

POLITECNICO DI TORINO



**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Matematica - Modelli Matematici e Simulazioni Numeriche**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio e analisi di incendi in galleria:
confronto tra modelli CFD, 1D, volume di controllo e multiscala**

Relatore

Prof. Luigi Preziosi

Tutor aziendale

Ing. Rugiada Scozzari

Candidato

Federica Ciliberto

Matricola 315069

Anno Accademico 2023/2024

Indice

1 Incendi in galleria	5
1.1 Le fasi dell'incendio	6
1.2 Stratificazione dei fumi	7
1.2.1 Altezza dello strato di fumo	9
1.2.2 Modelli di stratificazione di fumi	10
1.3 Ventilazione	11
1.3.1 Ventilazione in caso di incendio	13
1.4 Impianti e sistemi di supporto	13
2 Modelli CFD, 1D, volume di controllo e multi-scala	15
2.1 Modelli CFD	15
2.1.1 Modello matematico	16
2.1.2 Condizioni generali	20
2.2 Modelli 1D	21
2.2.1 Modello matematico	22
2.2.2 Struttura di rete	23
2.2.3 Modello termico	25
2.3 Modellazione tramite volume di controllo	26
2.3.1 Equazioni di conservazione	27
2.3.2 Sottomodelli di trasferimento di calore e di massa	28
2.4 Modello multi-scala	31
2.4.1 Decomposizione del dominio	31
2.5 Algoritmo dell'accoppiamento 1D-3D	33
2.5.1 Condizioni al contorno	34

3	Velocità del fronte dei fumi e simulazioni in Pyrosim	37
3.1	Velocità del fronte dei fumi	37
3.1.1	Caratteristiche e condizioni iniziali	38
3.1.2	Analisi dei dati	39
3.2	Simulazioni Pyrosim	41
3.2.1	Caratteristiche e condizioni iniziali	41
3.2.2	Analisi dei risultati	43
3.2.3	Commenti	53

Abstract

Il seguente elaborato si propone di analizzare gli incendi in galleria e i modelli che vengono utilizzati per rappresentarli e studiarli. A tal fine verranno anche presentati i risultati di simulazioni di incendi nei tunnel.

Gli incendi in galleria sono fenomeni pericolosi e difficili da prevedere. Attraverso la loro simulazione o riproducendo incendi già avvenuti è possibile, però, studiare meglio il fenomeno caso per caso e apportare i dovuti sistemi salvavita nei diversi tunnel.

Nel primo capitolo verranno analizzati gli incendi nei tunnel, il fenomeno della stratificazione dei fumi e i sistemi di ventilazione. La stratificazione dei fumi è estremamente importante in quanto legata all'evacuazione della galleria per cui verranno descritte le caratteristiche principali del processo di stratificazione e i modelli matematici che possono descriverlo. Verranno poi trattate le diverse tipologie di sistemi di ventilazione e la ventilazione necessaria in caso di incendio.

Nel secondo capitolo verranno definiti e descritti i modelli utilizzati per le simulazioni di incendi in galleria, le loro caratteristiche principali e i pro e i contro di ciascun modello. Il primo modello analizzato è il modello CFD che è molto più affidabile e completo ma con tempi di calcolo eccessivamente elevati.

Si procede poi con il modello 1D che risulta facile e pratico da utilizzare ma poco efficiente, utile per chi necessita di fare diverse simulazioni senza ottenere risultati molto precisi.

La modellazione tramite volume di controllo divide in volumi la galleria e analizza ciascun volume singolarmente.

Infine il modello multiscala sfrutta le potenzialità del modello 1D e del modello CFD, utilizzando quest'ultimo solo nella zona dell'incendio e simulando il resto della galleria tramite il modello 1D, così da avere il giusto equilibrio tra costo computazionale e accuratezza dei risultati.

Nell'ultimo capitolo sono stati descritti due attività svolte nel mio percorso di tirocinio presso CANTENE SRL. La prima riguarda la valutazione della velocità del fronte dei fumi per casi specifici e con dati assegnati. La seconda attività riguarda, invece, la simulazione di alcuni scenari attraverso il software Pyrosim, la realizzazione delle gallerie con le loro caratteristiche e l'analisi e il confronto dei risultati alla fine delle simulazioni. Nello specifico sono stati confrontati i valori delle temperature ottenute con il modello 3D e i risultati presi da un modello 1D e le lunghezze di backlayering delle gallerie prese in esame, dove per backlayering si intende lo spostamento dei fumi verso monte rispetto al punto d'innesco dell'incendio.

Capitolo 1

Incendi in galleria

Gli incendi in galleria possono causare eventi catastrofici e per questo motivo suscitano molto interesse in diversi ambiti. Sono oggetto di studio in svariati campi con l'obiettivo comune di mitigare i danni che possono causare. Infatti, nonostante abbiamo basse probabilità di verificarsi, sono certamente gli eventi stradali più pericolosi.

Anno	Galleria	Lunghezza	Vittime
1978	Velsen(Paesi Bassi)	770m	5 morti e 5 feriti
1979	Nihonzaka(Giappone)	2km	7 morti e 2 feriti
1980	Sakai(Giappone)	460m	5 morti e 5 feriti
1982	Caldecott(USA)	1.1km	7 morti e 2 feriti
1983	Pecorile(vicino Genova, Italia)	660m	9 morti e 22 feriti
1996	Isola delle Femmine(Italia)	148m	5 morti e 20 feriti
1999	Monte Bianco(Francia - Italia)	11.6km	39 morti
1999	Tauern(Austria)	6.4km	12 morti e 40 feriti
2001	Gleinalm(Austria)	8.3km	5 morti e 4 feriti
2001	San Gottardo(Svizzera)	16.9km	11 morti
2006	Galleria Viamale(Svizzera)	750m	9 morti e 6 feriti
2010	Wuxi Lihu(Cina)	10.95km	24 morti e 19 feriti
2014	Yanhou(Cina)	-	31 morti

Tabella 1.1: Incendi in galleria con almeno 5 morti negli ultimi 50 anni

Nella Tabella 1.1 sono indicati gli incendi con un numero di decessi superiore o uguale a 5 dal 1950.

Le Linee Guida ANAS 2009 identificano 5 tipologie di episodi che possono accadere in galleria:

- eventi di incendio;
- eventi di collisione che degenerano in eventi di incendio;
- eventi di sversamento di combustibili liquidi infiammabili;
- eventi di detonazione o deflagrazione;
- eventi di rilascio di sostanze tossiche e nocive.

Dati del PIARC (Associazione mondiale della strada) informano che la zona con più alto rischio di incidenti è rappresentata dai primi 150 *m* di un tunnel e la probabilità che avvenga un incidente è più alta nelle gallerie più corte. D'altro canto però maggiore è la lunghezza delle gallerie maggiore è la gravità delle conseguenze.

Contrariamente a quanto si potrebbe pensare i tunnel unidirezionali sono molto più rischiosi rispetto a quelli con due sensi di marcia in quanto il conducente si sente più rilassato e quindi più incline a commettere errori. Altri fattori di rischio sono la pendenza della galleria e il cambio del numero di corsie infatti, una diminuzione del numero di corsie all'ingresso del tunnel causa un effetto imbuto, ma anche un numero elevato di esse potrebbe favorire il cambio corsia e quindi il rischio di collisione. Incidenti a causa di malfunzionamenti meccanici incidono per il 20% sul totale di incidenti che causano incendi in galleria.

1.1 Le fasi dell'incendio

In ogni incendio è possibile distinguere 4 fasi:

- **Fase di innesco**

Nella prima fase si ha un aumento relativamente basso della temperatura media che con il progredire della combustione si fa sempre più accentuato. L'aumento della temperatura va ad influire sul tasso di crescita della combustione stessa;

- **Fase di flashover**

La combustione continua fino a raggiungere le pareti e avanza passando da oggetto ad oggetto. In questa fase si ha una rapida propagazione dell'incendio e la maggior parte del materiale infiammabile si incendia. Da questo stadio è poco probabile, se non del tutto impossibile, che l'incendio si spenga da solo prima che il combustibile venga esaurito;

- **Fase di incendio sviluppato**

La temperatura nel tunnel non è uniforme e i fumi vanno a depositarsi nella parte superiore. In questa fase si verifica poi una diminuzione della temperatura, più o meno accentuata in base all'incendio, agli impianti di ventilazione e ai veicoli presenti;

- **Fase di estinzione o di decadimento**

Nell'ultima fase, a seguito degli interventi di estinzione, si ha l'abbassamento della temperatura e quindi il raffreddamento dell'ambiente. Si torna alle condizioni iniziali di resistenza della struttura. Infatti i danni riportati danneggeranno solo in modo parziale o per nulla la struttura complessiva, lesioni e distacchi invece possono essere provocati da rapide variazioni di temperatura.

Il dato con maggiore rilevanza in un incendio è la potenza termica rilasciata durante un incendio e in particolare il tasso di rilascio termico, HRR (Heat Release Rate). Esso varia nel tempo ma ogni incendio è caratterizzato da un valore di HRR di riferimento, generalmente legato al tipo di veicolo e/o evento che l'ha generato.

Tra i fattori scatenanti e le conseguenze di un incendio troviamo:

- alte temperature all'interno del tunnel;
- basse concentrazioni di ossigeno;
- alte concentrazioni di sostanze tossiche;
- visibilità ridotta;
- quantità e tipi di veicoli;
- quantità di persone;
- infrastruttura della galleria;
- punti di accesso per i soccorsi.

1.2 Stratificazione dei fumi

La stratificazione dei fumi è un fenomeno di enorme importanza legato all'evacuazione del tunnel che si verifica a seguito di un incendio. La presenza di fumi nel condotto comporta la presenza di diverse sostanze tossiche dovute alla combustione, che se inalate provocano gravi danni alla salute. La propagazione e la posizione dei fumi dipende dalla velocità longitudinale, dalle loro caratteristiche e dal dislivello degli ingressi della galleria, ovvero dalla pendenza. A causa delle pendenze si

può generare l'effetto camino, ossia un flusso d'aria verso il portale situato più in alto.

Le condizioni di salute all'interno del tunnel sono influenzate principalmente da quattro fattori: i gas asfissianti, i gas irritanti del fuoco, il calore e la visibilità oscurata. Nelle prime fasi dell'incendio il calore può essere considerato un problema minore, mentre il problema della produzione di sostanze della combustione, oltre ad essere il principale, è rilevante fin dall'inizio.

Un problema legato alla propagazione dei fumi che può nascere è il fenomeno del backlayering, ovvero lo spostamento dei fumi verso monte rispetto al punto d'innescò dell'incendio. Per "monte" e "valle" si intendono i tratti precedenti e successivi all'incendio che vengono stabiliti in base all'orientamento del vento. A seguito di un incendio si cerca di mandare i fumi verso valle per favorire l'evacuazione e le operazioni di sicurezza provenienti da monte, un ritorno dei fumi verso la direzione opposta potrebbe essere pericoloso. La stratificazione dei fumi dipende dalla velocità longitudinale, per cui anche il fenomeno di backlayering può essere evitato se la velocità del flusso dell'aria supera un determinato valore critico. Operativamente si cerca quindi di raggiungere una velocità critica, che identifica la minima velocità di ventilazione longitudinale che porta ad evitare il fenomeno del backlayering.

Infatti il legame tra il tipo di diffusione dei fumi e la velocità dell'aria all'interno del tunnel, permette di classificare i seguenti scenari:

- velocità bassa o assente (0-1 m/s) \Rightarrow elevata stratificazione e possibile lunghezza di backlayering pressochè uguale da entrambi i lati del punto di innescò;
- velocità moderata (1-3 m/s) \Rightarrow stratificazione fortemente influenzata dalla velocità dell'aria;
- velocità elevata (>3 m/s) \Rightarrow la stratificazione a valle scompare e non si ha il backlayering.

come mostrato in figura [1.2.1](#).

C'è da notare che i valori di soglia 1 m/s e 3 m/s sono approssimativi.

Un elemento fondamentale che genera la stratificazione è la pressione termica, dovuta alla minore densità dei fumi caldi rispetto la densità dei gas o dell'aria. I fumi caldi salgono verso il soffitto e iniziano a muoversi in maniera longitudinale. Man mano che si allontanano dall'incendio la temperatura dei fumi inizia a diminuire, per cui la pressione termica a sua volta diminuirà con la distanza e di conseguenza anche la stratificazione.

Consideriamo ora l'aria fredda sotto il soffitto del tunnel. Essa non ha alcun calore da scambiare con l'ambiente circostante. Tuttavia, a causa della forza di inerzia, allontanandosi dalla zona di

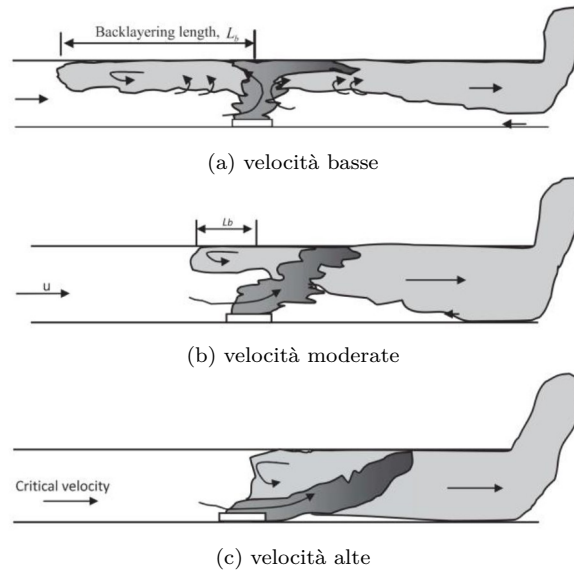


Figura 1.2.1: Stratificazione dei fumi

innesco i fumi trascinano aria dallo stato sottostante per cui il suo spessore aumenta gradualmente. La pressione termica tende ad aumentare la stratificazione, mentre la forza di inerzia tende a distruggerla. Per misurare l'andamento delle due forze si utilizza il numero globale di Richardson:

$$R_i = \frac{\Delta\rho gh}{\rho\Delta u^2} \quad (1.1)$$

dove ρ è la densità del gas caldo, $\Delta\rho$ la differenza di densità tra gas freddo e gas caldo, g l'accelerazione di gravità, h è lo spessore dello strato e Δu è la differenza di velocità tra i due strati.

1.2.1 Altezza dello strato di fumo

All'interno di un tunnel lo spessore dello strato dei fumi varia a seconda della posizione. Generalmente dove inizia l'incendio i fumi iniziano a salire fino a toccare il soffitto per iniziare a espandersi in modo longitudinale e quindi aumentare di spessore man mano che aumenta la distanza dal punto di innesco. L'aumento è dovuto alla massa trascinata, alla perdita di momento e al trasferimento di calore. Per queste grandezze è possibile ricavare le seguenti equazioni differenziali di controllo.

Massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A) = \rho_0 u_e W \quad (1.2)$$

Momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 A) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\Delta\rho g h A\right) = -\frac{1}{2}C_f \rho u^2 w_p \quad (1.3)$$

Energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A c_p T) = \rho_0 u_e W c_p T_0 - h_t w_p (T - T_w) \quad (1.4)$$

dove A è l'area della sezione trasversale, t è il tempo, x è una distanza lungo la galleria con l'origine sul primo portale della galleria, h è la larghezza dello strato di fumo, h_t è il coefficiente di calore trasferito, w_p è il perimetro bagnato dallo strato di fumo, C_f è il coefficiente di frizione, T_w è la temperatura del muro. La larghezza dello strato di fumo alla distanza x rispetto all'incendio prima che il fumo scenda al livello del suolo può essere stimata tramite:

$$h(x) = \frac{m'(x)(T_0 + \Delta T(x))}{\rho_0 T_0 u(x) W} \quad (1.5)$$

1.2.2 Modelli di stratificazione di fumi

È possibile affermare che esiste una correlazione tra la temperatura locale della stratificazione, la composizione dei gas e la stratificazione dei fumi nel tunnel. Tale correlazione è legata al numero di Froude e al numero di Richardson, i quali sono correlati, a loro volta, con la forza di galleggiamento e la forza di inerzia, ma in modo inverso.

Il numero di Froude è definito come

$$Fr = \frac{u_{avg}^2}{\sqrt{g H \Delta T_{cf} / T_{avg}}} \quad (1.6)$$

dove H è l'altezza del tunnel, T_{avg} è la temperatura media del gas sull'intera sezione in un dato punto, $\Delta T_{cf} = T_c - T_f$ è la differenza di temperatura tra il soffitto e il pavimento $u_{avg} = u T_{avg} / T_a$.

In base al numero di Froude è possibile distinguere tre regioni:

- Regione I: $Fr \leq 0.9 \Rightarrow$ si ha molta stratificazione in prossimità della sommità e prodotti della combustione caldi;
- Regione II: $0.9 \leq Fr \leq 10 \Rightarrow$ è presente una forte relazione tra i flussi orizzontali e la forza di galleggiamento, non si ha un'eccessiva stratificazione;
- Regione III: $Fr > 10 \Rightarrow$ si riscontra un gradiente di temperatura verticale insignificante e di conseguenza anche una stratificazione insignificante.

come mostrato in figura 1.2.2.

Il limite tra la Regione II e la Regione III non è così netto, sicuramente però per $Fr < 0.9$ si ha una netta stratificazione.

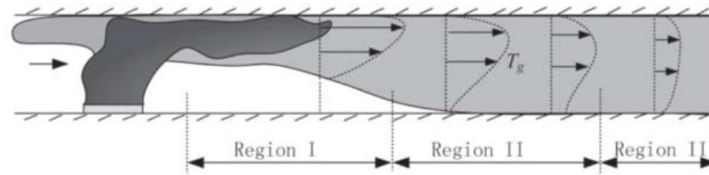


Figura 1.2.2: Stratificazione dei fumi nelle tre regioni

1.3 Ventilazione

I sistemi di ventilazione gestiscono principalmente l'aria pulita all'interno della galleria cercando di ridurre i contaminanti e/o il calore prodotto dai veicoli, in caso di emergenza hanno un ulteriore compito legato alla sicurezza nel tunnel.

Il tipo di ventilazione può essere di tipo naturale o supportata da sistemi di ventilazione meccanica. La ventilazione naturale sfrutta la differenza di temperatura tra un portale e l'altro, la differenza d'altezza o l'effetto pistone. L'effetto pistone è generato dal flusso d'aria trasportato dai veicoli entranti ed uscenti nella galleria, tale effetto ha maggiore importanza per gallerie con sezione di dimensione simile alle dimensioni dei veicoli e soprattutto per tunnel ferroviari. Viene utilizzata soprattutto in tunnel corti ma tipicamente risulta inefficace nel caso di incendi. Infatti anche nei tunnel corti vengono spesso inseriti sistemi di ventilazione meccanica che entrano in funzione in caso di pericolo. Viceversa in lunghe gallerie è necessario installare sistemi di ventilazione meccanica.

I principali sistemi di ventilazione meccanica sono: sistemi di ventilazione longitudinale, sistemi di ventilazione trasversale, sistemi di ventilazione semi-trasversale e sistemi di ventilazione combinati.

- **Ventilazione longitudinale**

In questi sistemi, rappresentati in figura 1.3.1, vengono usati ventilatori a getto e/o normali ventilatori, solitamente montati in prossimità dei portali in gruppi di due o tre. Attraverso sistemi di ventilazione longitudinale i contaminanti vengono trasportati all'esterno della galleria.

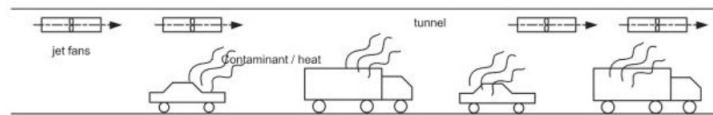


Figura 1.3.1: Esempio di ventilazione longitudinale

- **Ventilazione trasversale**

I sistemi di ventilazione trasversale hanno impianti che rilasciano aria pulita e impianti che raccolgono i fumi esausti in dei pozzi o in delle stanze collocate vicino al portale, si veda figura 1.3.2. I ventilatori di aria pulita possono essere posizionati al suolo mentre quelli che raccolgono i fumi alla sommità.

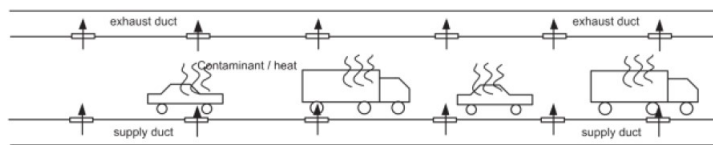


Figura 1.3.2: Esempio di ventilazione trasversale

- **Ventilazione semi-trasversale**

Mentre i sistemi di ventilazione trasversale possono avere sia impianti che rilasciano aria pulita che impianti per raccogliere i fumi esausti, i sistemi di ventilazione semi-trasversale sono in grado di fare solo una delle due funzioni, si veda figura 1.3.3.

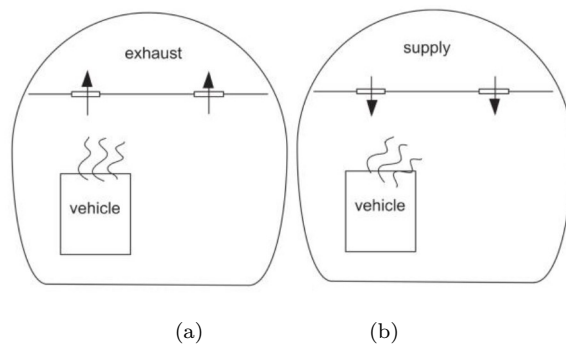


Figura 1.3.3: Esempio di ventilazione semi-trasversale
 (a) Impianti per la raccolta di fumi esausti
 (b) Impianti per il rilascio di aria pulita

1.3.1 Ventilazione in caso di incendio

In caso di incendio a supporto dei sistemi di ventilazione normale subentrano sistemi di ventilazione appositi, i quali possono essere catalogati in sistemi di ventilazione longitudinali, sistemi di ventilazione per l'estrazione dei fumi e sistemi combinati.

I sistemi di ventilazione longitudinale utilizzati in caso di incendio permettono ai veicoli a monte dell'incendio di non essere compromessi perchè protetti dal flusso d'aria generato dai ventilatori in direzione opposta. Tendono a mandare i fumi in un'unica direzione per avere la zona sopravento libera e quindi poter permettere la fuga agli utenti verso monte. Questo tipo di ventilazione quindi indirizza i fumi verso la direzione più opportuna ma aggiunge aria alla combustione con il rischio di aumentare il valore di HRR. In realtà esperimenti dimostrano che, per velocità dell'aria immessa dai ventilatori non elevate, il valore di HRR decresce. I due principali parametri per regolare i sistemi di ventilazione longitudinale sono la velocità critica e la lunghezza del backlayering.

I sistemi di estrazione dei fumi invece sono costituiti da bocche di estrazione dell'aria che hanno il compito di estrarre l'aria viziata e i fumi di scarico e sono generalmente posizionati lateralmente sotto la volta.

1.4 Impianti e sistemi di supporto

I sistemi di ventilazione però non sono da soli sufficienti a garantire la sicurezza e devono essere affiancati da impianti specifici per migliorare la sicurezza sia in condizioni normali che in caso di

incendio.

Sicuramente sono necessari sistemi di alimentazione elettrica in grado di fornire energia a sufficienza sia in condizioni normali che in casi di emergenza, ovvero anche in caso di blackout.

Impianti di comunicazione e allerta vengono utilizzati per verificare periodicamente le condizioni della galleria e per informare gli automobilisti di possibili danni o incidenti. Tra questi troviamo i sistemi che permettono la rilevazione automatica di fumi e/o incendi. Anche gli automobilisti stessi possono informare il personale di controllo tramite pulsanti di allarme o telefoni per le emergenze.

Altri due elementi importanti per diminuire i rischi sono un'adeguata illuminazione e una segnaletica sufficiente. Sono essenziali per un primo intervento da parte degli utenti e per i soccorsi impianti per l'estinzione degli incendi o impianti fissi antincendio automatici.

Capitolo 2

Modelli CFD, 1D, volume di controllo e multi-scala

Un incendio in galleria può far nascere diversi scenari, dai più semplici ai più complessi da analizzare. Per simulare un tale fenomeno sono svariati i modelli che possono essere utilizzati. Tra questi troviamo:

- modelli CFD (*Computational Fluid Dynamics*), che analizzano i vari scenari in modo tridimensionale analizzando turbolenze e calore trasferito in funzione dei sistemi di ventilazione e delle geometrie della galleria;
- modelli 1D, che assumono come omogeneo il comportamento del flusso lungo la sezione e considerano solo la componente longitudinale;
- modellazione di volumi di controllo, dove si divide la galleria in sezioni da analizzare singolarmente;
- modelli multi-scala, che uniscono i modelli 1D e 3D per avere ottime prestazioni e poco costose.

In questo capitolo verranno analizzati i modelli sopracitati, le equazioni matematiche alla loro base, le loro caratteristiche principali, i loro vantaggi e i loro svantaggi.

2.1 Modelli CFD

I modelli CFD nascono per uso industriale ma successivamente sono stati applicati nei più disparati campi dell'ingegneria. Nell'applicazione di nostro interesse i modelli CFD studiano il comporta-

mento dell'incendio nel tunnel in modo tridimensionale considerano eventuali variazioni, dovute alle turbolenze e allo scambio di calore, e i sistemi di ventilazione e le geometrie che possono influenzare la ventilazione. Sono in grado di trattare geometrie complesse con diverse condizioni al contorno, flussi turbolenti e la dispersione dei prodotti della combustione.

Uno dei vantaggi della CFD è che le modifiche apportate dalle interazioni fisiche complesse vengono modellate immediatamente, quindi la loro influenza sul comportamento dell'incendio viene studiata man mano che succedono. Tuttavia non tutta la fisica alla base di questo modello è nota ed è necessario applicare dovute accortezze per evitare eventuali imprecisioni.

All'interno della galleria al momento dello scoppio dell'incendio inizia il processo di combustione e di rilascio di sostanze tossiche. È possibile creare modelli CFD che includano questi fenomeni e quindi il tasso di crescita dell'incendio.

A volte si sceglie di simulare tramite CFD solo parte del tunnel, per esempio quella più prossima all'incendio, in quanto un limite di questi modelli è il costo computazionale.

2.1.1 Modello matematico

Le equazioni necessarie per descrivere il modello sono le leggi di conservazione della massa, del momento e dell'energia.

Le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto sono:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g} \quad (2.2)$$

dove \mathbf{u} è il vettore delle velocità $\mathbf{u} = (u; v; w)$ e \mathbf{T} il tensore degli sforzi.

Infine l'equazione di conservazione dell'energia si basa sulla prima legge della termodinamica. La variazione di energia all'interno di un elemento fluido può dipendere da energie interne e cinetiche, il lavoro dell'energia dalle sollecitazioni e dalle forze del corpo e il trasporto dell'energia dipende da convezione, conduzione, irraggiamento, diffusione.

L'equazione di partenza è:

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.3)$$

dove ε è l'energia interna, \mathbf{y} è il flusso termico e h_0 è la sorgente di calore.

Dal bilancio di massa sappiamo che

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4)$$

da cui si ottiene

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho \right) \quad (2.5)$$

Sostituendo nell'equazione 2.3 si ottiene quindi:

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon \right) = \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho \right) - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{p}{\rho} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{p}{\rho} \rho \mathbf{u} \right) - \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) - \frac{p}{\rho} \rho \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \mathbf{u}) - \rho \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho} \right) + \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \frac{p}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{u} \right\} - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.8)$$

Portando i coefficienti di ρ al primo termine e risistemando i termini si ottiene:

$$\rho \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon + \frac{p}{\rho} \right) + \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\varepsilon + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{p}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{u} \right\} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.9)$$

Definendo ora l'entalpia h come $h := \varepsilon + \frac{p}{\rho}$ possiamo riscrivere l'equazione 2.9 come

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla h + p \nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - h \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) - h \mathbf{u} \cdot \nabla \rho - \rho h \nabla \cdot \mathbf{u} + p \nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.11)$$

$$-h \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} \right) + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) + p \nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p + p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p - \nabla \cdot \mathbf{y} + h_0 \quad (2.13)$$

Infine imponiamo $h_0 = 0$ e $\mathbf{y} = -k \nabla \frac{h}{C_p} + \mathbf{S}_r$, dove k è la conduttività, C_p è il calore specifico e \mathbf{S}_r rappresenta il trasferimento per irraggiamento. Quindi $\nabla \cdot \mathbf{y} = -\nabla \cdot (k \nabla \frac{h}{C_p}) + \nabla \cdot \mathbf{S}_r$.

L'equazione di bilancio dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p + \nabla \cdot \left(k \nabla \frac{h}{C_p} \right) + \nabla \cdot \mathbf{S}_r \quad (2.14)$$

Le equazioni generalmente vengono risolte attraverso un metodo ai volumi finiti, con l'introduzione di celle e di equazioni di dominio finito su ogni cella, in modo iterativo.

In ciascuna cella si impone la legge di conservazione

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(u) = 0 \quad (2.15)$$

dove u è la grandezza scalare d'interesse nella cella, l'incognita, ed \mathbf{F} è il flusso di u .

In particolare si considera la sua forma integrale ottenuta grazie al teorema della divergenza

$$\frac{d}{dt} \int_V u dx + \int_{\partial V} \mathbf{F}(u) \cdot \mathbf{n} d\gamma \quad (2.16)$$

dove V è il volume di cella.

Definiamo ora in 1D un passo di discretizzazione spaziale $\Delta x > 0$ e i nodi equispaziati $x_j = j\Delta x$. A definire le celle con centro x_j sono i punti interni $x_{j+\frac{1}{2}} = (j + \frac{1}{2})\Delta x$ da cui $V_j = [x_{j-\frac{1}{2}}; x_{j+\frac{1}{2}}]$. Analogamente si definisce il passo di discretizzazione Δt e quindi gli istanti temporali $t_n = n\Delta t$.

Considerando $V = V_j$ e integrando l'equazione 2.16 tra t_n e t_{n+1} si ottiene:

$$\int_{x_{j-\frac{1}{2}}}^{x_{j+\frac{1}{2}}} u(x, t_{n+1}) dx = \int_{x_{j-\frac{1}{2}}}^{x_{j+\frac{1}{2}}} u(x, t_n) dx - \left(\int_{t_n}^{t_{n+1}} F(u(x_{j+\frac{1}{2}}, t)) dt - \int_{t_n}^{t_{n+1}} F(u(x_{j-\frac{1}{2}}, t)) dt \right) \quad (2.17)$$

Introducendo la media di cella della soluzione esatta

$$U_j^n = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{j-\frac{1}{2}}}^{x_{j+\frac{1}{2}}} u(x, t_n) dx \quad (2.18)$$

e la media temporale dei flussi

$$F_{j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_n}^{t_{n+1}} F(u(x_{j+\frac{1}{2}}, t)) dt \quad (2.19)$$

l'equazione 2.17 diventa

$$\Delta x U_j^{n+1} = \Delta x U_j^n - (\Delta t F_{j+\frac{1}{2}}^n - \Delta t F_{j-\frac{1}{2}}^n) \quad (2.20)$$

Si procede approssimando le medie di celle esatto con medie di celle numeriche $U_j^n \approx u_j^n$ e le medie temporali dei flussi con flussi numerici $F_{j+\frac{1}{2}}^n \approx f_{j+\frac{1}{2}}^n$. È possibile definire schemi numerici differenti in base ai flussi numerici.

$$\Delta x u_j^{n+1} = \Delta x u_j^n - (\Delta t f_{j+\frac{1}{2}}^n - \Delta t f_{j-\frac{1}{2}}^n) \quad (2.21)$$

L'equazione 2.21 diventa l'equazione su cui si basa il metodo ai volumi finiti con incognite $u_j^n \forall j \forall n$.

Definendo

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x} > 0 \quad (2.22)$$

si ottiene lo schema ai volumi finiti

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \lambda (f_{j+\frac{1}{2}}^n - f_{j-\frac{1}{2}}^n) \quad (2.23)$$

Alcuni schemi numerici notevoli:

- **Metodo di Eulero centrato**

- flusso numerico: $f_E(u, v) = \frac{a}{2}(u + v)$
- schema risultante: $u_j^{n+1} = u_j^n - \lambda a (u_{j+1}^n - u_{j-1}^n)$
- forma equivalente: $\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + a \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta x} = 0$

- **Metodo di Lax - Friedrichs**

- flusso numerico: $f_{LF}(u, v) = \frac{a}{2}(u + v) + \frac{1}{2\lambda}(u - v)$
- schema risultante: $u_j^{n+1} = \frac{1}{2}(u_{j+1}^n + u_{j-1}^n) - \frac{1}{2}\lambda a (u_{j+1}^n - u_{j-1}^n)$
- forma equivalente: $\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + a \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta x} - \Delta x \frac{1}{2\lambda} \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{\Delta x^2} = 0$

- **Metodo Upwind**

- flusso numerico: $f_U(u, v) = \frac{a}{2}(u + v) + \frac{|a|}{2}(u - v)$
- schema risultante: $u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{1}{2}\lambda a (u_{j+1}^n - u_{j-1}^n) + \frac{1}{2}\lambda |a| (u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n)$
- forma equivalente:
$$\begin{cases} \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + a \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta x} = 0 & \text{se } a > 0 \\ \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + a \frac{u_{j+1}^n - u_j^n}{\Delta x} = 0 & \text{se } a < 0 \end{cases}$$

- **Metodo di Lax-Wendroff**

- flusso numerico: $f_{LW}(u, v) = \frac{a}{2}(u + v) + \frac{1}{2}\lambda a^2(u - v)$

- schema risultante: $u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{1}{2}\lambda a(u_{j+1}^n - u_{j-1}^n) + \frac{1}{2}(\lambda a)^2(u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n)$

- forma equivalente: $\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} + a \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta x} - \Delta x \frac{\lambda a^2}{2} \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{\Delta x^2} = 0$

Un ruolo fondamentale è svolto dal tipo di problema studiato, i metodi vengono scelti in base alla divisione del dominio e alle caratteristiche del problema, in quanto non tutti i metodi sono adatti a tutti gli scenari.

Infine per una corretta soluzione delle equazioni la dimensione della mesh utilizzata è un fattore decisamente rilevante.

2.1.2 Condizioni generali

I principali dati richiesti dai modelli CFD sono relativi alla geometria del tunnel, alle condizioni al contorno, ai materiali che costituiscono la galleria e alla curva HRR.

Per quanto riguarda la geometria del tunnel è possibile modellare facilmente una sezione regolare. In caso di sezioni irregolari sarà necessario, invece, valutare di quanto si discostano dalla sezione regolare per definire un modello che ne tenga conto. Avendo poi un costo computazionale elevato o per altre esigenze è possibile simulare tramite modelli CFD anche solo parte del tunnel e la lunghezza da modellare è definita in base alla sua lunghezza complessiva. In base alla lunghezza scelta si hanno attenzioni diverse. Se la sezione da modellare è corta in tunnel lunghi è necessario prestare attenzione nel porre le condizioni al contorno. In tunnel corti o per incendi vicini ai portali la lunghezza dello strato di fumo è breve quindi è più importante fare attenzione alle conseguenze che ciò comporta, come la possibile uscita dei fumi dai portali.

Vanno definite non solo le condizioni al contorno per i portali e i muri, ma anche la presenza di sorgenti e pozzi inclusi nelle equazioni. Con sorgenti e pozzi si intende i finestrini e/o i motori delle auto ad esempio. È possibile poi stabilire pressione, velocità o flusso di massa al bordo.

Definendo come contorni del modello i portali è possibile modellare il comportamento dell'aria e del fumo che esce dai portali. Ciò è possibile estendendo i calcoli del modello oltre i confini stabiliti dai bordi. Alternativamente è possibile considerare un fattore empirico per valutare gli effetti al

bordo in modo più approssimativo.

Un'altra condizione da fissare è la velocità iniziale e la temperatura dei muri. Essi possono generare un flusso legato alle forze di galleggiamento se il tunnel ha pendenza e la temperatura dell'aria è diversa da quella delle pareti.

Per una simulazione generalmente si definisce una pozza dalla quale nasce l'incendio. Si procede modellando prima i fumi da entrambi i lati dell'incendio in modo simmetrico, per poi modellare in modo differente i fumi nelle due metà applicando le opportune condizioni su ciascuna sezione. Questo processo riduce i costi computazionali.

Nota la sorgente dell'incendio, un tipo di approccio è quello di utilizzare un modello di combustione per rappresentare il processo nei dettagli. È utile per valutare e confrontare risultati ottenuti da esperimenti con i risultati teorici. Purtroppo, però, con questo metodo si aggiungono incertezze. Un problema comune è la previsione di temperature molto elevate, problema legato all'incapacità di prevedere l'efficienza della combustione.

In caso di traffico, invece, non è possibile sapere con certezza la sorgente, il modo di avanzare dell'incendio e come bruciano i veicoli. In questo caso è necessario definire un range di combustibilità e stimare un tempo di sviluppo dell'incendio. Con quest'approccio i veicoli vengono rappresentati come regioni bloccate e le zone che sono le sorgenti dell'incendio diventano bordi dove si applicano condizioni di ingresso.

È possibile definire una fonte di fumo che aiuti a definire i parametri utili per stimare i prodotti della combustione, in quanto questi non vengono modellati individualmente.

Infine è possibile ottenere la visibilità, variabile di estrema importanza, attraverso formule empiriche che legano la concentrazione di fuliggine e la visibilità dei segnali.

I modelli CFD sono quindi validi, in grado di simulare in modo efficace e soddisfacente anche gli scenari più complessi. Tra gli svantaggi però si hanno gli elevati costi computazionali.

2.2 Modelli 1D

Una galleria e i suoi sistemi di ventilazione sono considerati un unico sistema complesso il cui comportamento termo-fluido-dinamico è influenzato da diversi fattori. Questo tipo di modelli considera

le variabili lungo un'unica direzione, quella longitudinale, e assume le quantità fluido-dinamiche uniformi in tutta la sezione.

Nei modelli 1D è possibile inserire con abbastanza precisione le condizioni al contorno. Ciò porta ad avere una descrizione completa e compatta del sistema analizzato. Sono modelli che necessitano di poche informazioni e hanno costi computazionali bassi. Per questo motivo si prestano per casi in cui è necessaria la valutazione di più scenari, quindi più simulazioni.

Non sono però modelli validi per tutti gli scenari, l'assunzione dell'uniformità nella sezione li rende inadatti per i casi in cui si registrano forti gradienti poichè non sono in grado di riprodurli restando fedeli alla realtà. I piccoli incendi, ad esempio, generano una stratificazione dei fumi che ha una lunghezza longitudinale elevata e l'utilizzo di modelli 1D non permette la corretta riproduzione di tale fenomeno.

I modelli 1D possono studiare quale tipo di strategia devono usare i sistemi di ventilazione per avere condizioni accettabili all'interno della galleria e possono valutare la distribuzione degli inquinanti e la temperatura all'interno del tunnel. Studiare l'andamento dei prodotti della combustione condizionato dal traffico è estremamente difficile, ma i modelli 1D forniscono valori accettabili.

Anche se modelli 1D non sono in grado di fornire un quadro completo sull'andamento dell'incendio però in caso di ventilazione longitudinale sono capaci di valutare se i sistemi di ventilazione possono garantire una velocità critica che eviti la formazione del fenomeno di backlayering.

2.2.1 Modello matematico

Per descrivere il modello si parte dalle equazione di conservazione della massa e del momento, ovvero le equazioni 2.1 e 2.2 scritte in una dimensione, quella longitudinale x , arricchite dai termini di sorgente di massa e i termini di sorgente per il momento, per cui esse si scrivono:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = S_{Mass} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + S_{Mx} + u S_{Mass} \quad (2.25)$$

dove g_x è la componente lungo x dell'accelerazione gravitazionale, u è la velocità longitudinale, S_{Mass} sono i termini di sorgente di massa per unità di volume, p è la pressione e S_{Mx} termini di sorgente del momento per unità di volume agente lungo x , ovvero i termini associati alla forza viscosa e l'effetto della resistenza dinamica. Il termine $u S_{Mass}$ rappresenta il contributo che il termine di sorgente di massa fornisce all'equazione del momento.

È possibile riscrivere l'equazione del momento nel seguente modo:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \right) + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + S_{Mx} + u S_{Mass} \quad (2.26)$$

semplificando i termini di sorgente di massa e rendendo esplicito il termine relativo al galleggiamento si ottiene:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\rho} S_{Mx} \quad (2.27)$$

dove h è la coordinata di spostamento verticale.

2.2.2 Struttura di rete

Il modello 1D descritto nel paragrafo precedente viene arricchito da una struttura topologica a rete. Utilizzando la teoria dei grafi vengono così identificati archi e nodi che contengono informazioni per rappresentare proprietà e caratteristiche del sistema. In questo caso nei nodi sono definiti temperatura, pressione, massa e pressione molare, mentre sugli archi vengono definite le proprietà geometriche e le proprietà termiche. Questa rete può essere espressa in una matrice di incidenza A , dove il numero di righe corrisponde al numero di nodi e il numero di colonne al numero degli archi. L'elemento A_{ij} vale +1 se l'arco j è entrante nel nodo i , viceversa vale -1 se l'arco j è uscente dal nodo i mentre se non c'è alcun legame tra il nodo i e l'arco j vale 0.

Considerando ad esempio il grafo orientato:

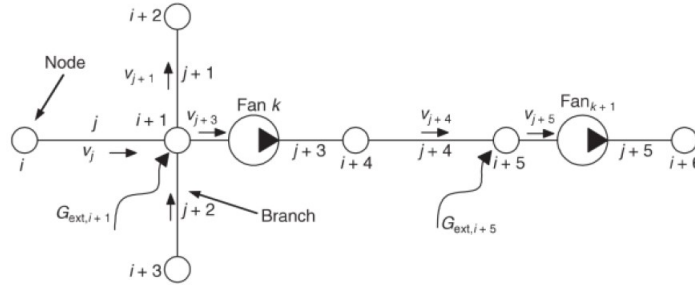


Figura 2.2.1: Esempio di ventilazione longitudinale

la corrispondente matrice di adiacenza è:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

L'equazione 2.27 può essere risolta andando a discretizzare il dominio e integrandola lungo un arco j generico compreso tra il nodo di uscita $i - 1$ e il nodo di ingresso i :

$$\int_{i-1}^i \frac{\partial u}{\partial t} dx + \left(\frac{u_i^2 - u_{i-1}^2}{2} \right) + \frac{p_i - p_{i-1}}{\rho_j} + g(h_i - h_{i-1}) = \int_{i-1}^i \frac{1}{\rho} \sum S_{M_x} dx \quad (2.28)$$

Si procede andando ad esplicitare i termini che contribuiscono al momento dovuti ai ventilatori, all'effetto pistone e all'attrito:

$$\frac{du_j}{dt} L_j + \left(\frac{u_i^2 - u_{i-1}^2}{2} \right) + \frac{p_i - p_{i-1}}{\rho_j} + g(h_i - h_{i-1}) + \frac{\Delta P_{fan;j}}{\rho_j} + \frac{\Delta P_{piston;j}}{\rho_j} - \frac{1}{2} \left(f_j \frac{L_j}{D_{h;j}} + \beta_j \right) u_j^2 = 0 \quad (2.29)$$

dove f_j e β_j sono i coefficienti d'attrito maggiori e minori dell'arco j , L_j è la lunghezza dell'arco e $D_{h;j}$ è il diametro idraulico dell'arco.

Il termine $\frac{\Delta P_{fan;j}}{\rho_j}$ è il termine legato alla variazione di pressione dovuta ai ventilatori situati nella galleria, $\frac{\Delta P_{piston;j}}{\rho_j}$ è il termine legato all'effetto pistone ovvero l'effetto dovuto allo spostamento dell'aria dei veicoli entranti ed uscenti dalla galleria, infine $\frac{1}{2} \left(f_j \frac{L_j}{D_{h;j}} + \beta_j \right) u_j^2$ è il termine legato all'attrito.

Supponendo lo stesso flusso in ingresso e in uscita nell'arco e introducendo la pressione totale P come $P = \rho h$ l'equazione 2.29 diventa:

$$\rho_j \frac{du_j}{dt} L_j + (P_i - P_{i-1}) + \Delta P_{fan;j} + \Delta P_{piston;j} - \frac{1}{2} \rho_j \left(f_j \frac{L_j}{D_{h;j}} + \beta_j \right) u_j^2 = 0 \quad (2.30)$$

In definitiva le equazioni del momento per uno stato stazionario hanno la seguente formulazione finale considerando nulla la derivata della velocità:

$$(P_i - P_{i-1}) + \Delta P_{fan;j} + \Delta P_{piston;j} - \frac{1}{2} \rho_j \left(f_j \frac{L_j}{D_{h;j}} + \beta_j \right) u_j^2 = 0 \quad (2.31)$$

L'equazione di continuità, la legge di conservazione del flusso, è:

$$\sum_j A_j \rho_j u_j = G_{ext;i} \quad (2.32)$$

dove $G_{ext;i}$ è il tasso di flusso di massa scambiato in un nodo con l'ambiente esterno, A_j è la sezione dell'arco e j sono gli archi entranti ed uscenti in i .

2.2.3 Modello termico

L'analisi termica richiede la soluzione dell'equazione dell'energia:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \varphi_e \quad (2.33)$$

dove T è la temperatura, c è il calore specifico, k è la conduttività del fluido, \mathbf{u} è il vettore velocità e φ_e è il calore generato per volume di controllo.

Nel modello 1D l'equazione si riduce in funzione della componente longitudinale e quindi:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varphi_v - \varphi_l \quad (2.34)$$

dove si è distinto φ_e , che in 1D assume il significato di calore generato per volume di controllo, in calore generato nel sistema, φ_v , e calore scambiato con le pareti, φ_l .

Integrando l'equazione 2.34 su un volume di controllo si ottiene:

$$\int_{CV} \rho c \frac{dT}{dt} dV + \int_A \rho c u T dA = \int_A k \frac{dT}{dx} dA + \int_{CV} \varphi_v dV - \int_{CV} \varphi_l dV \quad (2.35)$$

dove CV è il volume di controllo e A è la sua superficie.

Nel modello 1D è presente un problema legato alla temperatura. A differenza della pressione definita in ciascun nodo la temperatura è definita sugli archi, per cui nel caso di due flussi convergenti con temperature diverse in uno stesso nodo si considera una temperatura media data dal perfetto miscelamento dei due flussi.

Discretizzando il dominio per un generico nodo i e un generico arco j e considerando il volume di controllo CV centrato sul nodo l'equazione 2.35 diventa

$$\int_{CV} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \sum_j \rho_j c_j u_j A_j T_j = \sum_j k_j \frac{dT}{dx} \Big|_j A_j + \Phi_{v,i} - \Phi_{l,i} \quad (2.36)$$

Il termine di sorgente volumetrico $\Phi_{v,i}$ è difficile da modellare. Infatti nelle simulazioni si calcola partendo da dati sperimentali grazie alla curva HRR.

Il calore scambiato con le pareti, $\Phi_{l,i}$ può essere calcolato attraverso la seguente formula:

$$\Phi_{l,i} = \sum_j \frac{L_j}{2} U_j \Omega_j (T_i - T_{\infty,j}) \quad (2.37)$$

dove U_j è il coefficiente globale di calore trasferito, Ω_j è il perimetro del ramo j , T_i è la temperatura nel nodo i e T_{∞} è la temperatura ambiente.

Come condizioni al bordo per la temperatura si assume la temperatura del nodo precedente al volume di controllo rispetto la direzione del flusso.

2.3 Modellazione tramite volume di controllo

La modellazione tramite volume di controllo si basa sul dividere la galleria in zone e quindi in più volumi, tutti con le stesse proprietà sull'intero dominio e in cui valgono le stesse equazioni di conservazione. È un modello in grado di stimare correttamente diversi aspetti dell'incendio. Purtroppo però differenze eccessive tra le caratteristiche del sistema reale e quelle del modello teorico potrebbero compromettere l'accuratezza e la validità del metodo.

Questo tipo di modello si basa sulle equazioni di conservazione, termini di sorgente e sottomodelli di trasferimento del calore e della massa. Le assunzioni richieste dal modello sono le seguenti:

- in un volume di controllo tutte le proprietà sono omogenee;
- tutti i gas sono trattati come gas ideali;
- la combustione è trattata come sorgente di massa e calore;
- nel volume di controllo il trasporto di massa è istantaneo;
- il calore trasferito agli elementi all'interno del tunnel è trascurato;
- il tunnel è orizzontale e la sua sezione costante;
- la pressione nel tunnel è costante;
- gli effetti dell'attrito non sono trattati esplicitamente.

2.3.1 Equazioni di conservazione

La base del modello sono le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia. Tuttavia, come vedremo, l'equazione di conservazione della quantità di moto non è applicata esplicitamente in quanto sono richieste informazioni riguardo la velocità e le pressioni sui bordi.

L'equazione di conservazione della massa all'interno di un volume di controllo tiene conto della variazione di massa all'interno del volume stesso e della somma delle portate di massa nette che escono, per cui la massa contenuta all'interno del volume di controllo al tempo t è pari a:

$$\frac{dM}{dt} = (m_{in} - m_{out} + m_{in_hot} + m_{in_cold}) \quad (2.38)$$

dove M è la massa nel volume di controllo e m_{in} , m_{out} , m_{in_hot} e m_{in_cold} sono i flussi di massa in entrata e in uscita nel volume di controllo dovute alla convezione, come mostrato in Figura 2.3.1

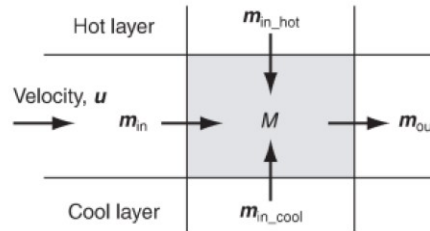


Figura 2.3.1: Massa all'interno del volume di controllo

Considerando A l'area di base del volume di controllo e z l'altezza possiamo quindi scrivere:

$$\frac{d(\rho Az)}{dt} + \sum_h m_h = 0 \quad (2.39)$$

dove m_h è la portata di massa netta attraverso il volume di controllo.

In modo analogo è possibile descrivere la conservazione della massa delle specie all'interno del volume di controllo e dell'energia.

Per l'equazione di conservazione della massa si procede andando a bilanciare i termini di massa entranti nel volume, già presenti nel volume e quelli generati dalla combustione:

$$\rho z A \frac{dY}{dt} + \sum_h m_h (Y - Y_{cv})_h = \omega \quad (2.40)$$

dove Y è la concentrazione di massa della specie nel flusso, Y_{cv} è la concentrazione di massa della specie nel volume di controllo e ω è la massa delle specie prodotta dall'incendio.

La concentrazione dipende fortemente dal plume (colonna di fumo) e dai prodotti della combustione, infatti varia in base al combustibile responsabile dell'incendio e al modo di progredire delle fiamme.

Per quanto riguarda la conservazione dell'energia è necessario utilizzare la legge dei gas perfetti così da ottenere:

$$\rho C_p z A \frac{dT}{dt} - z A \frac{dp}{dt} + C_p \sum_h m_h (T - T_{cv})_h = m_f \chi \Delta H - Q_{net_loss} \quad (2.41)$$

dove C_p è la capacità di calore specifico del gas nel volume di controllo, p è la pressione nel volume di controllo, T è la temperatura del gas nel flusso, T_{cv} è la temperatura del gas nel volume di controllo, m_f è il tasso con il quale il combustibile si volatilizza, χ è l'efficacia della combustione, ΔH è il calore rilasciato dalla combustione e Q_{net_loss} è il tasso netto con il quale il calore si perde ai bordi.

È possibile fare le seguenti osservazioni per l'equazione 2.41. Se la variazione di temperatura all'interno del volume di controllo è bassa il primo termine può essere trascurato. Nel caso di una buona ventilazione all'interno della maggior parte del tunnel è possibile trascurare il secondo termine grazie all'effetto Venturi.

I termini di sorgente principali in questo tipo di modello sono il calore rilasciato e il flusso di massa del combustibile. Se la sorgente dell'incendio è ben nota allora anche questi valori lo sono, altrimenti è necessario valutare la diffusione dell'incendio sui materiali e superfici, attraverso un modello empirico che suggerisce che:

$$q_f = \alpha (t - t_0)^2 \quad (2.42)$$

dove q_f è il calore rilasciato dall'incendio, α è il coefficiente di crescita dell'incendio e t_0 è il tempo tra l'inizio dell'incendio e la sua crescita.

Per quanto riguarda il flusso di massa del combustibile si ha:

$$m_f = \frac{q_f}{\chi \Delta H} \quad (2.43)$$

Tali modelli empirici forniscono approssimazioni per cui è necessario fare attenzione al valore dei coefficienti affinché siano il più possibile conformi alla realtà.

2.3.2 Sottomodelli di trasferimento di calore e di massa

I modelli di trasferimento di massa e calore possono includere:

- trascinamento nei plume;

- flusso tra le aperture;
- miscelamento degli strati;
- trasferimento di calore per convezione alle superfici;
- trasferimento di calore per radiazione;
- trasferimento di calore per conduttività.

L'effetto di trascinamento nei plume è un parametro critico nel calcolo dei rischi e delle previsioni sullo sviluppo di un incendio. I modelli utilizzati devono essere adatti allo scenario fisico del tunnel e dovrebbero essere tenuti in considerazione gli effetti della ventilazione sul plume. Infatti, come abbiamo già detto, una ventilazione longitudinale con velocità superiore alla velocità critica non dà luogo ad una regione di backlayering.

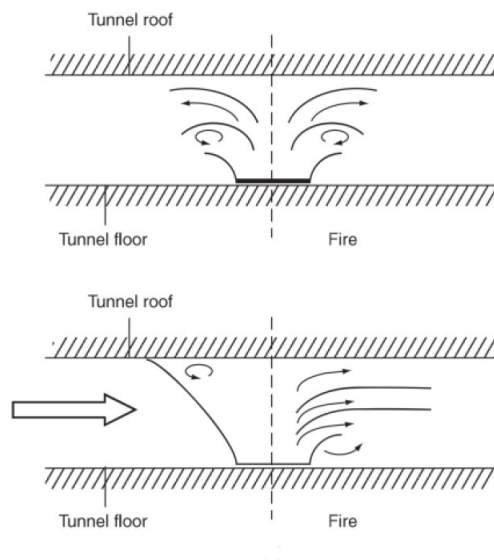


Figura 2.3.2: Plume in galleria

Per modelli che simulano gli incendi sfruttando la divisione in compartimenti è cruciale la valutazione dei flussi in ingresso e uscita dalle aperture, come i finestrini, le aperture di ventilazione e i portali.

Il miscelamento degli strati può avvenire per flussi freddi inseriti in strati caldi, per miscelazione di taglio associata ai flussi di strati laterali oppure per mescolamento causato dai flussi delle pareti.

Il trasferimento di calore per convezione è una delle principali cause di perdita di calore nel volume di controllo, i flussi convettivi variano in base alla loro posizione rispetto all'incendio. Per studiare tale fenomeno si utilizzano modelli per lo studio della convezione naturale.

Nel caso di trasferimento di calore per radiazione è possibile prevedere la radiazione del corpo grigio, ma non ricavare i valori di emissività. Quindi per il calore diffuso dalle fiamme si utilizzano dati empirici.

Infine, dovendo bilanciare il trasferimento di calore per conduttività con i due precedenti, è necessario ricorrere ad una soluzione numerica. Generalmente per il bilancio si considerano il trasferimento in una sola dimensione con rivestimenti del tunnel termicamente spessi oppure il trasferimento ad un dissipatore di calore ambientale infinito.

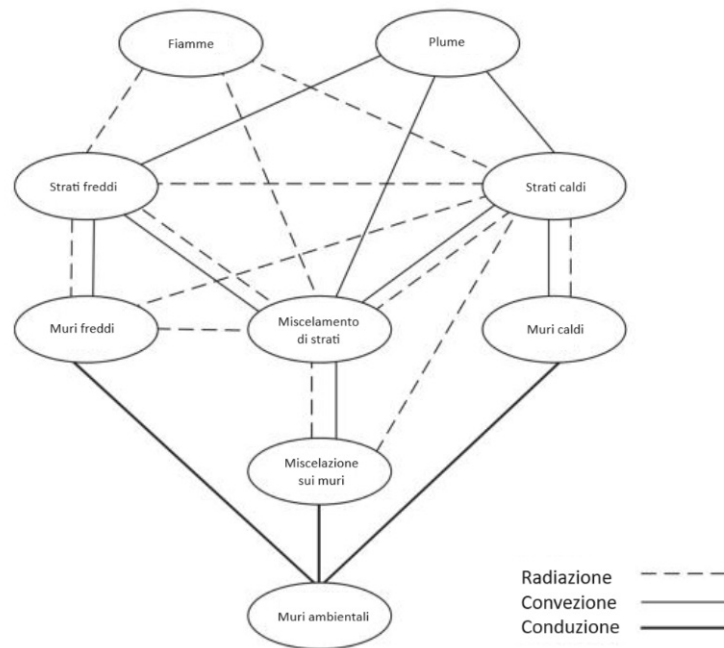


Figura 2.3.3: Schema esplicativo per modello di volume di controllo

2.4 Modello multi-scala

I modelli multi-scala utilizzano modelli CFD e modelli 1D simultaneamente, sfruttando gli aspetti positivi di entrambi.

Come già visto i modelli CFD sono molto accurati nel simulare i flussi con velocità elevate e alti gradienti di temperatura, ma con costi computazionali elevati, mentre i modelli 1D non hanno costi computazionali elevati ma non forniscono soluzioni adeguate in presenza di gradienti importanti.

Alte velocità e forti gradienti di temperatura si ritrovano nella regione prossima all'incendio, denominata *near-field*. I gradienti poi si mitigano arrivando alla regione *far-field*.

Alla base dei modelli multi-scala c'è quindi l'intuizione di poter utilizzare i modelli CFD nella regione *near-field* e i modelli 1D nella regione *far-field*.

2.4.1 Decomposizione del dominio

Prima di affrontare il problema dell'accoppiamento 1D-3D ricordiamo alcuni concetti di decomposizione di domini 3D. La parte più importante e quella più difficile nei modelli multiscala è la divisione del dominio e il conseguente approccio utilizzato per la risoluzione. In letteratura esistono principalmente due modi per classificare i modelli, il primo è legato a due diverse divisioni del dominio, overlapping e non-overlapping, il secondo alle condizioni al contorno che si impongono Dirichlet-Dirichlet, Dirichlet-Neumann e Neumann-Neumann.

Overlapping e Dirichlet-Dirichlet

Il primo metodo viene definito overlapping per la posizione reciproca dei due sottodomini realizzati con la decomposizione, come mostrato in Figura 2.4.1, e Dirichlet-Dirichlet per le condizioni al contorno imposte.

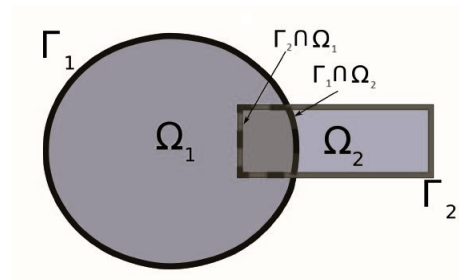


Figura 2.4.1: Divisione dominio con metodo di overlapping

Si considera quindi il dominio Ω irregolare con bordo Γ , lo si divide in due parti, Ω_1 e Ω_2 tra loro sovrapposte, con bordo rispettivamente Γ_1 e Γ_2 . A causa della sovrapposizione si avrà parte di Γ_1 all'interno del dominio Ω_2 , ($\Gamma_1 \cap \Omega_2$), e parte di Γ_2 all'interno del dominio Ω_1 , ($\Gamma_2 \cap \Omega_1$).

Si procede quindi in due step, nel primo si risolve il modello in Ω_1 applicando le condizioni al contorno su Γ_1 e si utilizza la soluzione per approssimare le condizioni al contorno sulla parte di bordo $\Gamma_2 \cap \Omega_1$.

Nel secondo step si procede con la risoluzione in Ω_2 applicando le condizioni al contorno su Γ_2 influenzate tramite una media pesata dalla soluzione calcolata nello step precedente. La soluzione ora verrà utilizzata per approssimare le condizioni al contorno della parte di $\Gamma_1 \cap \Omega_2$.

Successivamente si procede ripetendo il primo e in secondo step di modo che le soluzioni di uno influenzino le condizioni al contorno dell'altro fino ad arrivare a convergenza.

Si procede ripetendo i due step fino ad arrivare a convergenza nella sezione di overlapping.

Non-overlapping e Dirichlet-Neumann

Il secondo metodo di divisione ha sempre due step ma in questo caso non c'è sovrapposizione delle sezioni considerate.

Come mostrato in Figura 2.4.2 in questo caso il dominio Ω viene diviso in due parti, Ω_1 e Ω_2 che non si sovrappongono e hanno bordo Γ_1 , Γ_2 e Γ_{12} nella parte comune.

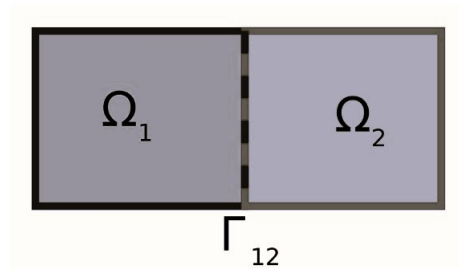


Figura 2.4.2: Divisione dominio con metodo di non-overlapping

Nel primo step si calcola Ω_1 con condizioni di Dirichlet sul bordo Γ_{12} . La soluzione determina attraverso una media pesata le condizioni di Neumann sul bordo Γ_{12} . Queste condizioni, nello step successivo, vengono imposte su Γ_{12} per risolvere in Ω_2 , con i risultati ottenuti si stimano nuovamente delle condizioni di Dirichlet sul bordo Γ_{12} e così tornare al punto precedente.

Si ripetono questi step in modo iterativo fino al raggiungimento di una convergenza sul bordo comune. Nel caso di più di due sezioni è necessario creare degli step per il calcolo delle condizioni

al contorno per ogni coppia di sezioni contigue.

Non-overlapping e Neumann-Neumann

Anche in questo caso si utilizza una divisione in sottodomini che non presenti overlapping e consiste in due step.

I due sottodomini vengono risolti in modo simultaneo, nel primo step sul bordo condiviso Γ_{12} si impongono condizioni di Dirichlet, nel secondo step vengono risolti sempre contemporaneamente ma in questo caso imponendo una condizione al contorno su Γ_{12} di Neumann data dalla differenza delle derivate nella direzione normale di Γ_{12} ottenute dal primo step. Si procede ricalcolando le condizioni di Dirichlet del primo passo e si in modo iterativo fino a convergenza.

2.5 Algoritmo dell'accoppiamento 1D-3D

Il modello multiscala si basa sulla divisione in regioni dove applicare modelli risolutivi differenti. Per la risoluzione di un problema attraverso questo modello è necessario creare un algoritmo in grado di passare dal modello 1D al modello CFD e viceversa.

Un possibile algoritmo è il seguente, [2]:

1. si assumono pressione e temperatura nel modello CFD pari a quelle delle condizioni al contorno nei nodi i e $i + 1$ calcolati nel modello 1D;
2. si fa partire il modello CFD applicato nella regione *near-field*;
3. si aggiunge la velocità del flusso all'interfaccia i e $i + 1$ per calcolare il tasso del flusso di massa globale e fissarlo per il modello 1D;
4. si calcola una temperatura media per le condizioni al contorno del modello 1D;
5. si avvia il modello 1D nella regione *far-field*;
6. si ripete tutto dallo step 1.

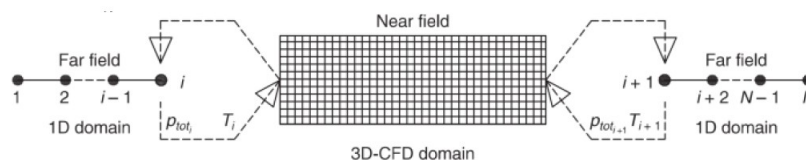


Figura 2.5.1: Accoppiamento tra modello 1D e CFD

Il metodo iterativo descritto è chiamato *direct coupling*, tale metodo riduce di molto il tempo computazionale pur avendo come scala temporale quella del modello CFD applicato nella regione *near-field*.

Un altro esempio di possibile algoritmo per un modello multiscala è quello utilizzato in [4].

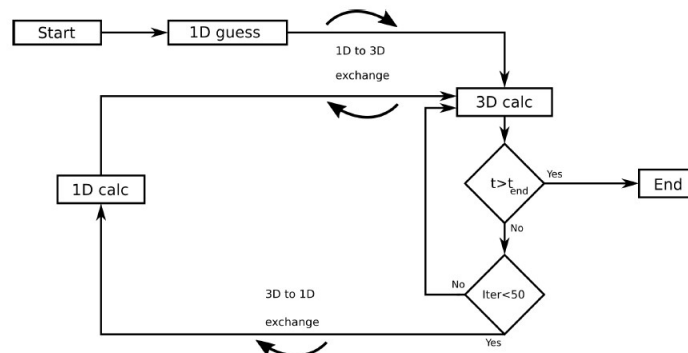


Figura 2.5.2: Algoritmo per modello multiscala con $Max_step = 50$

L'algoritmo inizia con il modello 1D e con la valutazione di condizioni al contorno da trasferire al modello 3D in modo omogeneo. Successivamente il modello 3D viene avviato e ad ogni iterazione controlla di non aver raggiunto tempo finale, T_{end} , e di essere al di sotto di un numero massimo di iterazioni, Max_step , valore scelto arbitrariamente. Appena è superato il valore Max_step il modello 3D passa le informazioni ottenute al modello 1D che da quel momento viene avviato simultaneamente fino al raggiungimento di T_{end} .

2.5.1 Condizioni al contorno

Uno dei problemi principali dei modelli multi-scala è dove fissare l'interfaccia tra i modelli 1D e 3D e come gestire le condizioni al contorno sull'interfaccia. Il confine tra le due regioni deve essere posizionata in una regione dove i gradienti di velocità e temperatura sono trascurabili per poter applicare il modello 1D senza incorrere in errori.

Un esempio di condizioni al contorno che possono essere applicate sono le **PRES** boundary e le **VEL** boundary.

PRES boundary

Le condizioni al contorno di tipo PRES vengono utilizzate nella regione sopravento, a monte dell'incendio, il confine viene posto ad una opportuna distanza dalla zona dove si verifica la stratificazione dei fumi.

Dal modello 3D al modello 1D avviene uno scambio di informazioni legate alla pressione. Si procede effettuando una media pesata della pressione sulla sezione del modello 3D ponderata sul flusso di massa. La pressione di ogni cella del modello 3D viene moltiplicata per densità e velocità della cella, la somma di tale valore su tutte le celle viene infine divisa per del prodotto di densità e velocità. Si ottiene così una media pesata della pressione che viene trasmessa al nodo del modello 1D.

Viceversa il modello 1D trasmette al modello 3D informazioni sul flusso di massa in modo omogeneo alla superficie del modello 3D. Per questo motivo è necessario porre il confine tra i due modelli ad una distanza dove non è disturbante l'uniformità del modello 3D, ovvero in una zona dove non si percepiscono conseguenze del fenomeno di backlayering. Tale fenomeno infatti genera variazioni drastiche di pressione e flussi bidirezionali non concordi con le condizioni omogenee trasmesse dal modello 1D. Tramite la velocità critica è possibile però valutare analiticamente la lunghezza di backlayering così da posizionare il confine ad una distanza ragionevole.

VEL boundary

In questo caso le condizioni al contorno vengono generalmente poste nella zona sottovento e le informazioni trasmesse dal modello 1D al modello 3D sono relative alla pressione mentre quelle inerenti al flusso di massa passano dal modello 3D al modello 1D.

Analogamente alle condizioni precedenti le informazioni trasmesse dal modello 3D al modello 1D vengono mediate sulla sezione 3D e il valore ottenuto viene passato al nodo 1D.

Il passaggio di informazioni sulla pressione dal modello 1D al 3D in questo caso è più complicato. Trasmettere la pressione del modello 1D come pressione uniforme a tutta la superficie del modello 3D crea instabilità. Per evitarlo ad ogni iterazione di definisce una nuova distribuzione di pressione, ovvero la media del comportamento della pressione nell'ultimo 5% del dominio nella direzione perpendicolare al confine. Infine la condizione VEL imposta combina la pressione media del modello 1D e la distribuzione appena calcolata del 3D.

In conclusione i modelli multi-scala sono modelli validi in grado di unire al meglio modelli 1D e 3D, sfruttando i loro punti di forza e cercando di minimizzare i loro difetti.

Tra i vantaggi di questi modelli c'è la notevole riduzione dei costi computazionali, ottenuta diminuendo la sezione di azione del modello 3D, e la qualità dei risultati, che si ottengono posizionando in modo opportuno i confini tra i due modelli.

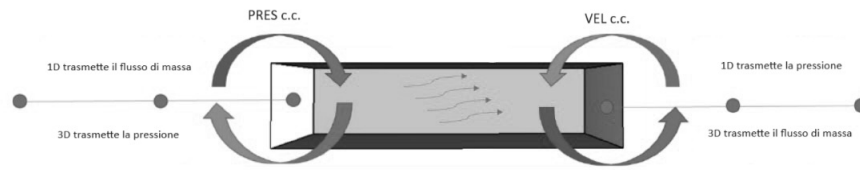


Figura 2.5.3: Condizioni al contorno PRES e VEL

D'altra parte nelle difficoltà legate al modello ci sono il posizionamento di tale confine e l'applicazione di opportune condizioni al contorno in grado di non compromettere l'affidabilità del modello.

Capitolo 3

Velocità del fronte dei fumi e simulazioni in Pyrosim

Le simulazioni e le analisi riportate in questo capitolo sono state effettuate in collaborazione con CANTENE SrL, azienda presso la quale ho svolto un tirocinio curriculare. L'azienda si occupa di analisi aerodinamiche e fluidodinamiche, Fire Safety Engineering, analisi dei rischi nelle gallerie e progettazione di sistemi di ventilazione.

Nel corso della mia esperienza di tirocinio ho avuto la possibilità di studiare la velocità dei fumi in casi specifici, di svolgere attività di analisi dati relativi a modelli 1D e 3D e soprattutto di effettuare simulazioni per lo studio dell'andamento dei fumi di incendi in galleria attraverso il software Pyrosim.

Nel seguente capitolo verranno illustrati i risultati principali ottenuti nello studio della velocità dei fumi, nelle gallerie nella tabella [3.1](#), e nelle simulazioni, utilizzando il modello presentato al paragrafo [3.2.1](#).

3.1 Velocità del fronte dei fumi

Nello studio degli incendi in galleria un'analisi approfondita è stata fatta sulla velocità assunta dai fumi quando questi superano il valore della temperatura ambiente del 20%, la temperatura ambiente viene assunta pari a $T_0 = 20C^\circ$.

3.1.1 Caratteristiche e condizioni iniziali

È stato analizzato l'andamento dei fumi in 6 gallerie con pendenze differenti. Le gallerie hanno una lunghezza pari a 654 m e sono divise in due tratti, il primo lungo 238.7 m e il secondo 415.3 m.

	Lunghezza	Pendenza
Caso 1	654m	0.5%
Caso 2	654m	1.5%
Caso 3	654m	3%
Caso 4	654m	5%
Caso 5	238.7m	0.5%
	415.3m	1.5%
Caso 6	238.7m	1.5%
	415.3m	-0.5%

Tabella 3.1: Caratteristiche gallerie analizzate

Inoltre sono stati presi in esame 3 tipi di incendi che si differenziano tra loro per la potenza.

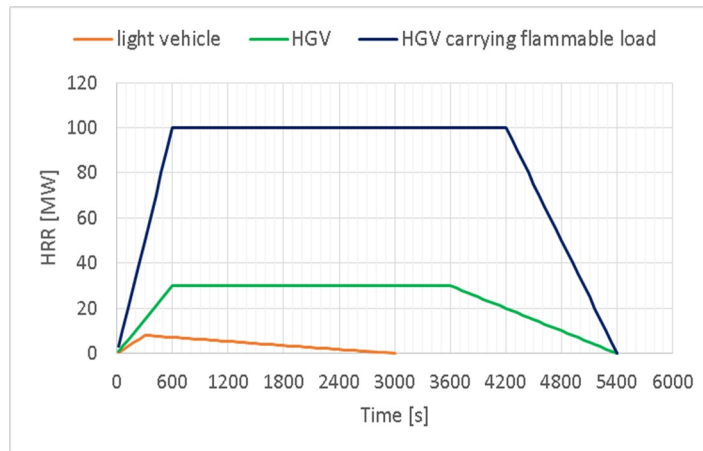


Figura 3.1.1: Valori della potenza dell'incendio in funzione del tempo

Le simulazioni vengono effettuate con incendi posizionati nel primo tratto a 203.88 m per ciascuna delle tre potenze e, analogamente, incendi posizionati a 401.84 m, ovvero nel secondo tratto, sempre con i tre tipi di potenze, per un totale di 6 scenari per ciascuna galleria.

I valori della velocità sono stati calcolati grazie ad uno script MATLAB.

I dati per il calcolo della velocità sono stati estrapolati da simulazioni 1D, nello specifico i dati utili sono: i valori della temperatura all'interno del tunnel in funzione del tempo e la posizione corrispondenti a ciascun valore della temperatura.

Sono stati poi passati in rassegna tutti i valori che la temperatura assume in una data posizione x , viene registrato il primo valore che supera del 20% T_0 e il secondo della simulazione in cui viene assunto questo valore, $t_{20\%}$.

Dopo aver analizzato tutti i 654 metri della galleria si procede con il calcolo della velocità media:

$$vel(x) = \frac{x}{t_{20\%}(x)}$$

dove $vel(x)$ è la velocità del fronte dei fumi in x e $t_{20\%}(x)$ è l'istante di tempo in cui la temperatura supera del 20% la temperatura ambiente nella posizione x .

3.1.2 Analisi dei dati

Nella figura 3.1.2 vengono riportati i grafici che rappresentano l'andamento del fronte dei fumi per i sei casi analizzati dove tr indica il tratto della galleria dove è posizionato l'incendio e pot la potenza analizzata. Le pendenze delle curve rappresentano le velocità del fronte dei fumi.

La prima cosa che si osserva è che le temperature salgono sopra il valore soglia solo nei metri successivi all'incendio, questo è dovuto al fatto che i dati utilizzati sono stati presi da simulazioni 1D quindi non in grado di prevedere la lunghezza di backlayering e quindi non in grado di prevedere la presenza di fumo nei metri precedenti all'incendio.

Per ciascuna curva possiamo affermare che maggiore è la distanza dall'incendio minore sarà la velocità, ovvero la pendenza della curva. Ciò è dovuto al fatto che la temperatura sale sopra il valore soglia in tempi brevi vicino l'incendio e in tempi maggiori man mano che ci si allontana.

Confrontando tra loro stesse potenze e stesse posizioni dell'incendio nei 6 casi si può affermare che maggiore è la pendenza del tratto dove viene posizionato l'incendio e maggiore sarà la velocità del fronte dei fumi.

Infatti il caso 4 è quello che riporta maggiore pendenza e quindi velocità maggiori.

I picchi che si osservano nei grafici relativi alla figura 4 e alla figura 6 stanno semplicemente ad indicare che nei metri antecedenti l'incendio la temperatura sale sopra il livello richiesto molti secondi dopo l'innesco dell'incendio.

Osservando poi in una stessa galleria l'andamento del fronte dei fumi con il medesimo posizionamento dell'incendio si ha che per potenze maggiori si hanno velocità maggiori.

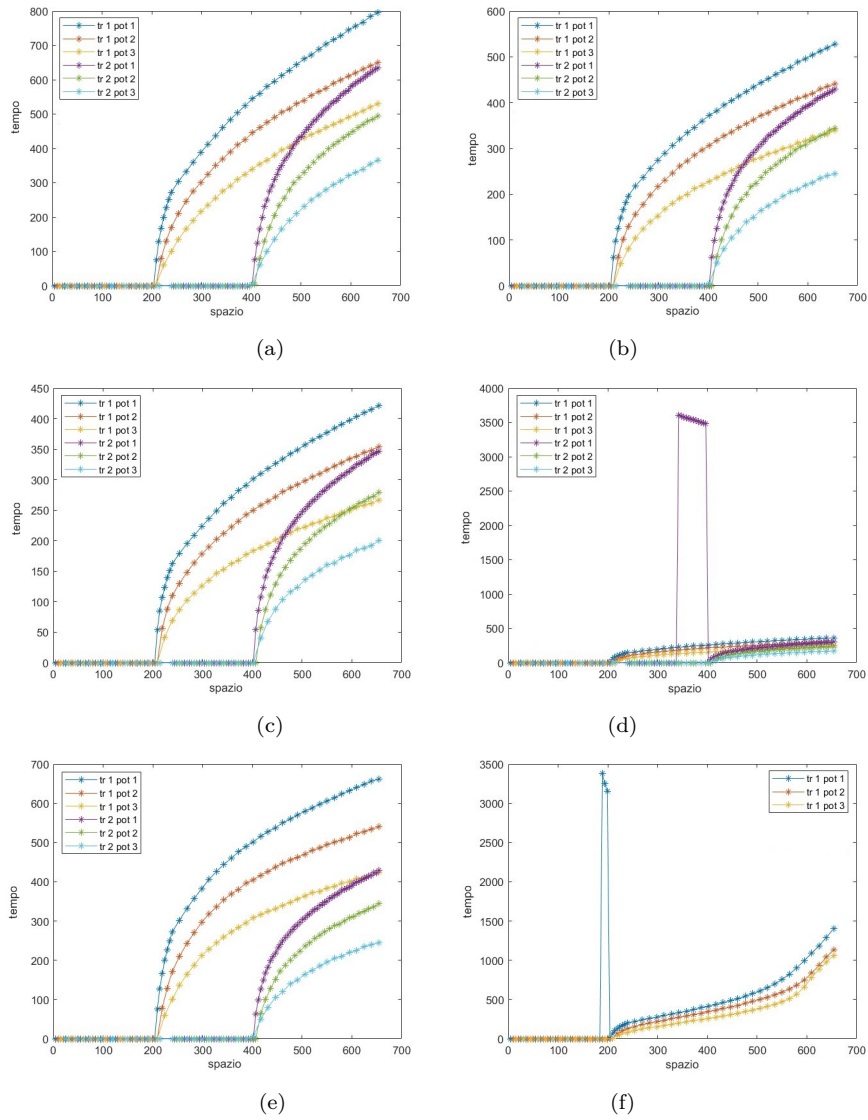


Figura 3.1.2: Andamento del fronte dei fumi.

(a) $L = 654 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

(b) $L = 654 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

(c) $L = 654 \text{ m}$; $p = 3\%$

(d) $L = 654 \text{ m}$; $p = 5\%$

(e) $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 0.5\%$; $L = 415.3 \text{ m}$; $p = 1.5\%$;

(f) $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 1.5\%$; $L = 415.3 \text{ m}$; $p = -0.5\%$;

3.2 Simulazioni Pyrosim

Fire Dynamics Simulator (FDS) è un modello CFD sviluppato appositamente per gli incendi in grado di descrivere i flussi di fumi e gas. Risolve numericamente le equazioni che descrivono l'evoluzione dell'incendio ponendo maggiore attenzione sul trasporto del fumo e del calore.

Per visualizzare i risultati ottenuti insieme ad FDS viene distribuito il software *Smokeview*, che permette di visualizzare i risultati della simulazione, li legge e riproduce una loro animazione. Grazie a *Smokeview* è facile visualizzare l'andamento del fumo e le variazioni di temperatura.

La prima versione di FDS è stata sviluppata per simulazioni di grande scala del movimento del fumo, condizioni ottime per incendi ventilati e per progettazioni dove il progettista è in grado di inserire i valori di HRR.

Le analisi FDS sono molto accurate e riescono a gestire anche fattori aleatori e di difficile previsione, inoltre un notevole vantaggio nelle simulazioni è la velocità di calcolo rispetto ad altri modelli CFD. Ciò è dovuto al fatto che FDS nasce per protezione antincendio, per cui non sono consentiti tempi di calcolo lunghi.

FDS legge un file di input dove sono inserite tutte le informazioni necessarie per procedere all'esecuzione.

Pyrosim della *Thunderhead Engineering Consultants, Inc.* è un software progettato come pre-processor per FDS, genera il file di input per FDS.

3.2.1 Caratteristiche e condizioni iniziali

Nelle simulazioni effettuate sono state analizzate 6 gallerie con pendenze differenti tra loro, menzionate nella tabella 3.1.

Lo scopo delle simulazioni è confrontare i valori della temperatura stimati da FDS e da un modello 1D e comprendere come la pendenza possa influire sulla lunghezza di backlayering dell'incendio.

Tramite il comando *Obstruction* è stata costruita la struttura della galleria di lunghezza pari a 654 m e una sezione di area pari a 81.0365 m² con una base di 10 m, ciascuna parete della galleria ha uno spessore pari a 0.5 m. Grazie al comando *Surfaces* è possibile scegliere il materiale o "non materiale" che definisce le caratteristiche fisiche del solido o delle aperture, nel caso delle pareti si è scelto il calcestruzzo.

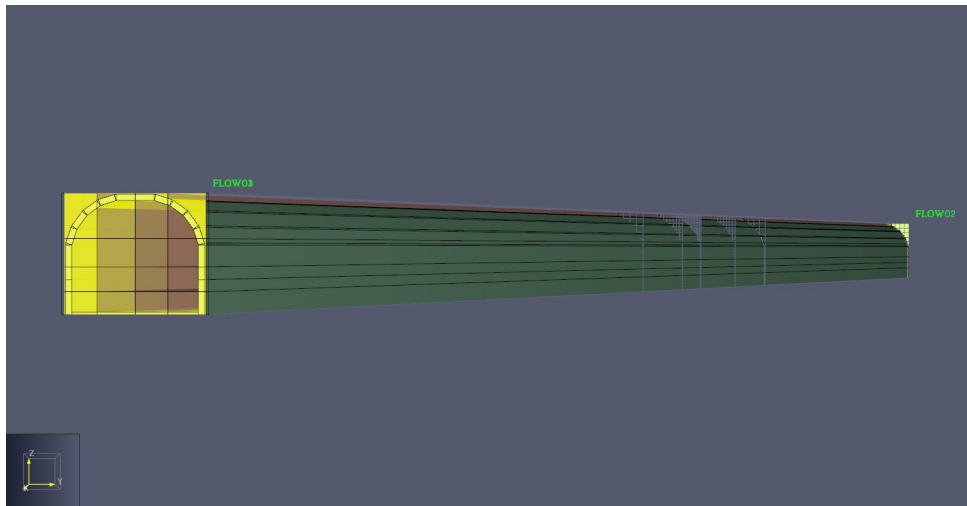


Figura 3.2.1: Modello galleria

Le condizioni al contorno sono imposte tramite la funzione *Vent*, comando apposito per descrivere le aperture sull'esterno ed assegnare ulteriori proprietà specifiche ad aree delimitate. Sono state quindi definite due *Vent* di dimensione pari alle aperture dei due portali alle quali è stata attribuita la *Surfaces Open*.

Per definire il focolaio è stata creata una "pozza" da dove si innesca l'incendio, ovvero una zona delimitata sulla parte della galleria corrispondente alla strada, alla quale sono state attribuite le caratteristiche dell'incendio.

Sempre grazie al comando *Surfaces* è stata creata una nuova superficie *Burner* che definisce le caratteristiche della pozza. L'HRR per unità di area è pari a $1 \text{ MW}/\text{m}^2$. L'incendio considerato ha una potenza pari a 8 MW per cui è stata creata attraverso la funzione *Vent* una sezione di 8 m^2 alla quale è stata attribuita la *Surfaces Burner*.

Nei primi 4 casi analizzati l'incendio è stato collocato a metà della galleria, 327 m , mentre per il quinto è stato posizionato a 119.35 m , ovvero a metà del primo tratto, infine per il caso 6 sono state fatte due simulazioni, la prima collocando l'incendio a 119.35 m , la seconda collocando l'incendio a 446.35 m , a metà del secondo tratto.

Per far avvenire la combustione è necessario definire la reazione chimica che la genera. Il comando *Reactions* permette di scegliere la reazione chimica che stabilisce i parametri specifici della combustione. Nel nostro caso la reazione scelta è *SFPE POLYURETHANE_GM27*, ovvero una combustione di poliuretano.

FDS permette di definire una singola reazione chimica e di tracciarne gli effetti grazie alla tecnica *mixture fraction*, una quantità scalare che indica la percentuale di massa ad un dato punto del flusso di uno o più componenti del gas.

Successivamente sono stati aggiunti dei *Devices*, ovvero dei dispositivi che permettono di leggere meglio alcuni valori dell'incendio, come sensori, sprinkles, rilevatori di calore e altro. Nello specifico sono stati aggiunti dei *Devices* sui portali per registrare la velocità in ingresso dell'aria.

Per tenere conto della temperatura sono state definite 6 *Slices*, superfici 2D che registrano le informazioni del piano dove sono state posizionate.

Infine è stata definita una mesh tale da bilanciare costo computazionale e accuratezza del modello. È stata utilizzata una mesh di circa 500 mila celle di dimensione differente in base alla vicinanza all'incendio. Sui 20 m centrati nell'incendio sono state create celle 0.2 x 0.2 x 0.2, 40 m prima e 40 m dopo quest'area le celle hanno dimensione 0.4 x 0.4 x 0.4, nel resto della galleria 0.8 x 0.8 x 0.8.

3.2.2 Analisi dei risultati

Di seguito verranno analizzati i risultati ottenuti con le simulazioni, valutando come variano le lunghezze di backlayering in funzione della pendenza e come varia la temperatura tra i valori ottenuti con il modello FDS e i valori presi da un modello 1D che analizza gallerie con le stesse caratteristiche.

Il primo obiettivo è valutare come la pendenza influisce sulla lunghezza di backlayering, per questo tutte le gallerie hanno le medesime caratteristiche al di fuori della pendenza.

L'altro obiettivo è mettere in luce la difficoltà del modello 1D di ricavare valori di temperatura attendibili, come spiegato nel paragrafo 2.2.3. Il modello 1D non riuscendo a prevedere il fenomeno del backlayering non riesce a fornire valori di temperatura differenti da quella ambiente per tutta la regione antecedente l'incendio.

Grazie alle animazioni create da *Smokeview* è stato possibile riconoscere gli intervalli in cui il fenomeno di backlayering risulta stazionario e quindi estrapolare i valori delle lunghezze di backlayering in questi intervalli per capire la massima lunghezza di backlayering raggiunta in tutti i casi analizzati. Per confrontare le lunghezze di backlayering tra loro sono stati invece scelti gli stessi istanti di tempo per i 6 casi.



Figura 3.2.2: Esempi di galleria con fumo

È stato possibile estrapolare i valori della temperatura grazie alle *Slices* inserite in fase di progettazione. Gli intervalli di tempo analizzati sono gli stessi di quelli utilizzati per la valutazione del fenomeno di backlayering.

Per gli istanti di tempo prescelti sono stati estrapolati i valori della temperatura indicati sulle slice 2D nei $30m/15m/5m$ antecedenti (tratto antecedente) al punto di innesco dell'incendio, ovvero a monte, e nei $5m/15m/30m$ successivi all'incendio (tratto successivo), ovvero a valle.

Nella trattazione con primo portale si indicherà il portale a monte, mentre con secondo portale quello a valle.

Per ogni *Slice* verticale sono stati registrate le temperature a 5/6 altezze differenti alle distanze indicate sopra, quelli indicati con tratto antecedente e tratto successivo, e in seguito è stata fatta una media dei valori. Essi sono stati poi confrontati con i valori di temperatura mediati sulla sezione rilevati nei medesimi istanti alle stesse distanze dall'incendio con il modello 1D.

Di seguito verranno riportate le lunghezze di backlayering, indicate con *lback*, e dei grafici della temperatura per i 6 casi analizzati.

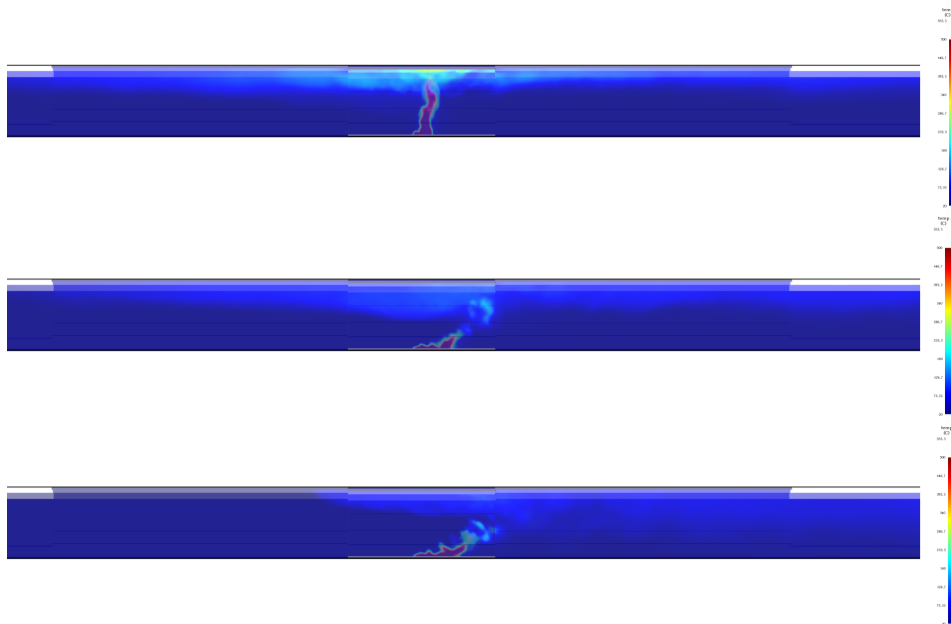


Figura 3.2.3: Esempi di distribuzione delle temperature in galleria

Caso 1: $L = 654 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Nel primo caso analizzato si verifica il fenomeno del backlayering ma non è possibile osservare un comportamento stazionario dello stesso. Per questo motivo per le analisi stati scelti 9 istanti di tempo con un intervallo di 100 secondi l'uno dall'altro.

tempo (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
lback (m)	184,6	292,11	out	out	out	out	out	out	out

Tabella 3.2: Lunghezza di backlayering (lback) caso 1: $L = 654 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Non verificandosi una stabilizzazione del fenomeno la lunghezza di backlayering è raggiunta la lunghezza massima, ovvero l'uscita del fumo dal primo portale, *out*. Questo comportamento potrebbe essere legato alla poca pendenza della galleria (infatti il caso 1 è quello con pendenza minore) e alle basse velocità sul primo portale registrate dai *Devices* applicati in fase di progettazione.

Di seguito sono stati riportati invece i grafici che indicano la temperatura rilevata con il modello FDS e con il modello 1D ogni 100 secondi.

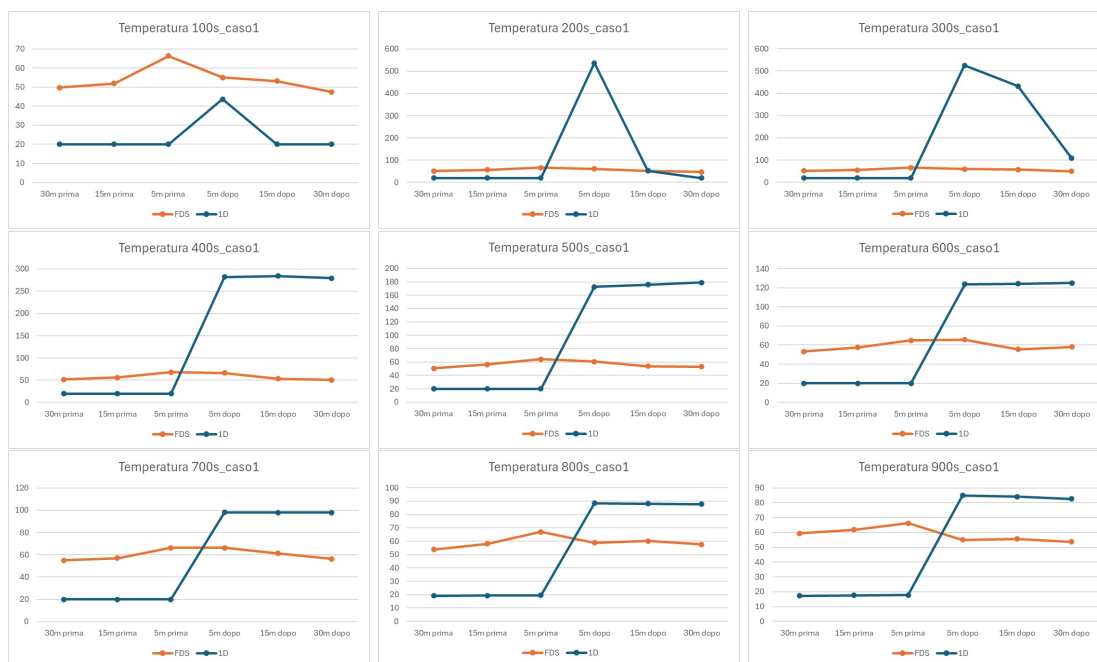


Figura 3.2.4: Temperature caso 1: $L = 654 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Nei metri a monte all'incendio nel caso 1D si hanno temperature pari alla temperatura ambiente. Ciò è dovuto al fatto che i modelli 1D non sono in grado di riprodurre il fenomeno del backlayering e quindi in assenza di fumo la temperatura rimane pari a quella ambiente.

Nel tratto successivo, fatta eccezione per la valutazione nei 100 secondi, il modello 1D registra temperature maggiori. Si hanno valori molto elevati a 200, 300 e 400 secondi nei 5 metri a destra dell'incendio.

Caso 2: $L = 654 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

Nel caso 2 i secondi analizzati sono quelli dove il fenomeno del backlayering è stazionario, ovvero 402 s, 429 s e 450 s.

tempo (s)	402	429	450
lback (m)	290	291	290

Tabella 3.3: Lunghezza di backlayering (lback) caso 2: $L = 654 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

Le lunghezze ottenute non sono elevate come quelle del caso precedente ma restano comunque alte. Andando a considerare infatti le velocità registrate dai *Devices* sul primo portale si hanno velocità basse che quindi contrasterebbero poco il fenomeno.

Procedendo con l'analisi della temperatura anche in questo caso per i valori dell'1D nell'area antecedente l'incendio si registra una temperatura pari alla temperatura ambiente.

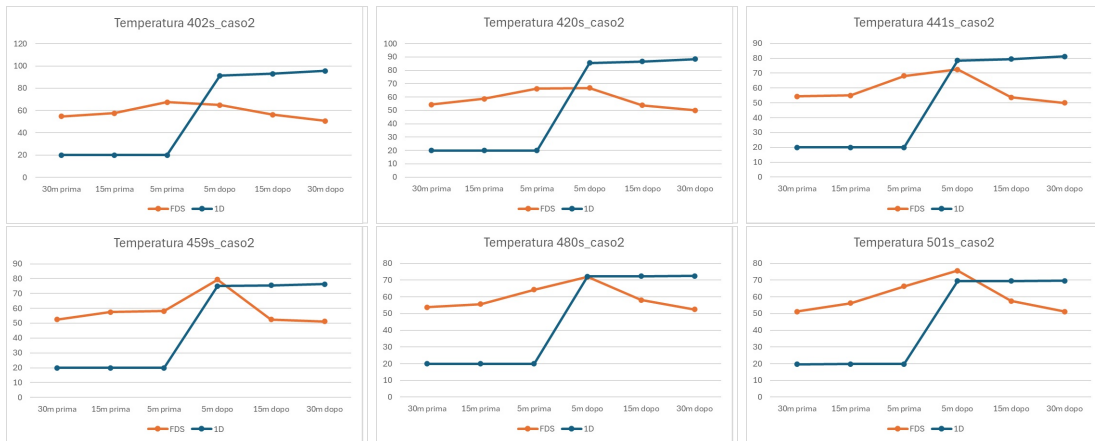


Figura 3.2.5: Temperature caso 2: $L = 654 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

In questo caso per l'analisi della temperatura si è ampliato l'intervallo di tempo scelto per l'analisi rispetto all'intervallo di stazionarietà del backlayering.

Le temperature nell'area successiva non sono estremamente elevate con il modello 1D ma si registrano valori comunque più alti di quelli del modello FDS, fatta eccezione per i 5 metri successivi all'incendio nei secondi 459, 480 e 501.

Caso 3: $L = 654 \text{ m}$; $p = 3\%$

Analogamente al caso precedente gli istanti di tempo nei quali sono stati registrati i dati sono relativi ad una lunghezza di backlayering stazionaria.

tempo (s)	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
lback (m)	167.9	171.42	174.17	175.7	175.7	175.7	174.17	172.48	169.87	167.9	162.83

Tabella 3.4: Lunghezza di backlayering (lback) caso 3: $L = 654 \text{ m}$; $p = 3\%$

La lunghezza di backlayering massima raggiunta è pari a circa 175.7 m, minore rispetto ai casi precedenti.



Figura 3.2.6: Temperature caso 3: $L = 654 m$; $p = 3\%$

Nell'area antecedente l'incendio si ha sempre una temperatura di 20°C, mentre nel tratto successivo si rilevano temperature superiori con il modello 1D rispetto al modello FDS. Nei 30m successivi all'incendio nei secondi 140, 150 e 160 si osservano temperature inferiori nel modello 1D rispetto al modello FDS. Poi si ha un aumento delle temperature nell'1D fino ad arrivare anche a valere il doppio della temperatura registrata con FDS sempre a 30m dall'incendio.

Caso 4: $L = 654 \text{ m}$; $p = 5\%$

Anche in questo caso i secondi analizzati sono quelli dove si ha una lunghezza di backlayering stazionaria.

tempo (s)	80	90	100	110	120	130	140	150
lback (m)	111,77	116,41	119,86	121,16	121,16	119,86	116,41	111,77

Tabella 3.5: Lunghezza di backlayering (lback) caso 4: $L = 654 \text{ m}$; $p = 5\%$

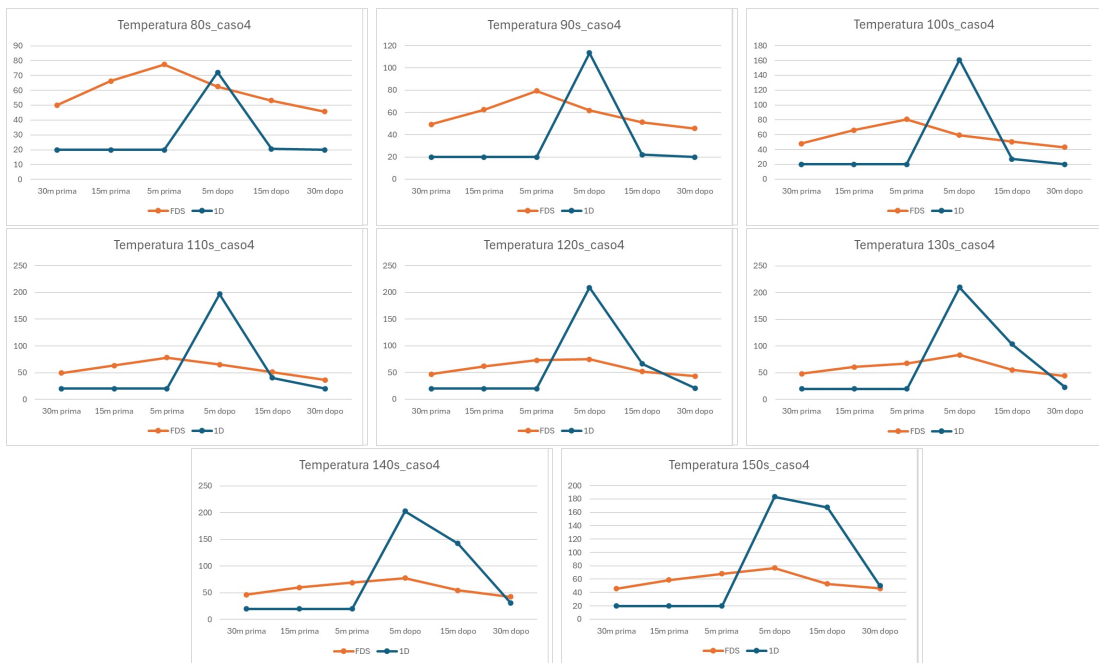


Figura 3.2.7: Temperature caso 4: $L = 654 \text{ m}$; $p = 5\%$

Nel tratto antecedente nel modello 1D si registra una temperatura pari a 20°C .

Dei 4 casi analizzati questo è quello con maggiore pendenza, infatti la lunghezza di backlayering stazionaria si registra dopo soli 80 secondi. La temperatura nei 5 metri a valle dell'incendio è sempre maggiore nel modello 1D rispetto al modello FDS, mentre i valori di temperatura registrati con il modello 1D, 15 e 30 metri a valle dell'incendio, sono inferiori ai dati registrati con il modello FDS. Molto probabilmente ciò è legato al fatto che gli istanti analizzati sono relativamente prossimi al momento dell'innesco, infatti se si osservano i grafici a 130, 140 e 150 secondi si rilevano tempera-

ture maggiori nel modello 1D.

Caso 5: $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Il caso 5 e il caso 6 sono gli unici analizzati in cui la pendenza della galleria varia tra il primo e il secondo tratto.

Nel caso 5 si ha una pendenza nel primo tratto pari a 0.5% e nel secondo tratto pari a 1.5%, nella simulazione l'incendio è stato posizionato a metà del primo tratto, ovvero a 119.35 *m* dal primo portale.

Dall'analisi della simulazione si osserva che si genera il fenomeno del backlayering per tutti i 900s analizzati, il fumo che si sposta verso il primo portale non torna indietro ma prosegue fino a uscire. Per le analisi sono stati scelti 9 istanti di tempo con un intervallo di 100 secondi l'uno dall'altro.

tempo (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
lback (m)	out	out	out	out	out	out	out	out	out

Tabella 3.6: Lunghezza di backlayering (lback) caso 5: $L_{\text{tratto}} = 238.7 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Nel primo tratto si ha la stessa pendenza del caso 1, per cui il motivo di questo comportamento potrebbe essere analogo, ovvero dovuto alla poca pendenza e alle basse velocità. Inoltre in questo caso la vicinanza dell'incendio al primo portale favorisce ancora di più questo comportamento.

Fatta eccezione per i metri precedenti all'incendio, nei secondi 100 e 200 si osservano temperature maggiori nelle simulazioni FDS, mentre già da 300s in poi si hanno temperature relative al modello 1D maggiori rispetto al modello FDS, per poi abbassarsi nuovamente nei secondi 700, 800 e 900.



Figura 3.2.8: Temperature caso 5: $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 0.5\%$

Caso 6 primo tratto: $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

Analogamente al caso precedente le pendenze nel primo e nel secondo tratto sono differenti, 1.5% nel primo e -0.5% nel secondo, l'unico con pendenza negativa.

È stata effettuata una simulazione ponendo l'incendio a metà del primo tratto, ovvero a 119.35 m dal primo portale e una con l'incendio a 446.35 m , metà del secondo tratto.

Analizzando la simulazione con l'incendio nel primo tratto si osserva che il fumo procede verso monte fino a uscire dal primo portale, per cui sono stati analizzati 9 istanti di tempo con un intervallo di 100 secondi l'uno dall'altro.

tempo (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
lback (m)	out	out	out	out	out	out	out	out	out

Tabella 3.7: Lunghezza di backlayering (lback) caso 6 primo tratto: $L_{\text{tratto}} = 238.7 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

Il caso 6 nel primo tratto ha la stessa pendenza del caso 2, dove il fumo arriva ad essere stazionario per un intervallo di tempo. Questo comportamento differente è imputabile alla vicinanza dell'incendio al primo portale, infatti nel caso 2 la lunghezza di backlayering massima raggiunta è di circa 291 m lunghezza maggiore della distanza dal primo portale al punto d'innesco dell'incendio.

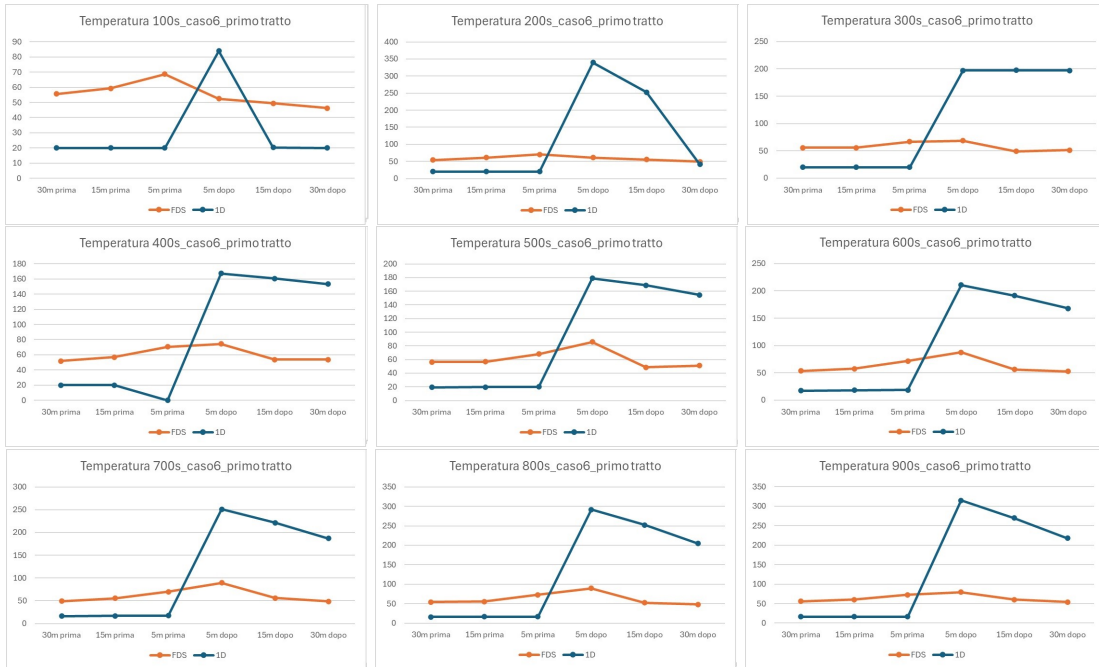


Figura 3.2.9: Temperature caso 6 primo tratto: $L = 238.7 \text{ m}$; $p = 1.5\%$

Nei metri antecedenti l'incendio lo stesso comportamento dei casi precedenti, mentre fin da 100 secondi nei metri successivi all'incendio si ha una temperatura maggiore nelle simulazioni 1D rispetto alle simulazioni FDS, andamento che prosegue per tutta la simulazione.

Caso 6 secondo tratto: $L = 415.3 \text{ m}$; $p = -0.5\%$

Questo caso si sviluppa nella medesima galleria del caso precedente, però l'incendio viene collocato a metà del secondo tratto, ovvero 446.35 m dal primo portale.

Questo è l'unico tra i casi analizzati con una pendenza negativa. In questo scenario, con l'incendio collocato nel secondo tratto è comprensibile che inizialmente l'incendio si sposti verso la parte più alta, quindi verso monte. Il fumo però non resta in stallo nella parte alta della galleria dove varia la pendenza, ovvero a 238.7 metri dall'ingresso, ma prosegue fino ad arrivare al primo portale.

tempo (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
lback (m)	182,38	291,29	376,48	436	out	out	out	out	out

Tabella 3.8: Lunghezza di backlayering (lback) caso 6 secondo tratto: $L_{\text{tratto}} = 415.3 \text{ m}$; $p = -0.5\%$

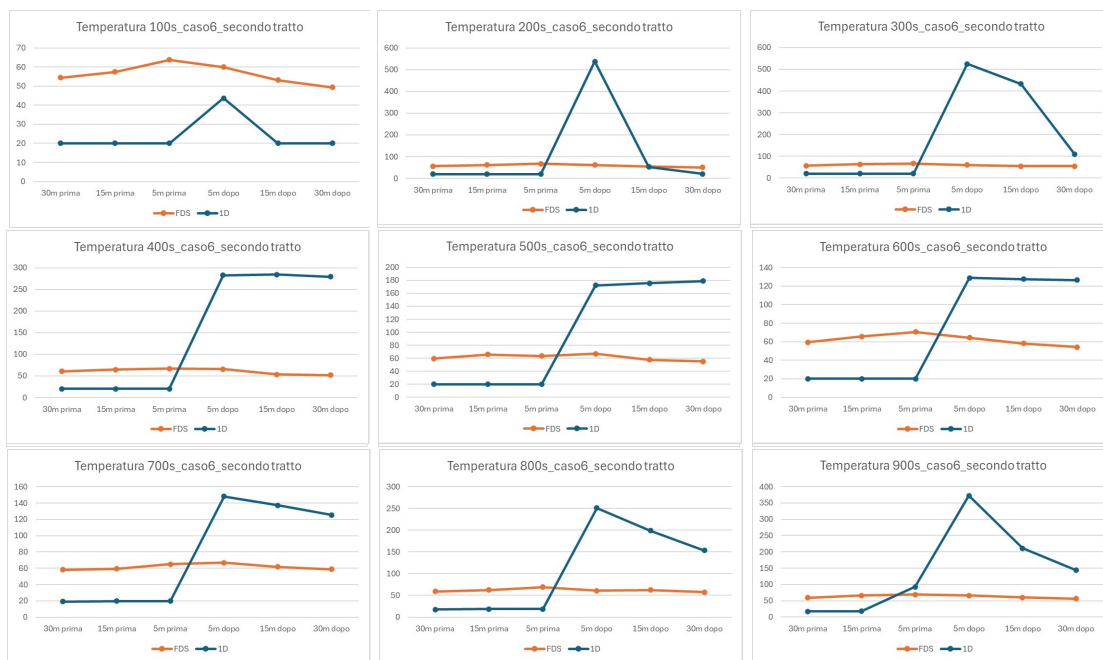


Figura 3.2.10: Temperature caso 6 secondo tratto: $L = 415.3 \text{ m}$; $p = -0.5\%$

Nei metri antecedenti l'incendio, analogamente ai casi precedenti si hanno 20°C nelle simulazioni 1D e temperature maggiori nei metri successivi, dove si hanno temperature maggiori nelle simulazioni 1D rispetto quelle FDS.

3.2.3 Commenti

Dalle analisi appena riportate possiamo affermare che per quanto riguarda la temperatura nel primo tratto si hanno valori pari a 20°C nel modello 1D legate al fatto che i modelli 1D non riescono a simulare il fenomeno del backlayering.

Nel secondo tratto, invece, si registrano temperature maggiori con il modello 1D, fatta eccezione per pochi istanti di tempo tra quelli analizzati.

Questi risultati confermano il fatto che il modello 1D è utile per simulazioni qualitative e in casi in cui è necessario ripetere simulazioni svariate volte ma non è in grado di fornire valori attendibili della temperatura.

Per valutare quanto la lunghezza di backlayering è influenzata dalla pendenza osserviamo ora le lunghezze di backlayering dei 6 casi negli stessi istanti di tempo:

tempo (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
lback FDS caso 1 (m)	184,6	292,11	327	327	327	327	327	327	327
lback FDS caso 2 (m)	170.84	247.37	280.97	289.47	289.16	281.63	273.79	263.55	257.29
lback FDS caso 3 (m)	148.01	174.17	147.36	120.73	96.43	86.84	78.23	76.58	77.97
lback FDS caso 4 (m)	119,86	82.20	49.94	34.1	22.57	16.32	16.32	15.60	15.60

Tabella 3.9: Lunghezze di backlayering

I casi 5 e 6 non sono stati inseriti poichè la posizione dell'incendio è differente rispetto gli altri 4 casi e quindi seguirebbe un'analisi e una deduzione errata.

Dalla tabella 3.9 si evince che le lunghezze di backlayering minori sono registrate nel caso 4 ovvero nel caso con maggiore pendenza, 5%, mentre le lunghezze maggiori si verificano nel caso 1, quello con pendenza minore 0.5%.

Possiamo poi osservare che con l'aumentare della pendenza diminuisce l'intervallo di tempo nel quale il fenomeno di backlayering raggiunge la massima lunghezza, maggiore è la pendenza prima raggiunge la lunghezza massima o la stazionarietà.

Raggiungendo prima la stazionarietà il fumo tornerà verso la sorgente in tempi minori e quindi il fumo occuperà la zona a valle dell'incendio per meno tempo.

In conclusione possiamo affermare che maggiore è la pendenza minore sarà la lunghezza di backlayering.

Questo comportamento è legato all'effetto camino, ovvero la tendenza dei gas di andare verso l'esterno dovuta al loro riscaldamento e alla necessità di stabilizzare la differenza di densità e di pressione tra il punto più in basso e quello più in alto.

Un altro fattore oltre l'effetto camino ad influenzare il fenomeno di backlayering è la velocità in ingresso dell'aria, infatti velocità maggiori contrastano il fenomeno.

Conclusione

I risultati ottenuti con le simulazioni ci permettono di capire meglio alcune differenze tra i modelli CFD e i modelli 1D. Come previsto si osserva che il modello CFD, analizzato nel paragrafo 2.1, è in grado di fornire un quadro completo del fenomeno in modo più o meno dettagliato in base alle informazioni richieste in fase di progettazione. Mentre il modello 1D illustrato nel paragrafo 2.2 è in grado di dare solo informazioni qualitative del sistema preso in esame.

I due modelli sono stati paragonati in particolare sulla previsione dei valori di temperatura e il modello 1D risulta abbastanza fallimentare. I risultati dedotti dal modello 1D nella regione antecedente l'incendio sono sempre pari alla temperatura ambiente non essendo in grado di prevedere il fenomeno di backlayering, fenomeno che come già spiegato è incisivo in fase di evacuazione. Nell'area successiva all'incendio invece prevede temperature eccessivamente elevate. Fornendo risultati distanti dalla realtà c'è il rischio di inserire impianti di sicurezza eccessivi.

Le simulazioni inoltre forniscono informazioni sulle lunghezze di backlayering. Il risultato principale ottenuto è che la pendenza influenza molto i risultati. Una pendenza alta potrebbe favorire le operazioni di salvataggio in quanto contribuisce ad ostacolare il fenomeno del backlayering.

Gli incendi in galleria non sono fenomeni facili da studiare. Ci sono diversi fattori, parametri e condizioni da valutare, tipo la pendenza e la velocità dell'aria in ingresso nel tunnel.

Un elemento fondamentale per diminuire i rischi generati dagli incendi in galleria è un adeguato sistema di ventilazione. In base alle caratteristiche di ciascun tunnel è necessario studiare e valutare il tipo di sistema di ventilazione migliore in grado di contrastare l'avanzare del fuoco e dei fumi.

Uno dei pericoli principali è il fenomeno del backlayering. In caso di backlayering i fumi si spostano verso il portale opposto ostacolando l'evacuazione della galleria. Lo studio di tale fenomeno aiuta a comprendere quali sono i principali fattori che agilitano la sua formazione e quali quelli

che la ostacolano. Gli impianti di sicurezza infatti agiscono facendo uscire i fumi da un unico portale.

Per quanto riguarda i modelli matematici da utilizzare per riprodurre gli incendi in galleria possiamo affermare che per un numero elevato di simulazioni che non necessitano risultati eccessivamente accurati il modello che si addice è quello 1D.

Se invece sono necessari valori più attendibili bisogna ricorrere ad una simulazione CFD in 3D. Gli eccessivi costi computazionali però rendono queste simulazioni possibili per brevi gallerie.

Per lunghe gallerie dalle quali è necessario ottenere risultati attendibili è conveniente utilizzare il metodo multiscale che fornisce il giusto equilibrio tra costo computazionale e attendibilità della soluzione utilizzando nella parte più sensibile da valutare, quella dell'incendio, modelli CFD e 1D nella restante galleria.

Le simulazioni effettuate con Pyrosim mettono in luce come il modello 1D non riesca a fornire dati sulla temperatura affidabili. Invece il modello CFD è in grado di fornire valori della lunghezza di backlayering e di ricavare temperature attendibili.

In conclusione è quindi possibile affermare che i diversi modelli descritti in quest'elaborato sono ciascuno adatto a circostanze differenti.

La tesi ha cercato quindi di dare un quadro generale del fenomeno dell'incendio in galleria e dei modelli utilizzati e di simulare alcuni scenari per dimostrare la loro applicazione. Sicuramente, però, la vastità e la complessità dell'argomento permette di poter fare analisi più approfondite dei metodi utilizzati e dei parametri e delle caratteristiche che lo influenzano.

Bibliografia

- [1] Haukur Ingason, Ying Zhen Li, Anders Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*, Springer Science Business Media New York, (2015) pp. 321 - 369.
- [2] Alan Beard, Richard Carvel, Norman Rhodes, David Charters, Francesco Colella, *Handbook of Tunnel Fire Safety*, ICE Publishing, (2012) pp. 329 - 390.
- [3] Nils Johansson, Enrico Ronchi, Rugiada Scozzari, Michele Fronterre, *The use of multi-zone modelling for tunnel fires*, article elsevier (2023).
- [4] Jesus Alberto Mejias Tuni, *Multiscale approach applied to fires in tunnels - Model optimization and development*, PhD Thesis, Politecnico di Torino (2022).
- [5] Sara Cosentino, *Innovative Modelling Approaches for the Design, Operation and Control of Complex Energy System with Application to Underground Infrastructures*, PhD Thesis, Politecnico di Torino (2017).
- [6] *Esperienze tratte dai passati incendi in galleria*, PIARC, <https://tunnels.piarc.org/it/aspetti-generalisicurezza/esperienze-tratte-dai-passati-incidenti-galleria>.
- [7] Lamberto Mazziotti, *Gli incendi in galleria: un problema anche per le squadre di soccorso*, articolo (2002).
- [8] Lamberto Mazziotti, *Gallerie: prevenzione, protezione e soccorsi per ridurre il rischio*, ANSFISA - Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), https://www.ansfisa.gov.it/focus/-/asset_publisher/ZHkklPeK807c/content/gallerie-prevenzione-protezione-e-soccorso-per-ridurre-il-rischio?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_ZHkklPeK807c_redirect=https%3A%2F%2Fwww.ansfisa.gov.it%2Ffocus%3Fp_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_

ZHkklPeK807c%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_ZHkklPeK807c_cur%3D0%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_ZHkklPeK807c_assetEntryId%3D1618687.

- [9] Aldo Lanfranconi, *Analisi del rischio nelle gallerie stradali - Metodo per la definizione del danno connesso all'accadimento di un incendio*, Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Politecnico di Milano (2013/2014).
- [10] ANAS - Condirezione Generale Tecnica - Direzione Generale Progettazione, *Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente*, Linee Guida ANAS (2009).
- [11] *Impianti e sistemi*, PIARC, <https://tunnels.piarc.org/it/operativita-e-requisiti-di-sicurezza/impianti-e-sistemi>.
- [12] Pietro Favia, *Simulazione di un incendio in galleria con il software FDS*, Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Università degli Studi di Padova (2012/2013).
- [13] Luciano Laterza, *Sicurezza delle gallerie stradali in esercizio*, Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Torino (2018/2019).
- [14] Claudio Canuto, *Appunti per il corso di Fluidodinamica e Ingegneria del Vento Computazionali - Modulo di Analisi Numerica*, Politecnico di Torino, (2020).
- [15] Alfio Grillo, *Forma Euleriana e Forma Lagrangiana delle Equazioni di Bilancio - Appunti per il corso di Meccanica dei Mezzi Porosi*, Politecnico di Torino, (2021).
- [16] *Equazioni della Fluidodinamica e metodologia CFD*, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [17] Dominic D'Ambrosio, *Governing equation - Appunti per il corso di Fluidodinamica e Ingegneria del Vento Computazionali - Modulo di CFD*, Politecnico di Torino.
- [18] Tzu-Sheng Shen, Yu-Hsiang Huang, Shen-Wen Chien, *Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene*, (2008), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132306003908>.
- [19] Piotr Smardz, *Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows*, Master of Science in Fire Safety Engineering - University of Ulster, (2006).

- [20] Giovanni Bellomia, *Introduzione a FDS*, FSE-Italia.eu, (2020).
- [21] *Pyrosim - Un pre-processore per FDS*, FSE-Italia, <https://www.fseitalia.it/blog/index.php/2023/10/17/pyrosim-un-pre-processore-per-fds/#:~:text=%C3%A8%20uno%20strumento%20software%20progettato,dell'ambiente%20oggetto%20della%20simulazione..>
- [22] *Pyrosim - Creazione del focolaio (Burner)*, FSE-Italia, <https://www.fseitalia.it/blog/index.php/2023/12/28/pyrosim-creazione-del-focolaio-burner/>.