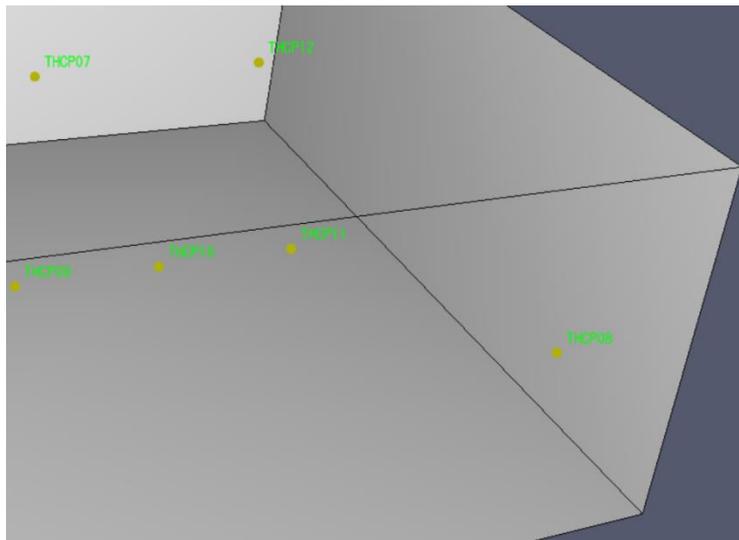


Figura 7.61 Zoom Devices Right splitting Wall

Andamento delle temperature: zona "right splitting wall"

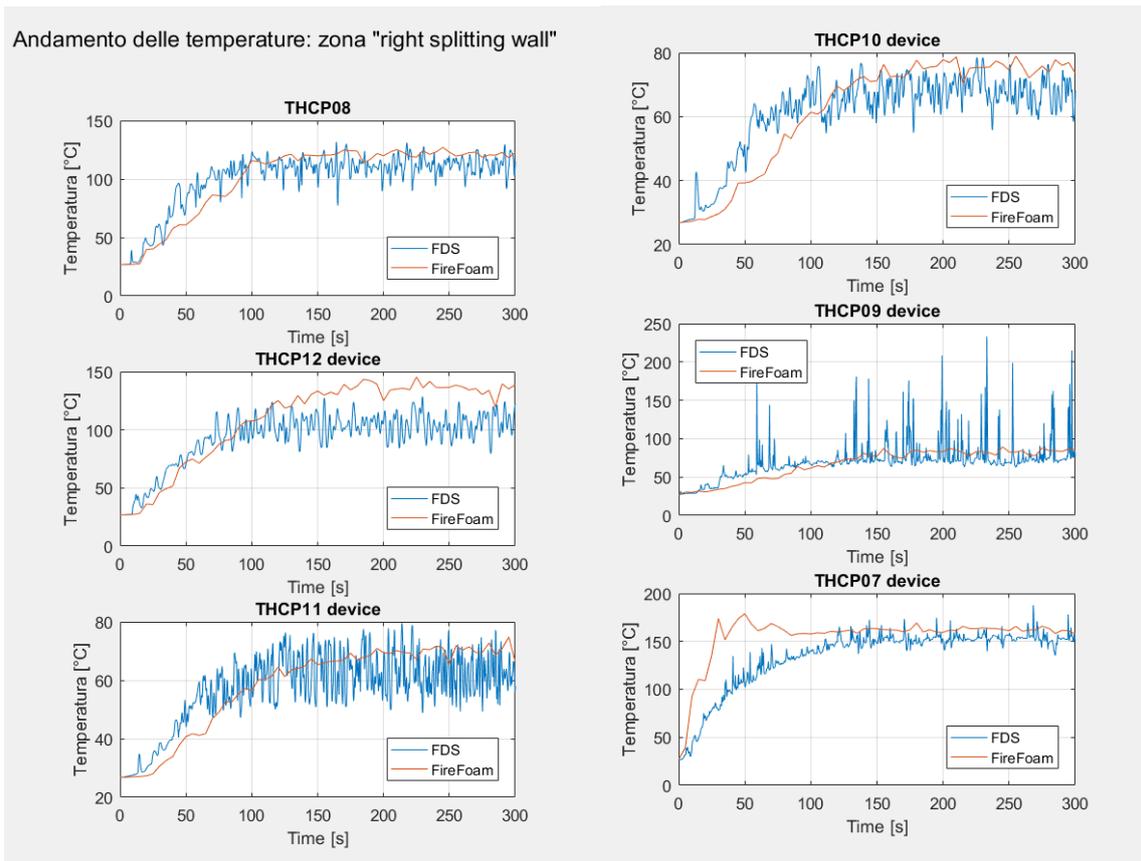


Figura 7.62 Andamento Temperatura Right splitting Wall

Il secondo gruppo di rilevatori contiene: THCP06, THCP05, THCP04, THCP03, THCP01 e THCP02

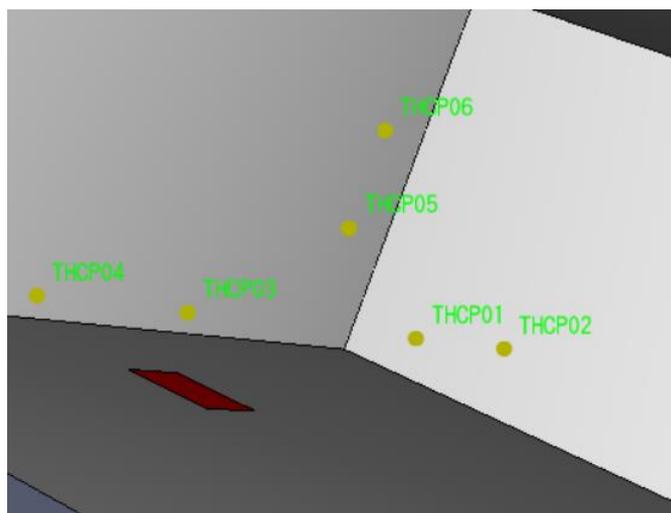


Figura 7.63 Zoom Devices 3D

Andamento delle temperature: zona "right splitting wall"

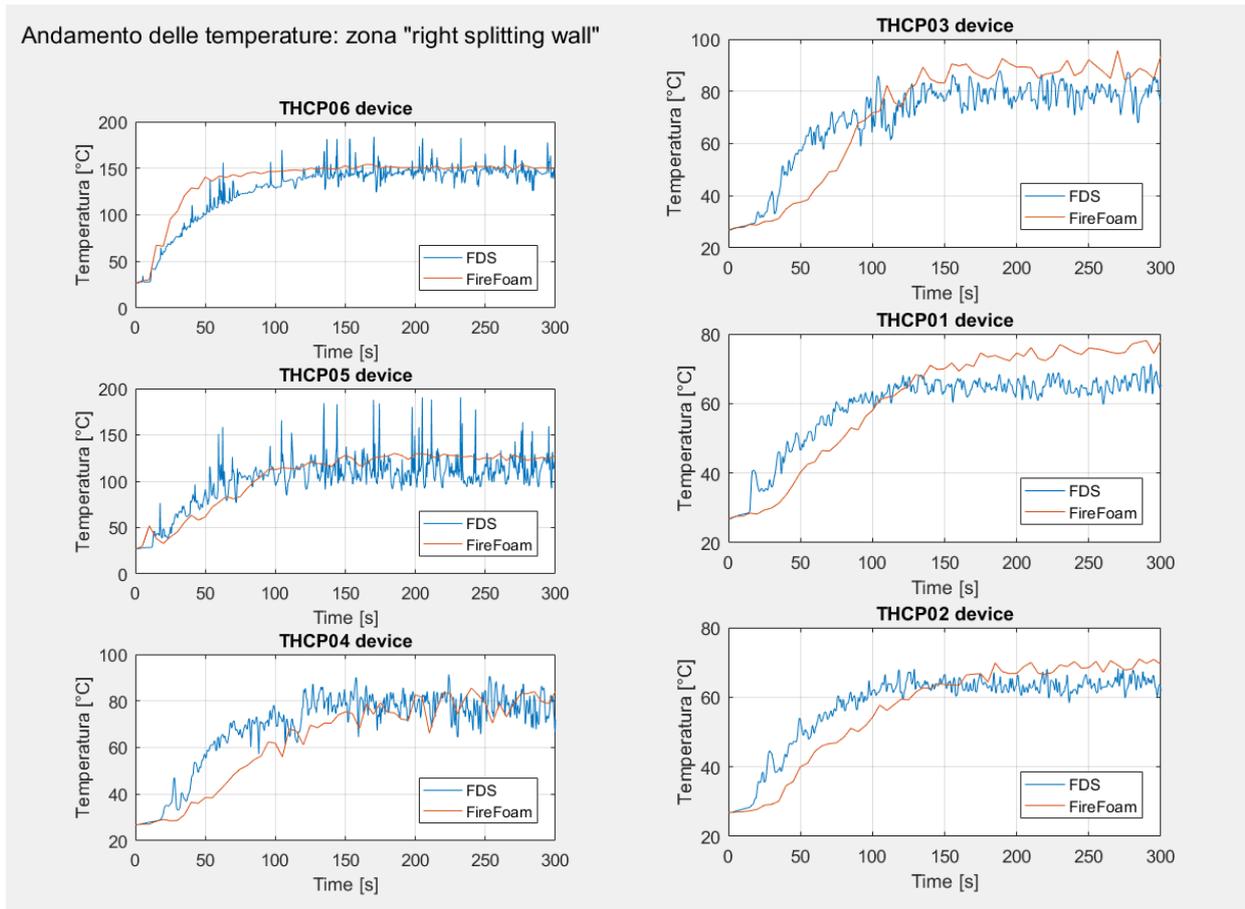


Figura 7.64 Andamento Temperatura Right splitting wall

A differenza di quanto visto per la stazione, i profili di temperatura risultano molto simili tra i due modelli di simulazione, in particolare si osserva come in FDS l'andamento sia molto frastagliato. In alcuni rilevatori, come per esempio il THCP05, la variazione della temperatura raggiunge anche i 100 gradi tra uno step temporale e l'altro.

In questa simulazione la temperatura media registrata in FireFoam risulta maggiore di quella in FDS dopo circa metà elaborazione. Gli unici due devices che non rispecchiano questo andamento sono il THCP06 e THCP07. Questi due strumenti si trovano entrambi nella zona alta della stanza sopra la sorgente di fiamma.

Una volta terminato lo studio nella zona "right splitting wall" si passa ad analizzare i profili di temperatura nell'area oltre il divisorio denominata "left splitting wall". In questa zona troviamo solo tre devices: THCP14, THCP e THCP14 visualizzabili tramite la figura sottostante.

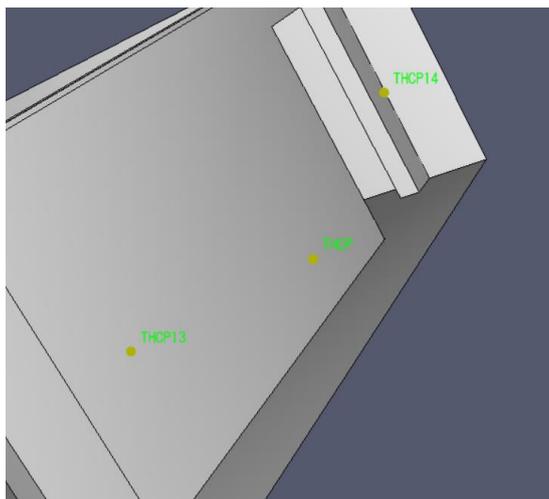


Figura 7.65 Zoom Devices 3DLeft splitting Wall

Di seguito verranno visualizzate le risposte dei devices in questione:

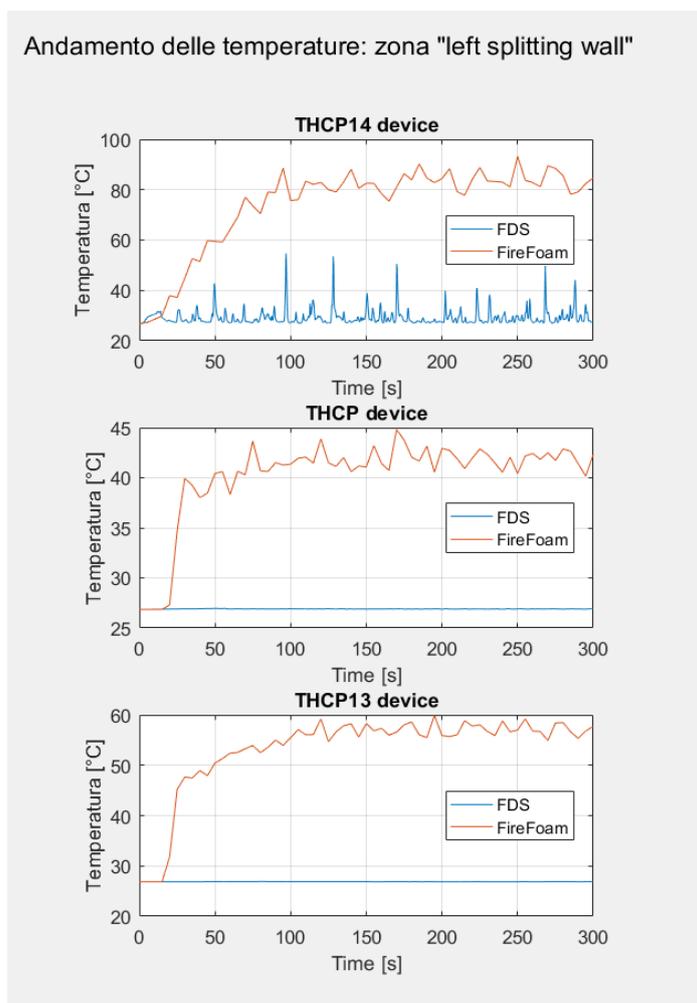


Figura 7.66 Andamento Temperatura left splitting Wall

Rispetto agli andamenti ottenuti per la zona “right splitting wall”, in questa osserviamo una differenza notevole dei profili di temperatura. Si nota in FDS una temperatura circa costante e pari a quella di inizio simulazione (26.85 °C) nei devices THCP e THCP13, i più lontani dalla porta. Il rilevatore THCP14 registra picchi di circa 20 gradi tra il valore medio ed il massimo poiché situato vicino alla zona di passaggio dei fumi.

A conferma di questi comportamenti si visualizzano con Paraview i risultati in 3D di FireFoam e con smokeview i risultati in 3D di FDS.

FDS

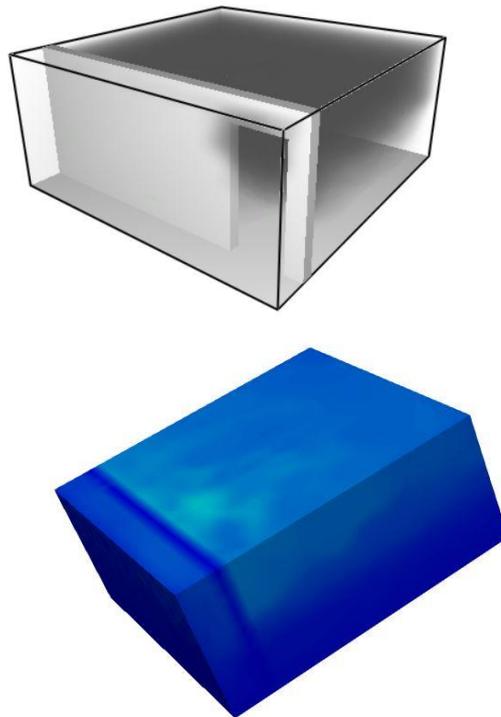


Figura 7.67 Results 3D software

Tramite le due immagini precedenti è possibile notare:

- In FDS, tramite la propagazione dei fumi, si osserva come la fuliggine non riesca ad accumularsi nella zona “left splitting wall” stabilendo una temperatura pari circa a quella iniziale.
- In FireFoam sono plottati i profili di temperatura 3D registrate sulle pareti esterne del dominio: la zona non è interamente in blu scuro, corrispondente alla temperatura iniziale, ma si colora di celestino pari ad una temperatura maggiore.

Nei due programmi lo studio dei profili di temperatura puntiforme ha permesso di confermare che questi siano molto simili quando si lavora con pareti chiuse adiabatiche e portino a risultati diversi in prossimità di pareti aperte.

7.4.2. Studio dei profili di temperatura 1D

Lo studio 1D della temperatura è condotto lungo due direzioni specifiche: la coordinata z e la coordinata y.

Per studiare la temperatura lungo la direzione z andiamo si analizzano i devices localizzati in colonna sopra la sorgente di fiamma: THCP09, THCP05, THCP06, THCP07 (Tabella 7.7).

Nome devices	Coordinata X[m]	Coordinata Y[m]	Coordinata Z [m]
THCP09	2.7	1.4	0.5
THCP05	2.7	1.4	1.0
THCP06	2.7	1.4	1.5
THCP07	2.7	1.4	2.0

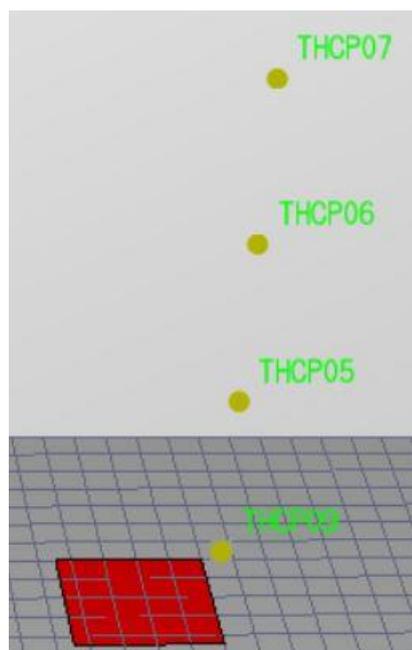


Figura 7.68 Devices in colonna

Di seguito si possono visualizzare le risposte di questi devices in due istanti di tempo: 100 s e 300 s. Nei due grafici i quattro rilevatori sono rappresentati con dei cerchi, ed è supposto che l'andamento nelle zone intermedie tra due detectors adiacenti sia continuo.

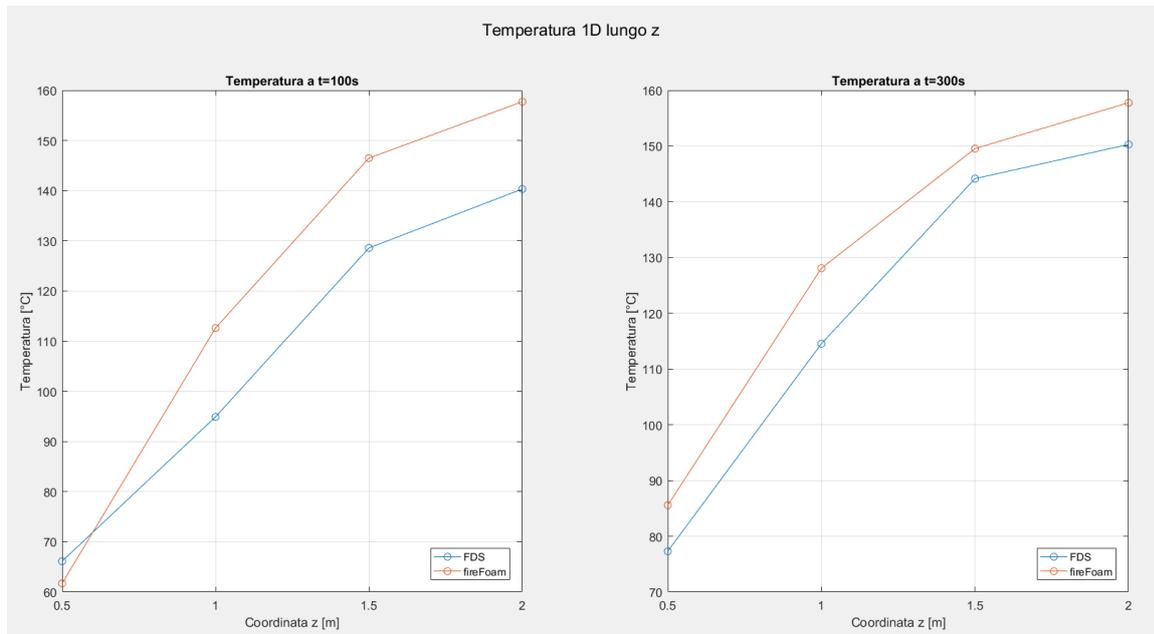


Figura 7.69 Andamento Temperatura 1D lungo z

Al variare dell'altezza l'andamento della temperatura nei due programmi è simile, ciò garantisce un'analogia pendenza delle curve registrata per ogni coppia di devices. A fine simulazione ogni rilevatore misura una differenza di circa 10 °C nei due programmi.

Si riscontra all'aumentare dell'altezza un incremento di temperatura comparabile per entrambi i programmi, ciò conferma la reale dinamica del problema: una volta superato un certo lasso di tempo, il fenomeno dell'accumulo dei fumi prevale sull'effetto della combustione in prossimità della superficie di fiamma.

Per visualizzare la temperatura lungo la coordinata y si studiano i devices localizzati in riga ad una altezza di mezzo metro da terra. I detectors di riferimento in questo caso sono THCP, THCP09, THCP10, THCP11. Il primo è collocato nella zona a ridosso della parete aperta.

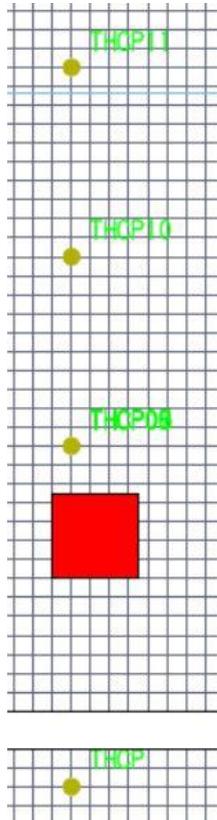


Figura 7.70 Devices in riga

Si riscontrano le risposte di questi devices a 100s e 300s:

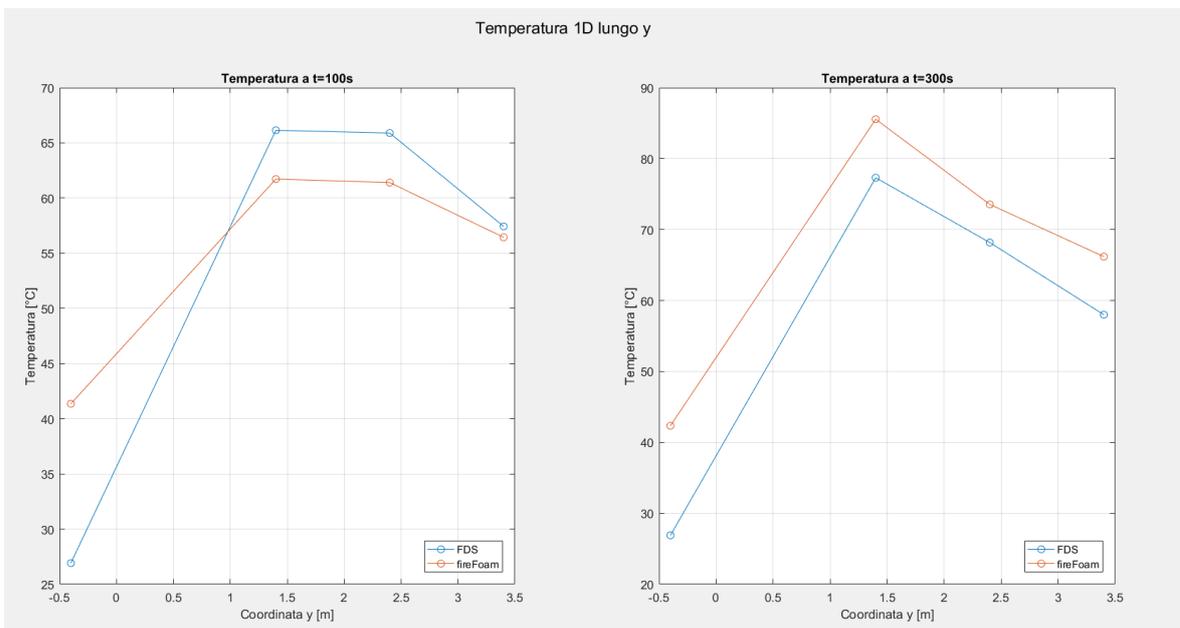


Figura 7.71 Andamento Temperatura 1D lungo y

I profili a 300s siano pressoché uguali e traslati di circa 15 °C. A 100s, come detto in precedenza, la temperatura media in FDS risulta sempre più alta di quella di FireFoam tranne per il device posto nella zona “left splitting wall”.

Le curve rappresentate identificano correttamente la presenza di un massimo nella coordinata y più vicino a quella della fiamma.

7.4.3. Visualizzazione della temperatura 2D

Per lo studio 2D si applica soltanto una slice che taglia trasversalmente le due zone passante per la superficie di fiamma, in modo da mettere in risalto sia l’evoluzione del pennacchio sia la differenza di temperatura tra la zona “right splitting wall” e “left splitting wall”.

Il piano di studio è passante per $x=2.8m$ e visualizzabile tramite la seguente immagine:

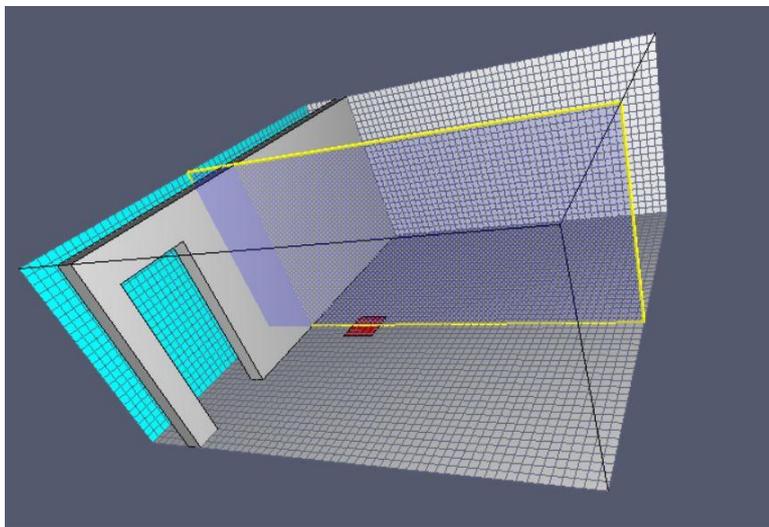
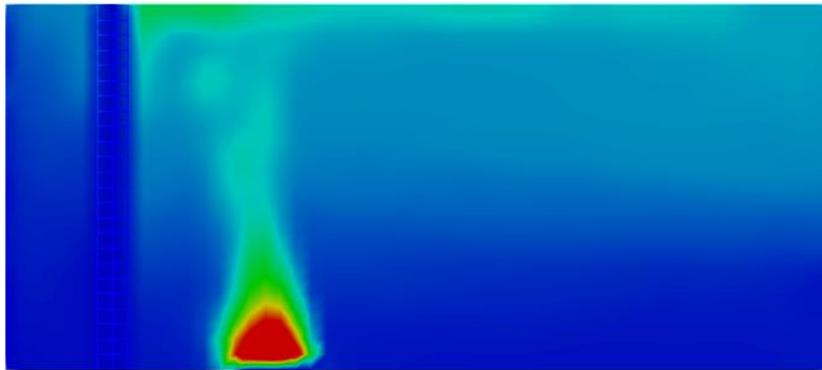


Figura 7.72 Piano $x=2.8m$

L’evoluzione 2D della temperatura è condotta a due istanti di tempo fissi: 100s e 300s, fine simulazione.

o per t=100s:



temp
°C



FDS

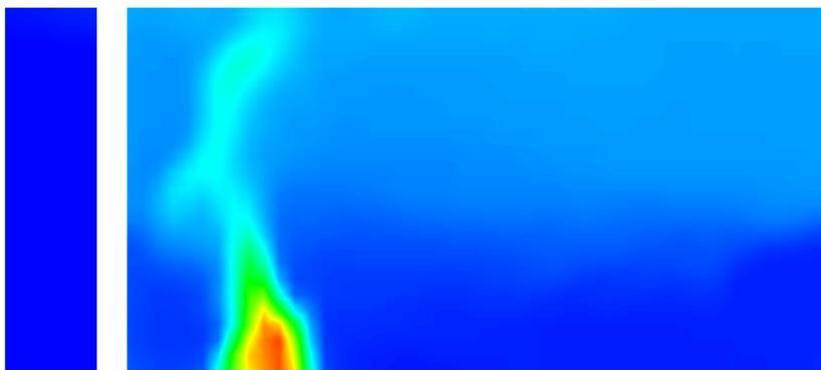
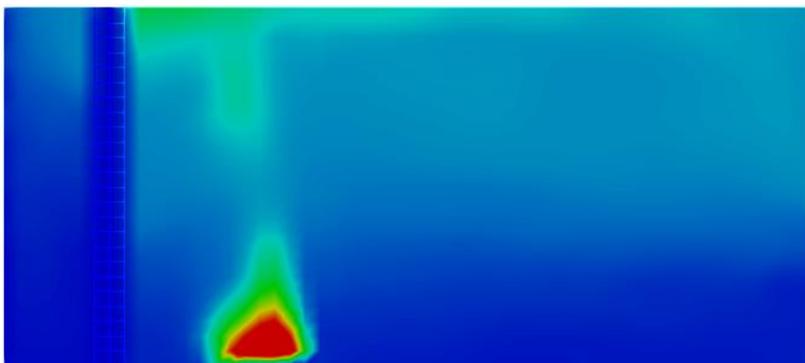


Figura 7.73 Temperatura slice x=2.8m t=100s

o t=300s:



temp
°C

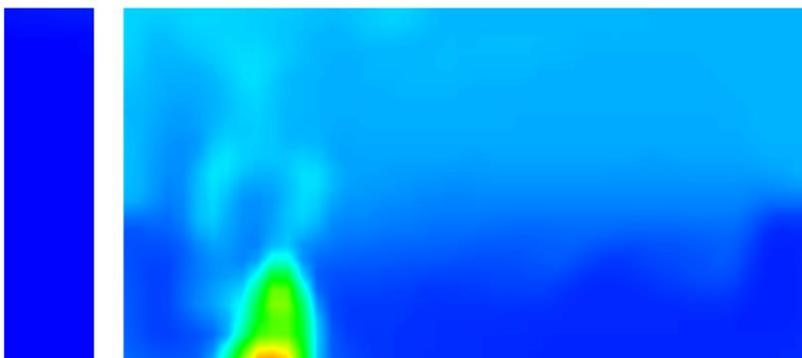


Figura 7.74 Temperatura slice x=2.8m t=300s

✓ considerazioni

Lo studio è condotto fissando la coordinata x e, visualizzando le temperature lungo il piano $y-z$, ha portato alle seguenti conclusioni:

- Si nota un pennacchio con base molto più calda in FireFoam, come succedeva anche per la stazione, sia a 100 che 300 secondi. Si osserva però che la punta massima di esso abbia in entrambi i programmi circa la stessa temperatura.
- a $t=100s$ si visualizza una temperatura in FDS in quasi tutta la stanza di colore celestino acceso, che comparata con il grafico di FireFoam, risulta maggiore. Questo conferma quanto registrato dei devices nell'analisi puntiforme.
- In FireFoam si nota una zona di maggiore stagnazione dei fumi a ridosso del divisorio che comporta un aumento notevole di temperatura.
- L'ultima considerazione utile di quest'analisi riguarda il comportamento delle temperature nella zona "left splitting wall" dove queste in FDS risultano di colore blu scuro a differenza di FireFoam. Tale effetto è più pronunciato in quest'ultimo programma nella zona più alta della stanza e conferma la più lenta fuoriuscita dei fumi dal volume di controllo.

7.4.4. Visualizzazione del profilo di velocità 2D

I profili di velocità, come fatto per la stazione, vengono mostrati soltanto tramite il comando "slice" per studiare il comportamento 2D. Per l'analisi sulla velocità si plotta quella totale per il piano passante per $x=4.5m$. Si è scelto questo piano in modo da osservare sia la velocità con cui i fumi scappano del dominio computazionale sia l'influenza della porta sul percorso di questi.

Il piano $x=4.5$ è mostrato nell'immagine sottostante.

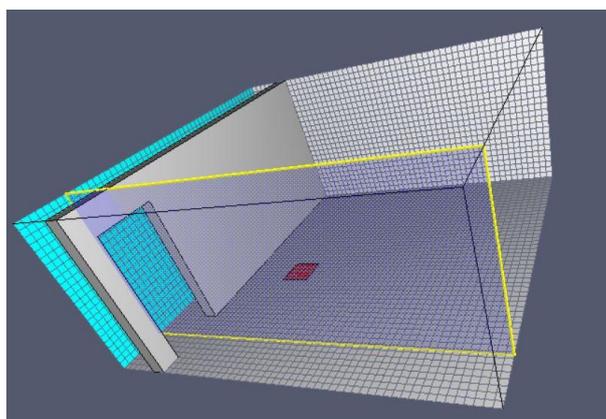


Figura 7.75 Piano $x=4.5m$

Per lo studio si sono utilizzati gli stessi istanti temporali dell'analisi sulla velocità.

○ t=100s:

FDS

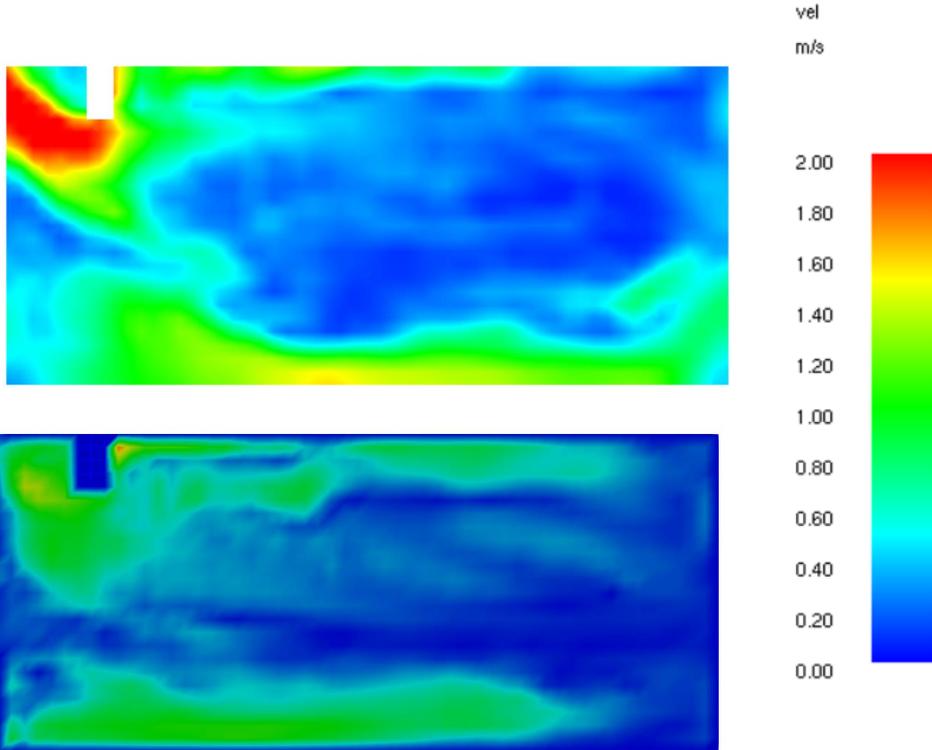


Figura 7.76 Temperatura slice x=4.5m t=100s

○ t=300s

FDS

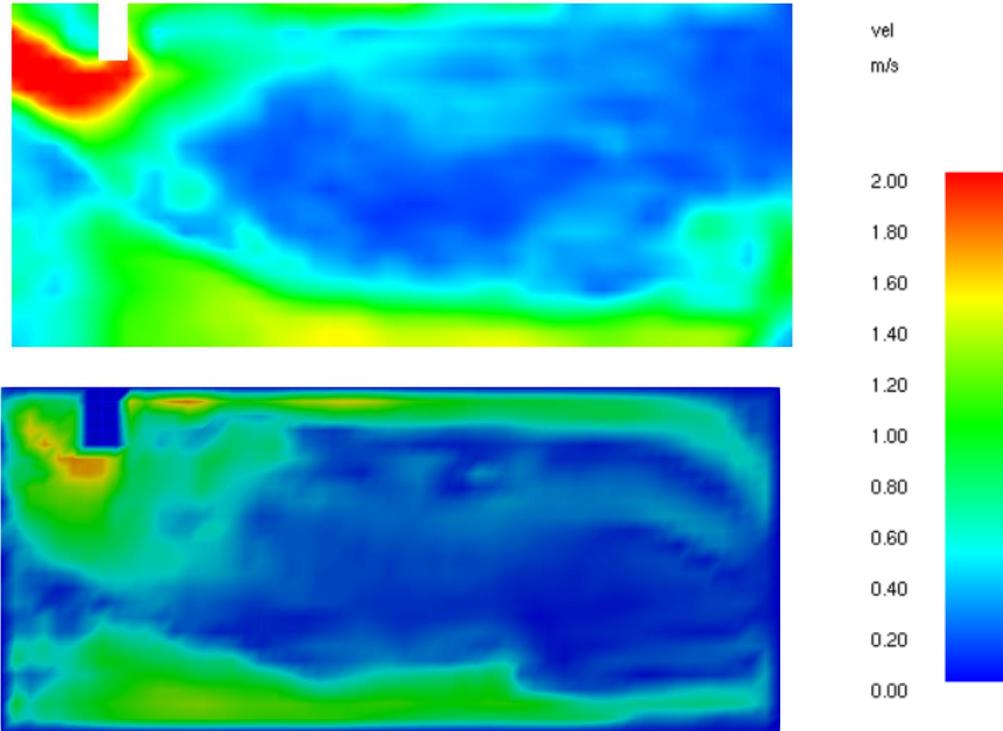


Figura 7.77 Temperatura slice x=2.8m t=300s

✓ considerazioni

I profili di velocità, calcolati sia a 100s che a 300s nei due programmi, evidenziano la stessa distribuzione della grandezza nella stanza. In entrambe le immagini, nella zona alta e bassa, in verdino sono riscontrabili le velocità maggiori, ed in particolare quella massima a ridosso del telaio della porta.

Per la zona “left slipping wall” si osserva una notevole differenza nella zona alta della slice dove vi è la fuoriuscita dei fumi: la velocità raggiunta in FDS in tutti i punti prossimi alla parete è maggiore rispetto a quella registrata in FireFoam. Ciò conferma quanto predetto sulla fuoriuscita più rapida dei fumi.

Nella zona a sinistra del divisorio anche la parte a bassa quota in z presenta una velocità mediamente maggiore in FDS, tranne per una piccola porzione del grafico in prossimità del pavimento.

CAPITOLO 8: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro di tesi è stato condotto con lo scopo di riscontrare analogie e differenze nella modellazione di incendi tra: FDS e FireFoam. Le analisi sono state condotte all'interno di una geometria molto complessa costituita da numerose ostruzioni. La realizzazione degli oggetti interni al dominio computazionale si è riscontrata molto difficoltosa, soprattutto in FireFoam attraverso la creazione dei "baffles".

Inizialmente la fase di pre-processing è stata compilata: corretta creazione della mesh e delle ostruzioni interne, adeguata impostazione delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali. Esaurita questa fase la simulazione è stata lanciata. Non è stato possibile studiare la geometria completa dato l'elevato costo computazionale richiesto, perciò si è diminuito il dominio nello spazio ottenendo la geometria semplificata. L'analisi dei risultati ha evidenziato una analoga distribuzione della velocità all'interno della geometria ed una netta differenza nei profili termici. Lo studio condotto ha attribuito la causa principale di tale disparità alla modellazione della "open boundary". Per confermare le deduzioni si è analizzato un secondo caso studio: l'"ufficio".

Grazie a quest'ultima simulazione si è constatato effettivamente che la parete aperta crea una forte disuguaglianza sui profili termici ottenuti con i due software. Tale disuguaglianza non si registra quando si eseguono ambienti delimitati da pareti chiuse adiabatiche. Si è dedotta una correlazione tra la velocità e la temperatura nel dominio in FDS: quando la velocità è elevata a ridosso della parete aperta la temperatura che si registra nelle limitrofe ad essa è più bassa. FireFoam, invece, non interpreta correttamente questo fenomeno, infatti registra vicino la parete aperta una temperatura più alta.

Approfondendo le abilità di FireFoam si è venuti a conoscenza di una vasta scelta tra i modelli da applicare a ogni tipo di fenomeno, dalla turbolenza fino alla combustione. Ciò determina per il programmatore una competenza del software più profonda, al contrario di FDS che risulta più immediato e maneggiabile.

Uno degli aspetti più rilevanti nel confronto tra i due software è l'eccessivo costo computazionale di FireFoam.

Dato il lavoro di tesi si è dimostrato che l'utilizzo di FDS risulta più diffuso per le simulazioni di incendio sebbene presenti alcune limitazioni nel campo di applicazione:

- si può lavorare con fluidi con numero di Mach inferiori a 0.3, non è utilizzato quindi per simulare esplosioni e detonazioni;
- non si possono rappresentare linee curve o oblique poiché si utilizza una griglia computazionale rettilinea;
- quando la simulazione richiede il calcolo indiretto del parametro $\dot{H}RR$ si ottiene una soluzione poco accurata. [4]

Dopo aver elencato queste limitazioni FDS risulta, nel lavoro condotto, quello che meglio simula il comportamento reale della propagazione dei fumi determinando una più corretta distribuzione della temperatura e della velocità.

Per concludere si vogliono proporre possibili soluzioni e idee da sviluppare nelle progetti future:

- implementare un codice con FireFoam che contenga le proprietà di trasmissione di calore delle pareti interne ed esterne del dominio in modo da poter osservare le grandezze termodinamiche in luoghi chiusi con pareti non adiabatiche;
- variare le condizioni al contorno applicate alle pareti aperte in modo da ottenere un comportamento più veritiero dei fumi;
- utilizzare diversi modelli di turbolenza e di combustione tra quelli proposti da FireFoam ed osservare la variazione dei profili di velocità e temperatura;
- sviluppare un software che permetta una più rapida elaborazione della fase di pre-processing con FireFoam;
- sviluppare una guida per il solver FireFoam, poiché attualmente è presente solo quella generica di OpenFoam. Una delle maggiori difficoltà è la conoscenza dei vari "tools" di FireFoam. L'unica fonte che descrive parte dei codici di programmazione è un forum per di più datato.
- Sviluppare dei modelli risolutivi alternativi per rendere i tempi di calcolo con FireFoam più accettabili.

Bibliografia

1. <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/10/30/15A08046/sg>
(allegato I)
2. http://www.dits-roma.it/sef/sites/default/files/S3-2_SEF15-DiMario.pdf
3. <http://www.ingegneri.info/news/innovazione-e-tecnologia/fluidodinamica-computazionale-cfd-applicazioni-comuni-e-software/>
4. Tesi su “Convalida di un modello CFD per l’analisi delle conseguenze di incendi in ambienti confinati” di Giovanni Costingo e Lucio Zampollo.
5. <https://www.12vda.it/cronaca/lutti/quindici-anni-fa-il-rogo-del-traforo-del-monte-bianco-il-ricordo-delle-39-vittime-e-la/>
6. http://ricerca.repubblica.it/repubblica/archivio/repubblica/2000/11/12/il-tunnel-della-morte.html?refresh_ce/
7. https://it.wikipedia.org/wiki/Incidente_ferroviano_di_Viareggio/
8. https://www.iene.mediaset.it/video/il-treno-che-ha-ucciso-32-persone_10808.shtml/
9. <https://cfd.direct/openfoam/about/>
10. [https://it.wikipedia.org/wiki/Scala di Kolmogorov](https://it.wikipedia.org/wiki/Scala_di_Kolmogorov)
11. [https://it.wikipedia.org/wiki/Fluidodinamica computazionale](https://it.wikipedia.org/wiki/Fluidodinamica_computazionale)
12. <http://www.vigilfuoco.it/sitiComandi/GestioneSiti/downloadFile.asp?s=43&f=42828/>
13. http://www.eteasicurezza.it/dati/pagine/consequence_analysis_04%20Incendi.pdf
14. <https://it.wikipedia.org/wiki/Fiamma>
15. <http://www.chimica-online.it/download/potere-calorifico.htm/>
16. <http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/9330P/combustibili.pdf>
17. http://www1.diccism.unipi.it/Nicolella_Cristiano/chimica_applicata/lezioni/lezioni_pdf/11_Combustione.pdf

18. http://www.ausl.rn.it/Materiali/lavorare_sicurezza/i_prodotti_della_combustione.html
19. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/92644>
20. <http://www.youmath.it/lezioni/fisica/idrostatica-fluidodinamica/3221-equazione-di-continuita.html>
21. <http://www.youmath.it/lezioni/fisica/dinamica/2997-conservazione-quantita-di-moto.html>
22. https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_totale
23. https://it.wikipedia.org/wiki/Fluido_newtoniano
24. https://it.wikipedia.org/wiki/Numero_di_Reynolds
25. https://translate.google.it/translate?hl=it&sl=en&u=https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_cascade&prev=search
26. https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/88802/1/2013_12_Citterio_Spessi.pdf
27. <http://www.va.minambiente.it/File/Documento/105592>
28. http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/centrali-carbone-rendimenti/rse111.pdf
29. <http://www.combustion-institute.it/proceedings/MCS-7/papers/TC/TC-19.pdf>
30. <https://biblio.ugent.be/publication/8510025/file/8510027.pdf>
31. http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783319028354-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1488865-p176301177
32. http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_5/449_468_x7_3_Incendi_x_it_a.pdf
33. <https://www.tesionline.it/v2/glossary.jsp?id=5669>
34. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/running-applications-parallel/>

