

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di laurea in  
Ingegneria Energetica



**Analisi dell'impatto di incendi in ambienti confinati  
Prestazioni dei filtri a prova di fumo in un tunnel di  
linea metropolitana**

Relatore: Prof. Pierangelo ANDREINI

Correlatore: Ing. Luca IANNANTUONI

Correlatore: Ing. Eugenio GALLI

Tesi di laurea di:

Gian Battista ROTINI matr. 746224

Anno Accademico 2011-2012



## Ringraziamenti

Innanzitutto, vorrei esprimere la mia gratitudine al Prof. Pierangelo Andreini, relatore della mia tesi, per l'aiuto e le preziose indicazioni fornitomi durante la stesura del lavoro. Desidero, inoltre, ringraziare l'ing. Luca Iannantuoni per la costante disponibilità che mi ha dimostrato, gli insegnamenti ricevuti e per tutte le ore che mi ha dedicato pazientemente, aiutandomi ad approfondire la conoscenza di discipline mai troppo vicine durante gli anni di studi. Non voglio dimenticare neppure l'ing. Daniele Ettorre, che ha fornito un contributo non indifferente alla finalizzazione dei risultati. Vorrei ricordare inoltre l'ing. Eugenio Galli e ing. Andrea Paradiso della Metropolitana Milanese S.p.A. per il graditissimo sostegno e confronto ricevuto durante lo sviluppo delle ricerche e l'analisi dei risultati.

Se sono arrivato fino a questo punto il merito non è esclusivamente mio ma, anche, di tutti coloro che mi circondano e che hanno creduto con me, ognuno a suo modo; non posso fare altro, quindi, di ringraziare tutti per il sostegno, l'incoraggiamento e i consigli ricevuti in tutti questi anni.

Il primo pensiero va, ovviamente, ai miei genitori, senza i quali non sarei mai potuto giungere a questo punto, non solo per il sostegno economico, che sicuramente è stato fondamentale, ma per quell'aiuto, a volte tacito e a volte esplicito, indispensabile per superare i numerosi ostacoli incontrati nel cammino della vita e tutti quei momenti di stress, ansia e nervosismo che ne fanno parte.

Un caloroso ringraziamento lo esprimo a Linda e Stefano, con cui ho avuto la possibilità di studiare gomito a gomito soprattutto nell'ultimo anno; a Tony, per i momenti di non-studio e le divagazioni su temi energetici che non si sa dove finiremo; a Paolo, per essere stato come un fratello maggiore a cui andare a chiedere lumi tecnico-etici.

Come non ringraziare infine altri tre personaggi, a me molto cari, che da anni sono parte integrante del mio saturday night. A Riccardo, per l'inestimabile spirito di iniziativa e intraprendenza; a Stefano, che mi fa viaggiare nei migliori posti nel mondo restando comodamente seduto; a Marco, per l'indiscutibile sapienza ingegneristica e cultura cinematografica.



## Sommario

Lo scopo di questo lavoro di tesi, sviluppato in collaborazione con Metropolitana Milanese S.p.a. e la Commissione Prevenzione Incendi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano, riguarda l'analisi delle prestazioni di un filtro a prova di fumo a servizio di un tipico percorso di esodo di un tunnel di linea metropolitana. Tale analisi è stata eseguita mediante l'impiego di un opportuno codice di calcolo CFD (OpenFOAM ©) e ha riguardato due diversi problemi: il primo inerente la verifica di un'ideale sezione del camino di estrazione nel caso di ventilazione naturale; il secondo il confronto in termini delle diverse performance ottenute nel caso di ventilazione naturale e di ventilazione forzata in immissione in base ad opportune ipotesi condivise con i tecnici di Metropolitana Milanese. Lo scenario d'incendio considerato, che prevede un rilascio di potenza di progetto di 10 MW localizzato nel sottocassa del treno al centro del convoglio, ha l'obiettivo di verificare l'adeguatezza delle diverse strategie, una volta definiti gli opportuni criteri di sicurezza sulla base dei quali sono state confrontate le soluzioni proposte. L'interesse principale è stato quello di confrontare la soluzione che prevede di mantenere libere dai fumi le vie di esodo mediante ventilazione naturale oppure ventilazione forzata in immissione. Per quanto riguarda il caso della ventilazione naturale si è prima proceduto alla determinazione della sezione del camino ottimale tra diverse ipotizzate, in assenza di chiare indicazioni a riguardo, mentre per quanto riguarda la ventilazione forzata si sono considerate le portate usualmente impiegate in tali circostanze. Per poter confrontare tra loro le prestazioni dei camini in immissione forzata o in estrazione naturale è stato necessario definire i tempi di attivazione delle unità ventilanti e il confronto ha richiesto di considerare diverse condizioni di ventilazione in galleria. In tale modo è stato possibile evidenziare le criticità principali delle varie soluzioni proposte, per poter fornire utili indicazioni all'ottimizzazione di tali sistemi antincendio. La complessità dello scenario considerato e la variabilità delle condizioni iniziali e al contorno non ha permesso di considerare tutte le possibili configurazioni, ma quelle oggetto delle simulazioni sono estremamente significative e sempre ragionevolmente a vantaggio della sicurezza, in modo da fornire una efficace rappresentazione delle conseguenze degli incendi considerati ai fini della valutazione del rischio.

**Parole Chiave:** filtro a prova di fumo, incendio, galleria, metropolitana, OpenFOAM, strategie antincendio, ingegneria antincendio

## Abstract

This research thesis, developed in collaboration with Metropolitana Milanese S.p.a. and Commissione Prevenzione Incendi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano, presents benchmarks analysis about a smokeproof enclosure, of a typical emergency egress in a subway tunnel line. This analysis have been developed running a CFD code (OpenFOAM ©) and considered two different trouble; the first inherent the check of an appropriate vestibule shaft section extracting smoke in natural convection; the second about the comparison of different performance obtained in case of open or mechanized ventilated vestibule, depending on appropriate hypothesis shared with Metropolitana Milanese technician. The fire scenario

considered, which foresee a designed 10 MW heat release rate localized into the coach undercarriage in the middle of a train, aim to verify the adequacy of different fire fight strategy, through convenient safety criteria definition. Main interest has been oriented at the comparison of two principal solution to keep clear from smoke escape route by natural and forced ventilation. As regard natural ventilation case, first an optimum section value of the vestibule shaft has been determined among presumed, in absence of certain informations about it, while about forced ventilation tunnel have been considered usual flows adopted in this circumstances. To compare open and mechanized ventilation vestibule performance definition time of activation of ventilation systems is needed and the comparison required to consider different tunnel ventilation conditions. In this way has been possible to highlight principal criticality of various solutions suggested, which provide useful information to optimize fire fighting systems. The complexity of fire scenario considered, initial and boundary conditions variability, have not allow to consider all possible configurations, but those simulations studied are extremely significant and always reasonably behalf security, to provide an effective consequence representation of fire studied to ensure risk assessment.

**Keywords:** smokeproof enclosure, fire, tunnel, subway, OpenFOAM, fire fighting strategy, Fire Safety Engineering

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>15</b>
<b>1 Fenomenologia degli incendi</b>	<b>19</b>
1.1 Fondamenti di combustione . . . . .	20
1.2 Analisi fisico-matematica . . . . .	23
1.3 Effetti dell'incendio sui materiali e sulle strutture . . . . .	31
1.4 Effetti degli incendi sulle persone . . . . .	35
1.5 Analisi e controllo del rischio di incendio . . . . .	38
<b>2 Prevenzione degli incendi nelle linee delle metropolitane</b>	<b>41</b>
2.1 Sistemi di protezione attiva . . . . .	43
2.1.1 Principali agenti estinguenti . . . . .	45
2.1.2 Sistemi antincendio ad acqua e a gas . . . . .	48
2.2 Sistemi di protezione passiva . . . . .	51
2.3 Smoke managment . . . . .	51
2.3.1 Ventilazione forzata . . . . .	52
2.3.2 Ventilazione naturale . . . . .	55
2.4 Criteri di sicurezza . . . . .	55
<b>3 Modellazione dello Scenario</b>	<b>59</b>
3.1 Descrizione dello Scenario . . . . .	59
3.1.1 Scala e filtro a prova di fumo . . . . .	59
3.1.2 Geometria dello scenario . . . . .	62
3.1.3 Dominio di calcolo . . . . .	62
3.2 Descrizione del Codice . . . . .	68
3.2.1 Metodo ai volumi finiti . . . . .	69
3.2.2 Equazioni di conservazione . . . . .	70
3.2.3 Turbolenza . . . . .	72
3.2.4 Scambio termico . . . . .	78
3.2.5 Modello di combustione . . . . .	80
3.2.6 Modello di soot . . . . .	82
3.2.7 Descrizione del codice di calcolo impiegato . . . . .	83
3.3 Analisi di Sensitività . . . . .	87
3.3.1 Grid Sensivity . . . . .	90
3.3.2 Effetto della rugosità . . . . .	93
3.3.3 Scambio termico alle pareti . . . . .	94
3.4 Setup Numerico . . . . .	96

<b>4</b>	<b>Risultati delle simulazioni numeriche</b>	<b>101</b>
4.1	Determinazione della sezione del camino del filtro a prova di fumo . . .	101
4.2	Descrizione delle strategie antincendio . . . . .	105
4.3	Confronto ventilazione naturale e forzata . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>125</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>133</b>



# Elenco delle figure

1.1	Andamento della temperatura nelle diverse fasi dell'incendio [24] . . .	25
1.2	Andamento HRR di un pallet in legno di 2 m <sup>3</sup> [24] . . . . .	27
1.3	Lunghezza di fiamma (l) come funzione della portata di combustibile, espressa come $\dot{Q}^*$ . Regioni I e II corrispondono a fiamme diffusive governate dalla turbolenza, mentre la regione V corrisponde ad un <i>jet flame</i> completamente turbolento [6]. . . . .	28
1.4	Diagramma schematico del <i>fire plume</i> , con le tre zone. Variazione della velocità V con l'altezza z, al di sopra del bruciatore, mediante il confronto tra $V/\dot{Q}^{1/5}$ (ordinate) e $z/\dot{Q}^{2/5}$ (ascisse) [6] [15]. . . . .	29
1.5	Il <i>buoyant plume</i> di una sorgente puntiforme confrontato con quello reale, interagente con il soffitto [6]. . . . .	30
1.6	Relazione resistenza-temperatura per acciaio rullato a caldo, trafilato a freddo e leghe di acciaio ad alta resistenza [24]. . . . .	33
1.7	Relazione resistenza-temperatura per carbonati, silicio, e sabbia [24].	34
1.8	Moduli di elasticità ad alta temperatura . . . . .	34
1.9	Tempo di incapacità da monossido di carbonio, per uomo di 70 kg a diversi livelli di attività [24]. . . . .	36
1.10	Tempo di incapacità da anidride carbonica [24]. . . . .	37
1.11	Tempo necessario per osservare scottature sulla pelle nuda da fonti termiche radiative [24]. . . . .	38
2.1	Ventilazione longitudinale di galleria . . . . .	53
2.2	Posizione dei camini di ventilazione rispetto alla stazione: 1 (due camini per ogni stazione); 2A (un camino in ogni stazione, alla sinistra); 2B (un camino per ogni stazione, alla destra); 2C (un camino per ogni tunnel a metà del tratto tra due stazioni) [2]. . . . .	53
2.3	Ventilazione semitrasversale di galleria . . . . .	54
2.4	Ventilazione trasversale di galleria . . . . .	55
2.5	Ventilazione naturale di galleria . . . . .	55
2.6	Sequenza di risposta degli individui all'incendio [24] . . . . .	57
3.1	Vista dello scenario . . . . .	60
3.2	Esempio di filtro a prova di fumo . . . . .	61
3.3	Vista in pianta dello scenario considerato . . . . .	63
3.4	Sezione della galleria, filtro e scale . . . . .	63
3.5	Sezione delle scale . . . . .	64
3.6	Vista del dominio di calcolo completo . . . . .	64

3.7	Superficie dell'incendio . . . . .	65
3.8	Particolare del filtro a prova di fumo con scale e camino . . . . .	65
3.9	Vista dell'ingresso del filtro . . . . .	66
3.10	Particolare del treno in galleria . . . . .	66
3.11	Rappresentazione schematica dello spettro di energia turbolenta confrontato con i diversi modelli di turbolenza [24] . . . . .	73
3.12	Rappresentazione schematica dei diversi modelli di turbolenza [24] . . . . .	74
3.13	Andamento della velocità in funzione della parete . . . . .	77
3.14	Confronto Patch Fire . . . . .	87
3.15	Confronto dei due tipi di galleria utilizzati per l'analisi di sensitività . . . . .	90
3.16	Sezione di diversi tipi di raffinamento della mesh in prossimità dell'incendio, lungo la galleria. . . . .	91
3.17	Confronto dei valori di temperatura a 5 e 10 metri di distanza dall'incendio tra diverse griglie. . . . .	92
3.18	Confronto dei valori di velocità a 5 e 10 metri di distanza dall'incendio tra diverse griglie. . . . .	92
3.19	Confronto dei valori di yPlus sulle pareti della galleria per diverse griglie. . . . .	93
3.20	Temperatura: confronto degli andamenti tra simulazioni con (prova E) o senza (prova D) wall function in gallerie con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio. . . . .	94
3.21	Velocità: confronto degli andamenti tra simulazioni con (prova E) o senza (prova D) wall function in gallerie con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio. . . . .	94
3.22	Temperatura: confronto degli andamenti tra simulazioni senza (prova F) e con (prova G) scambio termico alle pareti della galleria con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio. . . . .	95
3.23	Velocità: confronto degli andamenti tra simulazioni senza (prova F) e con (prova G) scambio termico alle pareti della galleria con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio. . . . .	96
3.24	Andamento potenza termica incendio (es. 2 MW) . . . . .	99
4.1	Punti considerati per la prova . . . . .	103
4.2	Andamento delle portate smaltite dal camino e dalle scale, quota dell'incendio di -10 m . . . . .	103
4.3	Andamento delle temperature e concentrazioni al punto 1 . . . . .	104
4.4	Andamento delle temperature e concentrazioni al punto 2 . . . . .	104
4.5	Vista dello scenario completo . . . . .	108
4.6	Particolare del filtro a prova di fumo con scale e camino . . . . .	108
4.7	Punti di rilevazione davanti alla testa del treno . . . . .	109
4.8	Punti di rilevazione dietro la coda del treno . . . . .	110
4.9	Punti considerati nel filtro e scale . . . . .	110
4.10	Andamento delle portate dei fumi smaltite di camini di 1 $m^2$ per le diverse strategie di ventilazione di galleria e filtro in estrazione naturale; quota dell'incendio di -10 m . . . . .	112

4.11	Andamento delle portate dei fumi dalle scale per le diverse strategie di ventilazione (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro); quota dell'incendio di -10 m . . . . .	112
4.12	Andamento delle Temperature - A 50 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	113
4.13	Andamento delle Temperature - A 30 metri dall'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	113
4.14	Andamento delle Concentrazioni di $CO_2$ - A 50 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	114
4.15	Andamento delle Concentrazioni di $CO_2$ - A 30 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	114
4.16	Andamento delle Concentrazioni di $O_2$ - A 50 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	115
4.17	Andamento delle Concentrazioni di $O_2$ - A 30 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	115
4.18	Andamento delle Temperature - A 10 metri dall'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	116
4.19	Andamento delle Temperature - All'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	116
4.20	Andamento delle Concentrazioni di $CO_2$ - A 10 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	117
4.21	Andamento delle Concentrazioni di $CO_2$ - All'ingresso del filtro . . . . .	117
4.22	Andamento delle Concentrazioni di $O_2$ - A 10 metri dall'ingresso del filtro . . . . .	118
4.23	Andamento delle Concentrazioni di $O_2$ - All'ingresso del filtro . . . . .	118
4.24	Andamento delle Temperature - Al centro del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	120
4.25	Andamento delle Temperature - All'ingresso delle scale (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	120
4.26	Andamento delle concentrazioni di $CO_2$ - Al centro del filtro . . . . .	121
4.27	Andamento delle concentrazioni di $CO_2$ - All'ingresso delle scale . . . . .	121
4.28	Andamento delle concentrazioni di $O_2$ - Al centro del filtro . . . . .	122
4.29	Andamento delle concentrazioni di $O_2$ - All'ingresso delle scale . . . . .	122
4.30	Andamento delle Velocità nella mezzeria dell'ingresso al filtro - 1.8 m dal piano banchina (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro) . . . . .	123
4.31	Andamento delle temperature per la valutazione del backlayering a diverse distanze - 1.8 m dal piano banchina - (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro; downstream = treno che si arresta dopo il filtro; upstream = treno che si arresta prima del filtro) . . . . .	123



# Elenco delle tabelle

1	Morti e feriti negli incidenti in metropolitana più rilevanti degli ultimi dieci anni [3] . . . . .	16
1.1	Effetti della concentrazione di $COHb$ nel sanbue sull'uomo [21]. . . .	35
2.1	Classificazione dei fenomeni combustivi degli incendi in base ai combustibili coinvolti secondo la norma UNI EN 2/2005 "Classificazione dei fuochi" e corrispondenza con i sistemi di controllo efficaci . . . .	43
2.2	Valori massimi di soglia delle diverse potenze termiche [13] [24] . . . .	56
2.3	Concentrazioni limite delle principali areiformi nei fumi [20][24] . . . .	56
2.4	Limiti di visibilità [13] [24] . . . . .	57
3.1	Statistiche della mesh e numero di celle per tipo . . . . .	67
3.2	Caratteristiche geometriche della mesh . . . . .	67
3.3	Dimensioni Patch Fire . . . . .	87
3.4	Condizioni al contorno e modelli utilizzati per l'analisi di sensitività - 1	88
3.5	Condizioni al contorno e modelli utilizzati per l'analisi di sensitività - 2	89
3.6	Numero di celle delle tre griglie . . . . .	90
3.7	Lista di fattori che influenzano la progettazione dell'incendio. . . . .	97
3.8	Condizioni al contorno di riferimento per tutti gli scenari . . . . .	98
3.9	Valori di picco adottati per la progettazione dei sistemi di ventilazione di alcune linee metropolitane . . . . .	98
4.1	Tempi di raggiungimento delle condizioni critiche ( $T > 100^{\circ}C$ ; $[O_2] < 15\%$ ; $[CO_2] > 4\%$ ) . . . . .	105
4.2	Cronologia della messa a regime della ventilazione forzata . . . . .	106
4.3	Colonna 1: Scenario senza ventilazione di Galleria; Colonna 2: Scenario con treno dopo il filtro-Ventilazione Longitudinale Downstream; Colonna 3: Scenario prima del filtro-Ventilazione Longitudinale upstream . . . . .	107



# Introduzione

L'incendio in una linea metropolitana è, in generale, un evento raro, che comporta una bassa probabilità di accadimento. Tuttavia l'elevato numero di persone che utilizza tale mezzo di trasporto, su una rete largamente estesa, l'ambiente chiuso e le condizioni di visibilità ridotta che vi si instaurano tendono ad amplificarne le conseguenze. La propagazione del fumo e le alte temperature possono pregiudicare le condizioni di evacuazione in sicurezza degli occupanti e l'eventuale permanenza di soccorritori e squadre di emergenza. Un'adeguata strategia antincendio permette di garantire il soddisfacimento dei requisiti assegnati dai sistemi adottati (protezione attiva e passiva) per gli scenari di progetto considerati e può essere efficacemente indagata con modelli di calcolo oltre che su base sperimentale.

La norma UNI 8379 [29] definisce la metropolitana come *un sistema di trasporto rapido di massa, di alta capacità e di frequenza, operante nell'ambito urbano, costituito da veicoli automotori circolanti su rotaia, ovvero con altra guida vincolata, completamente separato da altro tipo di traffico, con regime di circolazione regolato da segnali*. Da tale definizione si possono delineare degli aspetti che evidenziano l'importanza della sicurezza antincendio in questi ambienti. I passeggeri, inoltre, possono non essere adeguatamente informati circa i piani di evacuazione previsti e, in sfortunati casi, i percorsi di esodo, anche se efficacemente segnalati, potrebbero risultare di difficile individuazione a causa della scarsa visibilità.

La frequenza di incendio in metropolitana è strettamente correlata con la possibilità di guasti o di incidenti in galleria. La possibilità di intervenire dall'esterno, per attività di soccorso e di estinzione dell'incendio, è un'attività già di per sé critica per i tratti interrati, che può, a sua volta, esserlo maggiormente quando le città sono congestionate dal traffico urbano.

Analizzando i maggiori incidenti avvenuti in galleria negli ultimi dieci anni si possono distinguere tre diverse tipologie: il deragliamento o collisione tra treni (che costituisce il 40% del totale), l'attentato terroristico o atto vandalico (45%) e il problema elettrico o meccanico (cortocircuito o surriscaldamento dei freni, 15%) [3]; circa la metà di tutti gli incidenti registrati ha portato allo sviluppo di un incendio. In particolare lo sviluppo dell'incendio si riscontra nel 100% in caso di attentato terroristico o atto vandalico, del 10% in caso di deragliamento o collisione e in circa il 70% dei casi di problema elettrico o meccanico: questo conferma la grande importanza dell'analisi del rischio di incendio in tali scenari. La magnitudo degli eventi è tale da portare spesso al decesso; in tabella 1 viene riportata la frequenza di eventi incidentali in galleria e il numero di decessi e feriti a seguito di tali eventi.

Nell'ambito dell'attività di gestione del rischio connessa con tali eventi incidentali, uno degli aspetti fondamentali è l'implementazione di efficaci strategie di ven-

Anno	Incidenti	Morti	Feriti
2000	3	4	116
2001	2	15	45
2002	1	0	0
2003	1	200	150
2004	1	39	130
2005	2	52	712
2006	3	42	441
2007	2	0	72
2008	0	0	0
2009	1	9	60
2010	1	0	19
2011	3	51	663
Totale	20	393	2247

Tabella 1: Morti e feriti negli incidenti in metropolitana più rilevanti degli ultimi dieci anni [3]

tilazione. Per la messa a punto di tali strategie ci si avvale sempre più spesso dei codici di calcolo, ed in particolare dei codici di calcolo di termofluidodinamica computazionale (CFD) che, mediante un modello opportunamente validato, permettono di stimare le conseguenze degli incendi e prevedere l'adeguatezza di tali strategie negli scenari di principale interesse.

Lo studio qui presentato riguarda le attività a cui ci si riferisce con il termine *smoke management*, con la finalità di verificare le prestazioni di un particolare elemento impiantistico, di fondamentale importanza nella protezione delle vie di esodo delle metropolitane interrato nei tratti di tunnel che collegano due successive stazioni: il "filtro a prova di fumo".

Ci si riferisce con il termine "filtro a prova di fumo" ad un locale tecnico che, garantendo un certo valore di resistenza al fuoco e porte dotate di congegni di auto-chiusura, ha il compito di mantenere libere dai fumi le scale di emergenza per l'esodo dei passeggeri. A tal fine, il locale deve essere dotato di un camino di ventilazione per poter evacuare i fumi o, alternativamente, di un sistema di ventilazione che lo mantenga in sovra pressione rispetto agli ambienti confinanti.

Per fare ciò è stato necessario definire uno scenario di incendio, un opportuno dominio di calcolo e determinare le adeguate condizioni al contorno, svolgere un'accurata analisi di sensitività sul problema applicato alla griglia generata, e quindi adattata, per poter infine individuare, attraverso l'applicazione di opportuni criteri, la soluzione migliore ed eventuali criticità.

Tale analisi è stata eseguita mediante l'impiego di un opportuno codice di calcolo CFD (OpenFOAM ©) e ha riguardato due diversi problemi: il primo inerente la verifica di un'ideale sezione del camino di estrazione nel caso di ventilazione naturale; il secondo il confronto in termini delle diverse performance ottenute nel caso di ventilazione naturale e di ventilazione forzata in immissione. Il lavoro è stato condotto



in base ad opportune ipotesi condivise con i tecnici di Metropolitana Milanese, a partire dallo scenario di incendio considerato, che prevede un rilascio di potenza di progetto di 10 MW localizzato nel sottocassa del treno al centro del convoglio.

Per quanto riguarda il caso della ventilazione naturale si è prima proceduto alla determinazione della sezione del camino ottimale tra diverse ipotizzate, in assenza di chiare indicazioni a riguardo, mentre per quanto riguarda la ventilazione forzata si sono considerate le portate usualmente impiegate in tali circostanze. Per poter confrontare tra loro le prestazioni dei camini in immissione forzata o in estrazione naturale è stato necessario definire i tempi di attivazione delle unità ventilanti e il confronto ha richiesto di valutare diverse condizioni di ventilazione in galleria e posizioni relative dell'incendio. In tale modo è stato possibile evidenziare le criticità principali delle varie soluzioni proposte, per poter fornire utili indicazioni all'ottimizzazione di tali sistemi antincendio.

Dopo aver definito la sezione (pari a  $1\text{ m}^2$ ) del camino di ventilazione del filtro, vengono riportati i risultati relativi al confronto delle diverse strategie di ventilazione nelle configurazioni considerate (assenza o meno di ventilazione di galleria e diversa posizione del treno rispetto al filtro). Il confronto delle diverse soluzioni indagate è stato condotto mediante il monitoraggio delle principali variabili fisiche in diversi punti del dominio, osservando il funzionamento del filtro a prova di fumo nelle strategie proposte.

L'attività svolta non ha avuto la pretesa di essere completamente esaustiva riguardo al particolare problema affrontato, a causa del grande numero di parametri coinvolti, soprattutto geometrici (diversi affondamenti della linea interrata, altezze dei vani dei locali, dimensionamento delle aperture, etc.), ma anche relativi alle caratteristiche dello scenario d'incendio di riferimento, e ha fornito utili indicazioni per poter valutare il diverso comportamento del filtro a prova di fumo. L'indagine dovrebbe quindi proseguire attraverso ulteriori approfondimenti, soprattutto relativamente alla possibilità di meglio definire le condizioni al contorno in galleria, che risultano dal funzionamento della linea nel suo complesso.

In conclusione si è osservato che in base ai dati disponibili, ovvero in base alle portate d'aria in immissione considerate per il mantenimento in sovra pressione del filtro, la soluzione che prevede l'impiego della ventilazione forzata è l'unica in grado di garantire sempre un adeguato livello di sicurezza per l'esodo degli occupanti, mentre in caso si sia adottata la ventilazione naturale questa risulta poco idonea quando non in sinergia con la ventilazione di galleria. Ciò è dovuto al fatto che nelle linee di metropolitana automatiche (quelle di futura generazione) la posizione del treno non è determinabile con una accuratezza sufficiente a indicare oltre ogni ragionevole dubbio la corretta direzione della ventilazione di galleria. Tuttavia l'assenza del gruppo ventilante e dei sistemi di segnalazione necessari a garantirne adeguati tempi di attivazione, riducendo la complessità del sistema di gestione del rischio (quindi aumentandone l'affidabilità), può rendere la ventilazione naturale applicata ai filtri a prova di fumo una valida soluzione in certi casi.

Nel primo capitolo vengono introdotti i concetti basilari legati al pericolo d'incendio e quindi i rischi conseguenti, dopo aver richiamato i fenomeni principali che caratterizzano la combustione, la formazione delle fiamme diffusive e il moto dei prodotti di combustione che vengono conseguentemente liberati, con cenni sui principali effetti sui materiali da costruzione e sulle persone.

Nel secondo capitolo, dopo la breve descrizione di alcuni incendi avvenuti nell'ambito delle metropolitane e un'introduzione sui principi alla base della Fire Safety Engineering (FSE), si analizzano i diversi sistemi di protezione attiva e passiva utilizzabili per il controllo e l'estinzione degli incendi negli ambienti confinati. Infine si cerca, attraverso un'esaustiva indagine bibliografica, di definire degli adeguati criteri di sicurezza, basati sui parametri fisici più significativi, in base ai quali valutare le diverse conseguenze dell'evento nelle varie condizioni considerate.

Nel terzo capitolo si affrontano gli aspetti relativi alla modellazione dello scenario d'incendio mediante il codice di termofluidodinamica impiegato e si definiscono il dominio di calcolo e le opportune condizioni al contorno. Si procede con una breve descrizione del il codice di calcolo impiegato basato sulla piattaforma OpenFOAM 2.1 ©. Si sceglie di applicare un modello di combustione idoneo al caso considerato e si verifica l'adeguatezza dei parametri dei sottomodelli necessari mediante un affinamento della griglia e un'analisi di sensitività.

Nel quarto capitolo sono descritte le simulazioni condotte per la determinazione di un adeguato valore di sezione del camino che verrà utilizzato negli scenari per il confronto delle diverse strategie di ventilazione e tale confronto nelle diverse condizioni di ventilazione considerate e posizioni del treno.

Questo lavoro di tesi è sviluppato in collaborazione con Metropolitana Milanese S.p.a. (società di ingegneria specializzata nella progettazione e realizzazione di metropolitane a livello internazionale) e la Commissione Prevenzione Incendi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano.

# Capitolo 1

## Fenomenologia degli incendi

L'incendio è un evento caratterizzato da reazioni di combustione che generano elevate potenze termiche e notevoli quantità di gas combustibili, tali da provocare danni, a volte rilevanti, alle persone, alle strutture e ai beni materiali.

L'incidentalità dell'evento porta ad un'incertezza sia per quanto riguarda la fase di ignizione che di sviluppo della combustione, legata al tipo, alla quantità e alla distribuzione geometrica dei combustibili, oltre che alle condizioni di ventilazione, stato di efficienza dei sistemi antincendio, alle procedure adottate ed, infine, al comportamento delle persone presenti.

I danni derivanti dall'incendio non sono quindi determinabili a priori, per cui è necessario affrontare l'analisi dei diversi scenari d'incendio con metodologie che consentano di gestire in maniera efficace l'incertezza, in grado di minimizzare i danni prodotti nel corso del tempo. Tali metodologie sono di natura probabilistica, e caratterizzate dall'avere come variabile principale il rischio. Il rischio viene definito come la quantificazione dei danni attesi nel tempo, misurato come  $[danni/\Delta t]$  e si esprime come il prodotto tra la frequenza dell'evento dannoso  $[numero\ eventi\ dannosi/\Delta t]$  e l'intensità dell'evento  $[danni/numero\ eventi\ dannosi]$ . A sua volta la frequenza degli eventi dannosi si può esprimere come il prodotto tra la frequenza dell'innescio  $[numero\ inneschi/\Delta t]$  e la probabilità che l'innescio determini l'evento dannoso  $[numero\ eventi\ dannosi/numero\ inneschi]$ .

$$R = F \cdot M = f \cdot P_i \cdot M.$$

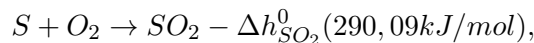
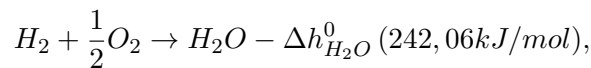
Il rischio di incendio  $R$  risulta, a volte, elevato, principalmente, per effetto della magnitudo  $M$ , ovvero dell'entità dei danni alle persone, alle strutture e ai beni materiali che si possono verificare per ogni evento. Per gli incendi in galleria di metropolitana, anche se la frequenza è generalmente bassa, il rischio resta comunque alto, per effetto dei gravi danni che possono essere causati alle persone (ad esempio per effetto dei fumi nocivi) o alle strutture.

Il processo di minimizzazione del rischio ha inizio con un'analisi di rischio, consistente nella ricerca delle fonti di rischio e della loro valutazione, ossia la quantificazione numerica dei rischi associati alle fonti. Successivamente si passa alla fase di riduzione del rischio, che può avvenire mediante trasferimento (dell'attività rischiosa o del solo rischio assicurativo) o ritenzione (finanziamento, investimenti o controllo del rischio, puntando ad un decremento dei danni fisici).

La riduzione dei danni prodotti si attua attraverso la prevenzione e la protezione. La prevenzione consiste nella riduzione della probabilità dell'evento dannoso  $P$  o della frequenza dell'evento dannoso  $F$ , che a loro volta riducono i valori della frequenza dell'innesco  $f$  e della probabilità che l'innesco determini l'evento dannoso  $P_i$ . In una galleria metropolitana interventi di prevenzione possono essere la limitazione della velocità di transito o la manutenzione degli impianti dei mezzi di trasporto. La protezione mira alla riduzione del valore della magnitudo dell'evento dannoso  $M$  ed una distinzione deve essere eseguita tra protezione attiva e passiva. La protezione attiva implica un'azione nello scenario di incendio in atto, come la rilevazione e segnalazione dell'incendio, il controllo, l'estinzione e soppressione dello stesso oltre che l'evacuazione dei fumi dell'incendio con sistemi di ventilazione. La protezione passiva non implica alcuna azione diretta sull'incendio, oppure implica un'azione completamente indiretta; la compartimentazione antincendio, ad esempio, fornisce la capacità di un ambiente di contenere all'interno dello stesso l'incendio, mediante le adeguate caratteristiche di pareti, soffitti e pavimenti.

## 1.1 Fondamenti di combustione

La combustione è una reazione chimica di ossidazione, tipicamente abbastanza rapida, che si svolge in fase gassosa, e che comporta l'emissione di calore. Le sostanze combustibili, che tipicamente contengono idrogeno (H), carbonio (C) e zolfo (S), sono ossidate dall'ossigeno dell'aria (comburente), generando i prodotti della combustione. I processi di combustione sono solitamente descritti mediante reazioni chimiche convenzionali. Ad esempio si rappresenta il processo di combustione teorica dell'idrogeno, del carbonio e dello zolfo in atmosfera di ossigeno puro:



dove  $\Delta h^0$  è l'entalpia o calore di combustione in condizioni di riferimento standard. Le condizioni standard sono riferite ad un valore di temperatura di 25°C e di pressione di 101325 Pa. Per convenzione l'entalpia di formazione standard di sostanze elementari è nulla. Tali equazioni indicano che la reazione di combustione, nel caso avvenga, procede rispettando i rapporti molari o massici. Per esempio 1 mol di carbonio reagisce con 1 mol di ossigeno molecolare, per formare 1 mol di anidride carbonica, oppure che 12 kg di carbonio reagendo con 32 kg di ossigeno molecolare formano 44 kg di anidride carbonica. L'energia termica che si genera durante la reazione di combustione dipende dalla composizione chimica, sia dei reagenti che dei prodotti. Infatti, qualsiasi sostanza è caratterizzata dalla propria entalpia di formazione standard, definita come l'entalpia che possiede la generica sostanza in condizioni standard, e i cui valori sono ricavati sperimentalmente mediante la misura del calore scambiato nella reazione chimica di formazione della sostanza in esame. Conoscendo l'entalpia di formazione standard di ogni specie chimica coinvolta nella reazione di combustione è possibile ricavare l'energia termica prodotta (o calore di

combustione) nelle medesime condizioni con la legge di Hess:

$$\Delta h^0 = \left( \sum_i^M \Delta h_{fi}^0 \cdot n_i \right)_{prodotti} - \left( \sum_j^N \Delta h_{fj}^0 \cdot n_j \right)_{reagenti},$$

dove  $n$  è il coefficiente stechiometrico della generica specie  $i$ -esima;  $N$  e  $M$  sono rispettivamente il numero di specie chimiche reagenti e prodotte  $\Delta h_f^0$  è l'entalpia di formazione standard della generica specie chimica  $i$ -esima. Se ci si trova ad un diverso valore di temperatura rispetto a quella standard, ma sempre alla pressione atmosferica, l'entalpia specifica della massa di una sostanza varrà

$$\Delta h = \Delta h_f^0 + \int_{T_0}^T c_p T dT.$$

In realtà queste reazioni di combustione sono sostituite da catene ramificate di reazioni. La rapidità e la complessità con cui avvengono i fenomeni che hanno luogo nel corso delle reazioni, non hanno ancora permesso di individuare con certezza quali siano i meccanismi di innesco della combustione e le sequenza che ne consente il sostentamento, la propagazione e la formazione dei prodotti finali. Per propagazione si intende il fenomeno per il quale l'onda di combustione è in grado di sussistere nel tempo, coinvolgendo le diverse parti della miscela reagente, ossia si può intendere la propagazione come l'innesco dei fenomeni di combustione, in seguito allo sviluppo di un incendio, che coinvolgono sostanze che inizialmente non ne erano coinvolte.

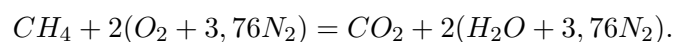
La teoria più accreditata riguardo alle reazioni reali di combustione è quella che prevede una modellazione equivalente agli effetti esterni del complesso dei processi combustivi, basata sulla temperatura di reazione, sull'energia di attivazione e sul tipo di concentrazione dei reagenti (equazione di Arrhenius), in grado di accorpare in un'unica reazione l'insieme delle catene di combustione. Oltre a questa vi è quella che prevede la presenza di radicali liberi, molecole incomplete e molto reattive, capaci di attivare con continuità legami transitori con le molecole di combustibile, del comburente ossigeno e di sostanze intermedie all'interno delle catene di reazione. Si formerebbero quindi, con l'avanzamento del fenomeno di combustione, diversi gruppi di atomi e atomi liberi, che non compaiono nei prodotti finali, ma senza il cui apporto il combustibile non potrebbe bruciare. Questo processo può essere attivato a seguito del superamento di una determinata soglia da parte dell'energia cinetica posseduta dalle molecole del combustibile in un suo determinato punto, per effetto di campi di forza agenti in prossimità di particolari superfici solide oppure ancora attraverso l'assorbimento di fotoni.

Il potere calorifico (p.c.) viene definito come la quantità di calore generato dalla combustione completa dell'unità di massa del combustibile, quando i prodotti della combustione vengono riportati alla stessa temperatura iniziale del combustibile e dell'aria comburente. Una distinzione sul valore del potere calorifico può essere eseguita in base al modo in cui avviene la combustione, se a volume o a pressione costante [1]. Altra distinzione può essere la valutazione del potere calorifico superiore (p.c.s) e del potere calorifico inferiore (p.c.i.) in base al fatto che l'acqua, presente tra i prodotti della combustione, sia rispettivamente sotto forma di vapore o allo stato liquido.

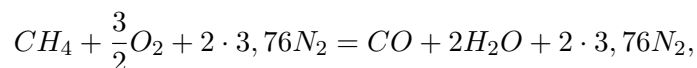
La quantità di calore resa complessivamente dal p.c.i. è quindi inferiore a quella resa dal p.c.s. e, in particolare, risulta pari al potere calorifico superiore diminuito della variazione di entalpia corrispondente alla condensazione del vapore d'acqua e al successivo raffreddamento del condensato fino alla temperatura iniziale di riferimento. Nota la composizione chimica del combustibile e le entalpie di formazione dei reagenti e dei prodotti della combustione, è possibile calcolare il potere calorifico del combustibile. Considerando una combustione adiabatica ed isobara, in cui i reagenti si trovano alla temperatura ambiente, quando tutto il calore disponibile è usato per riscaldare i prodotti della combustione, la temperatura finale dei prodotti è detta temperatura di fiamma o temperatura di combustione adiabatica:

$$T_{af} = T_0 + \frac{p.c. + \sum m_i \bar{c}_{p,i} (T_{in} - T_0)}{\sum n_j \bar{c}_{p,j}}.$$

La temperatura adiabatica di fiamma si ottiene dal bilancio entalpico tra i reagenti e prodotti della combustione, dove  $\bar{c}_p$  è il valor medio del calore specifico a pressione costante, che varia con la temperatura,  $T_0$  [K] è la temperatura di riferimento della reazione di combustione,  $T_{in}$  [K] è la temperatura dei reagenti e  $m_i$ ,  $n_j$  sono le portate massiche rispettivamente dei reagenti e dei prodotti. Nell'ipotesi di combustione completa, la temperatura adiabatica di fiamma dipende dal potere calorifico del combustibile, dalla temperatura iniziale dei reagenti e dalla presenza o meno di sostanze inerti. Questi ultimi, pur non partecipando attivamente alla reazione (non danno alcun contributo energetico), assorbono calore per riscaldarsi, e così, a parità di potere calorifico, la temperatura adiabatica di fiamma in loro presenza diminuisce, in quanto cresce il numero di sostanze che si ripartiscono l'energia termica sviluppata. Inoltre si osserva che preriscaldando le specie reagenti, la temperatura di fiamma aumenta per effetto di un maggior contenuto entalpico iniziale dei reagenti stessi. La combustione avviene, di solito, in un'atmosfera d'aria, che è formata all'incirca per il 21% da ossigeno molecolare e per il restante 79% da azoto molecolare (valutati in volume e trascurando la presenza di gas nobili e anidride carbonica). In tal modo, la combustione di metano in aria assume la forma:

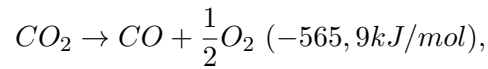


All'atto pratico, per garantire una combustione reale completa, è richiesto un apporto di aria comburente superiore, chiamato eccesso d'aria. Se alla reazione di combustione non fosse garantita la quantità di comburente necessaria all'ossidazione completa, si verifica un'ossidazione parziale che comporta la formazione di diversi altri prodotti. Nel calcolo della temperatura adiabatica di fiamma, si sostituisce al potere calorifico il calore che viene sviluppato da un'unità di massa del combustibile che si ossida solo parzialmente. Essendo questo inferiore rispetto al potere calorifico riferito all'ossidazione completa, ne consegue la diminuzione della temperatura della fiamma stessa. La tipica combustione incompleta del metano in aria, assume la forma:



da cui si nota la presenza, tra i prodotti di combustione, del monossido di carbonio. I fenomeni combustivi, innalzando le temperature dell'ambiente a valori molto elevati,

permettono, in alcuni casi, lo sviluppo di reazioni endotermiche di dissociazione, tra le quali quella dell'anidride carbonica



che comporta la formazione di monossido di carbonio. Una combustione è caratterizzata da tre fondamentali momenti: l'ignizione, la propagazione e l'estinzione. La variabile che più influenza i processi è sicuramente la tipologia e il tipo di combustibile, vale a dire la sostanza o le sostanze di cui è composto e il suo stato di aggregazione (solido, liquido o gassoso). Al variare dello stato fisico infatti, cambia anche il modo in cui le molecole di combustibile vengono in contatto con l'aria comburente.

## 1.2 Analisi fisico-matematica

I combustibili liquidi subiscono inizialmente una fase di vaporizzazione, in quanto la reazione di ossidazione avviene in fase gassosa ed interessa solo gli areiformi prodotti. La reazione risulta molto influenzata dalla temperatura alla quale si trova il liquido e dalla concentrazione di vapori di combustibile nell'aria. Caratteristiche fondamentali dei combustibili liquidi sono la massa volumica, la temperatura di ebollizione, il potere calorifico e la temperatura di infiammabilità. La combustione dei solidi è invece preceduta da un processo che coinvolge la liquefazione e la vaporizzazione, la sublimazione e la pirolisi. Quest'ultima, prevalente in molti casi, consiste nella gassificazione del combustibile per mezzo di un processo di decomposizione fisica e chimica per effetto termico (demolizione termica, piroscissione). I gas che si liberano dalla superficie, ossidandosi, sviluppano calore. Le caratteristiche principali dei combustibili solidi sono solitamente la dimensione, la compattezza (presenza di aria nella massa), l'umidità (presenza di acqua nella massa), la porosità e il potere calorifico.

Nello studio di qualunque fenomeno di combustione si assume l'ipotesi che le reazioni chimiche inizino a svilupparsi solamente quando la temperatura della miscela abbia raggiunto un conveniente valore, al di sotto del quale la miscela si comporta come un inerte. Quest'ipotesi è fondamentale, poiché secondo la teoria di Arrhenius la velocità di reazione decresce esponenzialmente al diminuire della temperatura. Quindi si definisce temperatura di ignizione quella temperatura al di sopra della quale insorge il fenomeno di *thermal explosion*, ovvero avviene la transizione da una reazione di ossidazione molto lenta, quasi stazionaria e termicamente insignificante, ad una reazione repentina, non stazionaria ed autoaccelerante di combustione della miscela. La velocità di reazione aumenta a causa dell'aumento della temperatura con conseguente aumento della potenza termica sviluppata che provoca un ulteriore aumento di temperatura, in un circolo virtuoso che presto interessa l'intera massa di combustibile, fino all'esaurimento della miscela formatasi [22]. Ogni combustibile ha una propria temperatura di ignizione, che dipende dalle sue proprietà chimiche, dalla pressione e dalla concentrazione con cui è presente in un ambiente (o reattore), per formare la miscela reagente.

L'ignizione può avvenire in due modi: riscaldando tutta la miscela composta da combustibile e comburente ad una temperatura immediatamente superiore a quella

di ignizione (ignizione spontanea) oppure riscaldando solamente la miscela per mezzo di una sorgente ad alta temperatura, come una scintilla o una fiamma pilota, in grado di fornire una sufficiente energia termica (ignizione forzata). L'ignizione è efficace se dà luogo ad una combustione che si può propagare in modo autonomo, ovvero che possa autosostenersi. Affinché ciò sia possibile, lo sviluppo di energia termica nell'unità di tempo, da parte dei processi combustivi, deve essere maggiore della dispersione termica nell'ambiente circostante. In questo modo, la temperatura della miscela reagente può essere mantenuta a valori tali da permettere lo svolgimento delle reazioni. Partendo da miscele stechiometriche di combustibile e comburente e procedendo nella scala delle concentrazioni sia verso miscele più ricche che verso quelle più povere di combustibile, si giunge ai casi limite per i quali il calore rilasciato da un volume della miscela posta in combustione risulta insufficiente a propagare la fiamma nell'ambiente circostante, ovvero non riesce a raggiungere la temperatura di ignizione. Esiste dunque un preciso intervallo, detto di infiammabilità, tale per cui si ha la combustione della miscela a seguito di un'ignizione. Ai due limiti dell'intervallo è dato il nome di limite inferiore e superiore di infiammabilità, che generalmente sono espressi sotto forma di percentuali di concentrazioni specifiche al volume.

Si definisce *limite inferiore di infiammabilità* la concentrazione di vapori di un liquido infiammabile miscelati con l'aria al di sotto della quale non si ha accensione alla presenza di un innesco a causa della carenza di combustibile. Nel caso di metano, ad esempio, la concentrazione volumetrica minima della miscela tale per cui non si ha combustione è del 5% in aria.

Con *limite superiore di infiammabilità* si indica la concentrazione di vapori di un liquido infiammabile miscelati con l'aria al di sopra della quale non si ha accensione alla presenza di innesco, a causa dell'insufficiente presenza di comburente. Riferendoci sempre al metano la concentrazione volumetrica della miscela tale per cui non si ha combustione è del 15% in aria.

Si definisce *fire point* la temperatura più bassa alla quale il vapore sviluppato dal liquido forma con l'aria una miscela in grado di bruciare, sviluppando una combustione capace di autosostentarsi, in conseguenza della presenza, per un piccolo intervallo di tempo, di un innesco (ignizione forzata), caratterizzato dallo sviluppo di una ridottissima quantità di energia e senza ulteriore apporto calorico, in condizioni di pressione standard.

Si chiama invece *flash point*, o anche temperatura di infiammabilità, il valore più basso di temperatura alla quale il vapore sviluppato dal liquido forma con l'aria una miscela in grado di bruciare, sviluppando una combustione non ancora in grado di autosostentarsi, sempre in condizione di pressione standard.

Per quanto riguarda invece l'ignizione spontanea, questa avviene ovviamente in presenza di valori di temperatura più elevati e questa temperatura è detta di accensione e risulta fortemente dipendente, oltre che dal tipo di combustibile, dalle concentrazioni dei reagenti e dalla pressione.

Nella dinamica di un incendio è determinante il luogo in cui si verifica, ossia se in ambiente confinato oppure all'aperto. I principali parametri da prendere in considerazione per caratterizzarlo sono:

- la potenza termica sviluppata di picco;
- la quantità totale di energia rilasciata;



- la velocità di crescita della potenza termica;
- i valori delle temperature dell'aria, dei fumi e delle pareti dei solidi presenti nelle vicinanze;
- la quantità e la velocità di formazione dei prodotti di combustione;
- la durata complessiva dell'incendio.

I processi combustivi che costituiscono l'evento nel caso di sua evoluzione libera (cioè in assenza di soppressione manuale o automatica) e del suo sviluppo in un ambiente confinato, sono caratterizzati da una prima fase di crescita successiva all'innesco, seguita da una seconda di sviluppo e da una terza ed ultima di progressivo decadimento che si conclude con l'arresto delle reazioni.

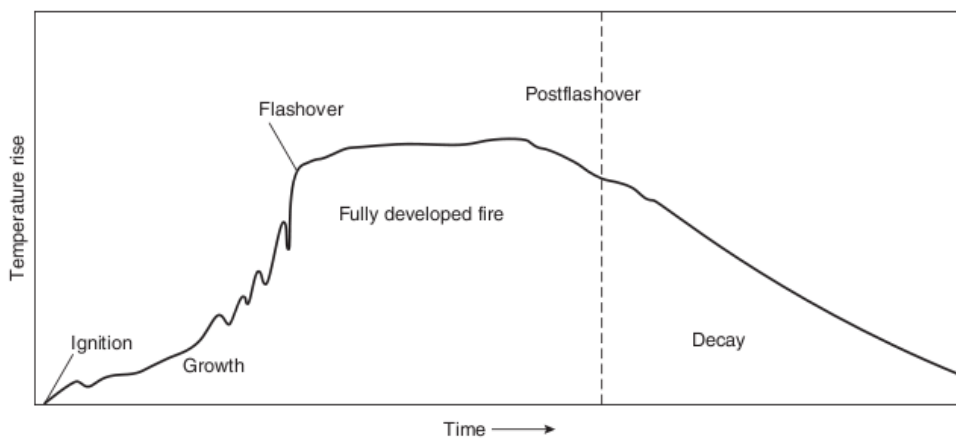


Figura 1.1: Andamento della temperatura nelle diverse fasi dell'incendio [24]

Un parametro che è buon descrittore dell'andamento dell'incendio è la temperatura media. Di nostro interesse sono tali valori riferiti ai prodotti della combustione ed alle strutture presenti nel volume occupato in funzione del tempo.

Nella prima fase, quella di sviluppo a seguito di un innesco efficace, la temperatura varia di poco in funzione del tempo, in quanto la maggiore parte del calore prodotto dalla combustione è utilizzata per vaporizzare l'umidità contenuta nei materiali combustibili, per aumentarne la temperatura oltre quella di accensione e per riscaldare sia l'aria circostante che i materiali combustibili vicini al focolaio. In un incendio di dimensioni modeste, la fase iniziale non comporta una trasmissione di calore verso i materiali non ancora coinvolti ed è caratterizzata da fiamme di dimensioni ridotte. I prodotti di combustione, mescolati all'aria, formano i fumi che, caratterizzati da elevate temperature e quindi dotati di una massa volumica inferiore rispetto a quella dell'aria circostante, tendono a salire miscelandosi a questa e quindi raffreddandosi.

Successivamente alla fase di ignizione la temperatura aumenta rapidamente, così come il calore sviluppato, per effetto della maggiore quantità di materiale combustibile coinvolto e per l'aumento della velocità di combustione (per effetto dell'aumento della temperatura, determinando l'effetto di autoaccelerazione dell'incendio). In

questa fase la velocità di rilascio del calore è maggiore rispetto a quella di dispersione per irraggiamento, conduzione e convezione verso l'esterno. Ne consegue che la temperatura nell'ambiente aumenterà tanto più rapidamente quanto maggiore è la differenza fra il calore sviluppato e quello disperso. Il *flashover* viene generalmente definito come la transizione dalla fase di crescita dell'incendio ad un incendio completamente sviluppato, in cui tutti i materiali combustibili sono coinvolti nell'incendio. Il criterio più spesso utilizzato per la determinazione di tale punto è basato sul valore di temperatura, comunemente compreso tra i 500°C e 600°C, per cui la radiazione dai gas caldi in ambiente provoca l'ignizione dei materiali combustibili presente. E' in questa fase che si possono verificare i maggiori danni alle strutture, agli occupanti e ai materiali presenti nello scenario. La fase d'incendio completamente sviluppato è quella in cui è massima la potenza termica dell'incendio; il combustibile subisce la pirolisi, in modo che venga bruciato con l'ossigeno disponibile in ambiente. Se sono presenti delle aperture il combustibile non ancora bruciato potrebbe lasciare l'ambiente, con la possibilità che bruci all'esterno.

Per gli incendi di tipo confinato sono possibili due regimi di incendio: uno controllato dalla presenza di combustibile (*combustion driven fire*), che si verifica quando si ha un'ampia disponibilità di aria comburente garantendo lo sviluppo di tutti i processi combustivi; l'altro controllato dalla ventilazione (*air driven fire*), ovvero la velocità di sviluppo del fenomeno dipende dalla portata di aria comburente, che si verifica quando sono interessati ambienti caratterizzati da ridotte aperture verso l'esterno (in numero e superficie).

Per definire la quantità di energia sviluppata nell'incendio si utilizza come parametro il carico di incendio, definito come il potenziale termico della totalità dei materiali combustibili all'interno di un ambiente, considerando anche i rivestimenti delle pareti, anche provvisorie, dei pavimenti e dei soffitti. Nella pratica corrente viene convenzionalmente misurato in kilogrammi di legno equivalente (ossia con p.c.i. pari a 4400 kcal/kg). Il carico di incendio specifico è il carico di incendio riferito all'unità di superficie lorda [kcal/kg · m<sup>2</sup>].

La caratteristica essenziale che identifica quanto importante sia l'incendio è la curva di rilascio termico, noto a livello internazionale come *HRR* (*Heat Release Rate*), che indica l'energia termica emessa da un incendio per unità di tempo [16]. La velocità con cui le reazioni di combustione vengono prodotte viene misurata in [W]. Il valore effettivo dell'HRR può essere determinato dalla teoria o attraverso delle prove; i metodi comunemente più utilizzati per la misura dell'HRR sono l'utilizzo del cono calorimetrico oppure delle prove d'incendio in ambiente controllato. Per molti oggetti il valore dell'HRR è disponibile in letteratura, ed è possibile affermare che il tipico andamento può essere scomposto in tre fasi: iniziale, intermedia e finale.

Inizialmente la curva HRR cresce, nella maggior parte dei casi, con legge quadratica, con variazione della pendenza più o meno forte, a seconda della velocità di combustione. E' in questa fase che avviene l'ignizione, lo sviluppo dell'incendio e anche il *flashover*. Nel tratto intermedio della curva, l'HRR raggiunge il suo valore massimo, e la potenza è assunta stazionaria se la massa di combustibile bruciata nell'unità di tempo resta costante. In questa fase si osservano le fasi di *post-flashover*. Il valore massimo dipende dal regime dell'incendio e dal flusso termico radiativo che incide sul combustibile stesso, che può variare sensibilmente la potenza termica emessa. La parte finale della curva HRR decresce dal valore costante al valore nullo,

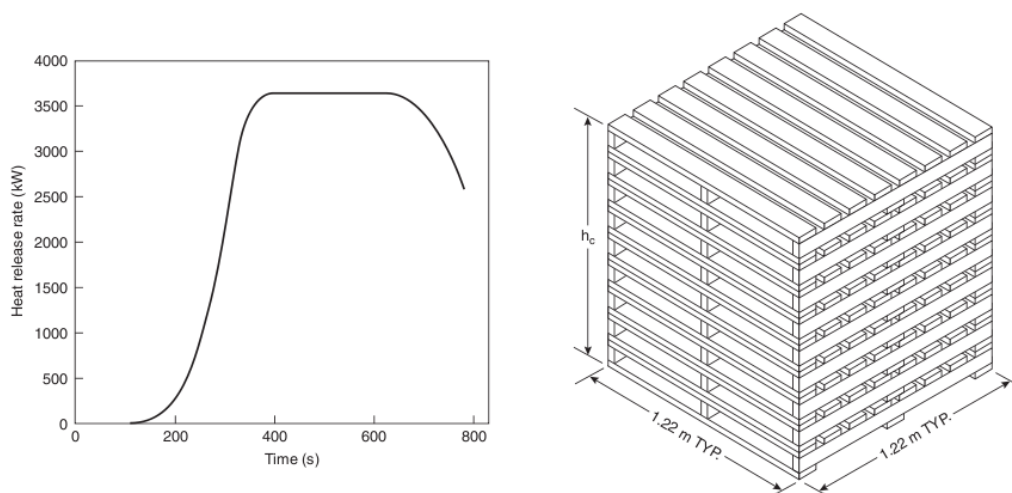


Figura 1.2: Andamento HRR di un pallet in legno di  $2 \text{ m}^3$  [24]

secondo un andamento generalmente lineare, che si osserva dall'istante in cui resta circa il 30% della massa di combustibile a disposizione.

Una fiamma è una reazione di combustione localizzata che si propaga a velocità subsonica nella miscela di aria e combustibile ed è in grado di autosostenersi. Per la maggior parte delle miscele stechiometriche di aria e idrocarburi, la velocità di combustione laminare si trova tra 0.4 e 0.6 m/s. Le fiamme si dividono in fiamme premiscelate e di diffusione. La differenza tra queste due risiede nella sequenza di combustione. Nelle fiamme premiscelate, il combustibile e il comburente sono miscelati prima che avvenga l'innesco, in quelle diffusive la miscelazione avviene nell'ambiente in cui è già presente un innesco. In pratica, la fiamma premiscelata si ottiene solo in condizioni controllate (forni industriali, becco Bunsen, cannello ossiacetilenico), mentre la fiamma da diffusione è quella che si osserva nella maggior parte delle combustioni e degli incendi. Una seconda classificazione delle fiamme è quella tra laminari (laminar flames) e turbolente (turbulent flames): se una fiamma non è interessata da correnti o flussi d'aria il suo comportamento è prevalentemente laminare. Al crescere dell'influenza delle correnti (circostanza che si verifica quando la fiamma cresce di dimensione, sopra i 30 cm circa), i moti turbolenti diventano più evidenti e la fiamma assume le caratteristiche corrispondenti. Le fiamme associate alla combustione di gas provenienti da solidi e liquidi sono dominate dal galleggiamento, rendendo trascurabile l'apporto del momento dei composti gassosi, che aumenta partendo dalla superficie. La relativa importanza del momento e galleggiamento della fiamma determineranno il tipo di incendio, e il *Froude Number*  $Fr$  può essere utilizzato come indice per la classificazione. Questo è una misura dell'importanza relativa dell'inerzia e del galleggiamento nel sistema, ed è espresso come:

$$Fr = \frac{U_c^2}{gD}, \quad (1.1)$$

dove  $U_c$  è la velocità dei gas combustibile,  $D$  è la dimensione caratteristica e  $g$  l'accelerazione gravitazionale. Negli incendi spontanei, la velocità iniziale del gas non

può essere misurata, ma può essere derivata dalla potenza termica (HRR)  $\dot{Q}$ . Assumendo un letto di combustibile circolare di diametro  $D$ , la densità del combustibile  $\rho$ , e un calore di combustione di  $\Delta H_c$ , la velocità iniziale del combustibile gassoso può essere espresso come:

$$U = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_c \rho (\pi D^2 / 4)}. \quad (1.2)$$

Confrontando le due espressioni, si può notare come il numero di Froude sia proporzionale a  $\dot{Q}^2 / D^5$ . Uno studio in scala può essere eseguito introducendo un HRR adimensionale  $\dot{Q}^*$  (cfr. [6]), che è la radice quadrata del numero di Froude, espresso in termini di HRR dell'incendio. E' utilizzato per classificare i tipi di incendio e correlare gli aspetti del comportamento dell'incendio, come l'altezza di fiamma. La sua espressione è

$$\dot{Q}^* = \frac{Q_c}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g D D^2}}. \quad (1.3)$$

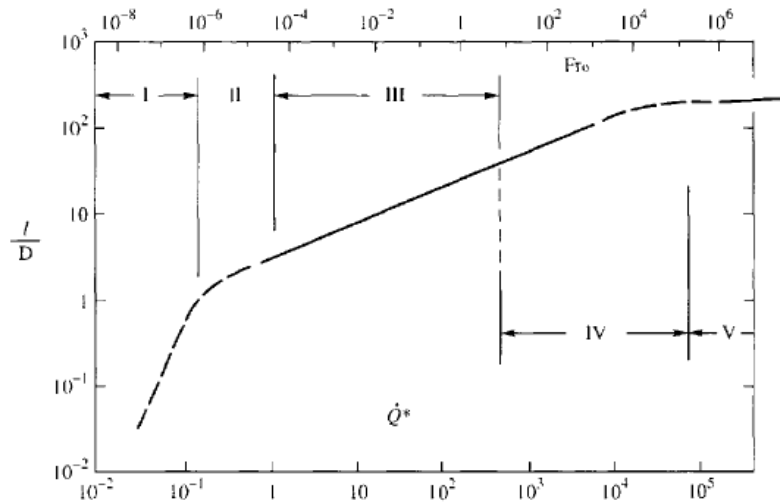


Figura 1.3: Lunghezza di fiamma ( $l$ ) come funzione della portata di combustibile, espressa come  $\dot{Q}^*$ . Regioni I e II corrispondono a fiamme diffusive governate dalla turbolenza, mentre la regione V corrisponde ad un *jet flame* completamente turbolento [6].

Negli incendi spontanei, il galleggiamento è la forza dominante, con valori di  $\dot{Q}^*$  che sono anche sei ordini di grandezza inferiore. Tali fiamme hanno una struttura poco ordinata e molto suscettibile alle influenze esterne come il movimento dell'aria. E' dimostrato che il *fire plume* valutato 30 cm al di sopra di un bruciatore con sezione quadrata, è composto da tre differenti regimi (cfr. [6]):

- zona di fiamma: la regione vicina, dove c'è una fiamma persistente e un flusso accelerato di gas combustibile;
- zona intermittente: regione per cui c'è una fiamma intermittente e una velocità di flusso quasi costante;

- il *buoyant plume* (pennacchio): caratterizzato da velocità e temperature decrescenti con l'altezza.

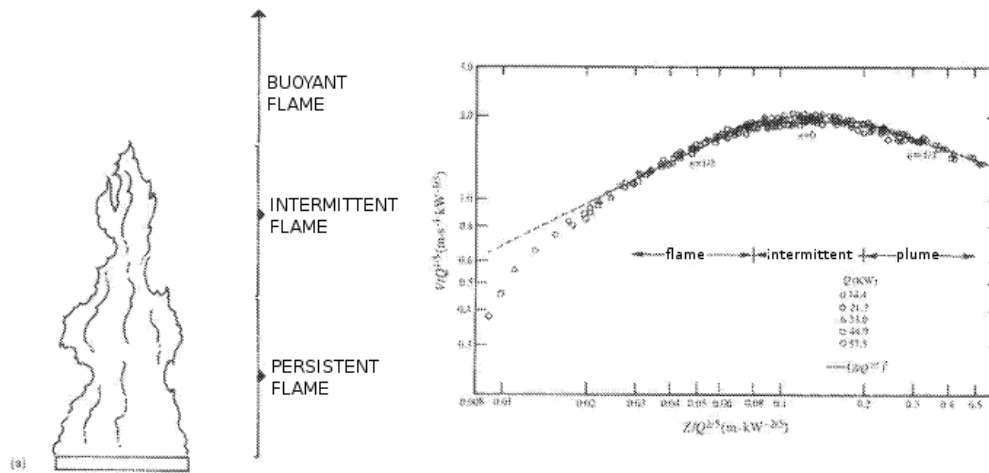


Figura 1.4: Diagramma schematico del *fire plume*, con le tre zone. Variazione della velocità  $V$  con l'altezza  $z$ , al di sopra del bruciatore, mediante il confronto tra  $V/\dot{Q}^{1/5}$  (ordinate) e  $z/\dot{Q}^{2/5}$  (ascisse) [6] [15].

Se per effetto del gradiente di temperatura esiste una differenza di densità tra due masse di fluido adiacenti, le forze di galleggiamento causeranno una salita del fluido meno denso verso l'alto. Le forze di galleggiamento (per unità di volume), date da  $g(\rho_\infty - \rho)$ , si oppongono alla resistenza viscosa del fluido, e la relativa magnitudo di queste forze opposte può essere espressa attraverso il numero di Grashof:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_\infty - \rho)}{\rho\nu^2} = \frac{g\beta_c l^3(T_s - T_\infty)}{\nu^2},$$

con  $g$  accelerazione gravitazionale,  $\beta_c$  coefficiente di dilatazione cubica,  $\nu$  la viscosità cinematica del fluido,  $l$  la dimensione caratteristica, mentre con il pedice infinito si identificano i valori del fluido in un punto sufficientemente lontano dalla superficie. Il termine *buoyant plume* è utilizzato per descrivere la colonna convettiva che sale al di sopra di una sorgente di calore; le temperature all'interno di questo dipendono dalla potenza termica e dall'altezza disponibile sopra la sorgente termica.

Il modello matematico di un semplice *buoyant plume* è basato su una sorgente puntiforme per cui il pennacchio ideale in un'atmosfera immobile è simmetrico ed esteso verticalmente ad un'altezza dove le forze di galleggiamento sono diventate troppo deboli per vincere le forze viscosi. In condizioni atmosferiche stazionarie, l'inversione di temperatura può costituire quello che effettivamente limita un *plume* di fumo crescente, arrestando il suo movimento verticale e causando la sua diffusione laterale a quel livello. Il raffreddamento del *plume* avviene come il risultato della diluizione con aria ambiente, che è risucchiata attraverso il contorno del pennacchio. La diminuzione della temperatura con l'altezza è accompagnata dall'ampliamento del *plume* e una riduzione della velocità di salita del flusso.

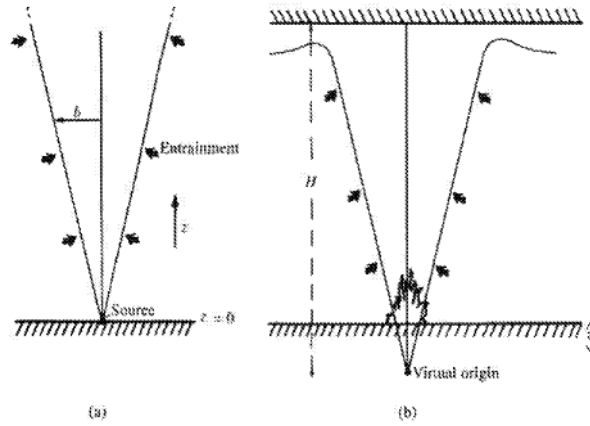


Figura 1.5: Il *buoyant plume* di una sorgente puntiforme confrontato con quello reale, interagente con il soffitto [6].

La struttura del plume può essere studiata in maniera semplificata, derivando l'equazione di conservazione e facendo un'analisi dimensionale, applicata per ottenere una relazione tra la temperatura e la velocità di salita, oltre che all'energia della sorgente. Per la conservazione del momento, può essere scritta una proporzionalità per un plume simmetrico (di raggio  $b$  e altezza  $z$ ) in un'atmosfera infinita se le forze viscose sono trascurabili e le differenze di temperatura piccole:

$$\frac{d}{dz}(\rho_0 u_0^2 b^2) \propto g(\rho_0 - \rho_\infty) b^2 \quad (1.4)$$

dove  $u_0$  e  $\rho_0$  sono la velocità di salita del flusso e la densità del pennacchio all'altezza  $z$  sopra la sorgente puntiforme. Allo stesso modo, la conservazione della massa:

$$\frac{d}{dz}(\rho_0 u_0 b^2) \propto \rho v b \propto \rho u_0 b \quad (1.5)$$

per cui l'aumento della portata con l'altezza è dovuto al risucchio di aria attraverso il confine del pennacchio. La velocità di risucchio ( $v_r$ ) è assunta direttamente proporzionale ad  $u_0$ , con  $v = \alpha' u_0$ , dove  $\alpha'$  è la costante di risucchio stimata pari a 0,09 per tutte le condizioni dell'aria [6]. Qualsiasi vento, o altro movimento dell'aria, defletterà il *plume* e incrementerà la costante di risucchio. La conservazione dell'energia può essere espressa come:

$$c_p \rho_0 u_0 b^2 \Delta T_0 \propto \dot{Q}_{conv}, \quad (1.6)$$

dove  $\Delta T_0$  è l'eccesso di temperatura nell'ambiente sull'asse all'altezza  $z$  e  $\dot{Q}_{conv}$  è la potenza termica convettiva uscente dalla sorgente. La potenza persa dal *plume* come sorgente effettiva (per esempio per effetto dello scambio radiativo), è assunta trascurabile e le variabili  $b$ ,  $u_0$  e  $\Delta T_0$  possono essere determinate (per approfondimenti v. [6]).

Le fiamme diffuse possono estinguersi a causa dell'annullamento della portata dei vapori di combustibile oppure con i tipici agenti estinguenti descritti più avanti.

Il metodo tipico per la soppressione è quello di raffreddare direttamente con acqua il combustibile; Introducendo  $\dot{Q}_w''$  come potenza persa per il raffreddamento dell'agente estinguente, possiamo scrivere l'equazione di conservazione dell'energia della fiamma:

$$[(f_r + f_c) \cdot \Delta H_c - L_v] \dot{m}_{burn}'' + \dot{Q}_E'' - \dot{Q}_L'' - \dot{Q}_w'' = S \quad (1.7)$$

con  $f$  frazione dell'entalpia di combustione ( $\Delta H_c$ ) trasferita convettivamente (pedice c) o radiativamente (pedice r),  $L_v$  calore latente di evaporazione del liquido mentre con  $\dot{Q}$  si identificano le potenze scambiate all'esterno (pedice E) e perse (pedice L). Per  $S = 0$  la combustione è stabile, ma se diventa negativa, la superficie del combustibile si raffredderà ulteriormente e la fiamma non persisterà. Le fiamme diffuse possono essere estinte anche per il meccanismo di *blowout*, che coinvolge la distorsione della zona di reazione all'interno della fiamma riducendone lo spessore; perciò i vapori di combustibile hanno un intervallo di tempo disponibile breve per reagire. Se la zona di reazione è troppo sottile, la combustione sarà incompleta e la fiamma si raffredderà, fino ad un livello per cui non potrà più sostenersi ( $T_f < 1600K$ ). Questo può essere interpretato attraverso un gruppo adimensionale conosciuto come il numero di Damkholer  $D$ :

$$D = \frac{\tau_r}{\tau_{ch}}, \quad (1.8)$$

dove  $\tau_r$  è il tempo di residenza riferito al periodo di tempo in cui i vapori di combustibile restano nella zona di reazione, e  $\tau_{ch}$  è il tempo di reazione chimico (effettiva durata della reazione alla temperatura di fiamma). Si può identificare un valore di  $D$  critico, al di sotto del quale la fiamma si estinguerà. Il tempo di residenza dipende dalla fluidodinamica della fiamma, ma come il tempo di reazione, è inversamente proporzionale alla velocità di reazione della fiamma, e possiamo scrivere:

$$D \propto \tau_r e^{\frac{-E_A}{RT_f}} \quad (1.9)$$

Lo spegnimento avviene se un flusso di aria prodotto riduce  $\tau_r$  e  $T_f$ , e quindi  $D$  al di sotto del valore critico [6].

### 1.3 Effetti dell'incendio sui materiali e sulle strutture

Lo studio degli effetti degli incendi sui materiali è di prioritaria importanza nell'ambito della sicurezza: l'incendio aggredisce le strutture riscaldandone gli elementi, provocando dilatazioni, rottura, fusione e degrado dei materiali di cui esse sono composte. La conoscenza del comportamento dei materiali sottoposti all'azione del fuoco, con maggiore attenzione a quelli da costruzione, permette di affrontare la progettazione strutturale nella maniera più opportuna, garantendo un margine di sicurezza alla resistenza delle strutture, tale da consentire, in caso d'incendio, l'incolumità degli occupanti. La resistenza al fuoco è la capacità di un elemento da costruzione (componente o struttura) di conservare, per un determinato periodo di tempo di esposizione a un focolaio di determinata potenza e configurazione, le sue caratteristiche di:

- R: stabilità: attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;

- E: tenuta: attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare ne produrre (se sottoposto all'azione del fuoco su un lato) fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto al fuoco;
- I: isolamento termico: attitudine di un elemento da costruzione a contenere, entro un dato limite, la trasmissione del calore, ossia capacità dell'elemento di mantenere le temperature del lato non esposto all'incendio a valori non pericolosi.

In base ai requisiti posseduti dagli elementi strutturali, in termini di materiali da costruzione utilizzati e spessori realizzati, la resistenza al fuoco è contraddistinta con un numero che quantifica il tempo massimo di esposizione al fuoco (incendio di caratteristiche tipiche), in minuti primi, durante il quale si mantengono uno o più caratteristiche R, E o I. La reazione al fuoco caratterizza l'eventuale ignizione e il conseguente sviluppo della combustione del materiale stesso e per la sua valutazione sono presi in considerazione come parametri la combustibilità del materiale, la propagazione della fiamma, la persistenza della combustione, il gocciolamento del materiale fuso. La selezione dei materiali e la rifinitura della costruzione giocano un ruolo importante nella sicurezza durante gli incendi, finalizzata all'evitare il collasso della struttura (valutazione della capacità portante) ed evitare l'ignizione e la diffusione delle fiamme negli spazi adiacenti.

Gli approcci utilizzati per la scelta dei materiali da costruzione sono essenzialmente di tre tipi:

- Test standardizzati di resistenza al fuoco in accordo con le leggi relative alle strutture.
- Calcoli analitici per determinare la resistenza all'esposizione di un incendio standard, come alternativa ai test di laboratorio.
- Metodi di progettazione strutturale analitica finalizzata all'antincendio, basata su incendi ed esposizioni reali.

L'approccio prescrittivo non è però sufficiente ad assicurare il raggiungimento del risultato per quanto riguarda il comportamento delle barriere o delle strutture.

Le strutture in calcestruzzo hanno la reputazione di aver un buon comportamento al fuoco in quanto il calcestruzzo non è combustibile e ha bassa conduttività termica. Da un punto di vista meccanico resta in posizione proteggendo l'acciaio di rinforzo e mantenendo l'interno a bassa temperatura in modo di mantenere i carichi applicati. I metodi analitici utilizzati per prevedere la resistenza al fuoco delle strutture possono essere suddivisi in due categorie in base all'esposizione standard o non standard. Per i casi di incendi standard, vengono utilizzati dei metodi empirici basati su correlazioni e dimensioni minime per determinare la resistenza al fuoco. Per esposizioni non standard, l'analisi richiede anche un approfondimento sullo scambio termico e sulla struttura. I calcoli sullo scambio termico vengono utilizzati per valutare la temperatura della superficie non esposta e la distribuzione della temperatura attraverso la struttura. L'analisi dell'integrità strutturale applica la teoria della stabilità utilizzata per progettare delle pareti in calcestruzzo rinforzato e la riduzione della forza della parete e dell'acciaio, dovuta alle elevate temperature, viene tenuta



in considerazione utilizzando risultati sperimentali per le azioni di compressione e di trazione. La forza dell'armatura cambia significativamente ad elevate temperature e deve essere tenuta in considerazione nei calcoli strutturali. In fig. 1.6 si osserva la relazione tra resistenza e temperatura per acciaio rullato a caldo (*hot-rolled*, usato per rinforzare le gettate, sottoposto a compressione), trafilato a freddo (*cold-drawn*, per il calcestruzzo precompresso, sottoposto a trazione) e leghe di acciaio ad alta resistenza (*high-strength alloy steels*, per il calcestruzzo precompresso, sottoposto a trazione). Anche la resistenza del calcestruzzo diminuisce ad elevate temperature (fig. 1.7). La forza di compressione non è esclusivamente funzione della temperatura, ma anche del carico applicato. I moduli di elasticità dell'acciaio e del calcestruzzo diminuiscono all'aumentare della temperatura, portando ad una riduzione delle tensioni termiche nelle pareti dovute all'incendio (fig. 1.8).

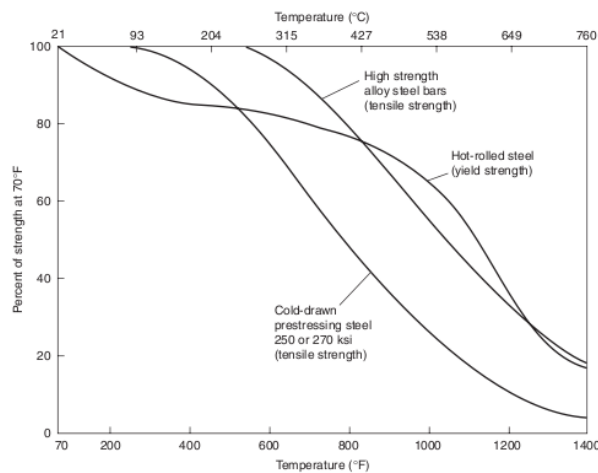


Figura 1.6: Relazione resistenza-temperatura per acciaio rullato a caldo, trafilato a freddo e leghe di acciaio ad alta resistenza [24].

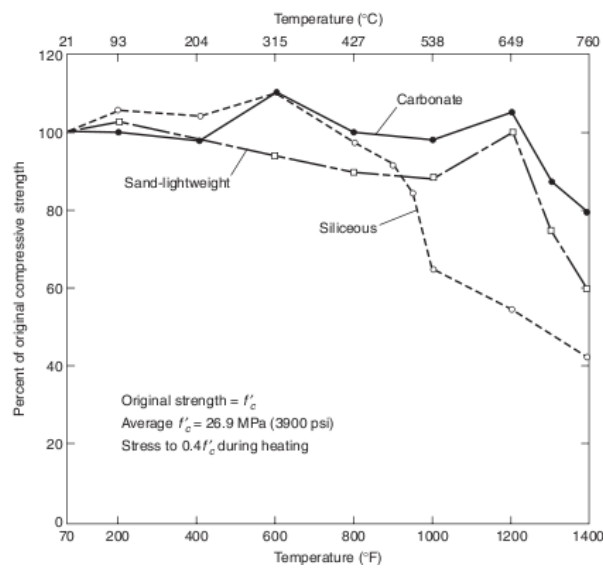
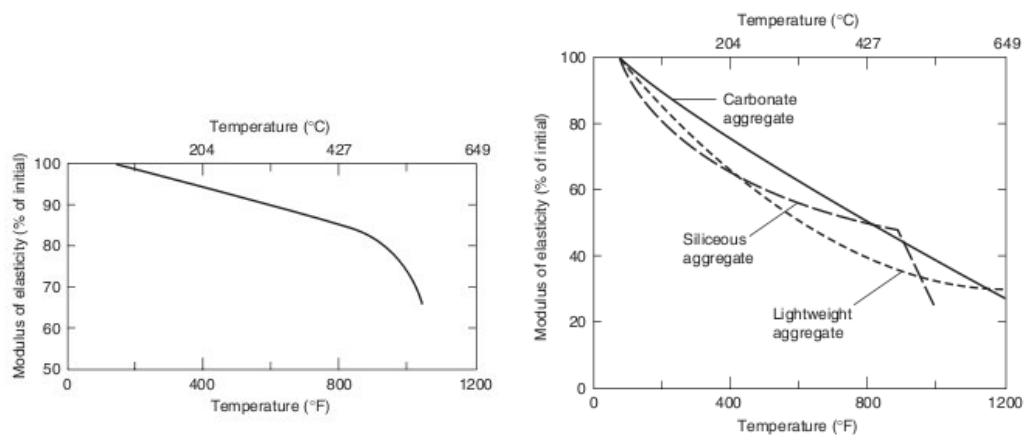


Figura 1.7: Relazione resistenza-temperatura per carbonati, silicio, e sabbia [24].



(a) Acciaio rullato a caldo [24]

(b) Carbonati, silicio, e sabbia leggera [24]

Figura 1.8: Moduli di elasticità ad alta temperatura

## 1.4 Effetti degli incendi sulle persone

Durante un incendio, il calore e i prodotti della combustione (vapori, gas tossici o asfissianti e particolato solido) possono produrre danni elevati alle persone coinvolte nello scenario. La pericolosità di una sostanza o di un fattore in generale è determinata dalla durata dell'esposizione, concentrazione e infine dal danno che essa è in grado di arrecare all'uomo.

Il grado di tossicità viene determinato da fattori come la concentrazione dei prodotti tossici in alcuni organi del corpo e il periodo di tempo per cui la concentrazione di tossicità è stata mantenuta. Per i prodotti asfissianti il principale criterio è la concentrazione nel sangue diretto al cervello, mentre per i prodotti irritanti il fattore più importante è la concentrazione nella cavità nasale, gola o polmoni. Esiste, per ciascuna specie, una concentrazione di soglia al di sotto della quale non si manifestano effetti dannosi e una al di sopra della quale si manifestano immancabilmente danni alla salute dell'individuo. Nell'ambito degli effetti sviluppati dai prodotti della combustione sull'uomo riveste una rilevante importanza quello di perdita di coscienza, che riduce la capacità di un individuo di far fronte al pericolo imminente o sopraggiunto e può condurlo al decesso. L'incoscienza può essere provocata sia da gas quali il  $CO$ , l' $HCN$  e dalla  $CO_2$  in elevate concentrazioni che dalla permanenza dell'individuo in ambienti con ridotta concentrazione di ossigeno.

L'effetto tossico dell'ossido di carbonio  $CO$  è causato principalmente dalla reazione tra  $CO$  e l'emoglobina ( $Hb$ ) del sangue, componente che consente il trasporto dell'ossigeno, sotto forma di ossiemoglobina ( $O_2Hb$ ), dai polmoni alle cellule del corpo. Emoglobina e monossido di carbonio  $CO$ , legandosi formano la carbossiemoglobina ( $COHb$ ), riducendo drasticamente la capacità del sangue di trasportare ossigeno. L'affinità del monoossido di carbonio per l'emoglobina è circa duecento volte superiore a quella dell'ossigeno. La perdita di coscienza è prevedibile ad una concentrazione del 40% di  $COHb$  nel sangue, ma può avvenire anche a frazioni più basse e livelli ancora minori per soggetti con problemi cardiaci. La morte è prevista per concentrazioni di  $COHb$  tra il 50% e il 70% (tab. 1.1).

COHb nel sangue	Effetti
15%	emicrania e nausea
20%-30%	emicrania, nausea e destrezza manuale anormale
30%-40%	nausea, vomito e perdita di coscienza
40%-50%	nausea, vomito, stordimento, collasso al minimo sforzo
50%-60%	coma
oltre 60%	morte

Tabella 1.1: Effetti della concentrazione di  $COHb$  nel sanbue sull'uomo [21].

La percentuale di carbossiemoglobina nel sangue dipende dalla concentrazione di ossido di carbonio nell'aria inalata. Il monossido di carbonio, sempre presente negli incendi, causa confusione ostacolando la fuga, ed è la maggior causa di morte. Per una data concentrazione di  $CO$  nell'aria, la concentrazione di carbossiemoglobina raggiunge un valore di equilibrio dopo un certo intervallo di tempo; tale valore si

mantiene nel sangue fino a quando il livello di  $CO$  in ambiente si maniene costante. Il tempo richiesto affinché la concentrazione di  $COHb$  nel sangue raggiunga l'equilibrio con la concentrazione di  $CO$  nell'ambiente è funzione dell'attività fisica della persona esposta, per effetto del diverso volume di aria inspirato. Essendo tale quantità dipendente dalla massa dell'individuo, i piccoli individui inspireranno  $CO$  in modo molto più rapido rispetto ai grandi, avvertendo per primi gli effetti.

La fig. 1.9 riporta il tempo necessario per la perdita di conoscenza di un uomo di 70 kg esposto a diversi livelli di concentrazione di carbossiemoglobina limite per tre diverse attività. Le curve in figura rappresentano le situazioni:

- A :  $COHb$  limite: 40%; Respirazione 8,5 [l/min]; Attività: seduto a riposo
- B :  $COHb$  limite: 30%; Respirazione 25 [l/min]; Attività: lavoro leggero - camminata a 6,4 km/h
- C :  $COHb$  limite: 20%; Respirazione 50 [l/min]; Attività: lavoro pesante - corsa lenta a 8,5 km/h

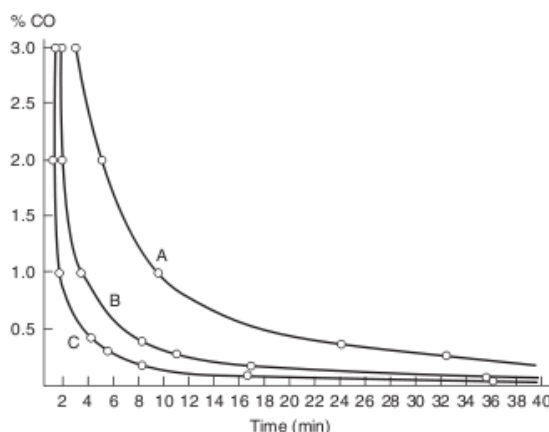


Figura 1.9: Tempo di incapacità da monossido di carbonio, per uomo di 70 kg a diversi livelli di attività [24].

Per incendi circoscritti la concentrazione di  $CO$  può crescere lentamente e restare quasi costante sul lungo periodo, ma per incendi completamente sviluppati, dove le vittime si trovano in luoghi distanti, la concentrazione di  $CO$  può crescere rapidamente dopo un breve periodo di tempo.

L'anidride carbonica ( $CO_2$ ), che si forma in grande quantità durante la combustione di composti che contengono carbonio, è un gas asfissiante. Provocando una riduzione della concentrazione di ossigeno nell'aria e un aumento della frequenza degli atti respiratori, l'organismo tende ad inalarne sempre maggiormente, insieme agli altri gas presenti nell'aria; questo riduce il livello di ossigeno nel sangue, con conseguente torpore e perdita di conoscenza e può portare alla morte per asfissia (fig. 1.10).

L'acido cianidrico ( $HCN$ ) impedisce l'utilizzo dell'ossigeno da parte delle cellule e la sua tossicità è circa venti volte superiore a quella del  $CO$ . Gli effetti di queste

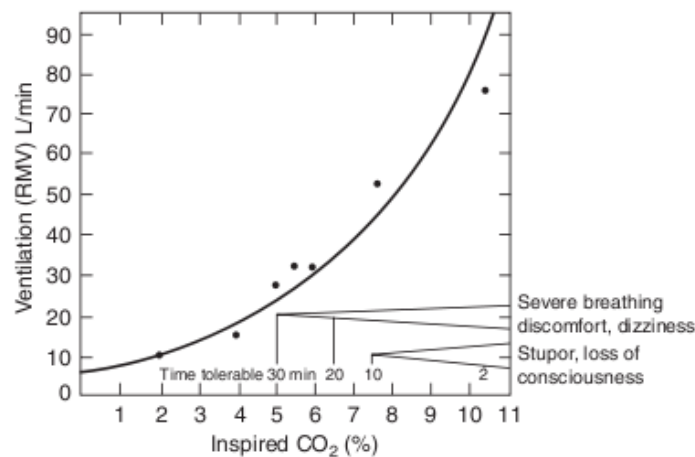


Figura 1.10: Tempo di incapacità da anidride carbonica [24].

sostanze tossiche possono tra loro possono sommarsi, costituendo così un pericolo maggiore. L'incapacità psico-fisica dell'individuo può subentrare qualora la concentrazione volumetrica di ossigeno  $O_2$  nell'aria scenda al di sotto dell'8÷12% oppure per una concentrazione volumetrica di  $CO$  nell'atmosfera pari a 0.015 ÷ 0.04% cui corrisponde la presenza di 20÷40% di  $COHb$  nel sangue.

L'effetto irritante è un altro tra quelli arrecati da alcuni prodotti della combustione. Gas quali l'acido cloridrico ( $HCl$ ), l'idrogeno solforato ( $HF$ ), l'aldeide acrilica derivante dalla combustione del legno ed altri, possono essere dannosi agli occhi, alle vie respiratorie e in genere alle mucose, anche se non risultano essere fatali durante l'inalazione. Tuttavia, i danni agli organi, che si manifestano nella fase successiva all'esposizione, possono risultare pericolosi e spesso anche mortali.

La riduzione della visibilità è un aspetto importante che si manifesta fin dagli albori del focolaio attraverso il fumo, formato da gas e particolato. Da un punto di vista tossicologico sono asfissianti solo i prodotti in fase gassosa, mentre sono irritanti i prodotti di entrambi le fasi. Il particolato è composto sia da particelle liquide che da particelle solide, di diverse dimensioni. Il pericolo del fumo risiede soprattutto nel ridurre la visibilità nascondendo le vie di esodo e, a seguito dell'inevitabile inalazione che ne comporta, al deposito sulle superfici alveolari e bronchiolari dei polmoni, provocando danni significativi all'apparato respiratorio.

Ultima questione da considerare è l'effetto termico, in quanto esistono tre modi per cui l'esposizione al fuoco può portare all'incapacità fino alla morte: per il calore, le scottature della pelle o per bruciatura del tratto respiratorio.

Per una persona che fugge da un incendio, la sorgente di calore verso cui proteggersi sono i gas caldi, che trasmettono per convezione e radiazione. Lo scambio termico tra aria calda e pelle dipende dalla ventilazione, umidità, resistenza termica dei vestiti indossati, oltre che la temperatura dell'aria. L'aria secca è abbastanza tollerata dal corpo umano, ma se l'aria ha alti livelli di umidità, non solo si riduce lo scambio termico attraverso il sudore, ma cresce il calore trasmesso alla pelle ed esiste il rischio di incapacitazione per ipertermia. L'umidità è quindi un fattore da non trascurare; temperature di 60°C accompagnate da un tasso di umidità del 100%

sono le condizioni limite di aria che può essere respirata. L'aumento della temperatura del cuore dai 37°C a più di 40°C può portare verso l'incoscienza e far sentire febbre. Ulteriori aumenti fino a 42.5°C possono portare a danni irreversibili.

Le scottature avvengono quando alla profondità di 0,1 mm dalla pelle si raggiungono i 44,8°C. La sensazione di dolore che si accompagna è presto seguita da un'ustione, che causa problemi a seconda della sua gravità.

Un flusso termico di almeno  $4 \text{ kW/m}^2$  per provocare delle bruciature in tempi relativamente brevi (l'irraggiamento solare è circa di  $1 \text{ kW/m}^2$  e con esposizioni prolungate può provocare lievi scottature, fig. 1.11). A questo flusso termico, nel caso di pura convezione, corrisponde una temperatura dei fumi che può essere stimata attorno ai 450°C; particolare attenzione quindi deve essere posta al tipo di vestiti indossati, e all'esposizione a tali radiazioni della testa, generalmente scoperta.

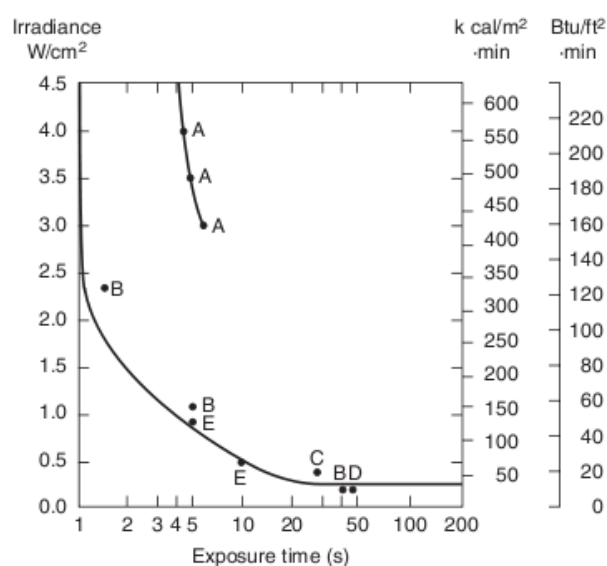


Figura 1.11: Tempo necessario per osservare scottature sulla pelle nuda da fonti termiche radiative [24].

I danni all'apparato respiratorio sono sempre accompagnati da ustioni al viso, e dipendono dal tasso di umidità dell'aria inalata. Del vapore a circa 100°C è in grado di provocare bruciature severe all'intero tratto respiratorio, fino ai polmoni.

## 1.5 Analisi e controllo del rischio di incendio

Nello sviluppo della soluzione di un problema dell'ingegneria antincendio si devono affrontare molte fonti di incertezza come la scelta e definizione dello scenario, la formulazione di modelli concettuali appropriati, la formulazione di modelli computazionali associati, la definizione dei dati di ingresso e degli altri dati. L'analisi del rischio di incendio è fondato su un approccio decisionale riguardo alle incertezze: esistono diverse tecniche o approcci sia qualitativi che quantitativi dell'analisi del rischio di incendio. Per ogni applicazione è poi possibile definire il livello di appro-

fondimento matematico per raggiungere i propri obiettivi e generalmente l'analisi del rischio si può comporre in:

1. Definizione dell'obiettivo;
2. Identificazione del pericolo di incendio;
3. Elaborazione di un piano di evacuazione;
4. Analisi dell'esposizione al calore e fumi;
5. Giustificazione delle incertezze;
6. Scelta del metodo di valutazione (qualitativo, mediante esperti, o quantitativo, mediante metodi di calcolo probabilistico).

Nonostante i massimi sforzi per prevenire l'insorgere di un incendio e la massima attenzione nell'adozione dei mezzi di rilevazione, segnalazione ed estinzione di un incendio, non si può escludere con certezza la possibilità che questo si propaghi con produzione di calore e fumi tali da mettere a repentaglio la vita umana. Per questo il problema dell'esodo delle persone comporta la scelta di soluzioni tecniche finalizzate all'esodo delle persone dai locali a rischio d'incendio, nelle migliori condizioni di sicurezza possibile. Gli elementi fondamentali nella progettazione del sistema di vie d'esodo si possono fissare in:

- dimensionamento e geometria delle vie d'esodo;
- sistemi di protezione attiva e passiva delle vie d'esodo;
- segnaletica, illuminazione ordinaria e di sicurezza delle vie d'esodo.

I sistemi di protezione attiva tendono a controllare, sopprimere ed estinguere la combustione, agendo sulla velocità di reazione con lo scopo di contenere lo sviluppo del processo di combustione, riducendo e, se possibile, annullando la velocità stessa. Anche i sistemi di evacuazione di fumo rientrano nei sistemi di protezione attiva e a causa del duplice effetto di allontanamento dei prodotti della combustione e di controllo delle temperature, vengono spesso identificati come di evacuazione di fumo e calore.

Le azioni realizzate dai sistemi considerati nella zona di reazione e nella zona prossima ad essa sono:

- azione termica di raffreddamento;
- azione meccanica, di riduzione o annullamento della concentrazione del combustibile o/e del comburente,
- azione chimica di inibizione della reazione attraverso la riduzione del contatto fra le diverse particelle dei reagenti e la neutralizzazione dei radicali liberi.

Perché funzionino devono essere adatti allo scenario d'incendio in cui si trovano coinvolti a operare, basandosi sull'adozione di sostanze estinguenti in grado di controllare e sopprimere (ed eventualmente estinguere) il processo di combustione

in atto. Ai fini della protezione è di rilevante importanza impedire l'ignizione dei fenomeni combustivi in zone dove si trovino dei combustibili non ancora interessati dalla combustione, prevenendo quindi la propagazione dell'incendio. Infatti, nel caso di incendi in fase avanzata, che sviluppano elevati valori di potenza termica, la possibilità di ridurre la velocità di reazione delle combustioni già in atto è bassa e l'azione tesa ad impedire la propagazione dell'incendio verso combustibili non ancora coinvolti diventa l'azione principale.



## Capitolo 2

# Prevenzione degli incendi nelle linee delle metropolitane

Le restrizioni imposte dall'uso intensivo del suolo nelle città richiede dei sistemi di trasporto efficienti e convenienti, come le metropolitane che si sono sviluppate rapidamente nell'ultimo secolo. Il sistema metropolitano, composto da tunnel, piattaforme e camini di ventilazione, costituisce una rete di ventilazione artificiale in cui si costituiscono dei flussi di aria. In questo tipo di ambiente il rischio di incendio, tra tutti quelli potenziali, è quello con le peggiori conseguenze. I vigili del fuoco hanno limitati spazi dove poter agire e sono molteplici gli aspetti che devono essere considerati, come i punti di accesso per il personale antinecendio, le uscite di sicurezza per i passeggeri, la possibilità di distribuzione di acqua e sistemi di ventilazione. La sicurezza del tunnel viene solitamente considerata una caratteristica di qualità, che deve essere garantita durante tutta la vita utile della galleria. Un nuovo tunnel non può essere progettato senza adottare misure riguardanti la prevenzione degli incendi, la riduzione di imprevisti e danni, miglioramento delle opportunità di salvataggio dall'interno e dall'esterno. Quindi, devono essere considerati degli aspetti come:

- lunghezza dei percorsi di sicurezza e indicatori;
- attrezzature lungo la via di fuga della galleria (luci, ventilazione..);
- possibilità di mezzi di comunicazione (telefoni, radio, etc.)

Nelle moderne costruzioni, i passeggeri evacuano passando dal treno alla banchina costruita lungo un lato della galleria per poter raggiungere le uscite di sicurezza, che devono tenere essere posizionate e dimensionate in modo da tenere in considerazione diversi fattori:

- lunghezza del treno;
- profondità della galleria rispetto alla superficie;
- accessibilità all'uscita alla superficie;
- tempo e distanza necessaria alle persone per uscire in superficie;
- presenza di sistemi di controllo, segnalazione e ventilazione;

- accessibilità alla rete da parte dei vigili del fuoco.

La NFPA 130 prescrive che le uscite di sicurezza vengano costruite ad una distanza non superiore a 380 metri nel tunnel [18], in modo di consentire l'esodo verso un luogo sicuro, in questo caso un posto esterno al tunnel, al livello del suolo.

I vigili del fuoco operanti in caso di emergenza in galleria devono essere a conoscenza del percorso, accessi, uscite, ventilazione e altre caratteristiche che fanno parte del piano di emergenza che deve essere aggiornato e provato periodicamente in modo che le squadre antincendio siano allenate per rispondere prontamente in caso di allarme.

### Literature review

Il 28 Ottobre 1995, a Baku, nella stazione di Uldus, vi fu un guasto all'equipaggiamento elettrico del carrello ferroviario della quarta carrozza. Oltre due chilometri prima della stazione i passeggeri avvertirono odore di bruciato, immesso nella carrozza dal sistema di ventilazione. Il conducente, accortosi di un malfunzionamento sconosciuto, fermò il treno a 200 m dalla stazione di Uldus. All'arresto, la galleria si riempì rapidamente di fumo, anche se le prime tre carrozze ne rimasero abbastanza libere, per effetto della direzione di ventilazione di galleria favorevole. L'arco elettrico generatosi aumentò, provocando un buco attraverso il pavimento della quarta carrozza, e l'incendio si propagò all'interno, bruciando i sedili. L'incendio si estese a tutta la carrozza (dopo circa 15 minuti dell'arresto del treno) coinvolgendo anche il vagone successivo. Nelle prime tre carrozze vennero ritrovati circa 220 passeggeri senza vita, per effetto della concentrazione degli inquinanti tossici. Durante l'incendio la direzione di ventilazione in galleria cambiò diverse volte.

L'8 Luglio 2000, alla stazione sotterranea di Berlino Deutsche Oper, a causa di una disfunzione elettrica sull'ultimo vagone di un convoglio avvenne un arco elettrico con il corpo della carrozza. A causa della corrente relativamente bassa e l'attenuata crescita dell'intensità, il corto circuito non venne rilevato dalla sottostazione di trasformazione elettrica. L'interruttore di corrente non scattò, e quindi l'arco rimase, mandando la carrozza in fiamme nel momento in cui il treno entrava in stazione. Il conducente, riconosciuto subito l'incendio, informò il centro di controllo, facendo scendere i passeggeri. La stazione era ad una profondità una volta e mezzo maggiore rispetto a quella standard, e l'unica scala di accesso presente si riempì ben presto di fumo. I passeggeri si allontanarono dalla zona di incendio, alcuni aspettarono comunicazioni dal centro di controllo, che non raggiunsero gli altoparlanti installati nella zona della piattaforma. Alcuni passeggeri iniziarono quindi ad evacuare attraverso la linea ferroviaria, non illuminata, nella direzione della stazione vicina, trovando un'uscita di sicurezza a circa 160 metri.

L'ultimo significativo esempio di incendio in metropolitana è quello accaduto in Corea del Sud a Daegu, il 18 Febbraio 2003, nella stazione di Jungagno. Un incendiario appiccò il fuoco ad una carrozza del treno utilizzando delle bottiglie riempite di gasolio, e in un paio di minuti l'incendio si propagò a tutto il treno, entrato in stazione. Pochi minuti dopo l'incendio un secondo treno che entrò nella stessa stazione in direzione opposta, prendendo fuoco. Il numero di vittime dell'incendio è di circa 200 persone. Nel momento dell'incendio nella metropolitana di Daegu non

erano state ancora prese delle precauzioni riguardo al tipo di materiale utilizzato all'interno dei convogli per la prevenzione incendi.

## 2.1 Sistemi di protezione attiva

I sistemi di controllo, di soppressione e di estinzione della combustione sono classificati in diversi modi, principalmente in base al tipo di effetto esercitato sulla combustione e al tipo di agente utilizzato. Per controllo della combustione si intende un'azione su di essa tesa ad impedirne la crescita in modo particolare per prevenire l'instaurarsi delle condizioni che determinano il fenomeno di flashover; per soppressione si intende la progressiva riduzione della potenza termica sviluppata dall'incendio fino all'eventuale estinzione, che consiste invece nel suo annullamento. Perciò i sistemi considerati saranno classificati a seconda dell'effetto esercitato sugli incendi.

Il tipo di erogatore adottato per l'agente utilizzato è una caratteristica per diversificare i sistemi di controllo ed estinzione della combustione. Il motivo dell'impiego di parecchi tipi di erogazione è la diversa efficacia dell'azione di controllo della reazione chimica al variare dei parametri caratteristici dell'erogazione stessa e delle caratteristiche dello scenario d'incendio. In particolare i parametri caratteristici dell'erogazione che vengono distinti sono principalmente: le portate, le pressioni interne all'elemento preposto all'erogazione (erogatore), la distribuzione iniziale delle velocità e lo stato di frammentazione (frazionamento) dell'agente estinguente all'uscita dell'ugello di erogazione.

Classe di Fuoco	Materiale	Sistemi di controllo indicati
A	Sostanze solide combustibili la cui combustione normalmente avviene con produzione di braci (es. legno, carta, gomma)	ad acqua (getti e gocce) polvere, schiuma, gas (locali chiusi)
B	Sostanze liquide infiammabili o combustibili (es. alcool, benzine, vernici)	ad acqua (nebulizzata) polvere, schiuma, gas
C	Sostanze nella fase di gas o vapore (es. metano, propano, idrogeno, acetilene)	ad acqua (nebulizzata) polvere, gas
D	Sostanze chimiche spontaneamente combustibili in presenza di aria e/o reattive con l'acqua (es. litio, magnesio, zinco, titanio, sodio)	ad agenti estinguenti speciali
E	Apparecchiature elettriche in tensione (es. quadri elettrici)	ad acqua (nebulizzata) polvere, gas

Tabella 2.1: Classificazione dei fenomeni combustivi degli incendi in base ai combustibili coinvolti secondo la norma UNI EN 2/2005 "Classificazione dei fuochi" e corrispondenza con i sistemi di controllo efficaci

Altro elemento distintivo di questi sistemi è la logica con cui viene effettuata l'attivazione, che determina l'inizio dell'erogazione, che può essere di tipo manuale o automatico; nel primo caso l'attivazione viene ottenuta tramite l'intervento dell'uomo, nel secondo caso tramite l'intervento di sistemi di rivelazione d'incendio automatici. Inoltre esistono anche logiche ibride che prevedono prima l'intervento del sistema automatico di rivelazione e conseguentemente l'intervento dell'operatore. La strategia di attivazione può essere prettamente locale, con l'attivazione di un solo erogatore alla volta, oppure può essere del tipo a zone, cioè tale da provocare l'attivazione contemporanea di tutti gli erogatori che sono presenti nella zona predefinita, sede dell'incendio. Nel caso di attivazione automatica locale sono installati degli elementi sensibili per la rilevazione dell'incendio posizionati nel corpo stesso dell'erogatore, nel caso invece di attivazione a zone, essi sono posizionati esternamente ad esso e sono presenti nell'area da proteggere in punti opportuni. La diversa logica di attivazione influisce sull'efficacia del controllo della combustione.

Requisiti di rilevante importanza, al fine di esercitare l'azione desiderata mediante il sistema antincendio adottato, sono la rapidità e la precisione di intervento nella zona di interesse e il mantenimento nel tempo dei valori opportuni dei parametri caratteristici dell'erogazione. Tutti questi elementi sono fondamentali per raggiungere e mantenere durante la fase iniziale e l'eventuale successiva evoluzione dell'incendio, la necessaria efficacia dell'azione di controllo.

L'ultima classificazione dei sistemi di controllo, di soppressione e di estinzione della combustione si basa sulla possibilità o meno della loro movimentazione e li raggruppa in sistemi mobili o fissi. I sistemi mobili sono quelli montati su automezzi, come le autopompe o gli estintori portatili (presenti a bordo di ogni carrozza della metropolitana) o carrellati, mentre i sistemi fissi sono costituiti dagli impianti. Gli impianti sono caratterizzati da un elevato numero di erogatori e da logiche di attivazione che garantiscono una elevata rapidità e precisione di intervento; queste caratteristiche garantiscono un'azione notevolmente efficace e hanno avuto una diffusione rilevante, in particolare nei casi in cui vi è un elevato rischio d'incendio. In generale, nel caso di impianti, il sistema è composto da un sottosistema di alimentazione, da uno di distribuzione e da uno di erogazione. Il sottosistema di alimentazione è preposto alla fornitura dell'agente estinguente e può essere composto da una apposita rete oppure da un serbatoio locale, dedicato allo stoccaggio dell'agente, collegati al resto dell'impianto in modo opportuno. Il sottosistema di distribuzione è preposto alla distribuzione dell'agente ai vari erogatori e collega il sottosistema di alimentazione a quello di erogazione. Il sottosistema di erogazione è composto dai vari erogatori posizionati nelle diverse aree con rischio d'incendio. Lungo il tunnel metropolitano degli estintori devono essere posti vicino all'equipaggiamento antincendio fisso installato lungo il tunnel, dove esistono possibili punti di ignizione o combustibili.

I sistemi preposti invece all'evacuazione del fumo consistono in apparecchiature posizionate opportunamente negli ambienti e collegate all'esterno di questi, la cui entrata in funzione provoca l'evacuazione dei fumi presenti nel locale, con la creazione di apposite aperture e attraverso condotti di ventilazione forzata che convogliano i fumi lungo i percorsi voluti. Anche questi ultimi sistemi possono avere una logica di attivazione manuale o automatica, a seconda che necessitino o meno dell'intervento di un operatore. Questa logica può essere esclusivamente locale, se comporta

l'azionamento singolo dei vari apparecchi (ad apertura comandata), oppure a zone, se viene attivata l'apertura contemporanea di un complesso di apparecchi o l'attivazione di un sistema di ventilazione che attua la sua azione in un insieme di locali e di condotti. Come avviene per i sistemi di controllo e di estinzione della combustione, nel caso di logica automatica esclusivamente locale gli elementi sensibili per la rivelazione dell'incendio sono posizionati nel corpo stesso dell'apparecchio, nel caso di logica automatica a zone, invece, sono esterni ad esso e sono presenti nella zona da proteggere in opportuni punti. Naturalmente al fine di ottenere e mantenere l'effetto voluto, cioè il mantenimento a valori sufficientemente bassi delle concentrazioni dei prodotti della combustione e delle temperature nelle zone di interesse, i sistemi devono garantire, come i precedenti, rapidità, precisione e continuità di intervento.

Questi diversi sistemi possono essere contemporaneamente presenti o meno a seconda delle caratteristiche degli scenari d'incendio possibili e in particolare del livello di rischio d'incendio presente. Tutti questi sistemi, analogamente ad altri mezzi e strumenti di riduzione del rischio d'incendio, richiedono una progettazione, un'installazione e un mantenimento delle opportune condizioni di esercizio eseguite in funzione della valutazione del rischio d'incendio dell'ambiente. Questa valutazione deve essere eseguita ripetutamente in modo da fornire, con la necessaria continuità, l'esatto stato di rischio presente.

### 2.1.1 Principali agenti estinguenti

#### Acqua

L'acqua è da sempre stata il principale agente estinguente adottato dall'uomo nella lotta agli incendi, per le sue ottime caratteristiche di scambio termico, abbondanza, economicità e atossicità e assenza di problemi di natura ambientale. La sua azione principale si esplica a mezzo di una inertizzazione termica, dovuta alla riduzione della velocità di reazione a causa dell'abbassamento della temperatura della miscela di combustibile e comburente; questo avviene in seguito all'assorbimento del calore sviluppato dalla combustione attraverso fenomeni di scambio termico convettivo e radiativo. Nel caso in cui l'acqua sia erogata sotto forma di gocce o lame altro effetto presente è quello dell'attenuazione radiativa, consistente nella riduzione del flusso termico areico irraggiato dall'incendio nella zona protetta dall'erogazione e dovuto ai fenomeni di assorbimento e di scattering e utile al fine di prevenire l'eventuale innesco di nuove reazioni che coinvolgono materiali non ancora interessati dall'incendio (ovvero la sua propagazione).

Un'altra azione è quella di inertizzazione meccanica che consiste nella riduzione della concentrazione di combustibile e/o comburente a causa dell'espansione del vapore formatosi, ossia la separazione fisica di combustibile e comburente generata dalla formazione di strati di acqua liquida sulle superfici. Nel caso in cui il bagnamento interessasse anche superfici non coinvolte da fenomeni combustivi, questo può ancora prevenirne una propagazione. La sua alta massa volumica, relativamente a quella dei reagenti e dei prodotti della combustione, permette inoltre un'eventuale azione di abbattimento della fiamma. Di rilevante importanza è anche il raffreddamento della superficie del materiale combustibile, sia esso in fase solida o liquida, che riduce l'apporto di vapori combustibili nella zona di reazione, contrastando i fenomeni di sublimazione, liquefazione, vaporizzazione e pirolisi (gassificazione del combustibi-

le per demolizione termica dei legami fra le particelle), comportando un'ulteriore riduzione della potenza termica sviluppata.

Di rilevante importanza è anche il raffreddamento della superficie del materiale combustibile, sia esso in fase solida o liquida, che riduce l'apporto di vapori combustibili nella zona di reazione, contrastando i fenomeni di sublimazione, liquefazione, vaporizzazione e pirolisi (gassificazione del combustibile per demolizione termica dei legami fra le particelle), comportando un'ulteriore riduzione della potenza termica sviluppata. L'impiego dell'acqua è tuttavia sconsigliato in presenza di impianti elettrici sotto tensione (può provocare cortocircuiti in quanto vi è la presenza di elettroliti disciolti), sostanze reagenti con essa in modo violento (sodio e potassio a contatto con l'acqua liberano idrogeno, carburi che producono acetilene, magnesio, zinco, alluminio ad alta temperatura), sostanze che reagendo con l'acqua possano dare luogo a prodotti tossici (cianuri) o corrosivi (cloro, fluoro, acido solforico), materiali delicati, di valore (stucchi, opere d'arte, ecc) e documenti cartacei, a causa del loro possibile deterioramento.

## Gas

I gas estinguenti si suddividono in due tipologie, attivi e passivi, in relazione al meccanismo di estinzione che sono in grado di esplicare. Gli estinguenti gassosi attivi sono derivati da idrocarburi saturi in cui gli atomi di idrogeno sono stati sostituiti tutti o in parte con atomi di fluoro, cloro e bromo. La loro azione estinguente si esplica attraverso l'inertizzazione chimica che comporta il rallentamento e/o il blocco delle reazioni a catena che si verificano durante la combustione mentre hanno un trascurabile effetto raffreddante. Sono sostanze chimicamente stabili sino a temperature intorno ai 400°C, oltre tali temperature si decompongono con formazione di sostanze tossiche e corrosive (acido cloridrico, acido fluoridrico). Sono inerti nei confronti della maggior parte dei materiali, non lasciano residui e non generano shock termico per raffreddamento. Sono stati largamente impiegati in ambienti ad elevato rischio di incendio, come le sale macchina, sia in applicazioni terrestri che marittime. A seguito del Protocollo di Montreal, gli halons sono stati messi al bando (in Italia con D.M. 26/3/96) in quanto dannosi per l'ambiente. Si è infatti ritenuto che la causa dell'assottigliamento dello strato d'ozono dipenda in larga misura dai clorofluorocarburi (CFC) contenuti anche negli halons usati per estinguere gli incendi. Oggi possono essere impiegati estinguenti alogenati denominati *clean agents* con basso potenziale riducente di ozono, un ridotto effetto serra ed una vita attiva in atmosfera decisamente più bassa di quella degli idrocarburi alogenati. Gli estinguenti gassosi inerti e che quindi svolgono un'azione passiva, sono invece, solitamente l'anidride carbonica, l'azoto ed infine il vapor d'acqua.

L'anidride carbonica, oltre ad essere un prodotto caratteristico della combustione delle sostanze organiche, è anche un agente estinguente che, in condizioni ambiente è allo stato gassoso. La sua azione estinguente si sviluppa tramite l'inertizzazione meccanica per soffocamento del fuoco, mediante la riduzione della concentrazione dell'ossigeno e del combustibile nell'aria al di sotto del limite di persistenza della combustione e l'inertizzazione termica tramite il raffreddamento che avviene per via della sua espansione (dovuta alla variazione di pressione a cui è sottoposto); tale azione di raffreddamento ha comunque una portata limitata ai fini del controllo e

della soppressione. E' utilizzata in particolar modo sui fuochi di liquidi infiammabili e di gas e, dato il suo potenziale dielettrico, risulta particolarmente indicata nel caso di incendi che coinvolgono apparecchiature e impianti elettrici sotto tensione. E' utilizzata sia come carica degli estintori portatili sia in impianti fissi per la protezione di locali e volumi chiusi, nei quali però non siano presenti persone, poiché una sua concentrazione percentuale volumetrica nell'aria compresa tra il 40% ed il 60% potrebbe indurre al soffocamento. La  $CO_2$  non è invece utilizzabile su apparecchiature sensibili alle brusche variazioni di temperatura, su materiali contenenti l'ossigeno necessario per la combustione, su fuochi di metalli quali sodio, potassio, magnesio, titanio zirconio, e sugli idruri metallici.

Il vapore acqueo è un valido agente estinguente che opera per soffocamento, ma trova impiego solo in casi particolari dove se ne ha una produzione e disponibilità massiccia, come nelle cartiere, in aziende petrolchimiche, in raffinerie. E' utilizzato in impianti fissi o semifissi di tipo localizzato. L'azoto, valido come mezzo estinguente, è utilizzato spesso come inertizzante in percentuali diverse in funzione delle caratteristiche della sostanza infiammabile, in quanto opera una riduzione delle concentrazioni di comburente e/o combustibile della miscela reagente, effettuando un'azione di inertizzazione meccanica.

### Schiume

Le schiume sono agenti estinguenti costituite da una soluzione in acqua di uno schiumogeno, opportunamente aerato e si presentano come un aggregato di bolle di gas (aria o  $CO_2$ ). La capacità estinguente delle schiume si esplica attraverso l'inertizzazione meccanica, attraverso la separazione del combustibile dal comburente, la diluizione del comburente, dovuta allo sviluppo di vapore acqueo ed in alcuni casi di  $CO_2$  da parte della schiuma che si degrada a contatto con i materiali incendiati, l'inertizzazione termica per mezzo del raffreddamento dovuto alla vaporizzazione dell'acqua, secondario rispetto all'inertizzazione meccanica. Le schiume possono essere di diversa natura e precisamente: di tipo chimico, quando sono ottenute dalle reazioni tra diversi reagenti (solfato di alluminio e bicarbonato di sodio) o con l'acqua in presenza di uno schiumogeno; di tipo fisico o meccanico, formate inglobando meccanicamente aria in soluzione schiumogena; di tipo filmante, formate cioè con addizione di speciali sostanze tensioattive. Il grado di aerazione determina l'espansione, intesa come rapporto tra il volume della schiuma prodotta e quella della soluzione acquosa di schiumogeno di partenza e si distinguono in:

- schiume a bassa espansione, con rapporto di espansione da 5 a 20;
- schiume a media espansione, con rapporto di espansione da 20 a 200;
- schiume ad alta espansione, con rapporto di espansione da 200 a 1000;

L'azione estinguente delle schiume a bassa e media espansione si esplica con la formazione di una coltre relativamente persistente che ricopre il focolaio. Le schiume ad alta espansione invece agiscono per riempimento dell'ambiente da proteggere. Le prime svolgono un'azione di tipo superficiale, le seconde di tipo volumetrico. Gli elementi che caratterizzano una schiuma sono la resistenza al fuoco (capacità di mantenere incorporata l'acqua in emulsione), il peso specifico, lo spandimento

(capacità di dilagare rapidamente), l'aderenza, l'elasticità (capacità della coltre di resistere all'azione agitatrice della superficie del liquido infiammato) l'impermeabilità (capacità della coltre di impedire il passaggio dei gas e dei vapori) e l'assenza di tossicità e aggressività chimica.

### **Polveri**

Le polveri sono agenti estinguenti costituiti da particelle solide finemente suddivise che vengono erogate da impianti fissi nei locali colpiti da un incendio. La loro azione estinguente si esplica tramite l'inertizzazione meccanica (abbattimento della fiamma, produzione di anidride carbonica e vapore acqueo dalla loro decomposizione per effetto della alta temperatura, separazione del combustibile dal comburente per mezzo di uno strato solido sulla superficie) e l'inertizzazione chimica. Le polveri possono essere: chimiche (per fuochi di liquidi e gas), chimiche covalenti (per fuochi di solidi, liquidi e gas), inerti (per fuochi di metalli). Gli elementi che caratterizzano le polveri sono la granulometria, la persistenza nel tempo e la fluidità. La prima è quella che determina la capacità di penetrazione nel focolaio e l'azione di contatto. La seconda è quella che stabilisce il compattamento nel tempo delle polveri, infine la terza caratteristica assicura nel tempo un corretto efflusso. Le polveri hanno tossicità modesta e non trovano in genere controindicazioni ad eccezione dei casi in cui l'elevato sporco prodotto è giudicato dannoso. Possono essere impiegate su apparecchiature elettriche sotto tensione e sono usate essenzialmente come carica di estintori portatili ed in misura limitata, in impianti fissi di tipo localizzato.

### **Aerosol**

Sono formati da particelle solide piccolissime di sali alcalini (dell'ordine di qualche micron di diametro) e gas, in proporzioni del 40% e del 60% in peso di aerosol generato. L'aerosol estingue il fuoco per azione chimica, interferendo con la catena di reazione della combustione rimuovendo i radicali liberi e rendendoli in tal modo meno disponibili per la combustione. Inoltre, sottraggono fisicamente energia dall'ambiente in cui si sta verificando l'incendio, con seguente azione di raffreddamento. Le due reazioni avvengono principalmente sulla superficie delle particelle solide di aerosol, pertanto più sono piccole e più superficie di reazione sarà disponibile e maggiore sarà l'effetto di spegnimento dell'incendio. Gli aerosol sono efficaci sugli incendi di tutti i tipi di materiali combustibili (solidi, liquidi e gas), trovando impiego anche nel caso delle apparecchiature elettriche sotto tensione. Non sono utilizzabili tuttavia su incendi che coinvolgono materiali chimici capaci di rilasciare ossigeno durante la combustione (es. nitrato di cellulosa), miscele e composti chimici contenenti ossidanti, (es. clorati o i nitrati di sodio), metalli reattivi (es. magnesio, alluminio), materiali piroforici (es. fosforo bianco, composti metallorganici) a causa del non completamente chiarito e parzialmente negativo effetto sulla combustione.

## **2.1.2 Sistemi antincendio ad acqua e a gas**

### **Sistemi ad acqua**

I sistemi ad acqua affiancano all'azione di controllo della velocità di reazione della combustione, un'azione di raffreddamento generale dell'ambiente, anche in zone non



prossime alla reazione e, a volte, un'azione di abbattimento dei prodotti della combustione presenti in aria. Questi sistemi sono numerosi e presentano configurazioni molto diverse. Il motivo principale per il quale si è sviluppata questa diversità risiede nella variazione dell'efficacia del controllo della combustione al variare del tipo di erogazione, della logica di attivazione e dello scenario d'incendio. Questi sistemi si distinguono, in base alle loro diverse caratteristiche, in:

- sistemi a getto; aventi come apparecchiature per l'erogazione gli idranti e i naspi, questi ultimi sono i componenti che erogano l'acqua, solitamente, in forma di getto continuo, più raramente in forma di getto frazionato. Sono costituiti, solitamente, da impianti oppure, in qualche caso, da unità montate su mezzi mobili (autopompe). Hanno logica di attivazione manuale e prettamente locale, che prevede l'utilizzo, da parte degli operatori, di un idrante o naspo alla volta.
- sistemi a pioggia; dotati degli erogatori di tipo sprinkler, sono impianti con logica di attivazione automatica e locale (attivazione di un erogatore alla volta da parte del componente di rivelazione d'incendio contenuto al suo interno).
- sistemi a diluvio; dotati di erogatori diversi da quelli di tipo sprinkler, costituiti solo da un ugello e da un diffusore mentre l'attivazione dell'erogazione avviene per gruppi tramite rivelatori posizionati all'esterno degli erogatori. Sono impianti con logica di attivazione automatica a zone (attivazione contemporanea di tutti gli erogatori della zona considerata).
- sistemi a muro, lama d'acqua; con una particolare configurazione, sono impiegati per creare dei volumi fittamente occupati dall'acqua, solitamente erogata in gocce e più raramente in forma di lame continue, allo scopo di separare le zone sede dell'incendio da quelle non interessate dall'evento, in modo da impedire la propagazione dell'incendio e dei fumi e da mantenere le temperature opportunamente basse nelle zone protette.
- sistemi water mist; sono simili ai sistemi a pioggia, ma sono caratterizzati da dimensioni delle gocce erogate notevolmente inferiori e velocità di immissione delle stesse nell'ambiente superiori.

La normativa vigente stabilisce precise definizioni per i componenti dei sistemi descritti:

- idrante antincendio: attacco unificato, dotato di valvola di intercettazione ad apertura manuale, collegato ad una rete di alimentazione idrica;
- naspo: apparecchiatura antincendio, permanentemente collegata ad una rete di alimentazione idrica, costituita da una bobina mobile su cui è avvolta una tubazione semirigida collegata ad una estremità con una lancia erogatrice;
- lancia erogatrice: dispositivo provvisto di un bocchello di sezione unificata e di un attacco unificato, di collegamento alla tubazione, dotato di valvola che permette di regolare e dirigere il getto d'acqua;

- tubazione flessibile: tubo la cui sezione diventa circolare quando viene messo in pressione e che è appiattito in condizioni di riposo;
- tubazione semirigida: tubo la cui sezione resta sensibilmente circolare anche se non in pressione;
- erogatore sprinkler: componente degli impianti automatici a pioggia costituito da un ugello, da un elemento termosensibile e da un diffusore;
- elemento termosensibile: componente di un erogatore sprinkler che si rompe o fonde ad una temperatura prestabilita provocando l'apertura dell'erogatore stesso e, conseguentemente, l'inizio dell'erogazione dell'agente estinguente.

Grazie al costo complessivo generalmente basso e alla loro elevata efficacia in molti scenari d'incendio, i sistemi ad acqua sono i più diffusi tra i vari sistemi di protezione attiva di controllo, di soppressione e di estinzione della combustione. Il Decreto Ministeriale 11 Gennaio 1988 [28] impone l'installazione di idranti in galleria ad una distanza non inferiore a 40 metri l'uno dall'altro, mentre non prescrive impianti di spegnimento automatici.

### Sistemi a gas

Per i sistemi a gas è fondamentale garantire quella che viene definita concentrazione di progetto, cioè quella concentrazione della sostanza estinguente, compreso un opportuno fattore di sicurezza, necessaria per spegnere l'incendio considerato. Per raggiungere questo valore di concentrazione nell'ambiente è necessario erogare una sufficiente quantità di agente estinguente, misurata in massa o in volume, denominata quantità di saturazione. A causa di questo tipo di funzionamento spesso questi sistemi vengono anche denominati a saturazione totale. La concentrazione di progetto dipende da vari fattori tra i quali il tipo di combustibile presente e viene determinata per mezzo di prove opportune, standardizzate dalle normative. Affinchè l'efficacia di azione di questi sistemi risulti elevata, occorre che l'erogazione avvenga in un ambiente chiuso al transito di massa, altrimenti la fuoriuscita dell'agente gassoso e l'entrata dell'aria dall'esterno ne ridurrebbero nettamente le prestazioni. Per avere una elevata probabilità di estinguere la combustione occorre che sia prodotta un'erogazione sufficiente a creare nell'ambiente considerato una concentrazione maggiore od uguale a quella di progetto la quale, per garantire che l'incendio non si sviluppi nuovamente, va mantenuta per il tempo necessario. Una precauzione fondamentale da attuare, a causa del raffreddamento dell'ambiente e della nocività di alcune sostanze gassose, è l'esodo delle persone presenti prima dell'attivazione dell'erogazione. A questo proposito devono essere quantificate, per le varie sostanze, la concentrazione minima alla quale siano stati osservati effetti nocivi sull'uomo e la concentrazione massima alla quale non siano stati osservati effetti nocivi. Il dimensionamento deve essere eseguito in funzione della valutazione di rischio preventivamente effettuata e, in questo caso, deve essere finalizzato principalmente alla determinazione della minima quantità da erogare nel volume protetto, durante l'intervallo di tempo di scarica, per raggiungere la concentrazione di progetto, ovvero la quantità di saturazione. Il calcolo di questo valore viene effettuato principalmente in funzione, oltre che della concentrazione di progetto, del valore del volume protetto

e della minima temperatura presente nell'ambiente considerato. Valori caratteristici per esempio per impianti ad anidride carbonica, sono tempi massimi di erogazione pari a 1÷2 minuti e concentrazioni di  $1,5\div 3 \text{ kg/m}^3$  che, in casi particolari, possono raggiungere i  $16 \text{ kg/m}^3$ .

## 2.2 Sistemi di protezione passiva

Tra le misure di protezione passiva che possono essere messe in atto, la compartimentazione consiste nella suddivisione di un ambiente in più parti, per evitare che un incendio, che ha inizio in una zona (compartimento), si propaghi negli altri compartimenti. Un compartimento non ha una delimitazione o configurazione fissa. La normativa prevede che ogni parte dell'ambiente chiamato compartimento sia delimitato da elementi costruttivi di resistenza al fuoco predeterminata e organizzato per rispondere alle esigenze della prevenzione incendi. Le pareti e solai di un compartimento devono essere resistenti al fuoco (v. cap. 1.3), così come devono essere protette anche le aperture di passaggio o di attraversamento da parte di cavi e canalizzazioni. Ogni compartimento deve essere provvisto di adeguate vie di fuga che portino a luoghi sicuri, ossia verso l'esterno o verso luoghi che non siano a rischio di incendio e che conducano direttamente verso l'esterno.

## 2.3 Smoke management

In diversi incendi le persone sono state ritrovate senza vita lontano dal punto di incendio, probabilmente mentre ricercavano una via sicura. Per questo motivo è importante conoscere il comportamento del movimento del fumo all'interno di un ambiente chiuso e ogni sistema di sicurezza progettato all'interno di tale ambiente deve incorporare mezzi di protezione dal fumo creando un percorso di esodo per gli occupanti.

Il fumo si muove sotto l'influenza delle forze che si manifestano attraverso dei gradienti di pressione attraverso il contorno del fluido. Per i movimenti del fumo in ambiente chiuso tali forze sono dovute a:

- galleggiamento creato direttamente dall'incendio (dovuto agli alti valori di temperatura che producono delle forze di galleggiamento responsabili dell'espulsione dei fumi caldi attraverso le aperture di ventilazione poste nella parte alta dell'ambiente o attraverso delle fughe verso l'ambiente esterno);
- galleggiamento dovuto alla differenza di temperatura tra temperature ambiente interne ed esterne (effetto camino);
- effetti del vento all'esterno;
- le condizioni di ventilazione interne (ventilazione di galleria naturale o forzata).

Ognuno di questi effetti dovrà essere considerato se si desidera conoscere la direzione e la velocità di movimento del fumo.

### 2.3.1 Ventilazione forzata

Il sistema di ventilazione, in condizioni di emergenza, può essere utilizzato per:

1. muovere i prodotti di combustione e il calore in una direzione preferenziale;
2. ridurre la concentrazione dei prodotti di combustione nell'aria, mediante miscelazione;
3. ridurre la temperatura e la crescita di calore nella galleria.

Durante le situazioni di emergenza è preferibile utilizzare ventilatori per fornire aria fresca ai passeggeri, in modo che non siano esposti ai prodotti di combustione o calore, e per assisterli nell'identificazione della via di fuga, oltre che diminuire la concentrazione dei composti chimici inquinanti, purché l'aumento del flusso non aumenti anche la velocità di produzione del fumo. Per poter fornire aria in modo corretto deve essere noto il punto in cui avviene l'incendio; quindi i ventilatori possono essere attivati in modo che l'aria si muova in entrambe le direzioni del tunnel. L'esatta locazione dell'incendio o il miglior percorso di evacuazione potrebbe essere spesso difficile da accertare attraverso il personale o sistemi di rilevazione incendio. Inoltre, se il treno si arresta tra due stazioni e l'incendio si trova al centro del treno, esistono due vie di fuga, con versi opposti e non è possibile servire aria fresca per tutti i passeggeri che si trovano sottovento rispetto all'incendio. Dopo che la direzione del flusso del vento in galleria e nelle stazioni è stata decisa dal personale responsabile, il sistema di ventilazione deve essere in grado di funzionare come progettato. I ventilatori di emergenza dovrebbero partire con un minimo di ritardo (anche automatico), e spingere l'aria nella stessa direzione del flusso d'aria provocato dall'effetto pistone del treno in avaria che si arresta; se ciò non fosse possibile, si dovrebbero attivare i ventilatori diversi istanti dopo. Nel rovesciamento del flusso d'aria, il calore e il fumo che sono andati in una direzione, verranno rimandati indietro, passando nelle zone critiche, riscaldandole e aumentando la concentrazione di inquinanti. I sistemi di ventilazione forzata possono essere suddivisi in tre categorie principali:

1. Ventilazione Longitudinale
2. Ventilazione Semi-Trasversale
3. Ventilazione Trasversale

#### Ventilazione longitudinale

La ventilazione longitudinale (fig. 2.1) è simile alla ventilazione naturale con l'aggiunta di ventilatori meccanici, posti nei pozzi di ventilazione posti a lato della linea o in stazione. La ventilazione longitudinale è spesso utilizzata all'interno dei tunnel a sezione rettangolare che non hanno a disposizione grandi spazi sopra il soffitto o al di sotto del piano dei binari per installare dei condotti d'aria. I ventilatori possono essere reversibili e possono sia introdurre che estrarre aria dalla galleria.

Rientrano nella categoria della ventilazione longitudinale anche i sistemi di ventilazione push-pull, che sfrutta due camini di ventilazione, in diverse modalità (uno in immissione, l'altro in estrazione). Le portate di ventilazione possono essere diverse per ogni camino, e quest'ultimi possono essere localizzati in diversi punti della

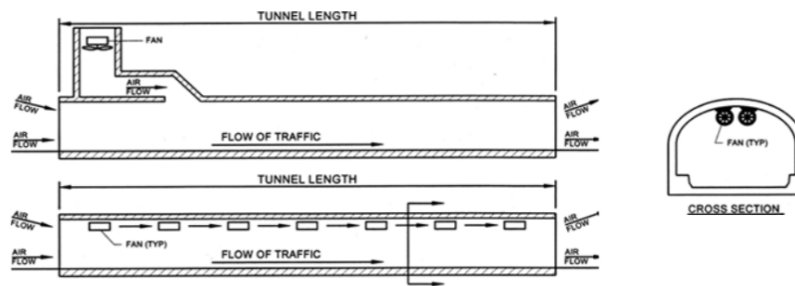


Figura 2.1: Ventilazione longitudinale di galleria

metropolitana (generalmente uno o due per ogni stazione e uno lungo la galleria tra due stazioni).

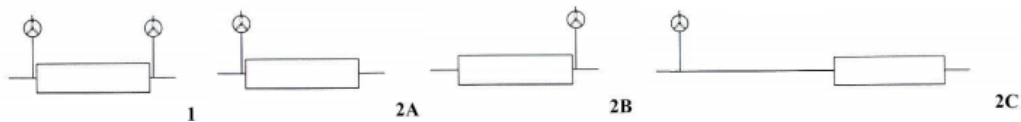


Figura 2.2: Posizione dei camini di ventilazione rispetto alla stazione: 1 (due camini per ogni stazione); 2A (un camino in ogni stazione, alla sinistra); 2B (un camino per ogni stazione, alla destra); 2C (un camino per ogni tunnel a metà del tratto tra due stazioni) [2].

Nel caso in cui si sviluppi l'incendio di un treno in galleria, e questo raggiunga la stazione successiva, si possono adottare diverse strategie di ventilazione.

- si aziona in immissione il camino di ventilazione nella stazione precedente e in estrazione quello della successiva;
- si aziona in estrazione il camino di ventilazione della stazione in cui il treno si è arrestato;
- si aziona in immissione il camino di ventilazione nella stazione precedente e in estrazione quello in cui il treno si è arrestato.

Nel caso invece che il treno si arresti nella galleria stessa non è sempre possibile imporre una ventilazione che sia favorevole per tutti i passeggeri, che possono fuggire verso le due stazioni vicine, andando incontro a drammatiche conseguenze. Attraverso simulazioni eseguite attraverso il codice *SES (Subway Environment Simulation)*, si è osservato che la strategia di immissione dal camino di ventilazione nella stazione precedente e di estrazione dal camino di ventilazione nella stazione successiva porta al minor valore di temperatura in galleria [2]. La presenza e l'utilizzo di due camini per ogni stazione non comporta significative differenze dal punto di vista della sicurezza rispetto al caso in cui sia presente un solo camino in stazione.

### Ventilazione semi-trasversale

La ventilazione semi-trasversale utilizza dei ventilatori meccanici per il movimento dell'aria, ma non utilizza la galleria come condotto. Il canale è tipicamente installato sopra il soffitto, o sotto una soletta strutturale per un tunnel di sezione circolare, e da questo si immette o estrae l'aria dal tunnel. La fig. 2.3 mostra un esempio di un sistema di immissione e di estrazione semi-trasversali. Una possibile variazione potrebbe essere di costruire metà tunnel con un sistema di immissione e l'altra metà con un sistema di estrazione dell'aria. Altra variante è quella di installare dei ventilatori prementi ad entrambe le estremità del condotto, in modo che spingano aria in direzione del centro del tunnel, per poi venire aspirata direttamente nel plenum. Ultima possibile variazione è di realizzare un sistema che possa essere estraente o in immissione, utilizzando ventilatori o un sistema di griglie nel condotto che possa cambiare la direzione dell'aria. In tutti i casi, l'aria entra o esce da entrambe le estremità del tunnel (traffico bi-direzionale) o solo da un'estremità (traffico unidirezionale).

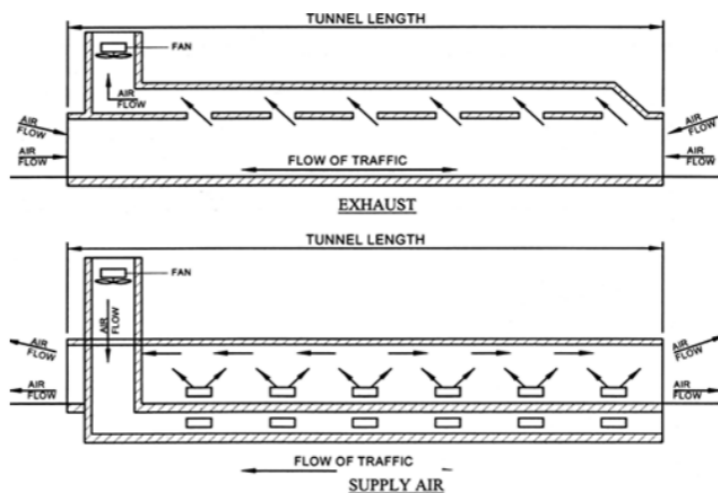


Figura 2.3: Ventilazione semitrasversale di galleria

### Ventilazione trasversale

La ventilazione trasversale utilizza gli stessi componenti della ventilazione semi-trasversale, ma effettua contemporaneamente l'immissione e l'estrazione dell'aria sull'intera lunghezza del tunnel. Questo metodo viene spesso utilizzato in tunnel molto lunghi, che necessitano di sostituire una grande quantità di aria. La presenza di canalizzazioni per l'immissione e l'estrazione permette la formazione di una pressione differenziale tra la strada e il soffitto; inoltre il flusso di aria viene immesso su tutta lunghezza del tunnel e viene circolata più spesso. Questo sistema può comprendere condotti di immissione o di estrazione lungo entrambi i lati del tunnel invece che sopra e sotto.

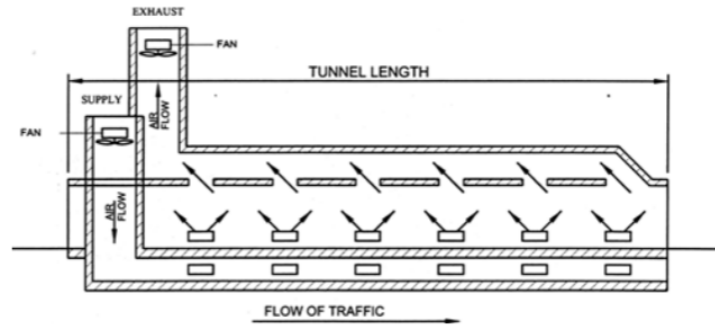


Figura 2.4: Ventilazione trasversale di galleria

### 2.3.2 Ventilazione naturale

In ventilazione naturale il movimento dell'aria è controllato dalle condizioni meteorologiche e dall'effetto pistone creato dal movimento dei mezzi che spinge l'aria ferma attraverso la galleria. L'effetto diminuisce se esiste un traffico bi-direzionale in galleria. Altri parametri che possono influenzare la ventilazione naturale sono la profondità della galleria, la pendenza e la differenza di temperatura tra i due portali. La configurazione tipica è riportata in fig. 2.5, mentre altre configurazioni possono considerare dei camini in galleria, che permettono ad ogni portale di far entrare o uscire un flusso d'aria. Alcuni tipi di tunnel ventilati hanno dei ventilatori di emergenza utilizzati durante l'incendio.

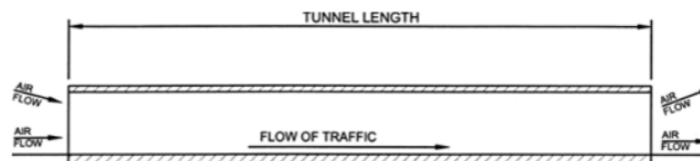


Figura 2.5: Ventilazione naturale di galleria

## 2.4 Criteri di sicurezza

Gli effetti degli incendi sulle persone sono già stati trattati nel cap. 1.4, dove si è descritto come le persone perdano la vita a causa dell'inabilità di raggiungere un posto sicuro prima di venire sopraffatti dalle condizioni create dall'incendio, come elevati valori di temperatura e presenza di elementi tossici. Il tempo disponibile per raggiungere tale luogo sicuro *ASET* (*Available Safe Escape Time*), è inteso come il tempo oltre il quale le condizioni dell'ambiente non sono più compatibili con la sopravvivenza delle persone, mentre con *RSET* (*Required Safe Escape Time*) si identifica il tempo richiesto per raggiungere un luogo sicuro, ossia il tempo impiegato complessivamente per mettersi in salvo. L'obiettivo di un progetto ingegneristico è quello di garantire che il tempo RSET sia minore dell'ASET di un certo coefficiente di sicurezza, necessario per le incertezze legate alla definizione dei due tempi.

$$t_{sicurezza} = T_{ASET} - T_{RSET}$$

Le valutazioni di ASET coinvolgono i fenomeni di sviluppo e diffusione dell'incendio, in cui si considerano i limiti delle condizioni ambientali di sostenibilità, determinati da fumo, gas tossici e/o calore. Il tempo limite per il calcolo del tempo di ASET è quello in cui le condizioni nell'ambiente sono considerate non sostenibili per un sicuro esodo. Per una stima del tempo di ASET è necessaria la conoscenza dello sviluppo nel tempo delle concentrazioni delle maggiori specie tossiche del fumo e del calore prodotti dall'incendio. I set dei criteri di sicurezza sono disponibili in letteratura in [13] e [24]; a titolo di esempio vengono riportati i valori di soglia delle potenze termiche in tab. 2.2, le concentrazioni di soglia dei prodotti di combustione in tab. 2.3 e i limiti di visibilità in tab. 2.4.

Modello di scambio termico	Intensità	Tempo di tolleranza
Radiativo	$< 2,5 \text{ kW/m}^2$	$> 5 \text{ min}$
	$2,5 \text{ kW/m}^2$	$< 30 \text{ sec}$
	$10 \text{ kW/m}^2$	$< 4 \text{ sec}$
Convezione	$< 60^\circ\text{C}$ 100% umidità	$> 30 \text{ min}$
	$100^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 8 \text{ min}$
	$110^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 6 \text{ min}$
	$120^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 4 \text{ min}$
	$130^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 3 \text{ min}$
	$150^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 2 \text{ min}$
	$180^\circ\text{C}$ $< 10\%$ umidità	$< 1 \text{ min}$

Tabella 2.2: Valori massimi di soglia delle diverse potenze termiche [13] [24]

Sostanza	Formula	Soglia di Concentrazione
Monossido di Carbonio	$CO$	$< 0,12\%$
Anidride Carbonica	$CO_2$	$< 4\%$
Acido Cianidrico	$HCN$	$< 50 \text{ ppm}$
Ammoniaca	$NH_3$	$< 300 \text{ ppm}$
Acido Cloridrico	$HCl$	$< 50 \text{ ppm}$
Ossigeno	$O_2$	$> 15\%$

Tabella 2.3: Concentrazioni limite delle principali areiformi nei fumi [20][24]

L'RSET può essere suddiviso in un numero discreto di intervalli, la somma dei quali fornisce il valore totale:

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e, \quad (2.1)$$

con:



Densità del fumo [ $m^{-1}$ ] (coefficiente di estinzione)	Visibilità illuminazione diffusa	Velocità di spostamento
Nessuno	nessun effetto	1,2 m/s
0,2 (0,5)	ridotta	0,3 m/s
0,33 (0,76)	3 m	0,3 m/s
0,5 (1,15)	2 m	0,3 m/s

Tabella 2.4: Limiti di visibilità [13] [24]

- $t_d$  intervallo di tempo tra l'ignizione e la scoperta dell'incendio;
- $t_a$  tempo per la notifica agli occupanti dell'incendio;
- $t_o$  intervallo di tempo tra la notifica agli occupanti e la decisione di agire;
- $t_i$  tempo intercorso dalla decisione di agire all'inizio dell'evacuazione;
- $t_e$  intervallo di tempo dall'inizio dell'evacuazione fino al suo completamento.

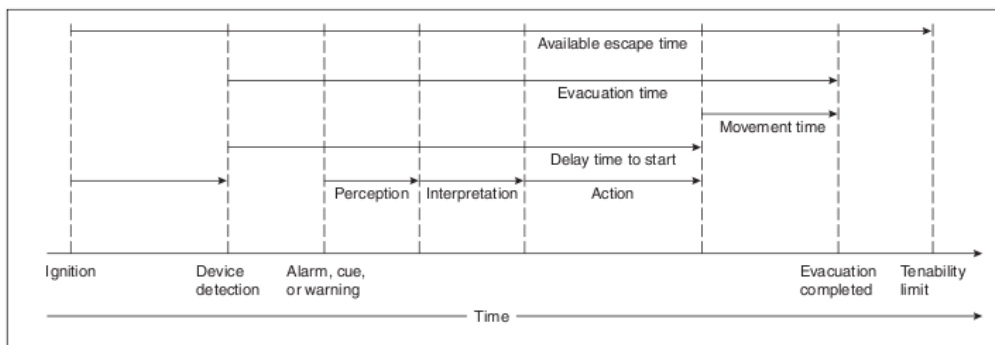


Figura 2.6: Sequenza di risposta degli individui all'incendio [24]

Il tempo disponibile per un'evacuazione sicura degli occupanti in caso di incendio è limitata al tempo per cui le condizioni ambientali diventano insopportabili sul percorso di fuga. In fig. 2.6 si osservano le diverse componenti del tempo disponibile. Con l'istante di ignizione ha inizio il tempo dell'incendio oltre il quale deve essere considerato un tempo per la rilevazione, che potrebbe richiedere da pochi istanti a qualche minuto, a seconda del tipo di incendio e dal tipo di strumenti utilizzati. Tra la rilevazione e l'attivazione dell'allarme esiste un tempo di ritardo, composto da tre componenti: percezione, interpretazione e azione (evacuazione). Alcuni fattori che possono influenzare il tempo di ritardo sono il tipo di allarme (abitudine all'emergenza, udibilità e intelligibilità), conoscenza delle vie sicure, esperienza nell'ambito antincendio e frequenza di falso allarme. Dopo che questi tre processi sono stati eseguiti, i passeggeri sono pronti a muoversi e il tempo di evacuazione è misurato dal tempo di rilevazione del pericolo fino a quando l'ultimo individuo ha raggiunto una zona sicura, e deve essere minore rispetto al tempo massimo di esposizione.



## Capitolo 3

# Modellazione dello Scenario

L'approccio della modellazione è differente rispetto a quella di altri metodi scientifici, in particolare se confrontata con le sperimentazioni su scala reale o ridotta. Un evidente vantaggio è rappresentato dalla riproducibilità delle simulazioni, ossia l'osservazione degli stessi risultati ogni qual volta le variabili iniziali vengano impostate con gli stessi valori di input. Tali valori sono poi molto semplici da modificare, e quasi tutti i parametri sono variabili (per esempio l'inclinazione del tunnel). Inoltre uno studio numerico non richiede molta attrezzatura, spazio o tempo reale. Questo è vero anche se la simulazione lavora più lentamente rispetto a delle prove in scala reale. Infatti la possibilità che i calcoli vengano eseguiti per 24 ore per tutta la settimana significa che il tempo totale di studio è ridotto, e porta a vantaggi economici. Allo stesso modo gli esperimenti su scala reale possono avere un costo in termini di impatto ambientale, salute del personale e sicurezza, i quali non possono presentarsi per una simulazione numerica. Sempre rispetto ad un esperimento su scala reale non vengono richiesti strumenti come termocoppie, sonde di velocità, trasduttori di pressione, acquisizione di immagini infrarosse, etc. I modelli non possono essere comunque considerati come una sostituzione delle sperimentazioni fisiche o delle analisi teoriche in quanto i risultati di un modello sono senza alcun significato se non sono validati dai dati sperimentali.

### 3.1 Descrizione dello Scenario

Per ricondurre lo studio a dei casi reali ci riferiamo ad un tunnel e ad un filtro a prova di fumo al servizio di una tipica linea di metropolitana interrata, la cui geometria ci è stata fornita da Metropolitana Milanese per delineare lo scenario in cui si sviluppa l'incendio. In fig. 3.1 si nota il treno che giace sul piano dei binari, lungo tutta la galleria la banchina di emergenza che conduce i passeggeri all'ingresso del filtro a prova di fumo. Questo, parzialmente nascosto dalla parete del tunnel nell'immagine, è collegato con le scale di emergenza e il camino di ventilazione, che raggiungono entrambi il livello del suolo.

#### 3.1.1 Scala e filtro a prova di fumo

Le principali misure di prevenzione incendi previste dal Decreto Ministeriale dell'11 Gennaio 1988 [28] si applicano alle opere civili e agli impianti fissi delle nuove rea-

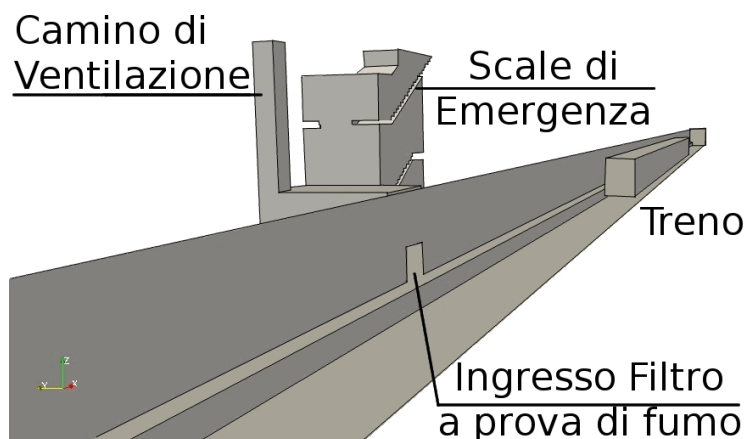


Figura 3.1: Vista dello scenario

lizzazioni di stazioni e linee sotterranee delle metropolitane. I percorsi di emergenza devono essere realizzati mediante banchine di emergenza continue, con larghezza non inferiore a 60 cm e munite di corrimano, consentendo di raggiungere le stazioni vicine. L'impianto di evacuazione dei fumi in galleria è obbligatorio, e in alternativa ai camini di estrazione naturale possono essere previsti degli impianti di estrazione dei fumi, assicurandone un'estrazione pari a 8 volumi ora. A metà della tratta è generalmente previsto un pozzo di ventilazione in aspirazione, che agevoli l'esodo dei passeggeri e l'accesso dei soccorritori. Questi possono raggiungere la galleria attraverso delle botole stradali con grigliati di chiusura e relative rampe di scale che, passando attraverso camere di ventilazione, pozzi di aerazione o eventualmente altri manufatti, collegano direttamente la galleria all'esterno. Questi accessi, normalmente chiusi, devono essere apribili anche dall'esterno e costantemente accessibili in modo agevole.

Le scale ordinarie a giorno, nella maggior parte dei casi in cui si verifica un incendio, non sono impiegabili sin dai primi momenti a causa del fumo che, tendendo a salire, invade le scale stesse. Per rendere utilizzabili le scale anche in caso d'incendio occorre che queste possiedano alcuni requisiti, in modo da restare libere dal fumo e mantenere al loro interno una temperatura sopportabile, anche in presenza di incendio nei locali serviti dalla scala stessa.

La scala a prova di fumo viene definita dal Decreto Ministeriale del 30 Novembre 1983 [17], come una scala in vano costituente *compartimento antincendio, avente accesso diretto da ogni piano con porte di resistenza al fuoco REI predeterminata e dotate di congegno di autochiusura*. La scala a prova di fumo è il sistema che dà la massima sicurezza possibile per garantire, in caso d'incendio, l'esodo delle persone. Le porte devono essere dotate di dispositivo di autochiusura, con larghezza e senso di apertura delle porte, quando la scala fa parte delle vie di esodo, correlate agli altri elementi dell'esodo (densità di affollamento e capacità di deflusso). La caratteristica REI delle porte di tipo omologato deve essere congruente con le norme di resistenza al fuoco della scala. Non è ammissibile che si possano creare delle condizioni di pericolo all'interno dello stesso vano scala ed è necessario che sia eliminato ogni

rischio d'incendio al suo interno.

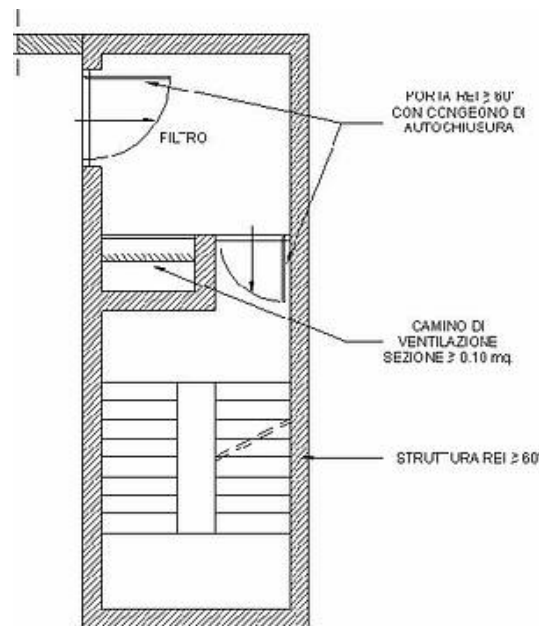


Figura 3.2: Esempio di filtro a prova di fumo

Qualora la scala faccia parte del sistema di vie di uscita è fondamentale che una persona, una volta che si trovi nella scala, possa, con la dovuta sicurezza, raggiungere facilmente la pubblica via o uno spazio scoperto. Nella prima fase dell'esodo le persone usciranno dalla zona in cui si è sviluppato l'incendio, e il fumo sarà presente solo in quantità relativamente modesta, mentre l'apertura temporanea della porta non lascerà passare apprezzabili quantità di fumo.

L'accesso alla scala a prova di fumo deve avvenire attraverso un disimpegno con caratteristiche particolari, in grado di impedire in maniera molto efficace che il fumo presente nella zona dell'incendio invada la scala. Tale particolarità consente di considerare la scala a prova di fumo interna un luogo sicuro dinamico e l'accesso alla scala quale uscita secondo la definizione stabilita dal decreto. Nel caso della scala a prova di fumo interna l'accesso alla scala stessa avviene attraverso un particolare disimpegno detto "filtro a prova di fumo", che assolve la funzione di impedire che il fumo dalla zona dell'incendio possa entrare nella scala. Questo locale si compone da un vano avente strutture e porte di accesso di REI predeterminato dalla normativa antincendi per la particolare attività, comunque mai inferiore a REI 60 (porte con dispositivo di autochiusura) ed assolve la funzione di filtrare il fumo in tre modi diversi:

- attraverso la presenza di un camino di ventilazione di sezione adeguata e comunque mai inferiore a  $0.1 \text{ m}^2$ , sfociante al livello del suolo nell'ambiente esterno, attraverso il quale dovrebbe fuoriuscire il fumo che eventualmente dovesse entrare nel filtro.
- mantenendo il filtro in sovrappressione rispetto agli ambienti circostanti, attraverso un apposito sistema di ventilazione, impedendo l'ingresso del fumo nel

filtro. La norma prevede un valore di sovrappressione minimo di 0.3 mbar, che deve essere garantito anche in caso di porte di sicurezza parzialmente aperte.

- aerazione diretta del filtro verso l'esterno mediante aperture libere di superficie non inferiore ad  $1 \text{ m}^2$ , con esclusione dei condotti. Tale modalità non può essere adottata nel caso delle metropolitane interrato.

### 3.1.2 Geometria dello scenario

Per limitare le risorse di calcolo necessarie viene considerata una porzione del dominio complessivo di interesse (il tratto di tunnel servito dal filtro generalmente collega tra loro due stazioni distanti tra loro mediamente circa 600 m) in particolare si considera un tratto di tunnel a singolo binario di una lunghezza di circa 300 m, con una sezione trasversale rettangolare (fig. 3.4). Il treno, ipotizzato senza aperture, ha una lunghezza di 60 m e una sezione frontale di  $10.35 \text{ m}^2$ . La posizione del treno in galleria che risulta essere di maggiore interesse è quella per cui la distanza tra ingresso del filtro e punto medio del treno è di circa 100 m; questo significa che l'uscita di sicurezza è a soli 50 m dalla testa del treno. Per quanto riguarda l'incendio, la potenza di interesse è di 10 MW, si sviluppa senza alcun transitorio nel sottocassa al centro del convoglio. Le scale di emergenza hanno altezza di 10 metri, con cinque rampe di scale che consentono l'evacuazione verso l'esterno. I gradini hanno alzata e pedata rispettivamente di 17 e 30 cm (fig. 3.5). Il vano scala occupa una superficie di 6.7 m x 3.9 m e si collega con il filtro a prova di fumo mediante un'uscita di sicurezza con larghezza di 1.8 m e altezza pari a 2.1 m. Il filtro a prova di fumo, viene definito come un parallelepipedo di 3.8 m di altezza (fig. 3.4) e superficie di 4 m x 6 m (fig. 3.3). Il filtro ha uno spigolo in comune con il camino, che può assumere diversi valori di sezione; infatti, oltre al valore proposto dalla [17] di  $0.1 \text{ m}^2$ , sono tipiche le aree di  $1 \text{ m}^2$  e  $4 \text{ m}^2$  (tutte con geometria quadrata, fig. 3.3).

### 3.1.3 Dominio di calcolo

Il dominio di calcolo considerato riguarda un tunnel in comunicazione con un filtro a prova di fumo, che collega la galleria con le scale e il camino. La geometria considerata (fig. 3.6 - 3.8 - 3.9 - 3.10) è quella di un tunnel a singolo binario di cui si è considerato un tratto di 280 m. La profondità della galleria è pari a 11 m rispetto al livello del suolo e le porte di collegamento tra tunnel e filtro, così come quelle tra il filtro e le scale, vengono sempre considerate nella condizione più sfavorevole: completamente aperte. La sezione di uscita delle scale di emergenza verso l'esterno è di 4,7 m per 1,8 m per una superficie di circa  $8.5 \text{ m}^2$ . Le caratteristiche della griglia vengono riportate nelle tabelle 3.1 e 3.2. Tale griglia, per la gran parte costituita da celle esaedriche e da celle tetraedriche per la regione comprendente il vano scala (in modo da ridurre il numero di celle necessarie conservando il massimo livello di dettaglio della geometria considerata), garantisce il soddisfacimento dei principali requisiti in merito ai fattori di forma, skewness, non ortogonalità. La definizione della griglia è frutto di un compromesso considerando che per poter effettuare la campagna di simulazioni in tempi congrui con le risorse di calcolo a disposizione, si è scelto di non superare un numero massimo di celle pari a circa a un milione e mezzo, considerando anche gli eventuali raffinamenti.

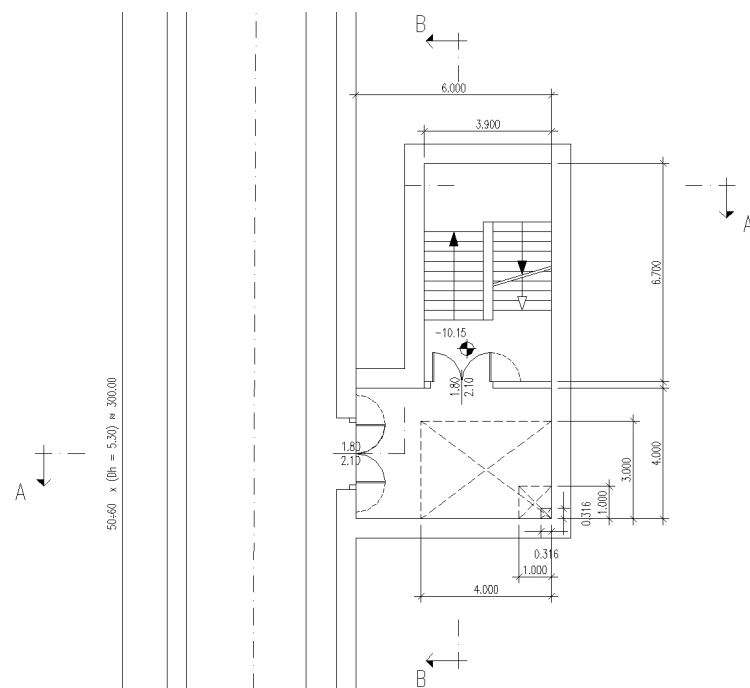


Figura 3.3: Vista in pianta dello scenario considerato

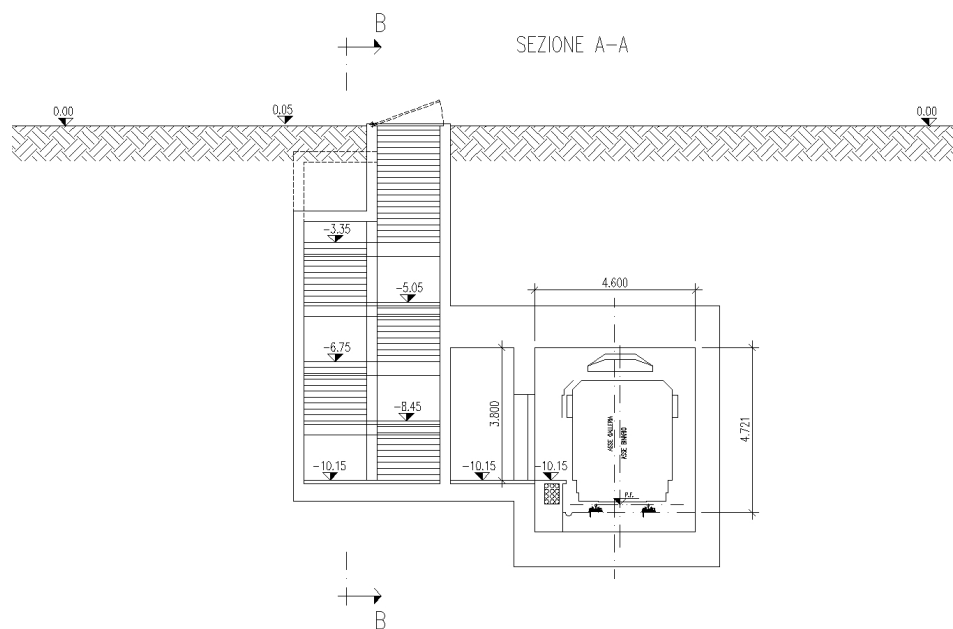


Figura 3.4: Sezione della galleria, filtro e scale

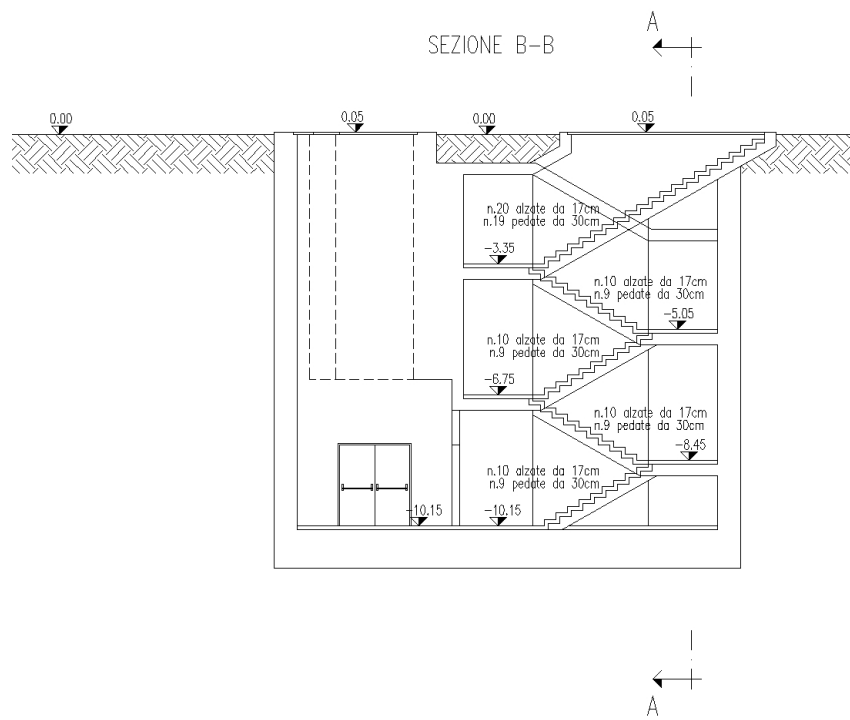


Figura 3.5: Sezione delle scale

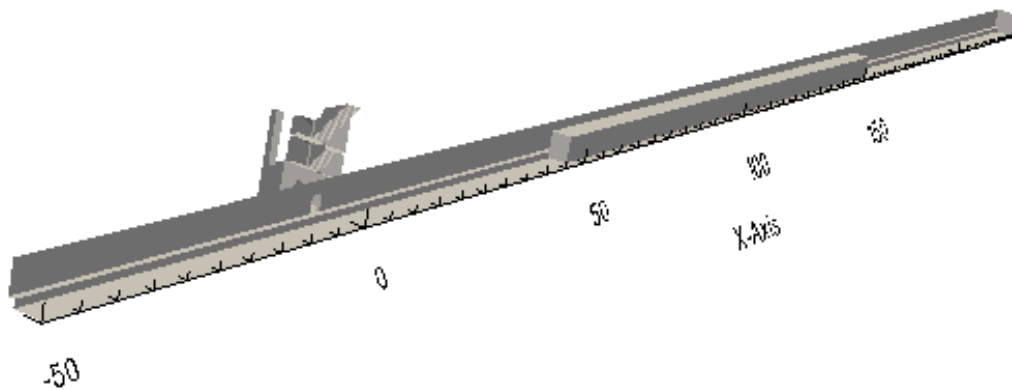


Figura 3.6: Vista del dominio di calcolo completo



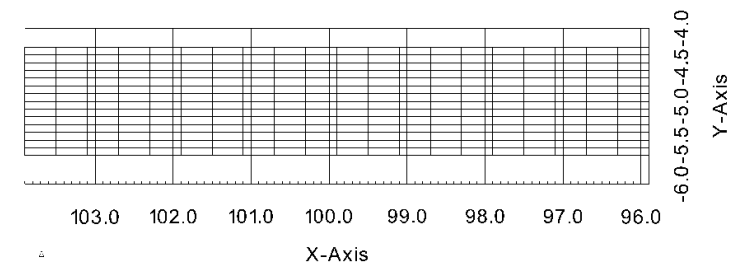


Figura 3.7: Superficie dell'incendio

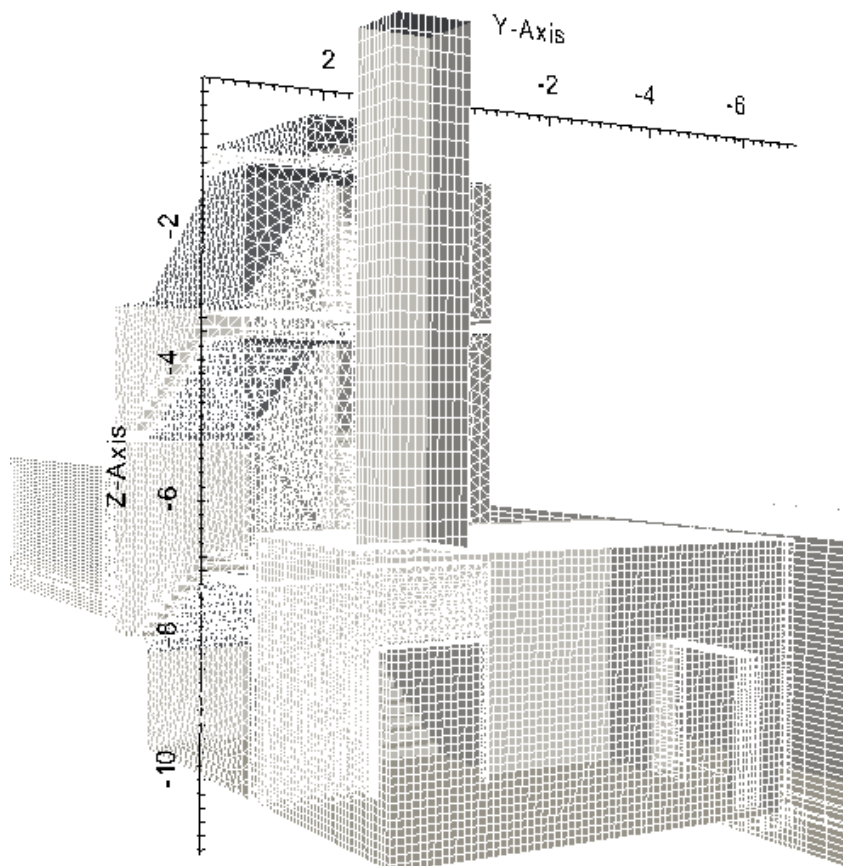


Figura 3.8: Particolare del filtro a prova di fumo con scale e camino

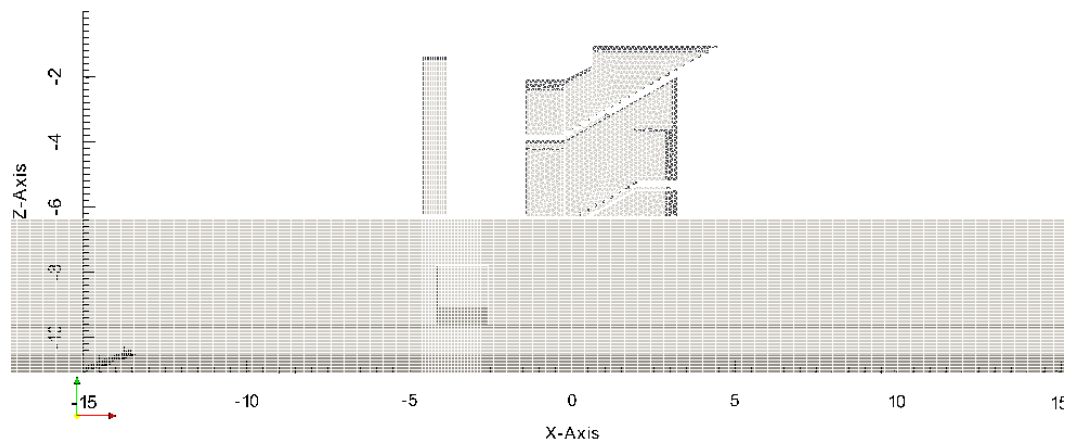


Figura 3.9: Vista dell'ingresso del filtro

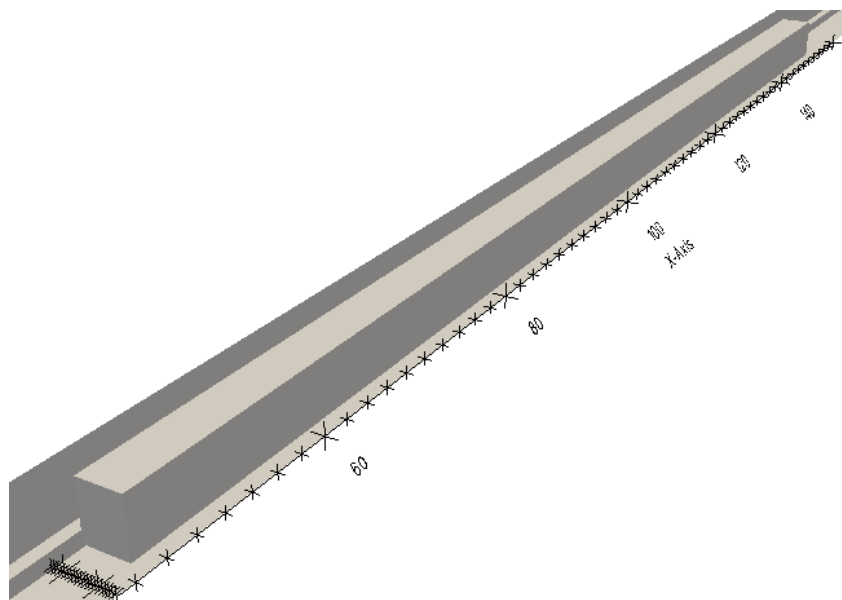


Figura 3.10: Particolare del treno in galleria

Numero punti	1468732
Numero facce	4397548
Facce interne	4185186
Numero celle esaedriche	1346272
Numero celle piramidali	378
Numero celle tetraedriche	125803
Numero celle poliedriche	0
Numero totale celle	1472453
Superfici al contorno	6
Numero di regioni	1
Lato medio Cella	0.152 m

Tabella 3.1: Statistiche della mesh e numero di celle per tipo

Lunghezza ( $\Delta x$ )	-50 m $\sim$ 236.3 m
Larghezza ( $\Delta y$ )	-7.2 m $\sim$ 3.9 m
Altezza ( $\Delta z$ )	-11.071 m $\sim$ $-5.85778e^{-16}$ m
Apertura di cella massima	$2.92466e^{-16}$
Aspect ratio massimo	9.26852
Area di faccia minima	$0.00232494 m^2$
Area di faccia massima	$0.0625174 m^2$
Volume di cella minimo	$5.15801e^{-05} m^3$
Volume di cella massimo	$0.00506537 m^3$
Volume Totale	$5175.57 m^3$
Non ortogonalità della mesh massima	65.5815
Non ortogonalità della mesh media	7.71296
Skewness massima	0.760171

Tabella 3.2: Caratteristiche geometriche della mesh

Per modellare il combustibile presente nel sottocassa del treno che si incendia nel dominio di calcolo, si è creata una superficie in cui si potesse imporre una portata massica, in modo di poter variare il valore della potenza termica rilasciata dall'incendio. La superficie dell'incendio è di 8 m per 1,4 m, ed è posto circa a metà della lunghezza del treno (fig. 3.7).

## 3.2 Descrizione del Codice

L'entrata in vigore del decreto Ministeriale 9 maggio 2007 "Direttive per l'Attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio" [16] sancisce la possibilità del ricorso ai metodi dell'ingegneria antincendio prestazionale (*Fire Safety Engineering FSE*) come strumento di analisi per la progettazione, nell'ambito della sicurezza antincendio. La fire safety engineering è l'applicazione di principi dell'ingegneria per proteggere le persone e l'ambiente dagli effetti distruttivi del fuoco e del fumo. Questa disciplina include molti aspetti, tra cui lo studio di sistemi di protezione attiva e passiva, il controllo dei fumi, la dinamica degli incendi e l'analisi del rischio. L'analisi del rischio di incendio e la determinazione delle prestazioni di un sistema sottoposto ad un incendio mediante strumenti e codici di simulazione avanzata permettono di verificare aspetti e problematiche che non sempre possono essere analizzati e risolti con il ricorso ai codici prescrittivi. Gli strumenti di simulazione, che hanno visto una rapida diffusione grazie alla maggiore disponibilità della capacità di calcolo e al progresso sul piano della ricerca circa la modellazione dei fenomeni fisici mediante algoritmi di calcolo, possono essere utilizzati come strumento di analisi per la progettazione nell'ambito della sicurezza antincendio.

### Modelli di zona e di campo

Diversi *software* vengono impiegati per la progettazione antincendio, i sistemi di progettazione di controllo del fumo e analisi delle vie di uscita; e per la modellazione dell'incendio attraverso dei codici numerici si ricorre ai modelli di zona o di campo. I modelli di zona furono i primi ad essere scoperti, visto che la loro applicazione non richiede sostanziali risorse computazionali e sono principalmente basati su considerazioni analitiche e semi-analitiche. Questi modelli cercano di dividere la regione di interesse in diverse zone distinte, ognuna delle quali può essere descritta da un semplice set di parametri e leggi semi-empiriche. I parametri sono rappresentati da quantità fisiche (temperatura, concentrazioni, etc.) mediate su ogni zona. Le equazioni di conservazione applicate ai confini tra diverse regioni, insieme alle leggi di conservazione globale, portano ad ottenere un sistema di equazioni che determina le variabili d'interesse. I modelli di zona sono stati studiati per un lungo periodo e sono la base di molti calcoli nell'ingegneria antincendio. L'alternativa è rappresentata dai modelli di campo o CFD, che presentano un approccio più accurato scientificamente che si basa su una legge di conservazione locale per quantità fisiche come massa, momento, energia e concentrazioni delle specie. Queste equazioni sono risolte con la maggior risoluzione spaziale e temporale possibile. Da un punto di vista teorico, questo approccio consente di fornire l'intera storia dell'evoluzione dell'incendio includendo le caratteristiche di ogni punto del dominio. Adottando questo tipo di modello si utilizzano solo i metodi numerici, facendo aumentare i costi computazio-

nali rispetto a un modello a zone. I principali limiti dei modelli di zona sono quindi legati al fatto che permettono di descrivere solo grossolanamente lo scenario di incendio poiché le variabili di interesse sono mediate su zone con una scala spaziale generalmente più grande rispetto alla scala dell'incendio.

### 3.2.1 Metodo ai volumi finiti

Come già accennato nel paragrafo precedente, il problema studiato in questo lavoro di tesi è stato affrontato attraverso la termofluidodinamica computazionale (CFD). Questo modello non garantisce una assoluta validità dei risultati, anche perché le equazioni differenziali, che contengono già semplificazioni, per poter essere risolte devono venir trasformate in algebriche, attraverso una discretizzazione che comporta ulteriori approssimazioni. Il metodo di discretizzazione di cui fa uso il programma utilizzato per il nostro lavoro viene detto metodo dei volumi finiti. Infine nella risoluzione delle equazioni si utilizzano degli algoritmi risolutivi basati su metodi iterativi che non portano ovviamente a una soluzione esatta del problema. La fluidodinamica computazionale cerca di risolvere i problemi trattando un fluido continuo in un modo discreto. Il metodo più semplice per raggiungere questo obiettivo è discretizzare il dominio dello spazio in un certo numero di celle che vanno a formare una griglia (*mesh*) di calcolo e quindi applicare degli algoritmi su ogni cella per risolvere le equazioni del moto in maniera iterativa. Siccome OpenFOAM supporta griglie non strutturate, le celle possono avere svariate forme a seconda del problema da studiare e possono essere graduate, ovvero essere più fitte in alcune regioni e più lasche in altre. Questo dipende dall'accuratezza richiesta rispetto ai tempi di calcolo. Normalmente un'elevata risoluzione spaziale è necessaria in regioni dove i gradienti delle grandezze di maggiore interesse sono elevati. Una buona ottimizzazione del dominio di calcolo può portare a ottenere soluzioni accettabili anche in tempi ragionevoli. I metodi più utilizzati per discretizzare la mesh sono:

- Metodo ai volumi finiti (*FVM, Finite Volume Method*)
- Metodo alle differenze finite (*Finite Difference Method*)
- Metodo agli elementi finiti (*FEM, Finite Element Method*)

Come abbiamo già detto il codice impiegato è ai volumi finiti; per generare la griglia generalmente si ricorre all'impiego di software dedicati, come quello della Ansys Gambit© impiegato in questo caso, ma per ragioni di opportunità non entreremo nel merito della descrizione della realizzazione della griglia.

Il metodo dei volumi finiti [30] prevede che l'equazione differenziale da risolvere sia posta in termini integrali, come nell'equazione (3.1).

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

Con questo metodo il dominio di calcolo viene suddiviso in un numero finito di piccoli volumi di controllo costruendo una griglia di calcolo appropriata. A differenza del modello alle differenze finite, le equazioni vengono risolte non sui nodi della griglia ma nei volumi di controllo, determinando il valore della variabile incognita  $\phi$  al centro di ciascun volume di controllo. L'equazione (3.1) può essere applicata

su tutti i volumi di controllo ma anche su tutto il dominio di calcolo. Infatti se andassimo a sommare le equazioni per i singoli volumi di controllo, otterremmo l'equazione di conservazione globale che viene garantita utilizzando questo metodo e ciò rappresenta uno dei principali vantaggi nella modellazione CFD. Per ottenere un'equazione algebrica per ciascun volume di controllo, gli integrali di superficie e di volume devono essere opportunamente discretizzati attraverso delle formule di quadratura.

- Integrali di superficie: l'integrale di superficie si può scrivere sempre come somma degli integrali di superficie su tutte le facce che costituiscono la superficie totale di controllo del singolo volume:

$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS \quad (3.2)$$

Prendendo in considerazione una singola faccia della cella, per calcolarne l'integrale esattamente, bisognerebbe conoscere la funzione integranda  $f$ , informazione che non è disponibile, in quanto si hanno a disposizione solo le informazioni relative al centro dei volumi di controllo. Perciò è necessario ricostruire le informazioni attraverso l'uso delle sole variabili definite nel centro. Per ottenere questo obiettivo è necessaria una doppia approssimazione: innanzitutto l'integrale è approssimato utilizzando generalmente le informazioni di un solo punto della faccia, e, in secondo luogo, i valori scelti sulla faccia sono a loro volta disponibili solo in forma approssimata, poichè ottenuti a partire dai valori calcolati nel centro delle celle della griglia. L'approssimazione più semplice per la descrizione dell'integrale di superficie è l'uso della regola del punto di mezzo: l'integrale viene approssimato come il prodotto della funzione integranda al centro della faccia per l'area della faccia considerata. Il valore di  $f$  al centro della faccia non è però disponibile, ma può essere ottenuto solo attraverso una opportuna interpolazione. Altre approssimazioni di questo integrale utilizzano la regola del trapezio e la regola di Simpson.

- Integrali di volume: anche in questo caso l'approccio più semplice consiste nell'andare a sostituire l'integrale di volume con il prodotto del valor medio della funzione integranda per il volume di controllo. Il valor medio può essere assunto pari al valore della funzione nel centro del volume di controllo. Questo valore è già disponibile, in quanto tutte le variabili principali e quelle derivate sono note nel centro della griglia di calcolo senza la necessità di ricorrere ad alcuna interpolazione. Si possono ottenere approssimazioni di ordine superiore utilizzando il valore della funzione in più punti; queste informazioni possono essere ottenute solo interpolando i valori nodali, utilizzando opportune formule di interpolazione (*Upwind*, interpolazione lineare centrata, interpolazione quadratica *Upwind* o schemi di ordine superiore)

### 3.2.2 Equazioni di conservazione

Per modellare qualsiasi tipo di flusso è necessario conoscere le equazioni di conservazione. In una regione dello spazio, chiamato volume di controllo, possiamo scrivere l'equazione di conservazione di una generica proprietà estensiva. Prendendo come

riferimento la generica quantità  $\phi$  nel volume  $V$  che ha superficie  $S$ , l'equazione di conservazione generale ha la forma vista in eq. (3.1), dove a primo membro troviamo la velocità di cambiamento di  $\phi$  nel volume e il flusso convettivo di  $\phi$  attraverso la superficie  $S$ , legato alla velocità del fluido. A secondo membro si osservano il flusso diffusivo di  $\phi$  attraverso la superficie  $S$  e la produzione di  $\phi$  nel volume  $V$ . Mediante il teorema della divergenza di Gauss si possono trasformare gli integrali di superficie in integrali di volume, e considerando un volume di controllo infinitesimo, si ottiene la formulazione differenziale:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla(\rho\phi\mathbf{u}) = \nabla\mathbf{Q}_S(\phi) + Q_V(\phi) \quad (3.3)$$

### Conservazione della massa

La conservazione della massa viene anche chiamata equazione di continuità e si ottiene in forma integrale a partire dall'equazione (3.1):

$$\int_V \frac{\partial\rho}{\partial t} dV + \int_S \rho\mathbf{u} \cdot \underline{n} dS = 0, \quad (3.4)$$

Applicando il teorema della divergenza, il termine di convezione viene trasformato in un integrale di volume e la forma differenziale, indipendente dal sistema di riferimento, si scrive come:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\rho\mathbf{u} = 0 \quad (3.5)$$

### Conservazione della quantità di moto

Nella conservazione della quantità di moto si considerano le forze agenti sul volume di controllo: forze superficiali (pressione, tensione superficiale e sforzi tangenziali) e forze di campo (gravità, forza di Coriolis, forza elettromagnetica). La forma integrale è:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{u}) dV + \int_S \rho\mathbf{u}\mathbf{u} \cdot \underline{n} dS = \int_S \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n} dS + \int_V \rho\mathbf{f} dV, \quad (3.6)$$

con  $\underline{\underline{\sigma}}$  si intende il tensore degli sforzi, mentre l'ultimo termine ha la forma:

$$\rho\mathbf{f} = \rho \sum_{k=1}^{N_C} \mathbf{f}_k \omega_k. \quad (3.7)$$

$\mathbf{f}_k$  è la forza di volume sulla  $k$ -esima specie e  $N_C$  è il numero totale delle specie. Se si considera solo la forza di gravità,  $\mathbf{f}_k$  coincide con il vettore di accelerazione di gravità  $\mathbf{g}$ . Quindi l'equazione (3.7) indica che la velocità di variazione della quantità di moto all'interno del volume di controllo è uguale alla somma delle forze di volume e di superficie agenti sul fluido. Applicando il teorema della divergenza si ottiene la forma differenziale:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{u}) + \nabla(\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = \nabla\underline{\underline{\sigma}} + \rho\mathbf{f}. \quad (3.8)$$

### Conservazione delle specie

Nel caso in cui il fluido sia composto da diverse specie  $k$  l'equazione di conservazione delle specie ha forma integrale:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_k)dV + \int_S \rho \omega_k \mathbf{u} \cdot \underline{\mathbf{n}}dS = - \int_S \mathbf{j}_k \cdot \underline{\mathbf{n}}dS + \int_V \dot{\Omega}_k dV \quad k = 1, \dots, N_C, \quad (3.9)$$

con  $N_C$  numero delle specie,  $\mathbf{j}_k$  flusso diffusivo molecolare,  $\dot{\Omega}_k$  velocità di formazione massica della specie  $k$  per unità di volume e  $\omega_k$  la frazione massica della specie  $k$ . In termini differenziali diventa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_k) + \nabla \rho \omega_k \mathbf{u} = -\nabla \mathbf{j}_k + \dot{\Omega}_k \quad k = 1, \dots, N_C, \quad (3.10)$$

Generalmente il flusso diffusivo molecolare è correlato con una velocità di diffusione  $\mathbf{V}_k$ :

$$\mathbf{j}_k = \rho \omega_k \mathbf{V}_k. \quad (3.11)$$

### Conservazione dell'energia

Il principio di conservazione dell'energia è la trascrizione della prima legge della termodinamica. In termini fisici, il principio afferma che la variazione nel tempo dell'energia totale contenuta in un elemento di volume di fluido è uguale al lavoro compiuto dalle forze di massa e di superficie sommato al flusso netto di calore che attraversa la superficie del volume considerato.

L'energia interna di un fluido è legata al suo stato di agitazione molecolare e l'energia totale di un fluido è la somma di energia cinetica ed energia interna. L'espressione dell'energia totale di un fluido è data da:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \int_S \rho h \mathbf{u} \cdot \underline{\mathbf{n}}dS = - \int_S \mathbf{q} \cdot \underline{\mathbf{n}}dS + \int_S \underline{\underline{\sigma}} \mathbf{u} \cdot \underline{\mathbf{n}}dS + \int_V \dot{q}dV + \int_V \rho \sum_{k=1}^{N_C} \omega_k \mathbf{f}_k \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{V}_k)dV, \quad (3.12)$$

in cui  $\dot{q}$  è il termine sorgente dell'energia per il volume, mentre  $\mathbf{q}$  è il flusso termico. L'ultimo termine a secondo membro è la potenza termica prodotta dalle forze di volume sulla specie  $k$ . In forma differenziale si può dire:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho h \mathbf{u}) = -\nabla \mathbf{q} + \nabla(\underline{\underline{\sigma}} \mathbf{u}) + \dot{Q} + \rho \sum_{k=1}^{N_C} \omega_k \mathbf{f}_k \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{V}_k). \quad (3.13)$$

### 3.2.3 Turbolenza

La maggior parte dei codici di fluidodinamica implementano diversi modelli, lasciando all'utente la scelta di quale utilizzare. Se un modello è troppo complesso, lo sforzo richiesto per risolvere il problema sarà necessariamente elevato; se invece il modello fosse troppo semplice, le soluzioni potrebbero essere incorrette o poco accurate.

Un approccio è rappresentato dalla risoluzione diretta delle equazioni di Navier-Stokes, noto in letteratura come *DNS (Direct Numerical Simulation)*, integrazione che permetterebbe di ottenere soluzioni molto dettagliate ma che richiederebbe costi



computazionali elevatissimi (tempi di simulazione, memoria ram, etc.) dal momento che l'evoluzione delle grandezze fluidodinamiche dovrebbe avvenire su griglie computazionali con un elevato numero di nodi e una discretizzazione temporale delle equazioni deve essere tale da poter catturare le più elevate frequenze associate alle scale più piccole. L'uso della DNS è quindi limitato al caso di numeri di Reynolds moderati, in modo tale da dover utilizzare geometrie semplici e quindi griglie poco fitte.

La tecnica *RANS* (*Reynolds Average Navier-Stokes equations*) risolve numericamente le equazioni mediate, risultando più economica dal punto di vista computazionale. Questa tecnica fornisce solamente informazioni sulla corrente media e stazionaria. Inoltre è necessario l'utilizzo di modelli di turbolenza che devono rappresentare l'influenza di tutte le strutture turbolente sulla corrente media.

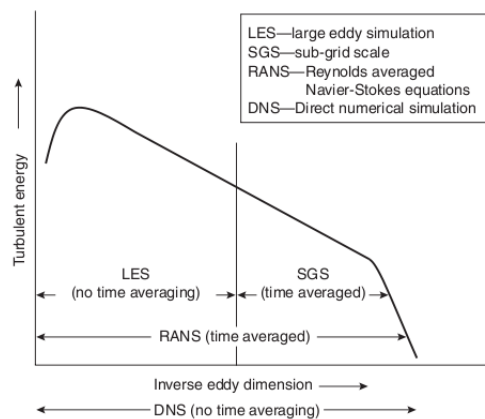


Figura 3.11: Rappresentazione schematica dello spettro di energia turbolenta confrontato con i diversi modelli di turbolenza [24]

Per la teoria di Kolmogorov i vortici del flusso di più grande scala sono dipendenti dalla geometria del fluido che si prende in esame, mentre quelli alle più piccole scale di lunghezza sono “universali”. Via di mezzo tra la tecnica RANS e DNS è la *Large Eddy Simulation (LES)*, che calcola direttamente i vortici di grande scala modellando tutti i rimanenti vortici che portano alla dimensione caratteristica dei vortici di Kolmogorov. I vortici di piccola scala vengono tenuti in considerazione utilizzando dei modelli appositamente sviluppati che prendono il nome di *sub-grid scale models (SGS)*, ossia “modelli delle scale di sottogriglia”. Questa tecnica permette quindi di ottenere anche informazioni locali ed istantanee sui fenomeni turbolenti di una corrente, in geometrie più complesse, a numeri di Reynolds maggiori e con risparmio di risorse di calcolo rispetto alla DNS. Lo studio dei modelli utilizzati in questa tecnica è molto interessante perché richiede la comprensione del comportamento delle strutture non risolte e della loro interazione con le scale risolte.

In figura 3.12 vengono messe in luce molto chiaramente le differenze tra i tre modelli presentati. Si nota come l'approccio DNS segua tutte le fluttuazioni della turbolenza; l'approccio RANS al contrario tiene conto solo del valore medio delle fluttuazioni, mentre il LES si pone tra i due precedenti andando a seguire solo le

macrofluttuazioni e non quelle più piccole. Come già accennato, in termini di costi computazionali l'approccio DNS è il più preciso quindi anche quello che richiede maggiori risorse ed è perciò limitato a numeri di Reynolds molto bassi e geometrie semplici, richiedendo un numero molto elevato di celle della griglia. Il metodo LES lavora con griglie più lasche e può essere usato anche con numeri di Reynolds relativamente alti, ma richiede dei modelli subgrid, dai quali dipendono la qualità del calcolo e l'accuratezza dei risultati. La tecnica RANS infine è molto utilizzata nelle pratiche ingegneristiche, poiché è molto meno onerosa, ma la sua validità è strettamente legata ai modelli di chiusura delle equazioni turbolente e al modello di combustione utilizzato.

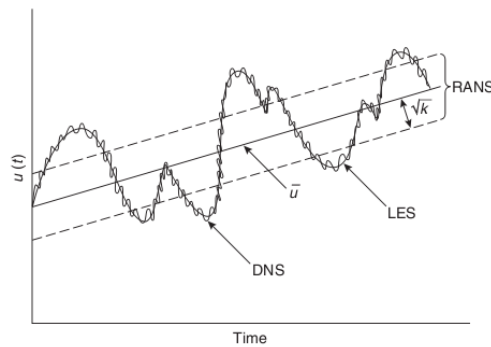


Figura 3.12: Rappresentazione schematica dei diversi modelli di turbolenza [24]

### Approccio LES

La modellazione viene eseguita utilizzando un *sub-grid scale model*. La suddivisione del campo di velocità in due parti, l'una da risolvere direttamente, l'altra da modellare, avviene per mezzo di un'operazione di filtraggio che definisce una dimensione dei vortici sotto la quale essi verranno modellati. In letteratura sono disponibili diverse tipologie di filtri matematici per l'utilizzo nelle simulazioni LES; per tutte le tipologie occorre fissare arbitrariamente una dimensione dei vortici sotto la quale eseguire il filtraggio. Se si suppone di indicare con  $\Delta$  la dimensione caratteristica della griglia di calcolo, sarà possibile identificare le scale di sottogriglia utilizzando un filtro di grandezza  $\Delta$ .

Il filtraggio, matematicamente, si realizza con l'operazione di convoluzione di una funzione  $\phi$

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}, t) = \int_D G(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|; \Delta) \phi(\mathbf{x}', t) d\mathbf{x}', \quad (3.14)$$

dove la barra superiore identifica una quantità filtrata,  $D$  è il dominio di integrazione e  $G$  è la funzione di filtro. I filtri più utilizzati, costruiti ed ottimizzati per tagliare le fluttuazioni di minore importanza delle grandezze manipolate, conservando invece le informazioni medie più importanti, sono *Box filter function*, *Gaussian filter function* e *Sharp spectral filter*.

Applicando l'equazione (3.14) alle equazioni di conservazione viste nel cap.3.2.2 per correnti comprimibili e instazionarie, possono essere così scritte [23]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_j}}{\partial x_j} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho \xi}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho \xi u_j}}{\partial x_j} = \frac{1}{Re Sc} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{\mu \frac{\partial \xi}{\partial x_j}} \right) \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho e}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho e u_j}}{\partial x_j} = & -p \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\sigma_{jk}}{Re} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{1}{M^2 Re Pr} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{\frac{\mu}{(\gamma - 1)} \frac{\partial T}{\partial x_j}} \right) \\ & + \frac{1}{\gamma M^2} \sum_{i=1}^N h_i \bar{w}_i \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\bar{p} = \frac{\overline{\rho T}}{\gamma M^2} \quad (3.19)$$

con  $e$  energia interna per unità di massa

$$e = \frac{T}{\gamma M^2 (\gamma - 1)}, \quad (3.20)$$

e  $w_i$  velocità di reazione della  $i$ -esima specie, dipendente alla densità, numero di Damköhler, temperatura di attivazione e frazione massica della specie stessa. Nella scrittura delle equazioni si è assunto che tutte le specie abbiano calore specifico, peso molecolare e diffusività equivalenti. Inoltre si è trascurata la trasmissione del calore attraverso scambio termico radiativo. L'ipotesi di pari diffusività è maggiormente valida ad elevati numeri di Reynolds dove la diffusione di piccola scala non è direttamente affetta dal processo di combustione globale. Con  $\xi$  si definisce la frazione di miscela, valutata come

$$\xi = \frac{(\omega_i - \omega_{i2})}{(\omega_{i1} - \omega_{i2})}, \quad (3.21)$$

dove  $\omega_i$  è la frazione massica dell'elemento  $i$  e i pedici 1 e 2 identificano la composizione uniforme nella corrente del combustibile e del comburente. Con  $Sc$  si identifica il numero di Schmidt, ossia il rapporto tra la viscosità cinematica e la diffusività.

Finché

$$\overline{U_i U_j} \neq \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (3.22)$$

un modello approssimato è richiesto per la quantità

$$\tau_{ij}^s = -\rho (\overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j), \quad (3.23)$$

chiamata *sforzi di Reynolds delle scale di sottogriglia*. Il modello di sforzi di sottogriglia che ha avuto più successo è stato quello proposto da Smagorinsky [25] e mette insieme gli sforzi di Reynolds SGS con il tensore degli sforzi delle scale risolte:

$$\tau_{ij}^s - \frac{1}{3} \tau_{kk}^s \delta_{ij} = \mu_s \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i} \right) = 2\mu_s \bar{S}_{ij}, \quad (3.24)$$

dove  $\mu_s$  è la *SGS eddy viscosity*. Questa può essere espressa attraverso l'analisi dimensionale:

$$\mu_s = C_s^2 \rho \Delta^2 |\bar{S}|, \quad (3.25)$$

dove  $\Delta$  è il filtro della scala delle lunghezze. Generalmente  $C_s$  è il parametro di modello, che potrebbe essere funzione del numero di Reynolds e altri parametri adimensionali, che potrebbe essere diverso per diverse correnti. Per queste ragioni, i migliori risultati vengono raggiunti con i modelli SGS di Smagorinsky chiamati *modelli dinamici*. Questi consentono al parametro  $C_s$  di essere calcolato dai risultati della LES stessa, introducendo un secondo filtro, di maggiore larghezza rispetto al filtro  $\Delta$  [19].

### Strato Limite

La condizione di aderenza è stata applicata a tutte le componenti di velocità nei punti in cui esistono delle pareti solide. Fissare una velocità nulla in direzione normale alla parete è la condizione tipicamente appropriata per la discretizzazione dell'equazione di continuità e del momento in direzione normale alla parete. La stima degli sforzi normali e tangenziali alle pareti (contenuti nell'equazione del momento discretizzato) richiede estrema cautela data la tipica natura turbolenta del flusso. Infatti un sottile sottostrato viscoso si forma immediatamente in posizione adiacente alla parete, seguito da uno strato intermedio e la scia turbolenta. Il numero dei punti richiesti dalla griglia per osservare tale fenomeno può anche ridursi se per risolvere lo strato turbolento al contorno vengono utilizzate delle *wall function*. Le wall function sono un insieme di formule e funzioni semi-empiriche che interpolano le soluzioni desiderate nella cella confinante la parete e le corrispondenti quantità alla parete. Tra queste è compresa la legge di parete per la velocità media e temperatura (o altre grandezze scalari) e correlazioni per valutare le quantità turbolente al contorno (in particolare  $\kappa$  ed  $\epsilon$ ). Le standard wall functions utilizzate [26] possono essere riassunte:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+);$$

con

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{U}{u^*}; \\ y^+ &= \frac{y\rho u^*}{\mu}; \\ u^* &= \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}; \\ \tau_w &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

$\kappa$  rappresenta la costante di Von Karman (pari a 0.4187),  $E$  il parametro di rugosità della parete (9.8 per pareti lisce),  $U$  la velocità media del fluido,  $y$  la distanza del primo nodo della griglia dalla parete,  $u^*$  la velocità caratteristica di parete,  $\mu$  la viscosità dinamica  $\rho$  la densità del fluido e  $\tau_w$  gli sforzi di taglio sempre

alla parete. In termini di fluidodinamica computazionale  $y^+$  (o *yPlus*) è la distanza adimensionale tra la parete e il primo nodo della griglia in direzione  $y$ ; analogamente si possono definire  $x^+$  e  $z^+$ , nelle rispettive direzioni.

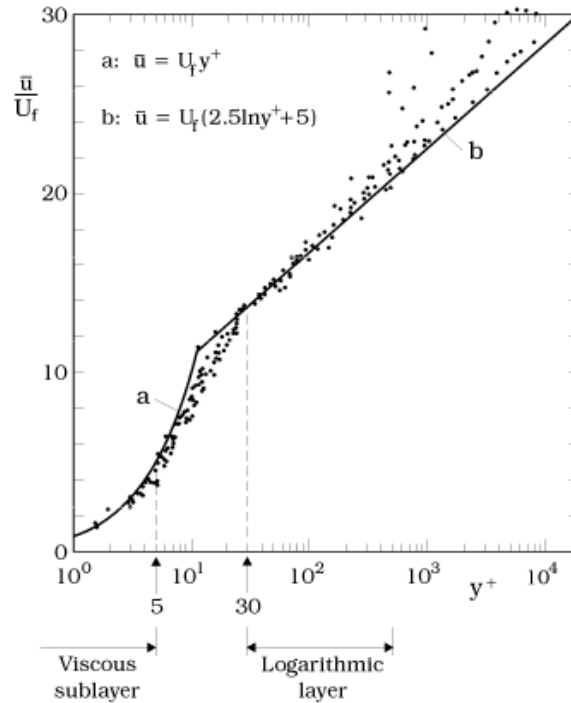


Figura 3.13: Andamento della velocità in funzione della parete

Generalmente, i valori di  $y^+$  in un sottostrato viscoso laminare vicino alla parete sono dell'ordine  $y^+ < 5$ , mentre la legge logaritmica di parete varrà per  $30 < y^+ < 400$  dove il flusso è completamente turbolento ma dove gli sforzi di taglio possono essere considerati uniformi; tra questi strati esiste la regione di transizione tra il flusso laminare e turbolento per  $5 < y^+ < 30$ . Per poter restare nel sottostrato inerziale è tipico posizionare il confine della prima cella della griglia abbastanza vicino alla parete. Nel caso in cui, per una rappresentazione accurata del fenomeno vicino alle pareti, si dovesse infittire la griglia, il confine della prima cella può essere posto nella regione laminare o di transizione. I codici di fluidodinamica assumono che il sottostrato viscoso esista per  $u^+ = y^+$ , e sia compreso tra il primo nodo della griglia e la parete. Il primo nodo della mesh è quello per cui il codice passa dalla legge logaritmica al sottostrato viscoso. Generalmente questo passaggio dovrebbe avvenire per  $y^+$  circa pari a 30. Se la mesh è molto fitta vicino alla parete si otterrà un basso valore di  $y^+$ . Se invece il valore di  $y^+$  fosse troppo elevato questo causerebbe l'applicazione della legge della parete sulla scia esterna, dove non è valida. L'inclusione del primo nodo di griglia nel sottostrato viscoso può essere evitato attraverso l'uso di wall function, basandosi sull'ipotesi che la velocità di produzione dell'energia cinetica turbolenta equivalga alla velocità di dissipazione, valida se siamo nello strato logaritmico (ma non strettamente nel sottostrato viscoso). L'ipotesi sta

alla base delle relazioni tra  $k$ ,  $\epsilon$  e gli sforzi di taglio alle pareti  $\tau_w$ :

$$k = \frac{\frac{\tau_w}{\rho}}{\sqrt{C_\mu}} \quad \epsilon = \frac{\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{\frac{3}{2}}}{ky}. \quad (3.27)$$

### 3.2.4 Scambio termico

#### Scambio termico radiativo

Esistono due difficoltà per la modellazione realistica dello scambio termico radiativo in incendi confinati. Il primo riguarda il problema geometrico associato con lo scambio di energia radiativa tra i corpi irradianti e ricevitori lontani, le superfici solide, e la fuliggine in fase solida e gassosa nella fiamma e nel fumo. La seconda difficoltà riguarda il calcolo della potenza locale emessa e assorbività. I contributi relativi alla fuliggine e alle emissioni gassose varia notevolmente tra la fiamma e i prodotti di combustione. Un buon modello deve essere in grado di far fronte non solo a queste differenze, ma anche a quelle tra lo strato di fumi relativamente denso e gli strati quasi trasparenti dell'aria. Inoltre, con il flusso e la combustione, l'effetto delle fluttuazioni turbolente della temperatura devono essere considerate nella zona vicino alla sorgente d'incendio. L'influenza dello scambio termico radiativo dovrebbe essere considerato anche nel termine sorgente nell'equazione della conservazione dell'entalpia; le soluzioni esatte non sono possibili per le più comuni applicazioni anche se diversi metodi approssimati sono stati sviluppati, potendo essere applicati negli incendi. Per gas grigi, non diffusivi e per superfici grigie e diffuse possono essere adatti due modelli radiativi: P1 e fvDOM.

- Modello P1 - L'ipotesi fondamentale del modello *P1* è che la dipendenza direzionale nell'equazione della potenza termica radiativa sia integrata esplicitamente, in modo che risulti un'equazione diffusiva per la radiazione incidente. Il metodo ha come vantaggio la possibilità di tenere in considerazione l'effetto di scattering molecolare legato alla presenza di particelle, gocce e fuliggine, anche se assume che tutte le facce siano di tipo diffusivo e sovrastimi i flussi radiativi nelle zone in cui vi sono sorgenti di potenza termica. Le equazioni parziali differenziali per la radiazione incidente  $G(\mathbf{x})$  vengono risolte nella forma:

$$\nabla \left( \frac{1}{a} \nabla G(\mathbf{x}) \right) = a (G(\mathbf{x}) - 4\sigma_{SB}T^4). \quad (3.28)$$

$G$  è utilizzato per calcolare la divergenza del flusso termico  $\mathbf{q}_R$  che rappresenta il contributo radiativo all'equazione di conservazione dell'energia:

$$-\nabla \mathbf{q}_R(x) = a (G - 4\sigma_{SB}T^4). \quad (3.29)$$

- Modello fvDOM - Questo modello risolve l'equazione della potenza termica radiativa per un numero discreto di finiti angoli solidi, ed è, tra quelli implementabili, il più completo, tenendo infatti conto del fenomeno dello scattering, superfici speculari e mezzi semi-trasparenti. Di contro, la risoluzione del problema in un elevato numero di direzioni è pesante da un punto di vista

computazionale. Nel modello *fvDOM*, l'angolo solido viene diviso in direzioni discrete  $\mathbf{s}$ , per cui l'equazione differenziale parziale dell'equazione di scambio radiativo, è risolta per l'intensità radiativa  $I(\mathbf{x}, \Omega)$ , applicando l'approccio dei volumi finiti discretizzati:

$$\nabla(\mathbf{s}I) = a(I_b - I) \quad (3.30)$$

L'energia radiativa incidente è quindi calcolata come:

$$G(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} I(\mathbf{x}, \Omega) d\Omega \quad (3.31)$$

Come nel modello precedente,  $G$  è utilizzato per calcolare la divergenza del flusso termico radiativo dell'equazione (3.29).

### Scambio termico a parete

Per lo scambio termico, l'approccio mediante l'utilizzo delle wall function si basa sulla distribuzione della temperatura nella parete proposta da [26]. Per un fluido incomprimibile la relazione utilizzata è del tipo

$$T^+ = \frac{(T_w - T_p)\rho c_p u_\tau}{q_w} = Pr(u^+ + P), \quad (3.32)$$

con  $T_w$  la temperatura di parete,  $\rho$  la densità del fluido,  $c_p$  il calore specifico del fluido a pressione costante,  $q_w$  il flusso termico di parete,  $Pr_t$  il numero di Prandtl turbolento (0.85 alla parete), e  $P$  è una correzione dipendente dal rapporto dei numeri di Prandtl laminari e turbolenti. L'equazione si applica finchè  $y$  è maggiore dello spessore del sottostrato adimensionale definito come la distanza di intersezione tra l'andamento lineare e logaritmico della legge della parete (fig. 3.13). Per piccoli valori di  $y$  la relazione lineare tra  $T^+$  e  $y^+$  è

$$T^+ = Pr y^+, \quad (3.33)$$

dove  $Pr$  è il numero di Prandtl del fluido. Combinando le equazioni (3.33) e (3.2.3) è agevole determinare, ad esempio, il valore dello sforzo di taglio per utilizzarlo come dato di input nelle condizioni al contorno per una cella vicina alla parete in condizioni di flusso turbolento

$$\tau_w = \rho \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k u}{u^+}, \quad (3.34)$$

dove  $u^+$  deve essere determinato attraverso la corrispondente legge di parete. Il flusso termico al contorno può essere introdotto come:

$$q_w = -\rho c_p \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} (T - T_w)}{T^+}. \quad (3.35)$$

In caso di pareti adiabatiche si impone un valore nullo alla derivata normale; altre condizioni alle pareti potrebbero essere applicate, ma la condizione adiabatica rappresenta il peggior caso in termini di forza di galleggiamento, pericolo per le persone e danneggiamento alle strutture.

### 3.2.5 Modello di combustione

Le reazioni di combustione, a causa dell'elevato rilascio di calore, modificano in maniera accentuata la densità e la viscosità dei gas, provocando forti accelerazioni che influenzano il campo di moto dei fluidi. Le interazioni tra cinetica e turbolenza intervengono per scale molto vaste di condizioni del flusso. E' noto che l'effetto di un campo di moto turbolento sia quello di portare i reagenti ad un più efficace mescolamento, migliorandone la combustione, la velocità di consumo di massa dei reagenti e quindi la potenza prodotta; tuttavia, una turbolenza troppo intensa può portare all'estinzione della fiamma. La velocità di formazione massica della specie  $k$  per unità di volume di una reazione di combustione viene espressa come:

$$\bar{\omega}_k = PM_k \sum_{j=1}^{N_R} (v_{k,j}^f - v_{k,j}^b) \bar{r}_j = PM_k \sum_{j=1}^{N_R} (v_{k,j}^f - v_{k,j}^b) \left[ K_j^f \prod_{i=1}^{N_c} [M_k]_i^{v_{k,j}^d} - K_j^b \prod_{i=1}^{N_c} [M_k]_i^{v_{k,j}^d} \right] \quad (3.36)$$

con  $PM_k$  la massa molecolare della specie  $k$  -esima,  $N_R$  il numero di reazioni considerate,  $N_c$  il numero delle specie considerate (reagenti e prodotti),  $[M_k]$  la concentrazione molare della specie  $k$ ,  $\bar{r}_j$  la velocità di reazione netta valutata in condizioni medie (velocità di reazione diretta meno velocità di reazione inversa per una generica reazione reversibile) e  $v_{k,j}$  è il coefficiente stechiometrico e, considerando una cinetica semplice, anche ordine di reazione per la specie  $k$  nella reazione  $j$  -esima. Gli apici  $f$  ed  $b$  indicano la reazione diretta (*forward*) e quella inversa (*backward*). Il parametro  $K$  viene espresso mediante l'equazione di Arrhenus:

$$K = Ae^{\left(\frac{-E_a}{R^*T}\right)} \quad (3.37)$$

dove  $A$  rappresenta il fattore pre-esponenziale,  $E_a$  l'energia di attivazione,  $R^*$  la costante dei gas e  $T$  la temperatura. Il problema sta nella non linearità di questo termine esponenziale, che causa grossi problemi nella procedura di media; valutare la velocità di reazione usando i valori di concentrazione e temperatura medi, infatti, significa trascurare completamente gli effetti della turbolenza e commettere un errore. Ogni reazione chimica possiede un tempo caratteristico, indispensabile per poter valutare l'effetto della turbolenza sulle velocità di formazione di ogni specie chimica. I tempi della chimica possono essere definiti in modo rigoroso tramite gli autovalori della matrice Jacobiana delle velocità di formazione. In condizioni isoterme il generico elemento di tale matrice è:

$$J_{i,j} = \frac{\delta \omega_k}{\delta C_j} \quad \text{con } i, j = 1, \dots, N_c \quad (3.38)$$

dove  $C_j$  è la concentrazione della specie  $j$  -esima e  $N_c$  il numero delle specie. Per una matrice  $N_c \times N_c$ , detti  $\mu_i$  gli autovalori, si possono definire i tempi caratteristici della chimica come:

$$\tau_{c,j} = \frac{1}{|Re(\mu_j)|} \quad (3.39)$$

con  $j$  indice riferito alla  $j$  -esima specie chimica del sistema. L'autovalore dipende dalla composizione locale in ogni istante, anche il tempo caratteristico avrà



la stessa dipendenza. Confrontando i tempi caratteristici sia della chimica che della turbolenza si possono individuare tre intervalli:

- Chimica veloce (*fast chemistry*), ossia tempi chimici bassi;
- Chimica lenta (*slow chemistry*), ossia tempi chimici alti;
- *finite-rate chemistry* quando il comportamento è intermedio tra i due precedenti e i tempi caratteristici sono simili.

Solitamente si differenziano le diverse situazioni usando il rapporto tra il tempo di miscelazione e il tempo chimico della specie  $j$  – *esima*:

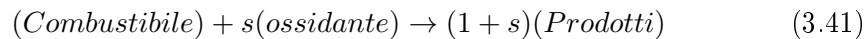
$$Da_j = \frac{\tau_{mix}}{\tau_{c,j}} \quad (3.40)$$

Quando il numero di Damköhler  $Da$  è molto maggiore dell'unità siamo in una zona in cui le reazioni sono governate dal mixing turbolento. Se il numero è invece molto minore dell'unità sarà la chimica ad avere il dominio sulla fluidodinamica. Se si verificano entrambe le condizioni sorgono difficoltà numeriche. Utilizzando un approccio RANS l'accoppiamento tra cinetica e turbolenza può essere descritto solo attraverso modelli appropriati, che possono essere raggruppati in due categorie:

- *Reaction Rate Approach, RRA*: viene modellata solo la velocità di formazione massica della specie  $k$  e risolvendo un'equazione di trasporto per ogni singola specie;
- *Primitive Variables Approach, PVA*: si risolvono le equazioni di trasporto solo per un ristretto numero di variabili fondamentali, permettendo di descrivere in maniera univoca i campi di concentrazione e di temperatura.

### Eddy Break Up Model

Il modello *Eddy Break Up* ricade tra i modelli *RRA* ed è stato sviluppato da Spalding [27]. Si applica a fiamme turbolente premiscelate sotto l'ipotesi di avere numeri di Reynolds e Damköhler elevati. L'ipotesi fondamentale è che la velocità del processo di combustione sia controllata dalla miscelazione turbolenta e non dalla chimica delle reazioni di ossidazione; per questo si può parlare di chimica infinitamente veloce. Considerando la generica reazione:



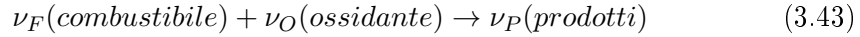
si otterrà una velocità di reazione del combustibile, indicata con il pedice F, pari a:

$$\bar{r}_f = \bar{\rho} C \frac{\epsilon}{k} \sqrt{(\tilde{\omega}_F^2)} \quad (3.42)$$

dove  $C$  è la costante di *Eddy Break Up*, mentre  $\tilde{\omega}_F^2$  indica la varianza della frazione massica del combustibile.

### Eddy Dissipation Model

Il modello *Eddy Dissipation* è l'estensione del modello *Eddy Break Up* al caso di fiamme non premiscelate proposto da Magnussen e Hjertager [14]. A causa della turbolenza della fiamma, si ottiene un lento mescolamento tra il combustibile e il comburente all'interno della zona di reazione, in cui la combustione è molto veloce; la combustione viene così definita *mixing limited* dato che il grado di mescolamento risulta limitante rispetto alla velocità di reazione. Quindi la cinetica di reazione può essere trascurata e il termine di velocità di formazione dell'elemento viene legato come nel modello precedente al tempo necessario per il mescolamento dei reagenti a livello molecolare. Considerando un'unica reazione:



Nell'ipotesi che il modello venga scritto per una sola reazione, la velocità di reazione media viene presa come il valore minimo tra tre espressioni di velocità:

$$\bar{r}_f = \bar{\rho} C \frac{\epsilon}{k} \min \left( \omega_F, \frac{\omega_O}{s}, \frac{\omega_P}{1+s} \right) \quad (3.44)$$

dove  $\omega_F$  rappresenta la frazione massica di combustibile,  $\omega_O$  la frazione massica di ossigeno e  $\omega_P$  la frazione massica delle specie prodotte,  $s$  il rapporto stechiometrico,  $C$  e  $\beta$  due costanti empiriche stimate pari a 4 e 0,5. Le prime due equazioni tengono conto di quale tra combustibile e ossidante sia il fattore limitante, mentre la terza tiene in considerazione che i prodotti caldi possano innescare il processo di combustione. Il modello *Eddy Dissipation* si applica bene a flussi turbolenti nei quali la cinetica chimica è elevata rispetto ai processi turbolenti (*infinitely fast*) e presuppone di simulare una combustione stabile, in quanto non vengono considerati né fenomeni di ignizione né di estinzione della fiamma. Questo modello ha il difetto di sovrastimare le temperature, trascurando le reazioni di dissociazione che avvengono ad alte temperature (es. *CO*). Inoltre il modello ottiene risultati accettabili solo se applicato ad un'unica reazione, ossia con un combustibile omogeneo. Nel caso si abbia una miscela di combustibili sarebbe necessario creare una pseudo-specie, perdendo in questo modo ulteriore accuratezza nella soluzione.

#### 3.2.6 Modello di soot

L'equazione di conservazione del soot è:

$$\frac{\partial \rho_g \phi_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \phi_s \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( 0.55 \frac{\omega_s \mu}{T} \nabla T \right) + \dot{\omega}_s''', \quad (3.45)$$

dove è stata ridefinita la variabile scalare del soot come  $\phi_s = \omega_s / (1 - \omega_s)$ , con  $\omega_s$  frazione massica del soot. Il termine sorgente  $\dot{\omega}_s'''$ , è calcolato come la somma della formazione del soot e la velocità di ossidazione  $\dot{\omega}_s''' = \dot{\omega}_{sf}''' + \dot{\omega}_{so}'''$ . La formazione del soot e la velocità di ossidazione sono assunti come funzioni della frazione di miscela e temperatura. L'equazione dell'entalpia totale è:

$$\frac{\partial \rho_g h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g h \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho_g D \Delta h) + S_{sf} + S_{so} - q_r''', \quad (3.46)$$

con  $h = h_T + \phi_s h_{T,s}$ . Con  $h_T$  si intende l'entalpia totale (sensibile e chimica) e  $\phi_s h_{T,s}$  è l'entalpia di soot.  $S_{sf} = \omega_s''' f(h_{T,F} - h_{T,s})$  è la variazione di entalpia sensibile dovuta alla formazione di soot, e

$$S_{so} = \frac{\dot{q}_{so}'''}{M_F} \left[ M_F h_{T,s} + \left(x + \frac{y}{4}\right) M_{O_2} h_{T,O_2} - x M_{CO_2} h_{T,CO_2} - \frac{y}{2} M_{H_2O} h_{T,H_2O} \right]$$

è il rilascio di energia per unità di volume dovuto all'ossidazione del soot per un arbitrario combustibile idrocarburo  $C_x H_y$ . L'equazione della conservazione della frazione di miscela può essere scritta come

$$\frac{\partial \rho_g Z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g Z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho_g D \Delta Z) + \dot{\omega}_Z''', \quad (3.47)$$

dove il termine sorgente  $\dot{\omega}_Z'''$  include gli effetti della formazione e ossidazione del soot sulla frazione di miscela. Il modello canonico può essere esteso alle fiamme turbolente, dove le velocità di deformazione sono determinate dal campo turbolento. Il modello base *smoke point* è adattato per un modello di sottogriglia soot-radiativo, ed è progettato per fornire la frazione di energia radiativa emessa da un singolo vortice turbolento. Si assume che il soot sia rilasciato dalle fiamme turbolente e che non sia ossidato all'esterno di tali fiamme. L'equazione di trasporto del soot non ossidato viene risolta includendo il termine di produzione  $\dot{\omega}_s'''$ . Per approfondimenti consultare [4].

### 3.2.7 Descrizione del codice di calcolo impiegato

Il lavoro presentato è uno studio orientato alla verifica del dimensionamento dei camini di estrazione dei fumi di un filtro a prova di fumo in una galleria di metropolitana sulla base di oggettivi criteri di sicurezza che permettano di stabilire l'efficacia della strategia considerata. Allo scopo si è scelto di utilizzare il software di calcolo open source *OpenFOAM*® nelle versioni 2.0.1 e 2.1, e il solutore *FireFOAM* sviluppato per lo studio degli incendi e la loro soppressione, che utilizza un modello di turbolenza LES. Il codice risolve delle equazioni di trasporto a volumi finiti su griglie poliedriche non strutturate, e consentirà di analizzare l'andamento del flusso, la temperatura e concentrazione dei gas combustibili in galleria, nel filtro a prova di fumo, nelle scale e nel camino.

#### OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) è un toolbox scritto attraverso librerie *C++* in grado di simulare numericamente tutti i fenomeni fisici riconducibili tramite la descrizione matematica della meccanica del continuo, come la fluidodinamica di fluidi complessi che comportano reazioni chimiche, i flussi turbolenti con trasferimento di calore e la meccanica dei solidi. Nato nel 1993, è in continuo sviluppo ed è distribuito dalla OpenCFD Ltd [9] con licenza GNU GPL (General Public License) [10].

OpenFOAM è prima di tutto una libreria *C++* utilizzata per creare eseguibili, noti come *applications*. Questi eseguibili possono essere suddivisi in due categorie: i solutori (*solvers*), progettati per risolvere specifici problemi nella meccanica del

continuo; e *utilities*, progettati per eseguire compiti che coinvolgono la manipolazione di dati. Il software viene fornito con numerosi solutori pre-configurati, utilities e librerie, e quindi può essere usato come qualsiasi altro pacchetto commerciale tipico per la simulazione numerica. A differenza però dei codici commerciali, OpenFOAM si è “aperto”, non solo in termini di codice sorgente, ma anche nella sua struttura gerarchica e di progettazione, in maniera tale che tutti i suoi solutori, utility e librerie siano completamente personalizzabili. OpenFOAM è fornito con ambienti di pre e post processamento dei dati, i primi necessari per la preparazione della simulazione, i secondi utili per la visualizzazione dei risultati. Le interfacce di pre e post processamento sono loro stesse delle utilities di OpenFOAM, in modo di garantire la manipolazione dei dati attraverso tutti gli ambienti. La simulazione vera e propria viene effettuata attraverso dei solutori, che possono essere quelli standard oppure possono essere creati ad hoc dall’utente. Il pre-processing è affidato a delle utilities che svolgono altri tipi di funzioni, a partire dalla generazione della mesh fino all’inserimento di condizioni non costanti sui diversi contorni. Il post-processing è invece affidato a un programma grafico, *Paraview*®<sup>1</sup>, utile a visualizzare i risultati, e comunque ad altre utilities adeguate allo scopo. E’ necessario aggiungere all’elenco degli elementi caratterizzanti questo software anche le librerie che, sebbene non direttamente utilizzabili dall’utente, contengono le dichiarazioni e il codice delle classi utilizzate e sono pertanto fondamentali per il funzionamento del codice stesso. Infine restano da citare i casi, ossia le simulazioni vere e proprie, in cui sono presenti i files contenenti le condizioni iniziali e le specifiche della simulazione e i files contenenti i risultati.

### FireFOAM

Il solutore fireFOAM risolve le equazioni di Navier-Stokes per fluidi comprimibili mediate secondo Favre. Per tali fluidi, si devono mettere in considerazione anche le fluttuazioni della densità e della temperatura, oltre che quelli di velocità e di pressione. Se fosse utilizzata la media temporale, le equazioni di conservazione medie conterrebbero dei termini addizionali che non avrebbero analogie con le equazioni laminari. Se consideriamo l’equazione di conservazione della massa, possiamo scrivere che la densità sarà la somma del termine medio  $\bar{\rho}$  e di quello fluttuante  $\rho'$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho'. \quad (3.48)$$

Esprimendo la velocità istantanea come

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (3.49)$$

sostituendo nell’eq. (3.5) ricaviamo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} + \rho') + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i + \rho'u_i + \bar{\rho}u'_i + \rho'u'_i) = 0. \quad (3.50)$$

Mediando nel tempo l’eq. (3.50) si ottiene l’equazione di continuità per un flusso comprimibile:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i + \overline{\rho'u'_i}) = 0. \quad (3.51)$$

Si noti che in modo di eseguire la chiusura del problema, è necessaria una correlazione tra  $\rho'$  e  $u'_i$ . Il problema si complica maggiormente per l'equazione della conservazione del momento, per la presenza del tensore degli sforzi. Il problema di stabilire una forma appropriata per semplificare le equazioni mediate nel tempo è quello di utilizzare una procedura di media pesata sulla densità, suggerita da Favre. In tal modo si introduce una velocità media pesata sulla densità  $\tilde{u}_i$ , definita come

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{\bar{\rho}} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_t^{t+T} \rho(\mathbf{x}, \tau) u_i(\mathbf{x}, \tau) d\tau, \quad (3.52)$$

con  $\bar{\rho}$  densità mediata nel tempo. Quindi, in termini di media temporale possiamo dire che

$$\rho \tilde{u}_i = \overline{\rho u_i}, \quad (3.53)$$

con la linea superiore che identifica la media temporale. Questo processo di media diventa più chiaro se si espande il secondo membro dell'equazione 3.53.

$$\overline{\rho u_i} = \bar{\rho} u_i + \overline{\rho' u'_i}. \quad (3.54)$$

La conservazione della massa in eq. (3.51) può essere riscritta quindi come :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0. \quad (3.55)$$

Utilizzando l'operazione di media secondo Favre, è abitudine scomporre la velocità istantanea in due parti, la parte mediata sulla massa  $\tilde{u}_i$ , e una parte fluttuante  $u''_i$ , dove

$$u_i = \tilde{u}_i + u''_i \quad (3.56)$$

In questo modo, le equazioni di conservazione possono essere scritte come [11]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\rho} (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\rho} \left( D_k + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \right] + \overline{\dot{\omega}''_{Y_k}} \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_s}{\partial x_j} = \frac{D \bar{p}}{D t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\rho} \left( D_{th} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}_s}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial \bar{q}''}{\partial x} + \overline{\dot{\omega}''_{h_s}} \quad (3.60)$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} R^* \tilde{T} \quad (3.61)$$

In fireFOAM la pressione viene scomposta in due termini:

$$\bar{p} = \bar{p}_d + \bar{\rho} g_j x_j, \quad (3.62)$$

e l'equazione di conservazione della quantità di moto diventa:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\rho} (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}_d}{\partial x_i} - g_i x_i \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i}. \quad (3.63)$$

La modellazione della turbolenza nella scala di sottogriglia è effettuata mediante il concetto di *eddy viscosity*, attraverso la selezione del modello *one equation*, disponibile in OpenFOAM:

$$\frac{\partial \bar{\rho}k}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{u}}k) = \nabla(\bar{\rho}\mu_k\nabla k) + P - \epsilon, \quad (3.64)$$

con

$$\mu_k = c_k\Delta k^{1/2} \quad \epsilon = c_\epsilon k^{3/2}\Delta^{-1}.$$

FireFOAM, come molti solutori di OpenFOAM, risolve delle equazioni discretizzate con il metodo dei volumi finiti su una griglia poliedrica non strutturata. Il solutore utilizza un metodo di soluzione segregato basato sulla pressione, simile a quello di diversi codici CFD commerciali, in cui vengono impiegati degli schemi completamente impliciti. Gli schemi spaziali e temporali utilizzati sono del secondo ordine, mentre per il termine convettivo della frazione di miscela e l'equazione dell'entalpia sono adottati degli schemi di interpolazione implicita *Total Variation Diminishing TVD* e *Normalized Variable Diminishing NVD*.

Le equazioni di Navier-Stokes vengono risolte utilizzando un metodo segregato sul valore di pressione utilizzando un algoritmo PIMPLE, combinazione di un algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) e SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Grazie all'adozione dell'algoritmo PIMPLE è possibile utilizzare un numero di Courant elevato, circa pari a 5. Due cicli interni PISO per l'equazione della pressione e la correzione del passo della velocità sono richiesti per assicurare la valutazione dell'abbinamento pressione-velocità e l'equazione di conservazione della massa. Un ciclo esterno SIMPLE è necessario eseguire un più severo abbinamento di equazioni scalari con i termini di flusso [31].

Il metodo di soluzione si compone dei seguenti step [11]:

1. Risoluzione dell'equazione della quantità di moto

$$\frac{\rho^*\mathbf{u}^* - \rho^m\mathbf{u}^m}{\delta t} = -\nabla \cdot (\rho^m\mathbf{u}^m\mathbf{u}^*) + \nabla \cdot \mu\nabla\mathbf{u}^* - \Delta p_d^m - (g\mathbf{x})\Delta\rho^*, \quad (3.65)$$

con il primo termine a secondo membro che rappresenta un'espressione linearizzata, mentre il termine della pressione utilizzato rappresenta il valore dello step precedente.

$$a_p\mathbf{u}_p^* = H(\mathbf{u}^*) - \Delta p_d^m - (g\mathbf{x})\Delta\rho^*, \quad (3.66)$$

2. Soluzione delle equazioni di conservazione delle specie e dell'entalpia con il flusso dello valutato allo step precedente;
3. Aggiornamento del valore di densità attraverso i nuovi valori di pressione e di temperatura utilizzando l'equazione di stato dei gas;
4. Soluzione dell'equazione della pressione e della velocità per ottenere il nuovo valore di velocità e soddisfare l'equazione di continuità

$$\nabla \cdot (\rho^{m+1}\mathbf{u}_p^{m+1}) = \frac{d\rho}{dt} = \nabla \cdot \left( \frac{\rho^{m+1}}{a_p} H\mathbf{u}^* \right) - \nabla \cdot \left( \frac{\rho^{m+1}}{a_p} \Delta p_d^{m+1} \right) - \nabla \cdot \left( \frac{\rho^{m+1}}{a_p} (g\mathbf{x})\Delta\rho^{m+1} \right) \quad (3.67)$$

$$\mathbf{u}_p^{m+1} = \frac{1}{a_p} H(\mathbf{u}^*) - \frac{1}{a_p} \Delta p_d^{m+1} - \frac{1}{a_p} (g\mathbf{x})\Delta\rho^{m+1}; \quad (3.68)$$

5. Ritorno al passo 3, iterazione per soddisfare l'equazione di conservazione della quantità di moto linearizzata;
6. Ritorno al passo 1, iterazione per aggiornare i valori di flusso dei termini convettivi.

La validazione dei codice OpenFOAM e FireFOAM sono già disponibili in letteratura, attraverso lo studio di diversi casi sulla fluidodinamica degli incendi [7].

### 3.3 Analisi di Sensitività

Volendo utilizzare un codice di calcolo adattato al meglio per poter studiare lo scenario d'incendio in galleria di metropolitana sono state svolte diverse prove per capire l'influenza della scelta di alcuni parametri. In particolare l'analisi di sensitività si focalizza sulla sensitività della griglia, la scelta del tipo di turbolenza implementato, lo scambio termico alla parete e l'utilizzo di wall function alle pareti della galleria. Nelle tabelle 3.4 e 3.5 vengono riassunte alcune caratteristiche delle prove simulate.

Per questi casi è stata utilizzata una diversa superficie per simulare l'incendio (rispetto a quella del sottocassa descritta al cap. 3.1.3) costruita per generarlo da due superfici poste lateralmente al treno (e non al di sotto), per un'area complessiva di  $8 \text{ m}^2$ . Le caratteristiche geometriche sono riportate in tab. 3.3 e fig. 3.14.

Superfici Fire	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Profondità [m]
Doppia	6	0.7	-
Sottocassa	8.4	1.2	0.06

Tabella 3.3: Dimensioni Patch Fire

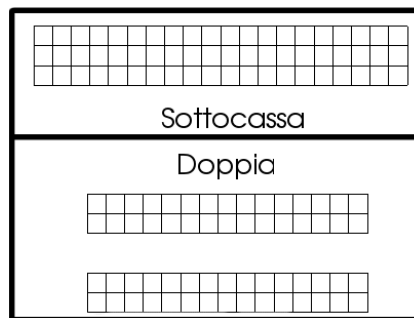


Figura 3.14: Confronto Patch Fire

Nella galleria senza il treno l'incendio è posto al centro della galleria, mentre in caso di presenza del treno è posto a circa 100 m dalla testa del treno (fig. 3.15).

Tipo di Mesh	A		B		C		D	
	Senza Treno	Senza Treno	Senza Treno	Senza Treno	Con Treno	Con Treno	Con Treno	Con Treno
Combustibile	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta
Potenza Incendio [MW]	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Patch Fire	Doppia	Doppia	Doppia	Doppia	Doppia	Doppia	Doppia	Doppia
Combustion Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model
Turbulence Model	standard One Equation LES	k-epsilon RANS	k-epsilon RANS	k-epsilon RANS	standard One Equation LES	standard One Equation LES	k-epsilon RANS	k-epsilon RANS
Walls	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche	Adiabatiche
Radiation Model	none	none	none	none	none	none	none	none
Soot Model	none	none	none	none	none	none	none	none
Portale 1 Tunnel	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet
Portale 2 Tunnel	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet

Tabella 3.4: Condizioni al contorno e modelli utilizzati per l'analisi di sensitività - 1



	E	F	G
Tipo di Mesh	Con Treno	Senza Treno	Senza Treno
Combustibile	Portata imposta	Portata imposta	Portata imposta
Potenza Incendio [MW]	1.33	2	2
Patch Fire	Doppia	Doppia	Doppia
Combustion Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model	Eddy Dissipation Model
Turbulence Model	k-epsilon RANS	standard One Equation LES	standard One Equation LES
Walls	Adiabatiche	Adiabatiche	wall heat transfer
Radiation Model	none	none	none
Soot Model	none	none	none
Portale 1 Tunnel	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet	p: totalPressure u: inletOutlet
Portale 2 Tunnel	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet	p: buoyantPressure u: inletOutlet

Tabella 3.5: Condizioni al contorno e modelli utilizzati per l'analisi di sensitività - 2

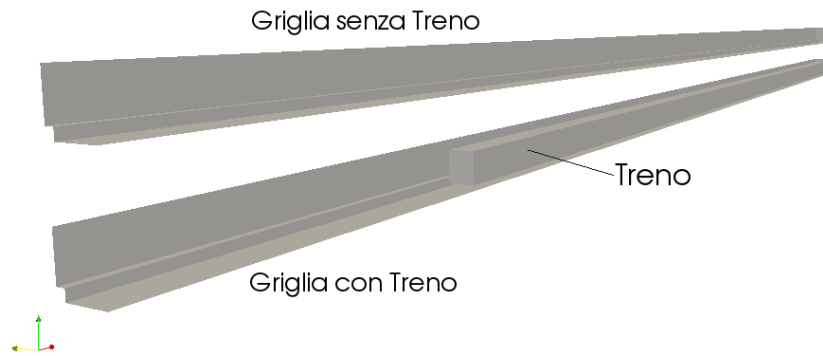


Figura 3.15: Confronto dei due tipi di galleria utilizzati per l'analisi di sensitività

### 3.3.1 Grid Sensivity

#### Setup numerico

Questa indagine consente di definire una griglia di ottimo per la simulazione del caso completo, senza compromettere i risultati in termini di convergenza fisica dei valori delle principali variabili in gioco (temperatura, velocità e il valore di  $y_{Plus}$  per la verifica di una sufficiente risoluzione dello strato limite). La griglia, partendo da quella descritta nel cap. 3.1.2 è stata modificata attraverso il raffinamento della regione di maggior interesse, ossia la zona del sotto-cassa del treno, dove avviene la combustione, e le pareti solide della galleria nella vicinanza. Sono state considerate tre griglie con diversi raffinamenti: una griglia lasca che ha dimensione di spigolo di circa 20 cm, una griglia media che ha dimensione di spigolo delle celle minore di 18 cm mediante un raffinamento delle regioni 20 m a monte e valle dell'incendio, e, attraverso un successivo raffinamento, per una zona che comprende 10 m a monte e a valle l'incendio, una griglia fitta con celle con spigolo minore di 15 cm. In tab. 3.6 si elencano la quantità di celle per ogni griglia raffinata. I diversi tipi di raffinamento possono essere confrontati in fig.3.16.

Griglia	Numero Celle
Coarse	460152
Medium	612752
Fine	1080331

Tabella 3.6: Numero di celle delle tre griglie

Tale procedimento è stato seguito per limitare il numero complessivo delle celle, mentre per le celle a parete, ulteriori raffinamenti sono stati eseguiti per garantire una migliore accuratezza nella soluzione dello strato limite. Le condizioni al contorno sono quelle riportate in tab. 3.8; nella zona in cui avviene la combustione è stata imposta una portata entrante di metano  $CH_4$  pari a 0,2 kg/s che, assumendo un potere calorifico del metano pari a 50 MJ/kg e in condizioni di combustione completa, sviluppa una potenza termica di 10 MW. Le simulazioni sono state condotte per un

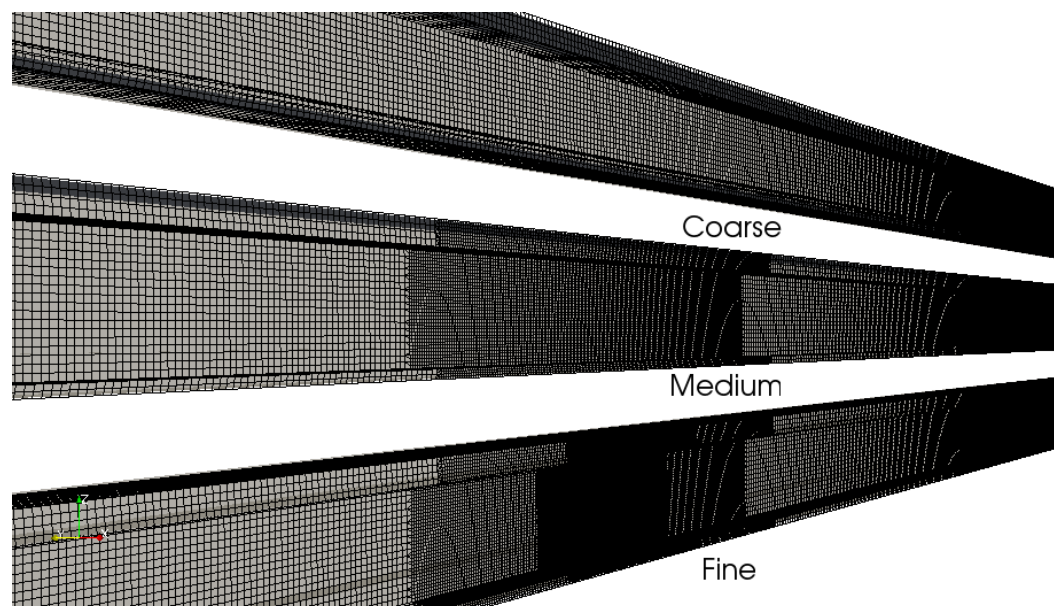


Figura 3.16: Sezione di diversi tipi di raffinamento della mesh in prossimità dell'incendio, lungo la galleria.

periodo di 120 secondi, in modo di raggiungere le condizioni stazionarie di sviluppo della fiamma, del plume e del campo di moto.

#### Analisi risultati

I parametri scelti per eseguire l'analisi di sensitività sono la temperatura, la velocità in direzione longitudinale ( $X$ ) e l' $yPlus$ , valutate sull'altezza della galleria a partire dal piano banchina su due diversi assi. Il primo asse si trova a 5 m dal punto medio dell'incendio mentre il secondo a 10 m. Nelle figure 3.17 - 3.18 vengono rappresentati gli andamenti di temperatura e di velocità in direzione  $X$  per i tre tipi di mesh. In fig. 3.19 si confrontano i valori di  $yPlus$  sulla parete della galleria per i diversi tipi di raffinamento. Eseguendo un primo raffinamento della griglia nella zona di incendio, il valore di  $yPlus$  si riduce passando dal valore massimo di 8 della mesh "coarse" a circa 6 della mesh "medium". Un ulteriore raffinamento della griglia non sembra essere necessario per una riduzione dei valori. L'adozione quindi della una mesh "coarse" per la conduzione delle simulazioni consente di ridurre il numero delle celle presenti nel tunnel, con un minor carico computazionale senza andare a discapito dei valori misurati.

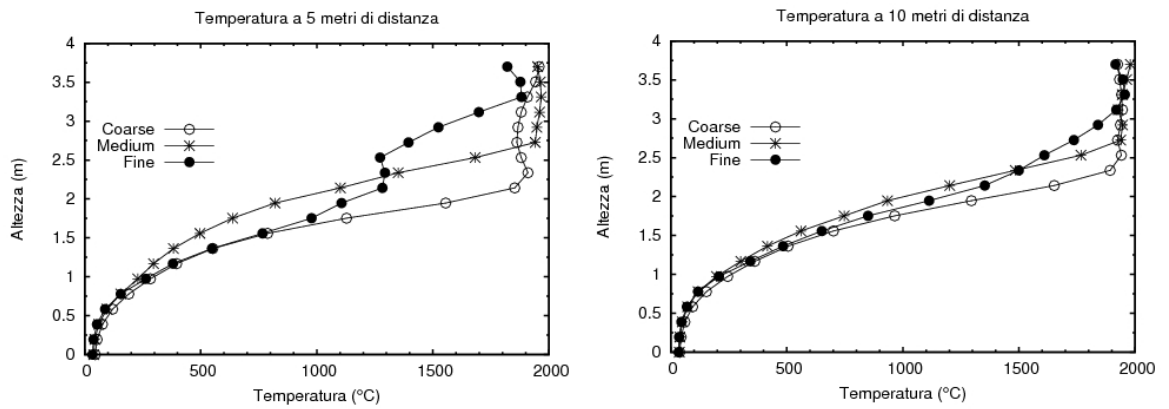


Figura 3.17: Confronto dei valori di temperatura a 5 e 10 metri di distanza dall'incendio tra diverse griglie.

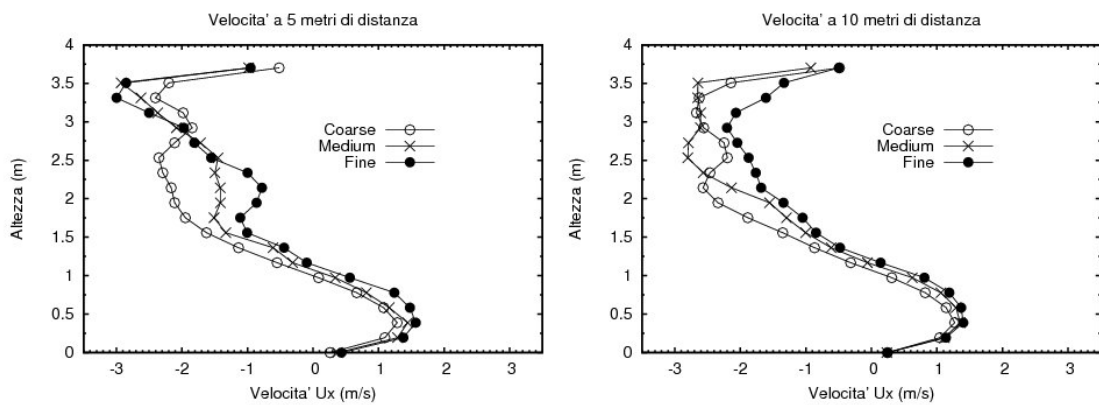


Figura 3.18: Confronto dei valori di velocità a 5 e 10 metri di distanza dall'incendio tra diverse griglie.

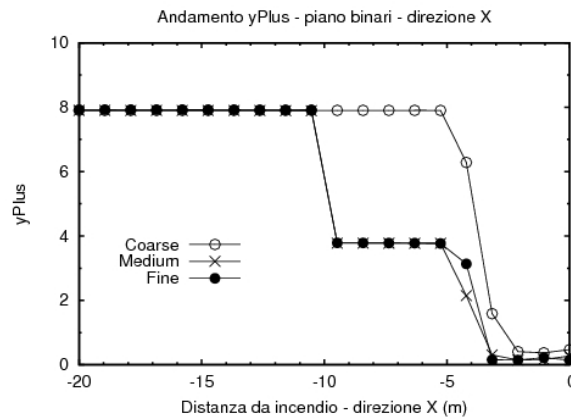


Figura 3.19: Confronto dei valori di  $yPlus$  sulle pareti della galleria per diverse griglie.

### 3.3.2 Effetto della rugosità

E' noto che utilizzando i modelli  $k-\epsilon$  nella regione vicino alla parete e applicando la condizione di aderenza non si raggiungono risultati soddisfacenti. Un metodo ampiamente utilizzato è quello di utilizzare una *wall function* (v. cap. 3.2.3), che modella la regione vicina alla parete. Le *wall function* utilizzano delle leggi empiriche per aggirare l'incapacità dei modelli RANS di predire il profilo di velocità logaritmico vicino alla parete. Con questa legge è possibile esprimere la velocità media parallela alla parete e le quantità turbolente al di fuori del sottostrato viscoso in termini di distanza dalla parete e condizioni di parete come gli sforzi di taglio, il gradiente di pressione e lo scambio termico con il contorno solido. Quindi le *wall function* possono essere utilizzate per fornire le condizioni al contorno vicino alla parete per le equazioni del momento e del trasporto della turbolenza, oltre che condizioni alla parete stessa, perciò il sottostrato inerziale non deve essere risolto e la necessità di una mesh molto raffinata viene superata.

#### Setup numerico

Il confronto tra una prova con l'implementazione di una *wall function* (prova E) e una senza (prova D) viene eseguita utilizzando lo stesso tipo di modello di turbolenza RANS, medesima patch fire e potenza dell'incendio; altre caratteristiche delle prove sono riportate in tab. 3.4 e tab. 3.5. La *wall function* utilizzata (*mutkRough Wall-Function*) consente di definire il valore di rugosità del contorno solido della galleria. Tra diversi valori disponibili in letteratura in funzione del grado di finitura e rasatura della parete, si è scelto di utilizzare una scabrezza di 10 mm sull'intera estensione delle pareti. Attraverso l'analisi dell'andamento del campo di temperatura e di velocità si può capire l'influenza della presenza di tale accorgimento. La potenza termica impostata è pari a 1,33 MW, attraverso una portata massica di 0,026 kg/s che entra dalla superficie di incendio. La griglia utilizzata per la prova è quella lasca, senza raffinamenti. Gli andamenti sono rilevati a 5 e 10 metri dall'incendio, in prossimità della parete della galleria.

### Analisi risultati

Le figure 3.20 e 3.21, relative rispettivamente agli andamenti di temperatura e di velocità misurati, mostrano, sia a 5 che a 10 metri dall'incendio, degli andamenti molto simili tra le simulazioni con e senza wall function, con piccoli scarti.

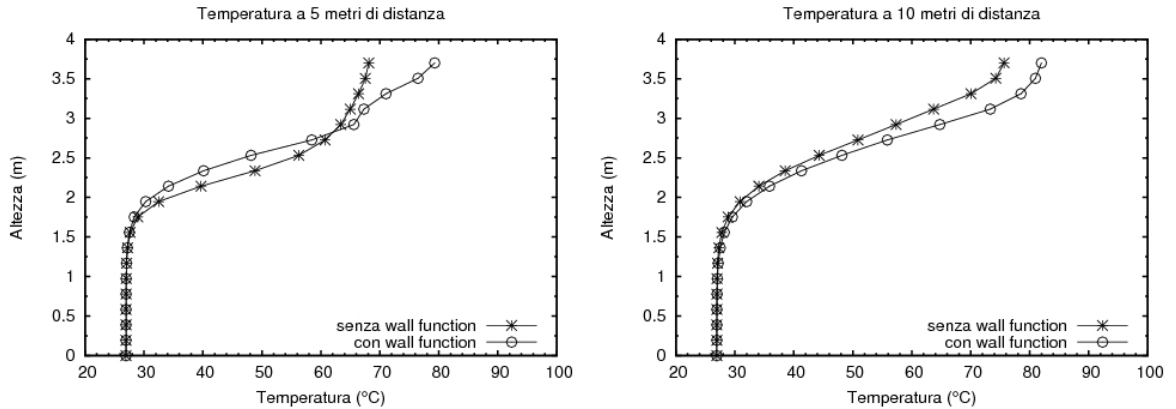


Figura 3.20: Temperatura: confronto degli andamenti tra simulazioni con (prova E) o senza (prova D) wall function in gallerie con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio.

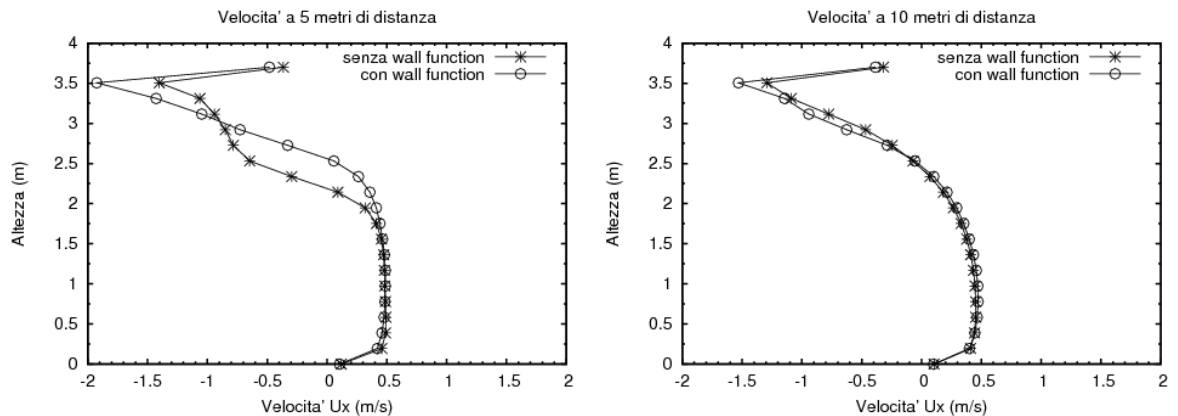


Figura 3.21: Velocità: confronto degli andamenti tra simulazioni con (prova E) o senza (prova D) wall function in gallerie con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio.

### 3.3.3 Scambio termico alle pareti

#### Setup numerico

In questa analisi si valuta l'incidenza del fenomeno dello scambio termico verso le pareti della galleria (*Coniugated Heat Transfer*). Nelle prove sono stati implementati il medesimo modello di turbolenza LES, la stessa patch fire e potenza dell'incendio.

Altre caratteristiche a corredo sono definite nelle tabelle 3.4 e 3.5. La prova G rappresenta il caso con la definizione dello scambio termico (*alphaHeatTransfer*) verso i contorni solidi, mediante la specificazione di un coefficiente globale di scambio termico, definito pari al valore di  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Osservando il campo di temperatura e interpretando l'andamento del plume possiamo notare l'influenza dell'effetto dello scambio termico all'interno del tunnel per un incendio con potenza pari a  $1,33 \text{ MW}$ . Per consentire il raggiungimento delle condizioni stazionarie del campo di temperatura le simulazioni sono state condotte per un periodo di 120 secondi e gli andamenti sono rilevati a 5 e 10 metri dall'incendio, in prossimità della parete della galleria.

### Analisi risultati

Oltre che una minore espansione dei prodotti della combustione al di sotto del soffitto del tunnel, ci si accorge di come lo scambio termico influenzi il valore della temperatura raggiunta dai gas attraverso il confronto delle due prove in fig.3.22. Tuttavia gli scarti sono inferiori a  $10^\circ\text{C}$ , non incidendo profondamente sugli esiti delle simulazioni.

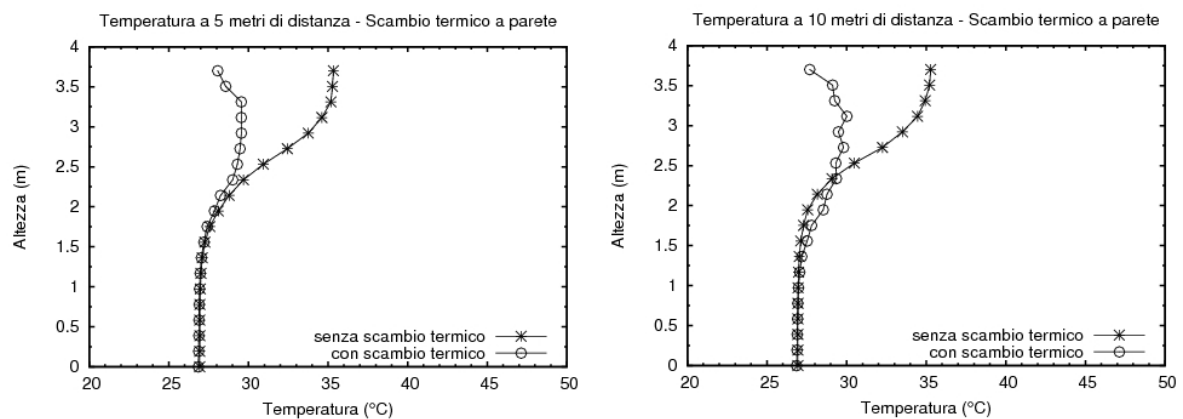


Figura 3.22: Temperatura: confronto degli andamenti tra simulazioni senza (prova F) e con (prova G) scambio termico alle pareti della galleria con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio.

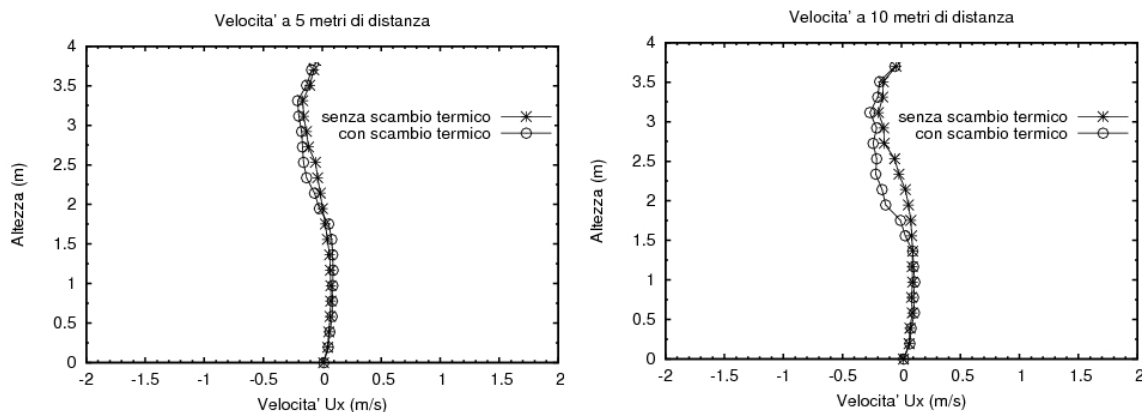


Figura 3.23: Velocità: confronto degli andamenti tra simulazioni senza (prova F) e con (prova G) scambio termico alle pareti della galleria con treno, a 5 e 10 metri dall'incendio.

### 3.4 Setup Numerico

La progettazione di scenari d'incendio è il cuore della metodologia FSE, osservando i risultati con attenzione rispetto all'adeguatezza del sistema antincendio proposto, in modo di rispettare i criteri di sicurezza stabiliti. Nella realtà il numero di possibili scenari d'incendio in un ambiente sono infiniti, ed è impossibile analizzarli tutti anche con l'aiuto delle risorse computazionali più sofisticate. L'identificazione dello scenario appropriato deve rappresentare la situazione più gravosa o di interesse, e deve coinvolgere molti aspetti, come la diffusione del fumo e delle fiamme, lo sviluppo dell'incendio, la ventilazione di galleria e condizioni ambientali esterne. La valutazione delle diverse soluzioni deve riferirsi a criteri di prestazione che possono essere definiti in diversi modi, a seconda della richiesta e dello scopo della progettazione.

La progettazione dell'incendio è funzione di diversi fattori; per essere in grado di eseguire una corretta progettazione antincendio spesso si tengono in considerazione:

- Caratteristiche dell'ambiente
- Caratteristiche al contorno fisico
- Condizioni ambientali
- Caratteristiche del combustibile
- Scenario d'incendio

In tab. 3.7 si riporta una lista di fattori riguardante la definizione dell'incendio.

Un approccio per distinguere gli scenari d'incendio è di classificarli in tre diversi gruppi, basati sulla loro probabilità di accadimento:

- Scenari d'incendio di base - hanno una ragionevole probabilità di accadimento e quelli più rappresentativi sono utilizzati per valutare la progettazione della sicurezza antincendio;



Caratteristiche dell'ambiente	Dimensioni ambiente Geometria dell'ambiente Natura del materiale di costruzione (materiali e metodo)
Condizioni al contorno	Rivestimenti pareti e soffitto Condizioni di ventilazione (meccanica o naturale) Proprietà termofisiche del contorno solido
Condizioni ambientali	Temperatura dell'aria ambiente Movimento dell'aria in ambiente esterno
Caratteristiche del combustibile	Tipo di combustibile Quantità di combustibile Posizione del combustibile Sistemazione del combustibile Pareti e rivestimenti
Scenario d'incendio	Fonte d'ignizione Punto d'ignizione Combustibile coinvolto nell'ignizione Tipo di crescita dell'incendio Eventi che influenzano la crescita dell'incendio

Tabella 3.7: Lista di fattori che influenzano la progettazione dell'incendio.

- Scenari d'incendio ad elevato potenziale - rappresentano dei guasti e altri eventi atipici che sono ancora considerati possibili;
- Peggiori casi d'incendio - non sono utilizzati nella progettazione, ma deve essere garantita una bassa probabilità di accadimento di tali eventi.

Selezionato lo scenario d'incendio, deve essere eseguita una descrizione quantitativa delle caratteristiche dell'incendio; queste sono descritte in termini di HRR, produzione delle specie tossiche e velocità di produzione del fumo.

Prima della definizione dell'incendio nella galleria di metropolitana sono state simulate prove con tunnel semplificati, per eseguire analisi di sensitività su diversi parametri. Un primo tipo di galleria ha le stesse caratteristiche di quello descritto in cap. 3.1.3, ma senza treno al suo interno, filtro a prova di fumo, camino e scale. Il secondo tipo ha invece all'interno un treno, posto 20 cm sopra il piano binari, lungo 239 m, in posizione non baricentrica rispetto al tunnel.

Le geometrie dell'ambiente considerato sono quelle definite nel cap. 3.1.3, mentre le condizioni al contorno di riferimento vengono riportate in tab. 3.8. Il valore della temperatura ambiente all'istante iniziale è stata impostata pari a 300 K (27°C), mentre la pressione atmosferica è di 101325 Pa e si è considerata un'accelerazione di  $-9,81 \text{ m/s}^2$  in direzione Z, per effetto della forza gravitazionale. Le condizioni iniziali della galleria considerano come specie chimiche solo la presenza di ossigeno  $O_2$  e azoto  $N_2$ , con concentrazioni massiche rispettivamente pari al 23.3% e 76.7%.

I valori di potenza termica HRR di picco utilizzati per la progettazione dei sistemi di ventilazione in galleria raccolti in letteratura [5] indicano valori compresi tra i 5

Combustibile	Portata imposta
Combustion Model	Eddy Dissipation Model
Turbulence Model	standard One Equation LES
Walls	Adiabatiche
Radiation Model	none
Soot Model	none
Portali Tunnel	p:fixedValue (zeroGradient con velocità imposta); u:inletOutlet
Camino	p:buoyancyPressure; u:inletOutlet
Uscita scale di emergenza	p:buoyancyPressure; u:inletOutlet
Numerical Schemes	Second Order in Time and Space

Tabella 3.8: Condizioni al contorno di riferimento per tutti gli scenari

e 31.3 MW, a seconda del metodo utilizzato per la valutazione, e sono riportati in tab. 3.9.

Nazione	Linea Metropolitana	HRR di picco [MW]
Singapore	North South Line (NSL)	24
Singapore	East West Line (EWL)	24
Singapore	North East Line (NEL)	15
Singapore	Circle Line (CCL)	10
Australia	New South Link	10
Hong Kong	Lantau Airport Line (LAL)	5
Hong Kong	Airport Express Line (AEL)	10
Thailandia	MRT line, Bangkok	7
Grecia	Metropolitana di Atene	10
UK	St.Paul's city Thameslink, Londra	16
USA	Mount Lebanon Tunnel, Pittsburgh	13.2

Tabella 3.9: Valori di picco adottati per la progettazione dei sistemi di ventilazione di alcune linee metropolitane

In queste simulazioni sono stati adottati diversi valori di potenza termica rilasciata, da 1 a 10 MW, con l'andamento proposto in fig. 3.24.

Non viene per ora considerato un modello di soot, che sarà oggetto di indagini successive, con l'obiettivo di predire con maggiore accuratezza la visibilità negli ambienti e gli effetti della presenza di mezzi partecipi allo scambio radiativo, considerando approfonditamente le proprietà ottiche dei materiali. Anche il modello radiativo dovrà essere implementato nella simulazione, per la considerazione della potenza termica radiativa. A questo proposito il valore della potenza termica in gioco deve essere considerato al netto dell'apporto radiativo, che da letteratura viene stimato pari al 30%. Una riduzione di questa percentuale nelle nostre simulazioni avrebbe comportato una riduzione della portata di combustibile che fuoriesce dalla superficie che simula l'incendio, e quindi una diminuzione dei fumi prodotti inciden-

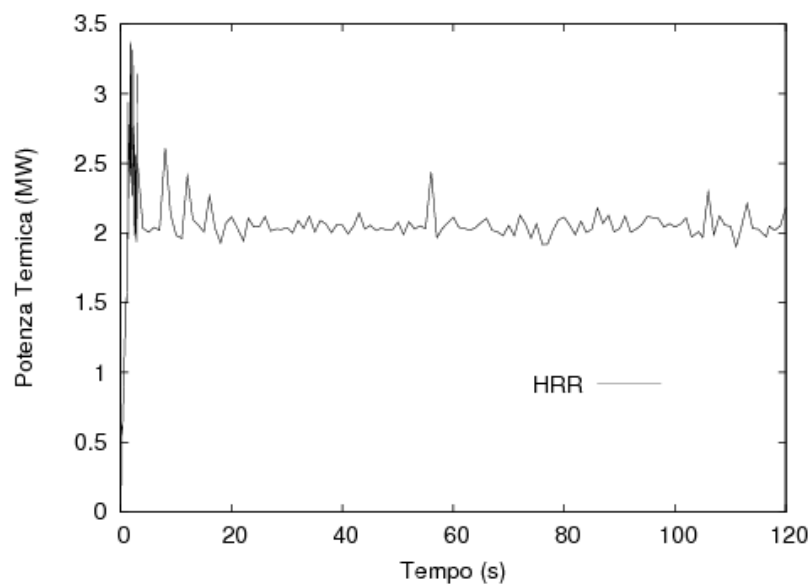


Figura 3.24: Andamento potenza termica incendio (es. 2 MW)

do profondamente sulle prestazioni della strategia antincendio adottata; pertanto si è scelto di non decurtare tale valore di potenza termica. Le prove sono state eseguite supponendo di poter trascurare le perdite di carico a monte e a valle del tratto di tunnel considerato e l'affondamento della linea è impostato pari a 11 metri. Le porte di collegamento tra tunnel e filtro, così come quelle tra il filtro e le scale vengono sempre considerate nella condizione più sfavorevole di completamente aperte. Generalmente le gallerie delle metropolitane possono avere delle pendenze fino al 4%, ma nel nostro caso il tunnel viene assunto completamente piano, senza alcuna variazione di pendenza.



## Capitolo 4

# Risultati delle simulazioni numeriche

Gli studi di dettaglio che seguono le analisi di sensitività riguardano il tipico problema dello smoke management applicati al caso di una metropolitana interrata, in un tratto di galleria compreso tra due stazioni dotato di un'uscita di sicurezza per l'esodo dei passeggeri. Tale uscita di sicurezza è mantenuta sgombera da fumi grazie all'interposizione di un locale tra le scale di emergenza e la galleria: il filtro a prova di fumo.

Per i tratti di metropolitana interrata il riferimento normativo è il decreto del Ministero dei Trasporti dell'11 Gennaio 1988 *Norme di prevenzione degli incendi nelle metropolitane*[28], dove vengono riportate le misure di prevenzione e protezione da mettere in atto nella realizzazione della costruzione di nuove linee per contrastare gli incendi, con particolare accento alle opere civili e agli impianti fissi delle stazioni e linee sotterranee. Nella norma viene definito il percorso protetto come un percorso all'ingresso del quale è presente un sistema che ostacoli il passaggio dei fumi, mantenendoli a dei livelli tollerabili per un tempo stabilito. Inoltre il decreto impone la presenza, oltre delle uscite di emergenza, di accessi d'emergenza costituiti da botole stradali con grigliati di chiusura e rampe di scale che, passando attraverso le camere di ventilazione, i pozzi di aerazione o altri manufatti, collegano direttamente la galleria all'esterno.

### 4.1 Determinazione della sezione del camino del filtro a prova di fumo

Nella prima fase dello studio si sono volute confrontare le prestazioni di camini al servizio del filtro a prova di fumo con diversi valori di sezione, operanti in estrazione naturale. Il camino è stato definito di sezione quadrata, con valori pari a:

- $0.1 \text{ m}^2$
- $1 \text{ m}^2$
- $4 \text{ m}^2$

Il primo valore è quello indicato nel decreto del 30 novembre 1983 [17], e servirà per confronto con le prestazioni degli altri camini, i cui valori di sezione sono stati indicati da Metropolitana Milanese. Aumentare il valore di sezione significa aumentare i costi di costruzione, oltre che creare problemi di ingombro a livello della superficie stradale. Per lo studio di ogni scenario è stato considerato un tempo di 4 minuti a partire dallo sviluppo dell'incendio, modellato nel sottocassa del vagone al centro del treno, che in pochi istanti di tempo è in grado di generare una potenza di 10 MW, mantenuti costanti fino al termine della prova.

La geometria considerata è quella del cap. 3.1.3 e negli scenari studiati i camini operano in ventilazione naturale, impedendo la penetrazione nelle scale dei prodotti di combustione per il tempo necessario a quello di esodo, fornendo un tiraggio sufficiente. Il confronto delle prestazioni dei camini avviene monitorando l'effettiva efficacia di ogni soluzione osservando le portate dei fumi al camino e nelle scale, oltre che monitorando la temperatura in diversi punti del dominio.

In queste prove si sono trascurate le perdite di carico a monte e a valle del tratto di tunnel modellato e che l'affondamento della linea considerato fosse pari a 10 metri, mentre altri studi preliminari consideravano una quota massima di -30 metri, condizione più penalizzante per la ventilazione naturale [8].

Le condizioni al contorno e i metodi utilizzati per la simulazione numerica sono quelli riportati al cap. 3.4; una portata di metano pari a 0,2 kg/s, uscente da una superficie creata sotto il modello del treno simula l'incendio che avviene nella zona del sotto-cassa del treno, per una potenza di 10 MW. Il modello di turbolenza implementato è di tipo LES, e la griglia utilizzata, senza alcun ulteriore raffinamento di specifiche zone, ha dimensione media dello spigolo di cella di 15 cm.

## Risultati

Nell'analizzare i risultati ottenuti sono stati monitorati gli andamenti delle portate smaltite dal camino e dalle scale per le tre diverse configurazioni studiate, e quelli della temperatura e delle concentrazioni di  $O_2$  e  $CO_2$  in due punti specifici in direzione dell'esodo degli occupanti del treno. Nello specifico i punti considerati (raffigurati in fig. 4.1) sono:

- punto 1: ingresso filtro, quota 1,8 m dal piano banchina
- punto 2: ingresso scale, quota 1,8 m dal piano banchina

Come è possibile notare in fig. 4.2 l'andamento delle portate mostra come il camino di sezione maggiore di 4  $m^2$  smaltisca una portata maggiore dal camino lasciando sostanzialmente libere le scale per tutti i 4 minuti della simulazione. Il camino avente sezione 0,31  $m^2$  invece non sembra riuscire a smaltire una portata sufficiente con conseguente presenza di fumi nelle scale dalla metà del terzo minuto. Anche il camino con sezione pari ad 1  $m^2$  preserva la zona delle scale fin solo al finire del quarto minuto dall'inizio dell'incendio.

Nelle figure 4.3, 4.4 sono mostrati gli andamenti di temperatura e concentrazioni di  $O_2$  e  $CO_2$  rispettivamente nei punti 1 e 2 presi in esame a partire dall'inizio dell'incendio. All'ingresso dell'uscita di sicurezza, come mostrato in fig. 4.3, si notano andamenti molto variabili delle temperature e delle concentrazioni di  $O_2$  e  $CO_2$ , dovuti all'ingresso dei fumi caldi nel filtro con abbassamento del layer fumi

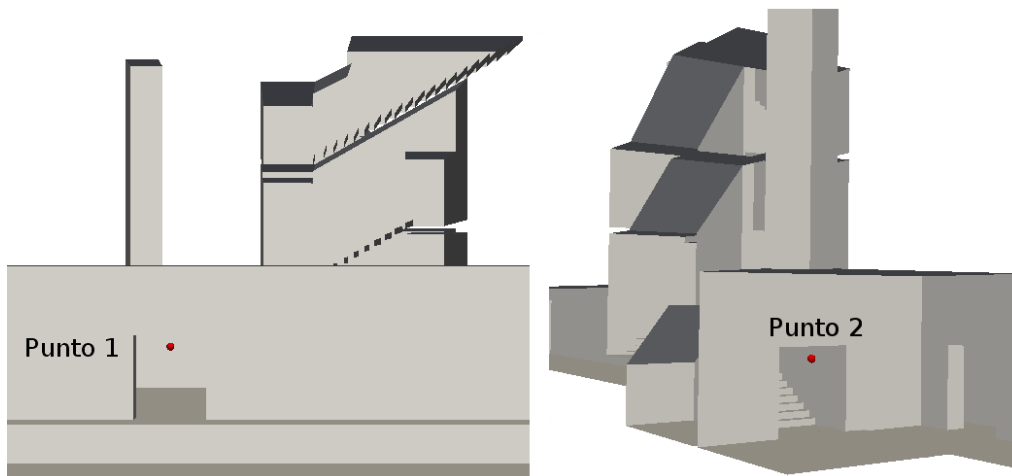


Figura 4.1: Punti considerati per la prova

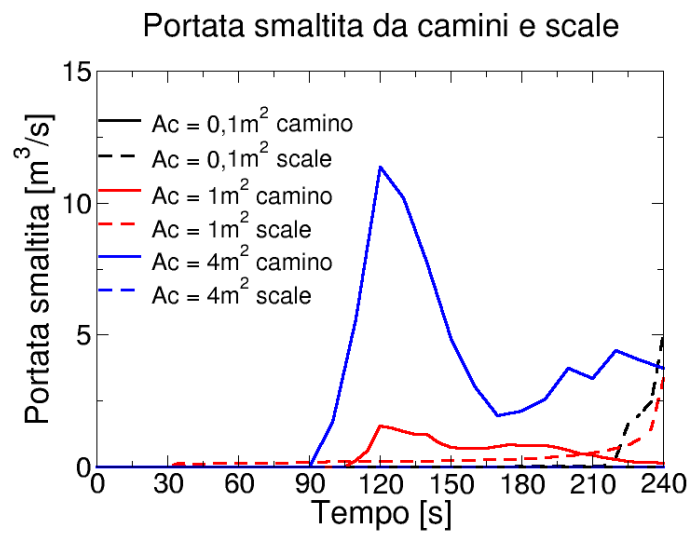


Figura 4.2: Andamento delle portate smaltite dal camino e dalle scale, quota dell'incendio di -10 m

dovuto all'altezza di 2,1 m dal piano banchina della porta. Ciò indica che dopo circa 2 minuti all'ingresso della porta c'è presenza di fumi caldi ad altezza d'uomo.

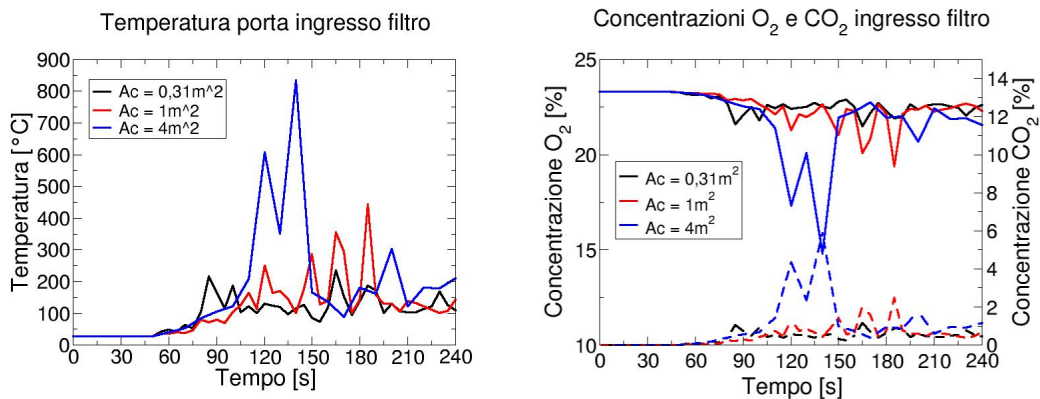


Figura 4.3: Andamento delle temperature e concentrazioni al punto 1

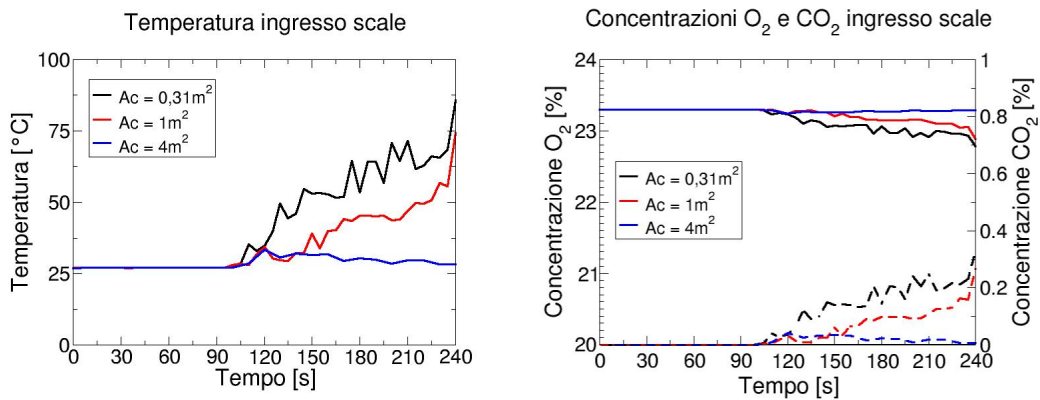


Figura 4.4: Andamento delle temperature e concentrazioni al punto 2

### Confronto con criteri di sicurezza

I risultati delle prove possono essere confrontati in base alle loro prestazioni, misurate in termini di tempo di raggiungimento delle condizioni critiche già esposte in cap. 2.4. In particolare si è scelto di considerare il tempo necessario per il raggiungimento di una temperatura di 100°C, di una concentrazione di ossigeno inferiore al 15% e una concentrazione di anidride carbonica superiore al 4%, riassumendo i risultati in tab. 4.1. Considerando i punti all'interno del filtro e all'ingresso delle scale le condizioni di temperatura e di concentrazione delle specie sono ancora al di sotto dei valori limite per i primi 4 minuti in tutti gli scenari considerati.

All'ingresso del filtro, per effetto del restringimento della sezione e all'abbassamento del layer fumi si superano le condizioni critiche in tutte le prove eseguite. Osservando la tabella 4.1 il cammino di 1 m<sup>2</sup> è quello che meglio riesce a garantire l'osservazione dei criteri di sicurezza riguardo alle temperature e concentrazioni,



	$A_c = 0,1 \text{ m}^2$	$A_c = 1 \text{ m}^2$	$A_c = 4 \text{ m}^2$
Ingresso Filtro	T:80 s	T:100 s	T:90 s; [CO <sub>2</sub> ]:120 s; [O <sub>2</sub> ]:140 s
Ingresso Scale	-	-	-

Tabella 4.1: Tempi di raggiungimento delle condizioni critiche ( $T > 100^\circ\text{C}$ ;  $[O_2] < 15\%$  ;  $[CO_2] > 4\%$ )

riportando dei tempi maggiori rispetto agli altri scenari. Lo scenario con camino di  $4 \text{ m}^2$  è quello che garantisce i minori valori di temperatura al centro del filtro e nelle scale, fondamentali per consentire l'evacuazione degli occupanti, grazie al maggior tiraggio del camino ed una conseguente maggiore portata smaltita. Allo stesso tempo per lo stesso scenario si nota come all'ingresso del filtro sia proprio la temperatura a limitare il rispetto dei criteri fissati. Inoltre, lo scenario avente un camino di estrazione dal filtro a prova di fumo con sezione di  $0,1 \text{ m}^2$  presenta forti criticità in questo incendio di progetto, in quanto fornisce le peggiori prestazioni in termini di sicurezza degli occupanti [12].

## 4.2 Descrizione delle strategie antincendio

L'obiettivo è quello di verificare in dettaglio, per ogni scenario, il tempo, a partire dallo sviluppo dall'incendio, per cui le vie di esodo possono ritenersi praticabili e quanto.

Nel presente studio è stato considerato un tempo indicativo di monitoraggio delle condizioni dell'ambiente di 4 minuti, che potrebbe essere esteso ulteriormente, in considerazione del fatto che la strategia antincendio ha anche la finalità di garantire, considerando gli specifici scenari che possono verificarsi, l'intervento in sicurezza da parte delle squadre di soccorso, evitando il collasso delle strutture e garantendo una via d'accesso libera dai fumi.

In galleria è possibile creare un flusso di aria longitudinale, diretto da un portale a quello successivo, utilizzando le camere di ventilazione oppure sfruttando i camini di ventilazione delle stazioni vicine all'incendio con una logica di attivazione *push and pull*. Questo significa che, nell'istante in cui viene rilevato l'incendio, il sistema di sicurezza comanda l'accensione dei ventilatori, i quali, dopo un intervallo di tempo, possano spingere l'aria in galleria, stabilendo una direzione preferenziale dei fumi. Il filtro a prova di fumo, a sua volta, può essere dotato di un sistema di ventilazione che lo mantiene in sovrappressione, impedendo l'ingresso dei fumi nel filtro e quindi nelle scale. Se non ne disponesse, il camino sarà operante per sola estrazione naturale, fornendo l'adeguato tiraggio naturale.

La logica di attivazione della ventilazione prevede che al momento dell'ignizione, ossia quando il treno si arresta in galleria, sia la ventilazione forzata del filtro che della galleria abbiano inizio. Mentre nel filtro viene immessa una portata di aria esterna dal camino di  $18000 \text{ m}^3/\text{h}$  (pari a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dopo 30 secondi, in galleria si cerca di raggiungere un valore di velocità medio pari alla velocità critica necessaria

per eliminare il backlayering, stimata pari a 3.5 m/s; in tal modo, dopo circa un minuto, la portata di aria immessa a regime in galleria è quindi pari a 252000  $m^3/h$  (70  $m^3/s$ ). In tabella 4.2 viene riassunta cronologicamente la messa a regime della ventilazione forzata.

Tempo [s]	Eventi
	Inizio incendio
0	Attivazione ventilazione forzata longitudinale in galleria Attivazione ventilazione forzata nel filtro a prova di fumo
30	Funzionamento a regime della ventilazione forzata nel filtro a prova di fumo
60	Funzionamento a regime della ventilazione forzata in galleria

Tabella 4.2: Cronologia della messa a regime della ventilazione forzata

Gli scenari studiati vengono quindi suddivisi in tunnel aventi filtro a prova di fumo ad estrazione naturale e tunnel con filtri a prova di fumo in sovrappressione. A entrambi i tipi di tunnel vengono imposti tre tipi di ventilazione di galleria:

- ventilazione naturale (tab. 4.3 - colonna 1)
- ventilazione longitudinale downstream (tab. 4.3 - colonna 2)
- ventilazione longitudinale upstream (inversa)

In particolare, per la configurazione simmetrica della galleria rispetto all'ingresso del filtro e la posizione relativa del treno rispetto a questo, la ventilazione upstream (ossia dal portale a valle verso quello a monte) può essere assimilata come uno scenario in cui il treno si arresta prima dell'uscita di sicurezza e la ventilazione resta in direzione downstream (flusso d'aria dal portale a monte verso valle) (tab. 4.3 - colonna 3), ossia manda i fumi a valle del treno; in questo modo è possibile confrontare la stessa strategia antincendio in galleria (ventilazione di galleria imposta sempre nella stessa direzione), ma con due diverse posizioni del treno, senza dover ricorrere alla generazione di una nuova griglia di calcolo.

Il camino viene definito con una sezione pari ad 1  $m^2$ , dopo l'indagine preliminare sulle prestazioni di camini con diversi valori di sezione (cap. 4.1), confrontando per ogni caso l'effettiva efficacia di ogni soluzione, mediante l'osservazione della presenza quantitativa dei fumi nel camino e nelle scale oltre alla temperatura lungo la via di esodo, nel filtro e all'ingresso delle scale. La geometria considerata è quella descritta nel cap. 3.1.3.

Degli studi preliminari hanno consentito di verificare che la combustione, simulata mediante la creazione di una superficie in cui fluisce una portata di metano pari a 0,2 kg/s, avvenga nella zona del sotto-cassa del treno, per una potenza termica HRR pari a 10 MW. Il modello di turbolenza implementato è di tipo LES, per la risoluzione diretta dei vortici di grande dimensione e la modellazione di quelli di dimensione minore. La griglia utilizzata, senza alcun ulteriore raffinamento di specifiche zone, ha dimensione media dello spigolo di cella di 15 cm. Nel corso delle

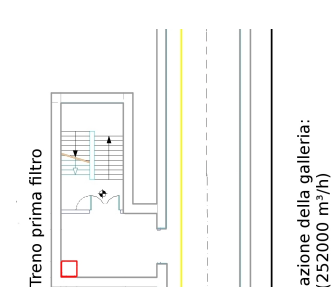
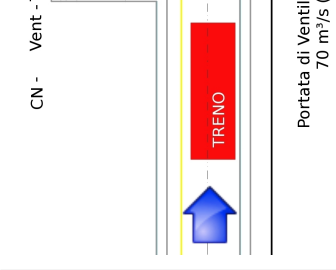
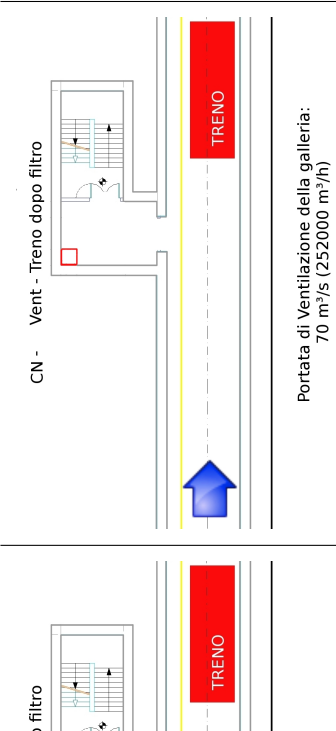
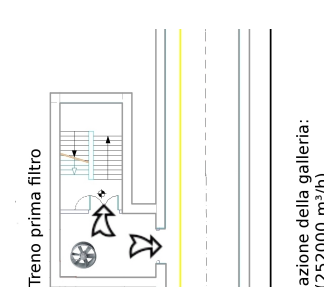
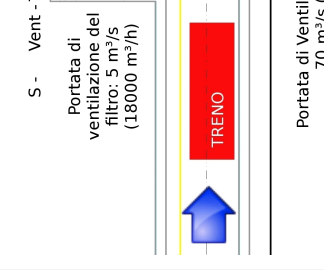
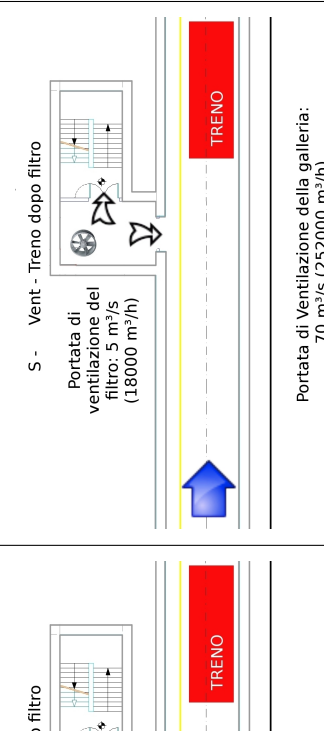
1	2	3
<p>CN - noVent - Treno dopo filtro</p> 	<p>CN - Vent - Treno dopo filtro</p> 	<p>CN - Vent - Treno prima filtro</p>  <p>Portata di Ventilazione della galleria: 70 m<sup>3</sup>/s (252000 m<sup>3</sup>/h)</p>
<p>S - noVent - Treno dopo filtro</p> 	<p>S - Vent - Treno dopo filtro</p> 	<p>S - Vent - Treno prima filtro</p>  <p>Portata di Ventilazione della galleria: 70 m<sup>3</sup>/s (252000 m<sup>3</sup>/h)</p>

Tabella 4.3: Colonna 1: Scenario senza ventilazione di Galleria; Colonna 2: Scenario con treno dopo il filtro-Ventilazione Longitudinale Downstream; Colonna 3: Scenario prima del filtro-Ventilazione Longitudinale upstream

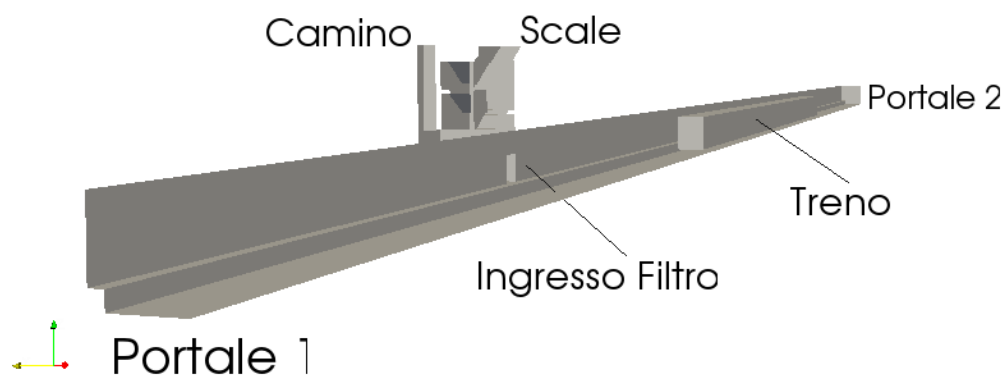


Figura 4.5: Vista dello scenario completo

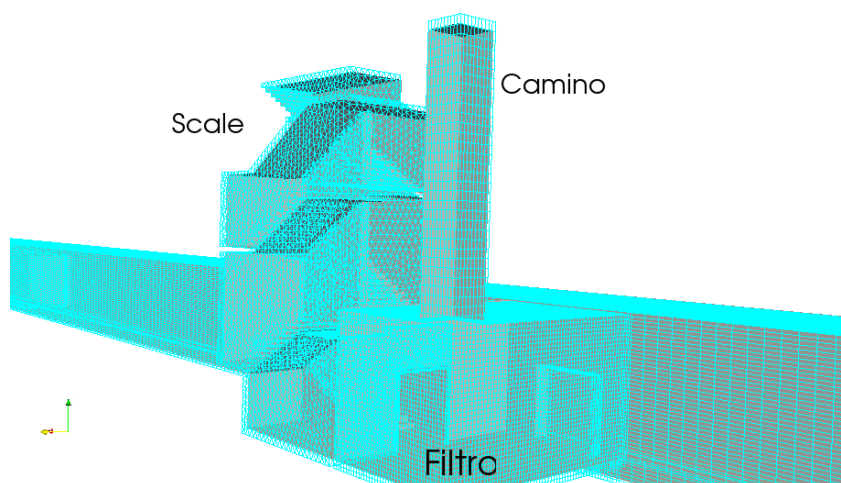


Figura 4.6: Particolare del filtro a prova di fumo con scale e camino

simulazioni si sono evidenziate delle difficoltà in alcuni casi legati alla presenza di celle tetraedriche nella zona delle scale, dove non è stato possibile creare un efficace mesh esaedrica limitando il numero di celle (il cui totale, per limiti computazionali è stato sempre fissato a un massimo di 2 milioni).

### 4.3 Confronto ventilazione naturale e forzata

Nell'analizzare i risultati ottenuti sono stati monitorati gli andamenti delle portate smaltite dal camino e dalle scale per le diverse configurazioni di ventilazione di galleria e del filtro a prova di fumo, oltre e quelli della temperatura e delle concentrazioni di  $O_2$  e  $CO_2$  nel filtro, scale e lungo la via di esodo. Nello specifico i punti considerati sono:

- Mezzeria dell'uscita di sicurezza all'ingresso filtro a prova di fumo (fig. 4.7);
- Centro del filtro a prova di fumo (fig. 4.9);
- Mezzeria dell'uscita di sicurezza all'ingresso scale di emergenza (fig. 4.9)
- Banchina della via di esodo (a 10, 30, 50 m progressivi dall'ingresso del filtro in direzione del treno, fig. 4.7)
- Tratto a monte della testa del treno (2, 10, 30 m progressivi dalla testa del treno verso il filtro, fig. 4.7)
- Tratto a valle la coda del treno (2, 10, 30 m progressivi dalla coda verso il portale del tunnel, fig. 4.8)

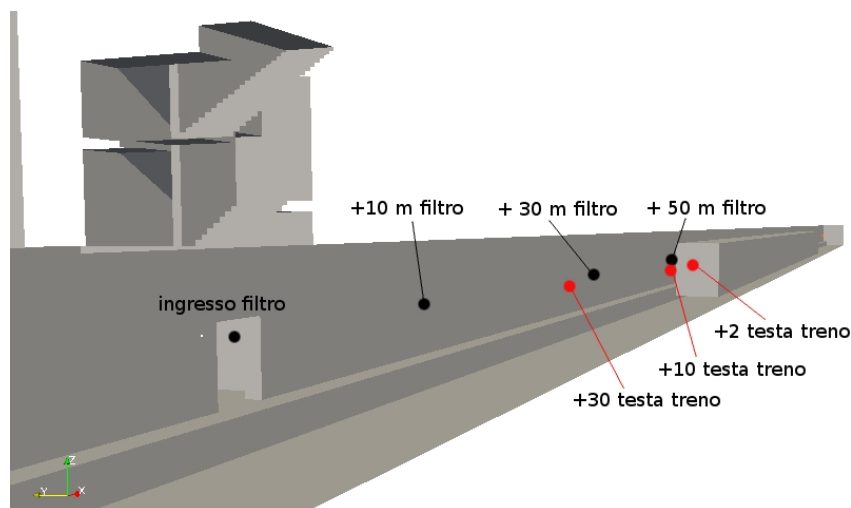


Figura 4.7: Punti di rilevazione davanti alla testa del treno

I punti vengono rilevati ad un'altezza di 1.8 metri rispetto alla banchina, in modo di poter valutare i potenziali valori di concentrazione dei prodotti tossici a cui

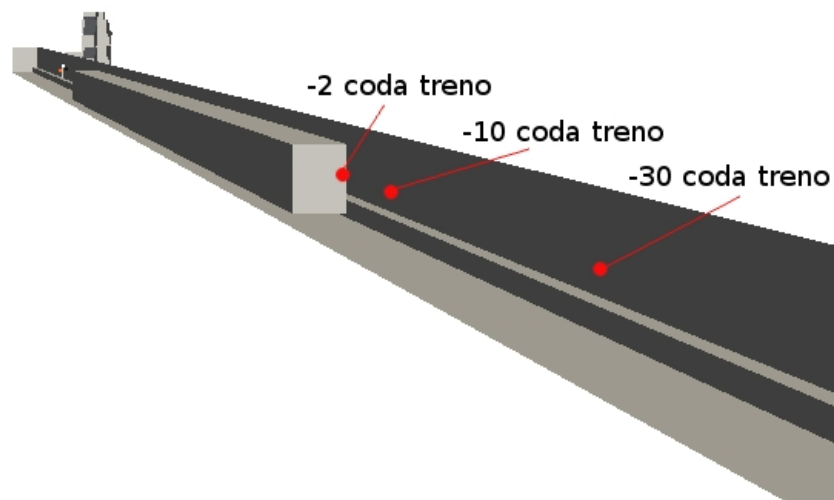


Figura 4.8: Punti di rilevazione dietro la coda del treno

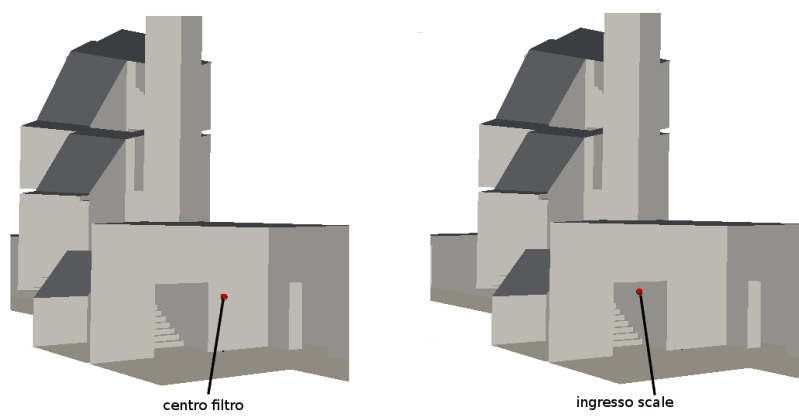


Figura 4.9: Punti considerati nel filtro e scale

i passeggeri sarebbero sottoposti. Questo valore è stata assunto in modo conservativo per gli occupanti, in quanto le norme di riferimento per la valutazione della sicurezza prevedono la misurazione di tali concentrazioni ad un'altezza di 1.6 m, rappresentativa della quota del naso.

Le portate estratte dal camino (per il caso del filtro operante per sola convezione naturale) e dalle scale (per tutti gli scenari) sono riportate in fig. 4.10 e 4.11.

Il camino estrae i gas combusti accumulatisi nel filtro a prova di fumo per gli scenari che prevedono l'assenza di ventilazione naturale in galleria e ventilazione forzata con treno che si arresta prima del filtro. In quest'ultimo caso, estrae la massima portata dopo solo un minuto dall'inizio dell'evento, e dopo due minuti i fumi escono anche dalle scale di emergenza, con elevati valori di portata. Al contrario, nel caso di ventilazione naturale in galleria, il camino lascia libere dai fumi per i primi tre minuti le scale, tempo oltre il quale si osserva una portata di fumi all'estremità del percorso di esodo. La ventilazione forzata di galleria con il treno che si arresta dopo il filtro garantisce l'esodo in sicurezza dei passeggeri, lasciando completamente libero da fumi il vano tecnico.

L'andamento dei valori di temperatura e concentrazioni di  $CO_2$ , a cui sono sottoposti i passeggeri che prendono parte all'esodo, sono riferiti a:

- 50 m dall'ingresso del filtro (fig. 4.12 e 4.16 )
- 30 m dall'ingresso del filtro (fig. 4.13 e 4.17 )
- 10 m dall'ingresso del filtro (fig. 4.18 e 4.22 )
- ingresso del filtro (fig. 4.19 e 4.23)

La sicurezza del percorso di esodo è fortemente dipendente dalla posizione relativa del treno rispetto al filtro e dalla direzione di ventilazione in galleria. se tale ventilazione viene imposta in modo favorevole sono garantite delle condizioni di sicurezza in accordo con i criteri prescelti. Al contrario, una ventilazione sfavorevole alla fuga dei passeggeri rende difficile il raggiungimento dell'uscita di sicurezza, in particolare in caso di filtro con camino in estrazione naturale. La stessa problematica si osserva per il medesimo tipo di filtro in caso di assenza di ventilazione in galleria. Tali osservazioni sono fatte in considerazione di una ben definita timeline, scelta in modo cautelativo rispetto ai tempi di attivazione delle unità ventilanti, infatti il fumo accumulatosi nel transitorio di attivazione degli stessi non può essere spazzato via istantaneamente: in questo senso l'immissione di aria comporta nella configurazione upstream un freno al loro movimento e una conseguente destratificazione che non permette di assicurare con l'immissione una condizione di sicurezza migliore che nel caso della ventilazione naturale.

Nel caso di ventilazione sfavorevole all'esodo si nota come il camino di ventilazione non riesca ad estrarre tutti i fumi nel filtro, che quindi entrano nelle scale. Se la ventilazione in galleria è di tipo naturale solo verso la fine della simulazione si nota un flusso di fumi entrante.

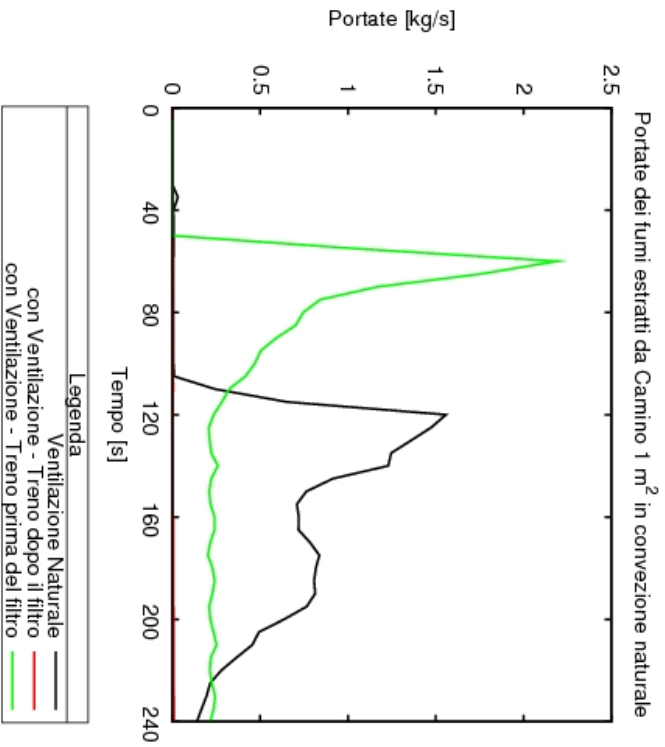


Figura 4.10: Andamento delle portate dei fumi smaltite di camini di  $1 \text{ m}^2$  per le diverse strategie di ventilazione di galleria e filtro in estrazione naturale; quota dell'incendio di -10 m

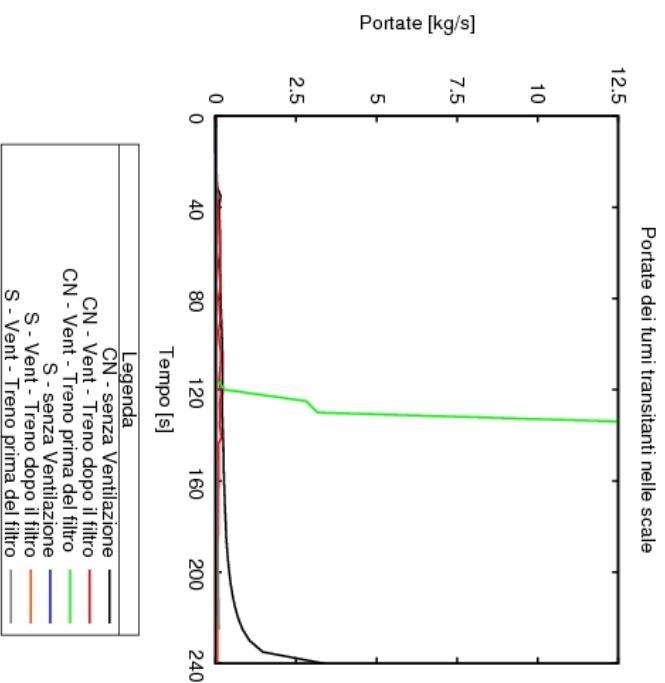


Figura 4.11: Andamento delle portate dei fumi dalle scale per le diverse strategie di ventilazione (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da camino del filtro); quota dell'incendio di -10 m



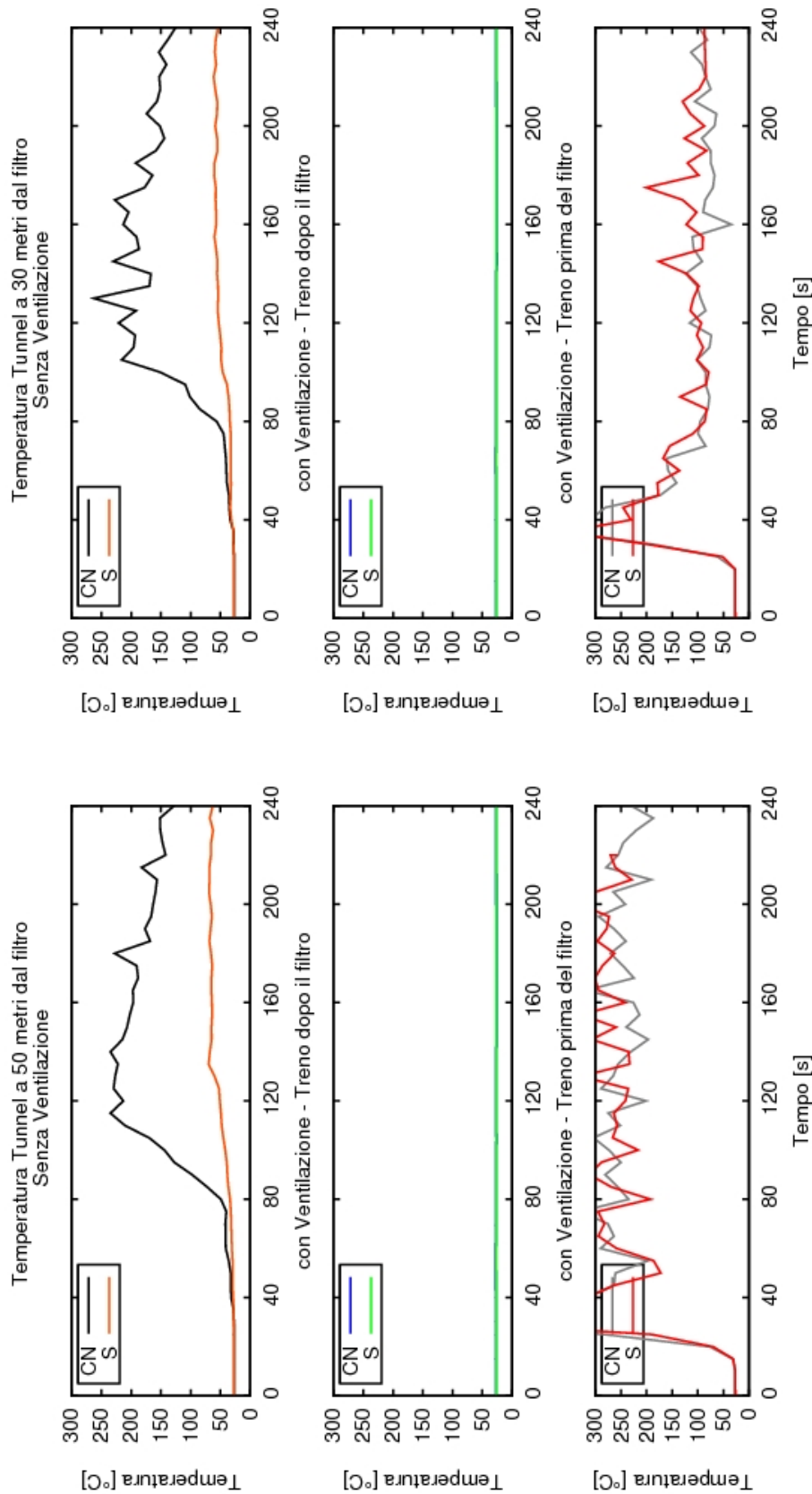


Figura 4.12: Andamento delle Temperature - A 50 metri dall'ingresso del filtro

Figura 4.13: Andamento delle Temperature - A 30 metri dall'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)

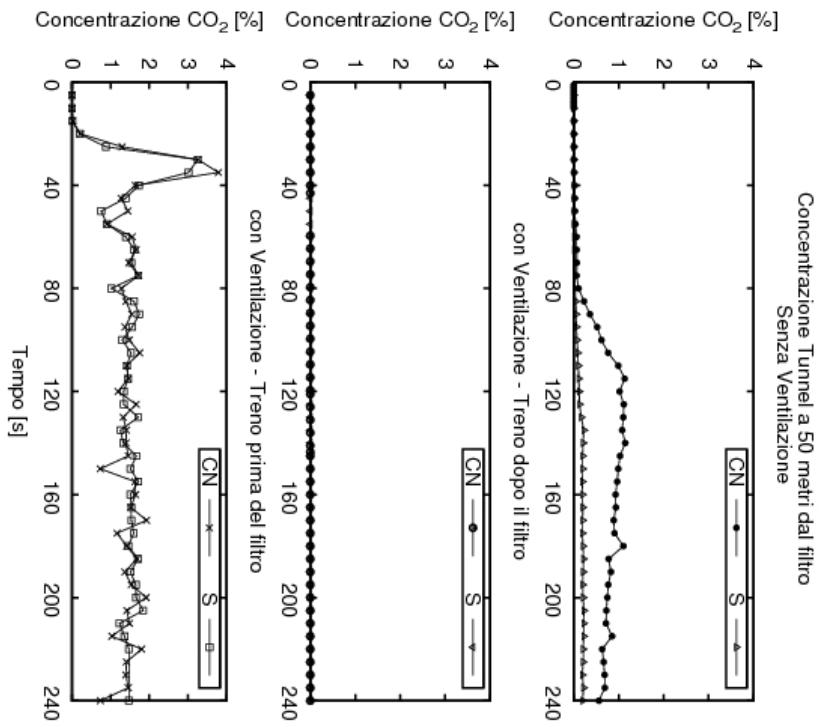


Figura 4.14: Andamento delle Concentrazioni di  $CO_2$  - A 50 metri dall'ingresso del filtro

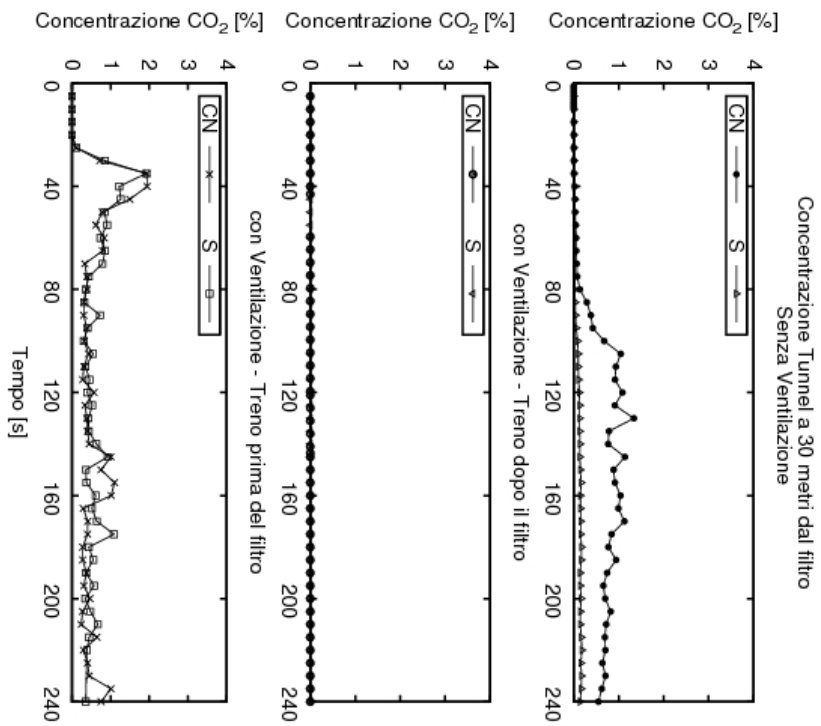


Figura 4.15: Andamento delle Concentrazioni di  $CO_2$  - A 30 metri dall'ingresso del filtro

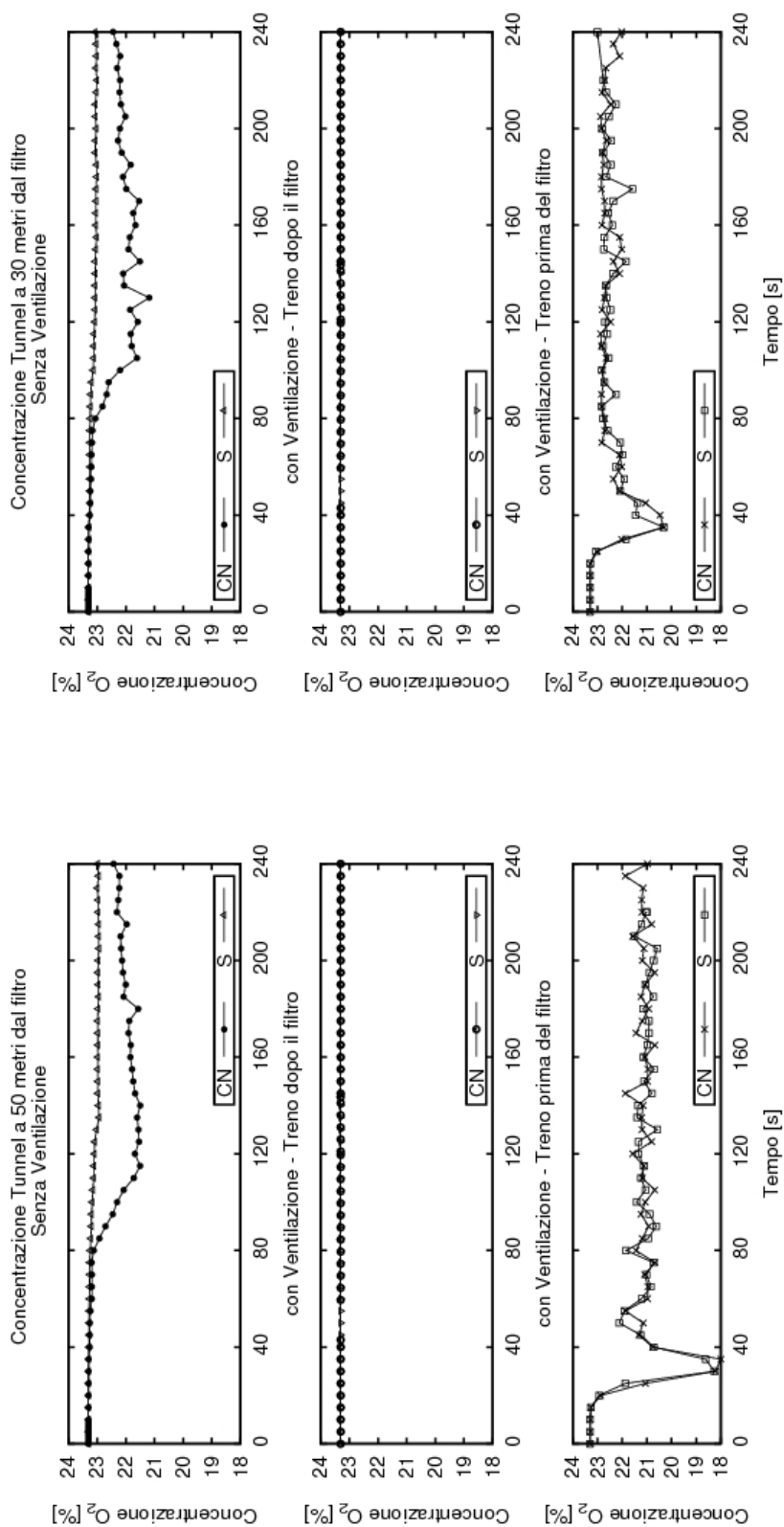


Figura 4.16: Andamento delle Concentrazioni di O<sub>2</sub> - A 50 metri dall'ingresso del filtro

Figura 4.17: Andamento delle Concentrazioni di O<sub>2</sub> - A 30 metri dall'ingresso del filtro

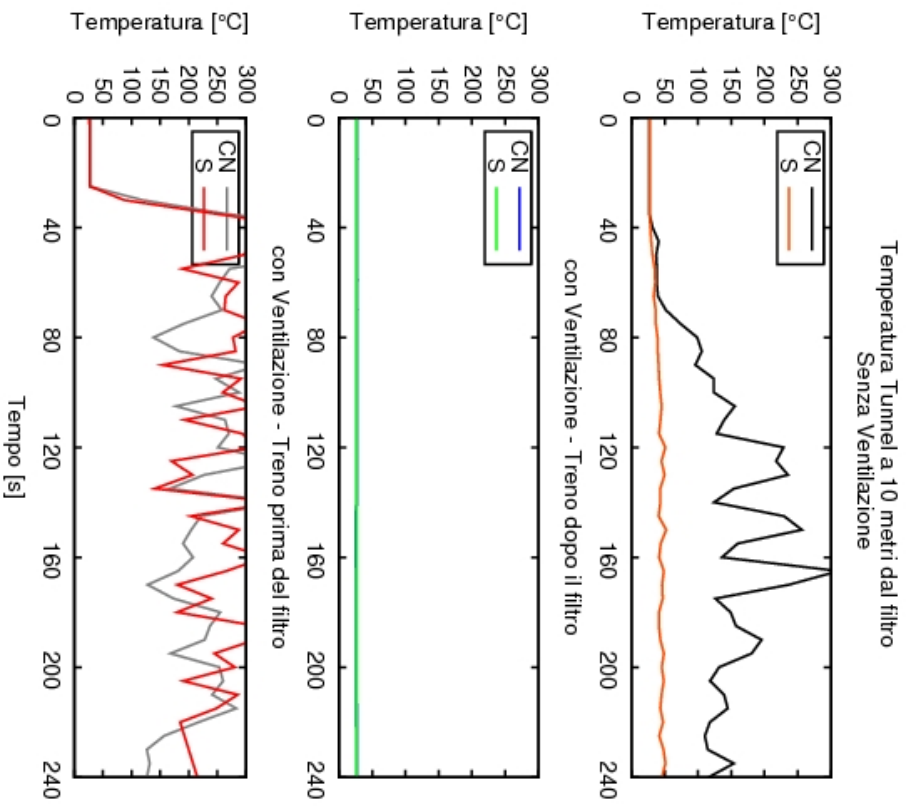


Figura 4.18: Andamento delle Temperature - A 10 metri dall'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)

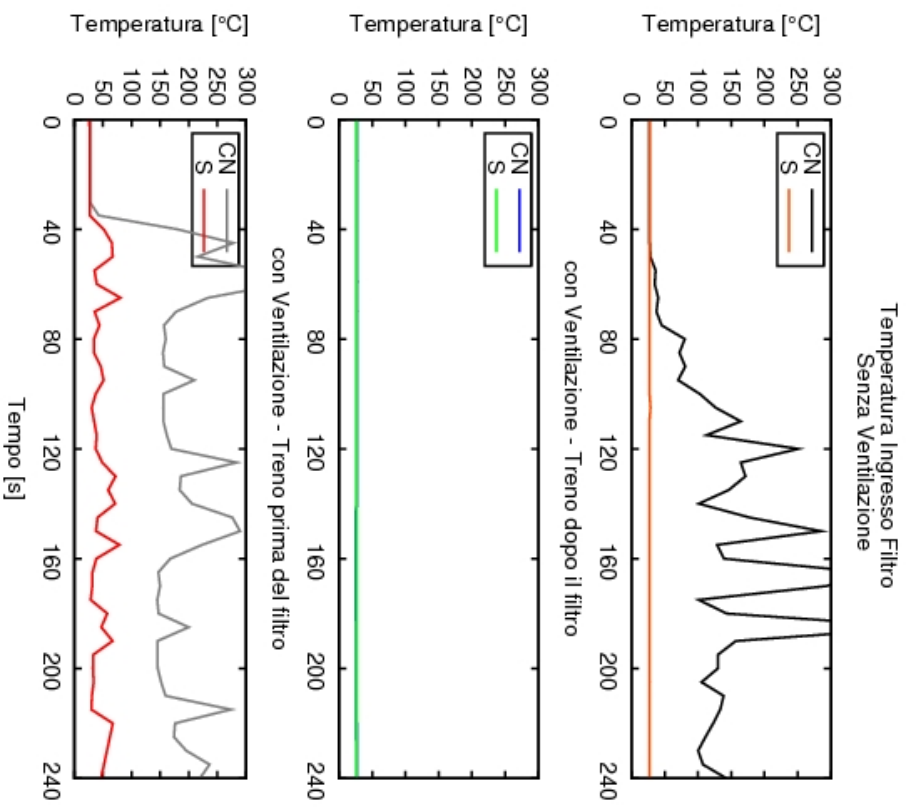


Figura 4.19: Andamento delle Temperature - All'ingresso del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)

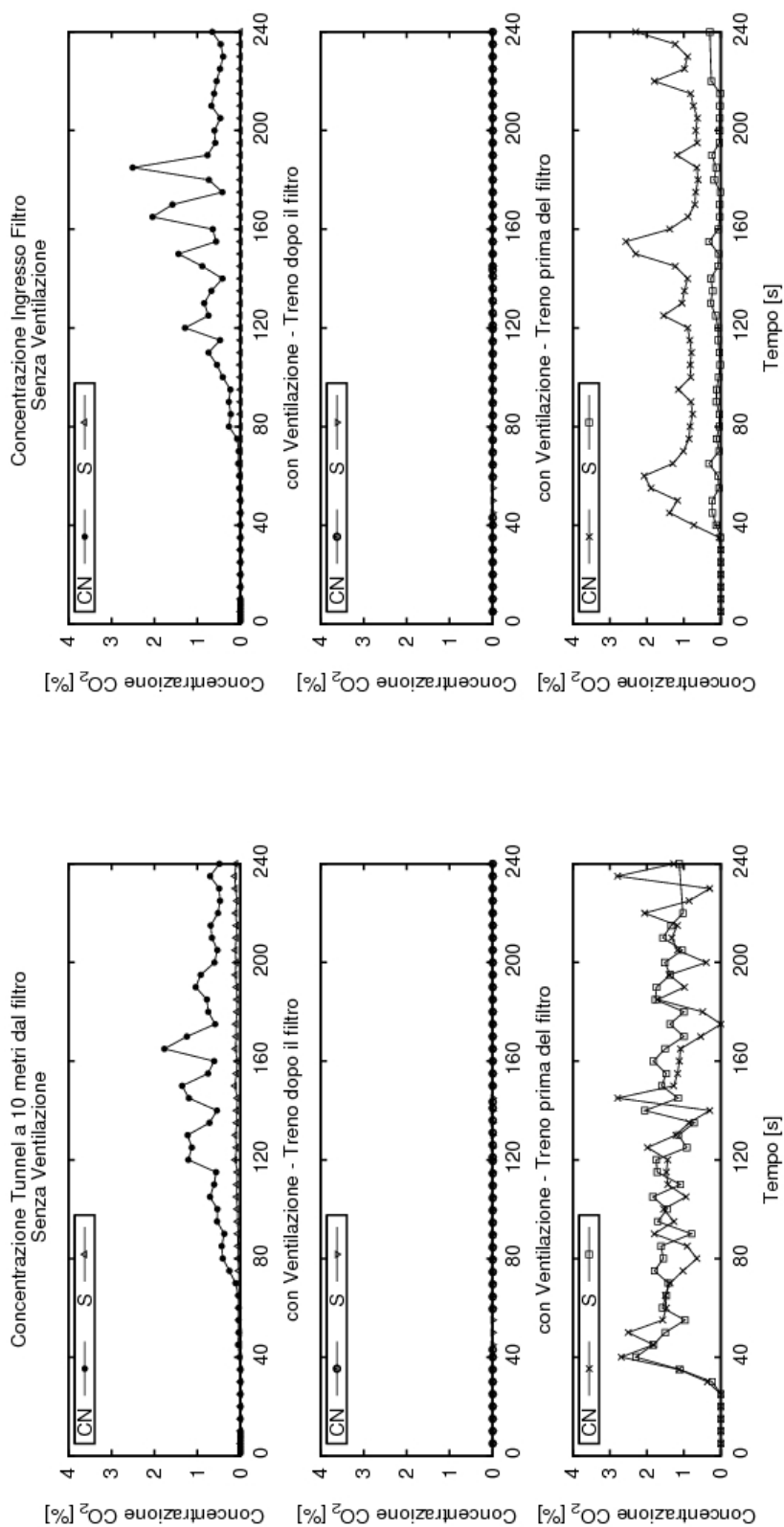


Figura 4.20: Andamento delle Concentrazioni di CO<sub>2</sub> - A 10 metri dall'ingresso del filtro

Figura 4.21: Andamento delle Concentrazioni di CO<sub>2</sub> - All'ingresso del filtro

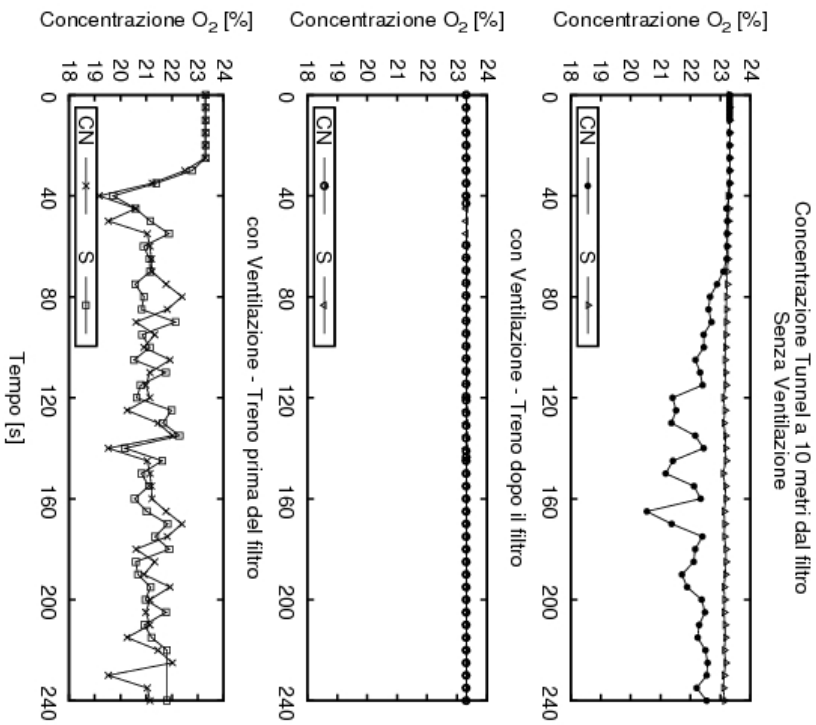


Figura 4.22: Andamento delle Concentrazioni di  $O_2$  - A 10 metri dall'ingresso del filtro

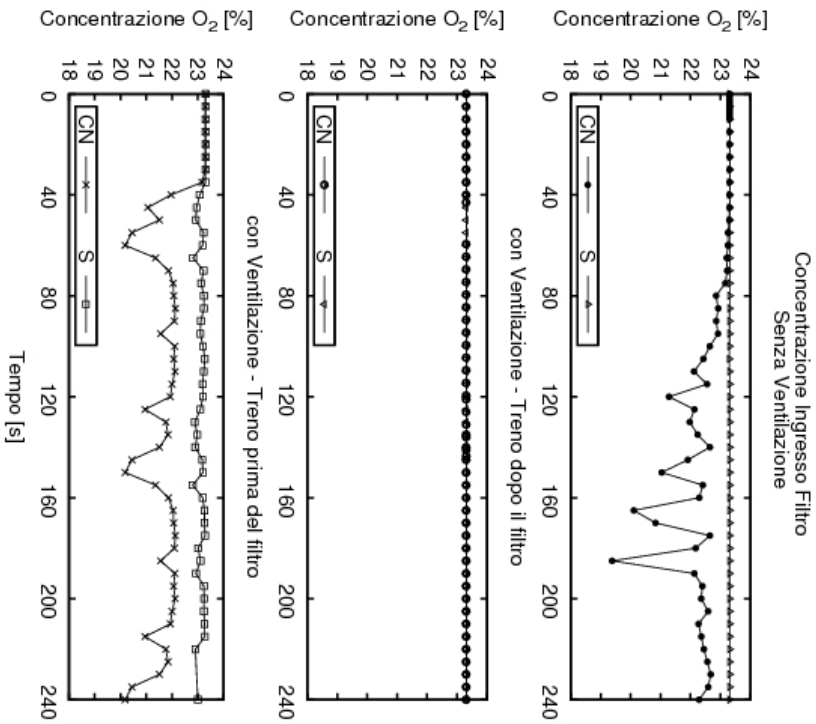


Figura 4.23: Andamento delle Concentrazioni di  $O_2$  - All'ingresso del filtro

I filtri in sovrappressione garantiscono, indipendentemente dalla ventilazione in galleria, una possibilità di permanenza in sicurezza al loro interno, raggiungendo l'obiettivo di impedire l'ingresso dei fumi nel locale (fig 4.28). Quando il filtro opera in estrazione naturale i fumi non penetrano nelle scale solo sotto particolari condizioni; è quindi importante conoscere la sua posizione rispetto al treno in galleria. Tuttavia, anche in questo caso, le condizioni ambientali all'interno delle scale di emergenza non sono tali da pregiudicare la fuga in sicurezza dei passeggeri.

In fig. 4.30 sono riportati i valori di velocità misurati normalmente rispetto alla sezione dell'uscita di sicurezza in ingresso del filtro. L'effetto della sovrappressione è efficace per evitare l'ingresso dei fumi nel filtro, mentre nei casi in cui è presente il camino di ventilazione e la ventilazione in galleria muove i fumi in direzione del filtro le velocità nel punto di misura sono molto levate, ossia è presente un flusso di fumi entrante.

In figura 4.31 si confronta l'andamento dei valori di temperatura di fronte al treno, in direzione dell'uscita di sicurezza, sia che il convoglio si arresti prima che dopo il filtro. Tali valori sono indice della presenza di fumi in direzione del filtro, ossia di sviluppo del plume lungo la direzione di esodo, che si vuole contrastare con la ventilazione forzata in galleria. La rapida messa a regime del flusso d'aria in galleria, che supera la velocità critica stimata dai tecnici di Metropolitana Milanese, impedisce la formazione della colonna dei fumi quando il treno si arresta dopo l'uscita di sicurezza. Il caso opposto presenta ovviamente alti valori di temperatura, osservato che la direzione di ventilazione non cambia.

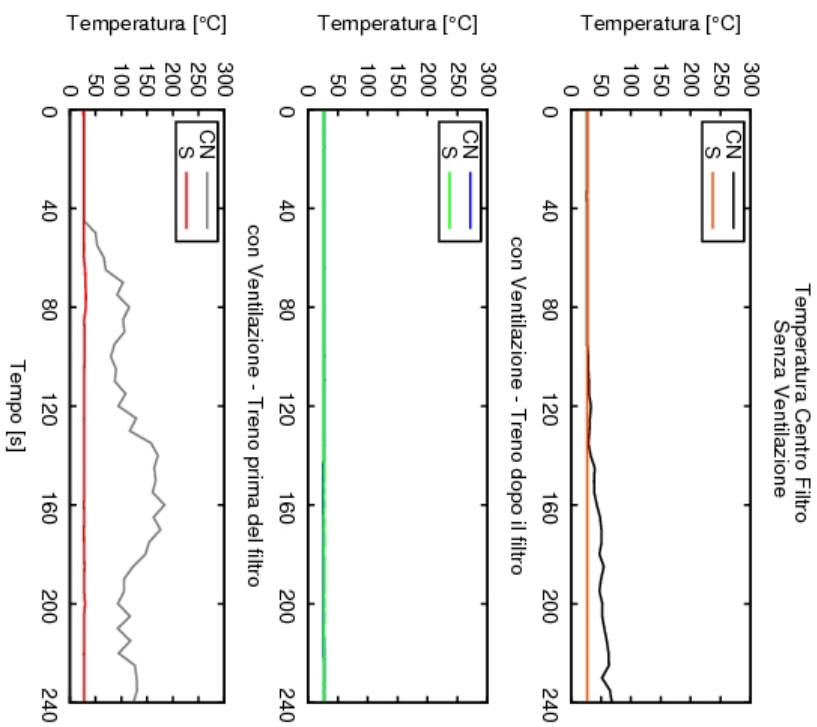


Figura 4.24: Andamento delle Temperature - Al centro del filtro (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)

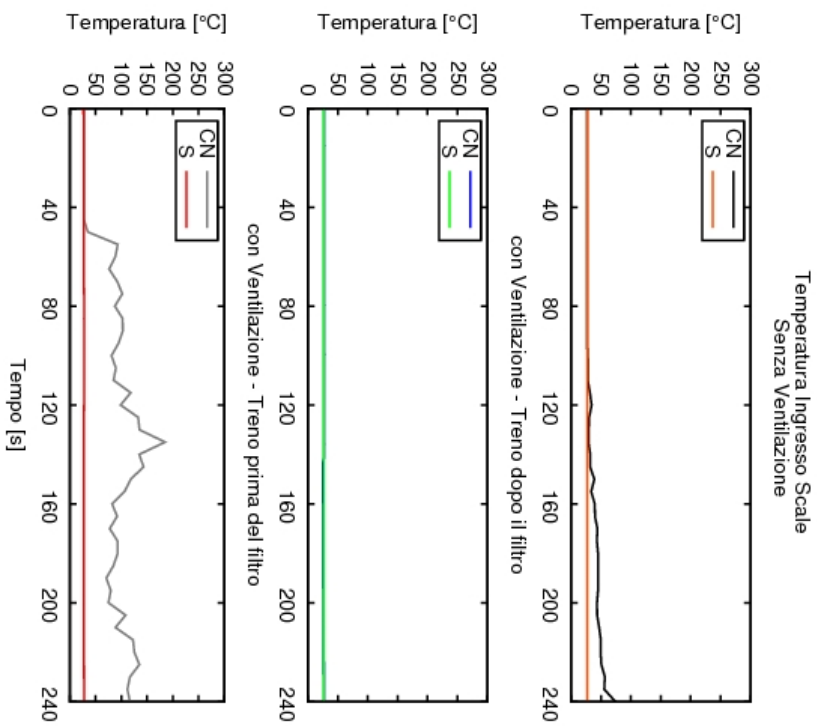


Figura 4.25: Andamento delle Temperature - All'ingresso delle scale (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)



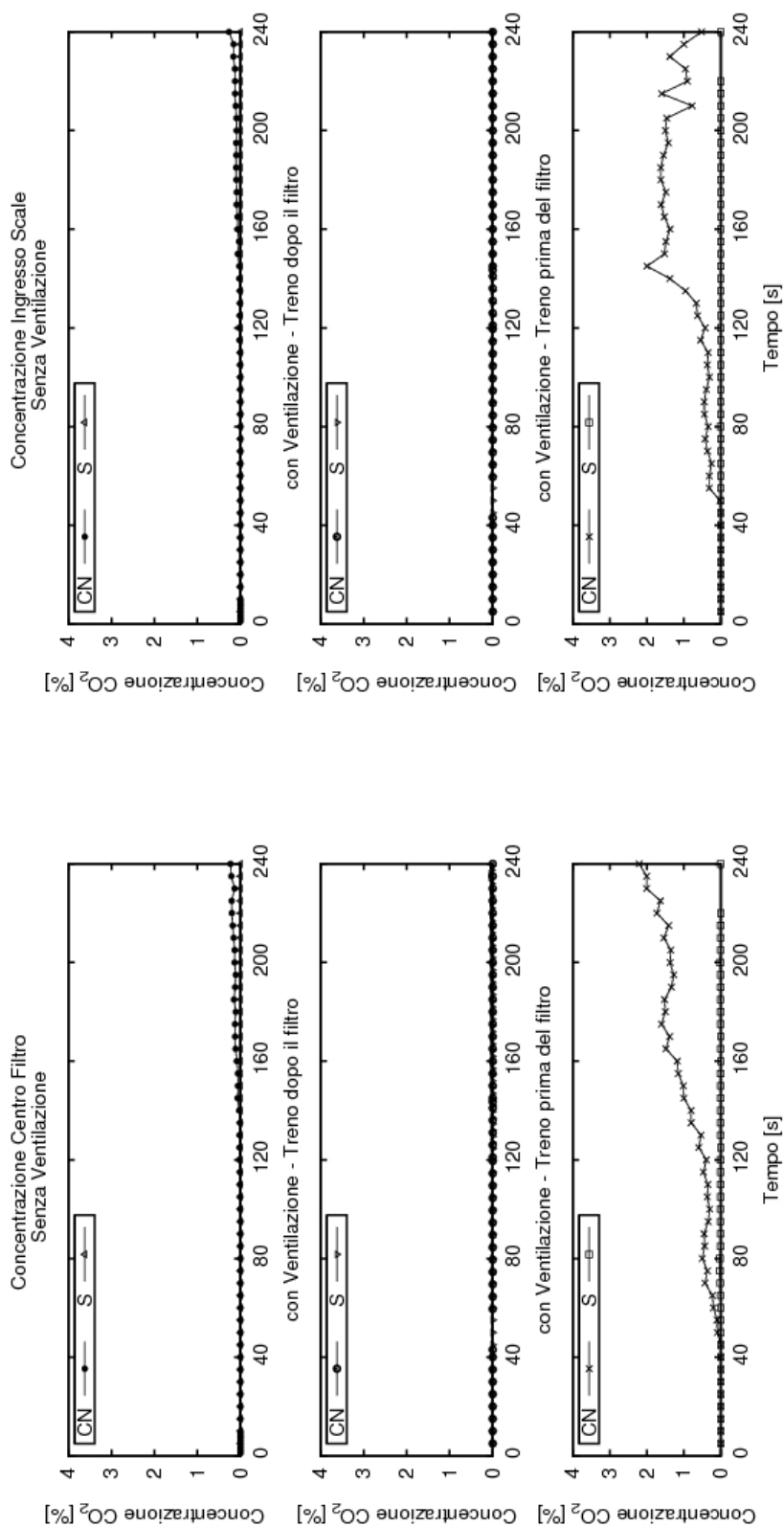


Figura 4.27: Andamento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> - All'ingresso delle scale

Figura 4.26: Andamento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> - Al centro del filtro

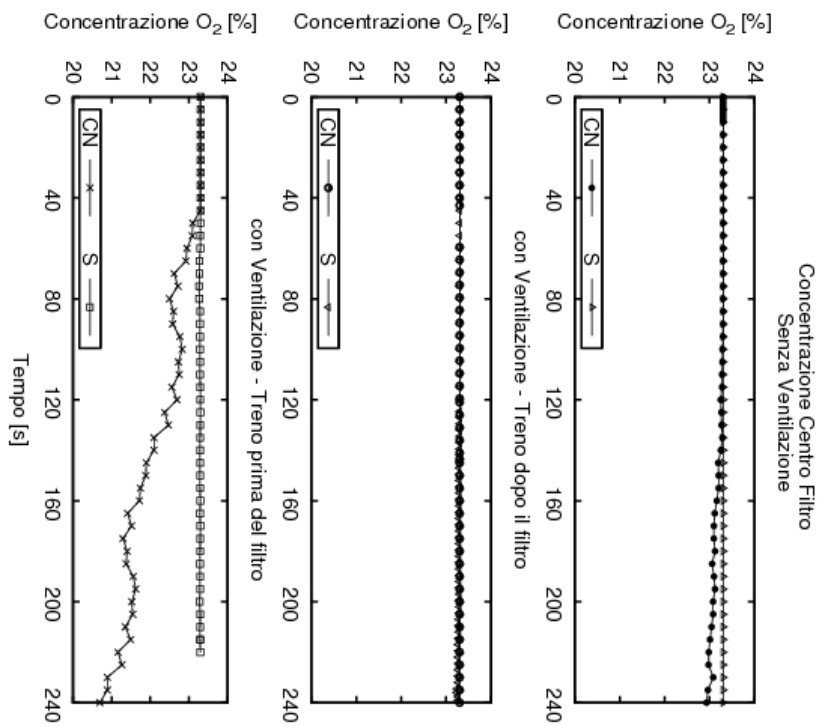


Figura 4.28: Andamento delle concentrazioni di O<sub>2</sub> - Al centro del filtro

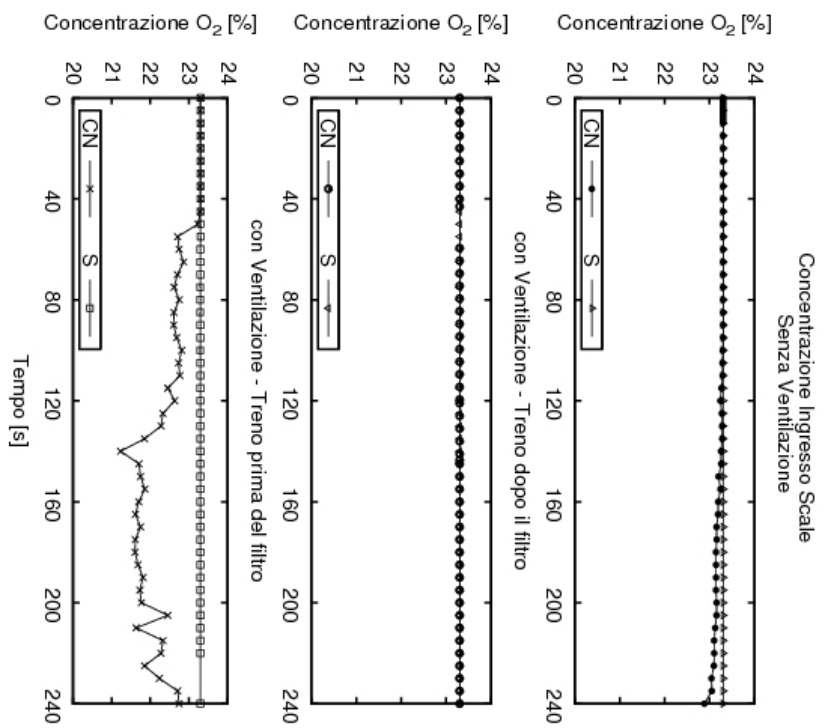


Figura 4.29: Andamento delle concentrazioni di O<sub>2</sub> - All'ingresso delle scale

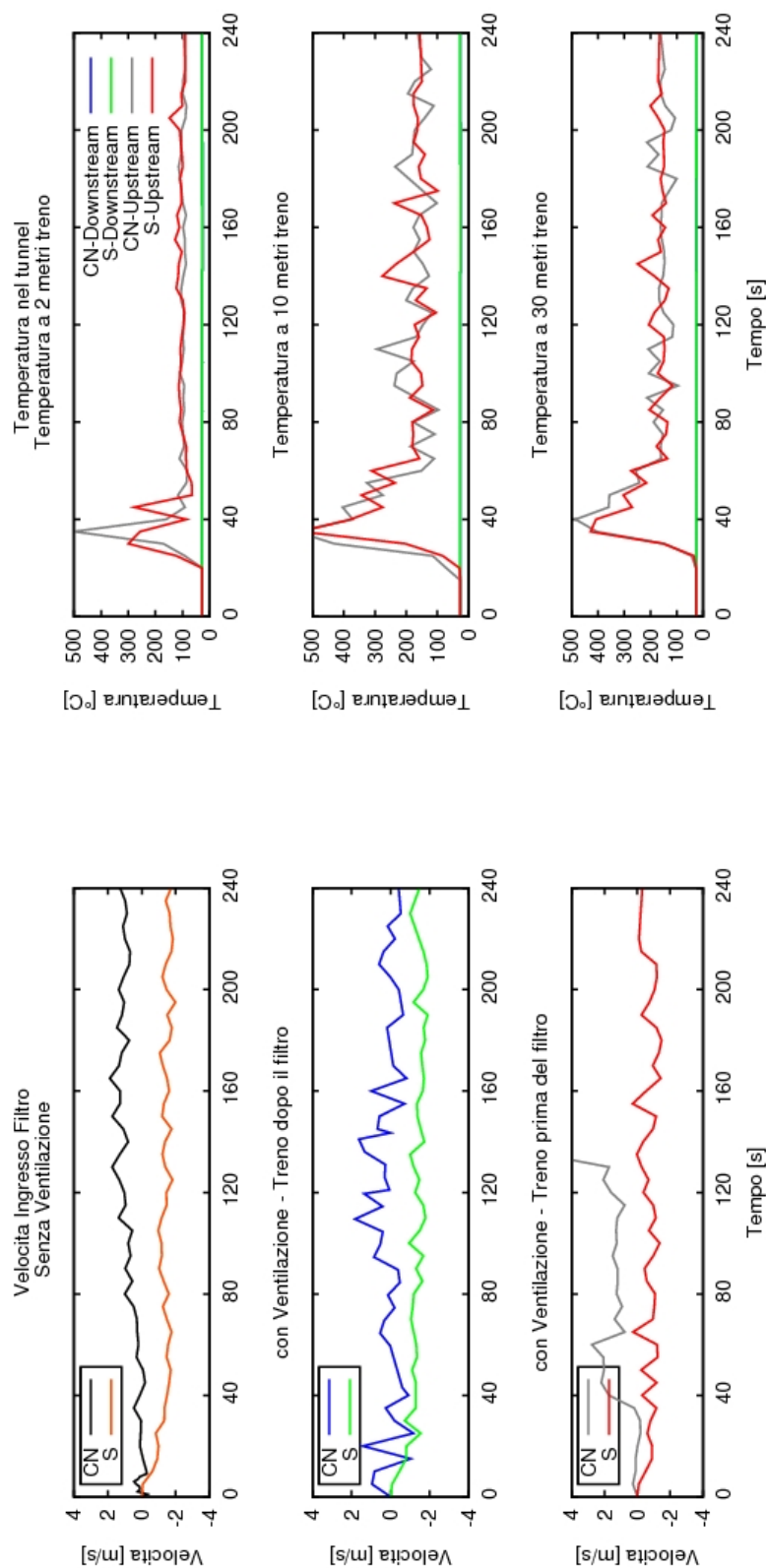


Figura 4.30: Andamento delle Velocità nella mezzeria dell'ingresso al filtro - 1.8 m dal piano banchina (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro)

Figura 4.31: Andamento delle temperature per la valutazione del backlayering a diverse distanze - 1.8 m dal piano banchina - (S = filtro in sovrappressione; CN = estrazione naturale da cammino del filtro; downstream = treno che si arresta dopo il filtro; upstream = treno che si arresta prima del filtro)



## Capitolo 5

# Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro ha riguardato lo studio delle conseguenze degli incendi negli ambienti confinati mediante l'impiego dei codici di calcolo CFD. Le simulazioni di cui ci siamo occupati mostrano come si possa supportare il dimensionamento di sistemi anche complessi, come quelli antincendio asserviti alle linee metropolitane, mediante analisi comparative e sulla base di opportune ipotesi. L'obiettivo di tali simulazioni è stato quello di prevedere lo sviluppo e la propagazione dei fumi in un tratto di linea di metropolitana interrata compresa tra due stazioni, che solitamente sono poste a distanze tali tra loro da richiedere un'uscita di sicurezza intermedia, che deve necessariamente essere protetta attraverso il cosiddetto filtro a prova di fumo, per garantire il mantenimento di idonee condizioni ambientali per l'esodo in sicurezza degli occupanti.

Infatti nei tratti interrati di galleria che collegano due stazioni oltre ad essere installati, come sistemi di controllo degli incendi, degli idranti a parete (non vengono tipicamente previsti dei sistemi antincendio automatici), sono disposte delle uscite di sicurezza a intervalli più o meno regolari nei rispetti delle distanze massime definite sulla base di criteri di opportunità o di normative eventualmente vigenti. Nel considerare le conseguenze degli incendi sull'esodo degli occupanti garantito nello studio in esame grazie alla presenza di dette uscite di sicurezza, assumono fondamentale importanza i sistemi di ventilazione, che sono il principale strumento per permettere l'esodo e l'eventuale intervento delle squadre di soccorso. Il sistema di ventilazione antincendio della galleria qui considerato è quello più diffuso, ovvero longitudinale, attivato in caso di emergenza, ma la cui efficacia per l'evacuazione delle persone risente dalla posizione relativa del treno rispetto all'uscita di sicurezza, potendo anche compromettere l'efficacia stessa del filtro, di cui abbiamo considerato due possibili alternative di funzionamento: in estrazione naturale o in sovrappressione.

Per l'ottimizzazione mediante l'impiego dei codici dei tipici problemi dell'antincendio occorre effettuare determinate ipotesi semplificative, nonché definire coerentemente con i modelli impiegati i criteri di sicurezza da perseguire. Infatti è la definizione dei criteri di sicurezza che consente il confronto delle diverse soluzioni per permettere un'analisi comparativa in grado di supportare la progettazione antincendio, osservando quali consentano di ottenere migliori risultati. La messa a punto dei valori di soglia e dei relativi tempi di esposizione, oltre i quali non è più garantita la permanenza in sicurezza nell'ambiente, è ancora in fase di approfondimento e definizione a livello globale, e dovrebbe avere come obiettivo quello di fornire dei valori

oggettivi, universalmente riconosciuti, a cui potersi riferire. L'altezza di rilevazione dei diversi parametri rispetto al piano della banchina è stato fissato a 1.8 m, a vantaggio della sicurezza, mentre le norme si riferiscono abitualmente ad una quota più bassa di 1.6 m, indicativa della posizione del naso [13].

L'attività ha riguardato innanzitutto la definizione e l'ottimizzazione della griglia di calcolo, dei parametri di simulazione e dei sottomodelli impiegati, con l'obiettivo di prevedere con sufficiente accuratezza lo sviluppo e la propagazione dei fumi, considerando diversi scenari, tutti concernenti un probabile incendio a bordo treno.

Le simulazioni si sono inizialmente focalizzate sulla determinazione di una ottimale sezione del camino funzionante in estrazione naturale tra diversi valori proposti, poiché non esisteva un tipico valore di riferimento. Il camino con sezione di  $1\text{ m}^2$  è quello che ha garantito le prestazioni migliori, richiamando una minore quantità di fumi rispetto alle sezioni più grandi, assicurando temperature e concentrazioni dei prodotti della combustione accettabili all'interno del filtro a prova di fumo. Appare quindi evidente come sarebbe opportuno aggiornare, almeno nel caso delle metropolitane, le linee guida in funzione delle caratteristiche degli incendi da cui è necessario proteggersi.

La fase principale dell'attività di simulazione è il confronto mirato alla valutazione dell'efficacia dei diversi comportamenti del filtro a prova di fumo, in caso di ventilazione naturale o ventilazione forzata, questo è stato condotto per diverse configurazioni: assenza o meno della ventilazione di galleria e diverse posizioni del treno rispetto al filtro a prova di fumo. Dai risultati si nota che la posizione relativa del treno rispetto al filtro e la direzione di ventilazione imposta in galleria incidono sensibilmente sulla sicurezza dei passeggeri che prendono parte all'esodo. Se tale ventilazione è favorevole sono garantite le condizioni di sicurezza in accordo con i criteri prescelti. Una ventilazione di galleria sfavorevole all'esodo ostacolerebbe la fuga dei passeggeri, evidenziandone le criticità soprattutto in caso di filtro con camino in estrazione naturale. Si nota come un diverso sistema di ventilazione di galleria, per esempio trasversale o semi-trasversale, annullerebbe l'influenza della posizione del treno rispetto all'uscita di sicurezza, intervenendo omogeneamente lungo tutta l'estensione della galleria in modo da agevolare l'allontanamento dei passeggeri dall'incendio.

Entrambe le soluzioni possono essere adottate, ma emergono delle criticità riguardo al tipo di ventilazione da adottare in galleria in combinazione con un'estrazione naturale dei fumi dal vano tecnico. I risultati mostrano come la soluzione che prevede il filtro in sovra pressione che elabora la portata imposta come vincolo di progetto sia sempre in grado di mantenere le condizioni di sicurezza adeguate, indipendentemente dalla ventilazione di galleria ipotizzata, a differenza del caso che prevede l'impiego di un camino di estrazione in convezione naturale, che invece richiede una sinergia con la ventilazione di galleria imposta. Occorre osservare che la portata immessa nel filtro ( $18000\text{ m}^3/h$ ) non è stata determinata in modo che si garantisse una certa sovra pressione atta ad impedire la risalita dei fumi attraverso le scale di emergenza, ma deriva dalle indicazioni fornite dai tecnici di Metropolitana Milanese, e si è confermata, in base ai risultati ottenuti, senz'altro sufficiente nonostante le porte dell'uscita di emergenza e di accesso alle scale vengano assunte permanentemente aperte, in senso cautelativo.

Tuttavia, a differenza del caso in cui il camino opera in estrazione naturale,

l'immissione di aria potrebbe sospingere i fumi eventualmente accumulati nel filtro anche lungo le scale penalizzando la soluzione con ventilazione forzata se l'attivazione non dovesse essere tempestiva.

Le principali criticità riscontrate per l'esecuzione delle simulazioni oggetto di questo lavoro sono principalmente inerenti alla definizione delle corrette condizioni iniziali e al contorno del dominio considerato. Infatti, per le prime, non essendo stato possibile modellare un'ampia porzione della linea, il rallentamento del treno in corsa che si arresta contemporaneamente allo sviluppo dell'incendio e l'effetto pistone dovuto all'eventuale movimento di treni presenti a monte e a valle, si è assunto un campo uniforme di velocità nulla. La ventilazione di galleria è stata imposta applicando un profilo di velocità nel tempo all'estremità del portale a monte in base ai dati disponibili in possesso dei tecnici di Metropolitana Milanese, ricavate mediante la sperimentazione e l'impiego di un codice monodimensionale in grado di simulare il comportamento della linea nel suo complesso. Inoltre si è visto come lo scambio termico dei fumi con le pareti disperdenti di confinamento ha un'incidenza significativa sul moto degli stessi dovuto al raffreddamento, ma i dati disponibili per la descrizione delle proprietà termiche di scambio di dette pareti e i tempi piuttosto brevi dell'indagine numerica non hanno giustificato un'indagine accurata in tal senso, cosa che sarebbe interessante eseguire considerando la risposta dinamica delle strutture.

Le simulazioni sono state condotte per un transitorio di 240 secondi, in quanto le indicazioni sull'efficacia delle diverse strategie obiettivo dell'indagine coi tempi di attivazione previsti non richiedevano un tempo maggiore; tuttavia strategie e scenari diversi richiederebbero tempi anche molto più lunghi. Non sono state considerate diverse caratteristiche geometriche della linea (tipi e dimensioni delle sezioni, pendenza e affondamento), diverse potenze dell'incendio di progetto e differenti tempistiche di attivazione dei sistemi di ventilazione, ma solo diverse posizioni relative del treno: per poter ottenere valutazioni di valenza più generale sulle prestazioni del sistema, si auspica un prosieguo dell'attività che possa in questo senso completare l'indagine svolta. I risultati ottenuti, limitatamente alle configurazioni considerate, permettono di esprimere comunque delle valutazioni significative sulle diverse strategie.





# Elenco dei Simboli

$\alpha'$	costante di risucchio
$\beta$	rapporto tra velocità dell'aria e velocità del treno
$\beta_c$	coefficiente di dilatazione cubica $[1/K]$
$\Delta$	dimensione caratteristica della griglia di calcolo del modello LES
$\Delta H_c$	calore di combustione $[kJ/kg]$
$\Delta h_f^0$	entalpia di formazione standard della generica specie chimica $[kJ/kg]$
$\epsilon$	velocità di dissipazione $[W]$
$k$	energia cinetica turbolenta $[J]$
$\kappa$	costante di Von Karman
$\mu$	viscosità dinamica $[Pa \cdot s]$
$\mu_s$	SGS eddy viscosity $[Pa \cdot s]$
$\nu$	viscosità cinematica $[m^2/s]$
$\Omega$	parametro adimensionale per la valutazione dell'effetto pistone
$\dot{\Omega}_k$	velocità di formazione massica della specie $k$ per unità di volume $[kg/(m^3s)]$
$\omega$	frazione massica
$\Pi$	produttoria
$\rho$	densità $[kg/m^3]$
$\sigma$	rapporto tra sezione del treno e sezione del tunnel
$\underline{\underline{\sigma}}$	tensore degli sforzi
$\sigma_{SB}$	costante di Stefan-Boltzmann $[W/(m^2K^4)]$
$\sum$	sommatoria
$\tau_\eta$	tempo di Kolmogorov $[s]$
$\tau_{ij}^s$	sforzi di Reynolds delle scale di sottogriglia (SGS) $[kg/(m^2s)]$

$\xi$	frazione di miscela
$A$	fattore pre-esponenziale equazione di Arrhenus
$a_0$	velocità di deformazione caratteristica di Kolmogorov
$b$	raggio del plume fire [ $m$ ]
$c_p$	calore specifico a pressione costante [ $J/(kgK)$ ]
$C_s$	parametro del modello LES
$D, d$	diametri [ $m$ ]
$Da$	numero di Damköhler
$f$	frequenza [ $Hz$ ]
$\mathbf{f}_k$	forza di volume [ $N/m^3$ ]
$f_t$	fattore adimensionale d'attrito del treno
$Fr$	numero di Froude
$g$	accelerazione gravitazionale [ $m/s^2$ ]
$Gr$	numero di Grashof
$h$	entalpia specifica [ $kJ/kg$ ]
$I$	radiosità [ $W/m^2$ ]
$\mathbf{j}_k$	flusso diffusivo molecolare
$L, l$	lunghezza [ $m$ ]
$M$	Magnitudo [ <i>danni/numero eventi dannosi</i> ]
$PM$	massa molecolare [ $kg/kmol$ ]
p.c.	potere calorifico [ $kJ/kg$ ]
p.c.i.	potere calorifico inferiore [ $kJ/kg$ ]
$p$	pressione [ $Pa$ ]
p.c.s.	potere calorifico superiore [ $kJ/kg$ ]
$P_i$	probabilità
$\dot{Q}$	potenza termica [ $W$ ]
$\mathbf{q}$	flusso termico [ $W/m^2$ ]
$\dot{q}$	termine sorgente dell'energia per unità di volume [ $W/m^3 \cdot s$ ]
$\bar{r}_j$	velocità di reazione netta in condizioni medie [ $m/s$ ]

---

$R^*$	costante universale dei gas [ $J/(kmolK)$ ]
$R$	rischio [ $danni/\Delta t$ ]
$S$	superficie [ $m^2$ ]
$T$	temperatura [ $K$ ]
$t$	tempo [ $s$ ]
$U, u$	velocità [ $m/s$ ]
$v_r$	velocità di risucchio dell'aria nel plume fire [ $m/s$ ]
$V$	volume [ $m^3$ ]
$z$	altezza [ $m$ ]



# Bibliografia

- [1] P. Andreini. *Manuale dell'ingegnere meccanico*. Seconda edizione. Hoepli. 2005.
- [2] P. Andreini et al. "Single and Double track Metro Tunnels: Comparison between different fire protection ventilation strategies". In: *2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail*. 2009.
- [3] R. Barro e F. Ongaro. "La progettazione antincendio di una linea metropolitana". In: *Antincendio Marzo* (2012), pp. 24–42.
- [4] P. Chatterjee et al. "A model for soot radiation in buoyant diffusion flames". In: *Proceedings of the Combustion Institute (33)* (2011), pp. 2665–2671.
- [5] B. H. Chiam. "Numerical Simulation of a Metro Train Fire". Tesi di laurea mag. Christchurch: University of Canterbury, 2005.
- [6] D. Drysdale. *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley, 1998.
- [7] D. Ettorre e L. Iannantuoni. "Memorial Tunnel Natural Ventilation Test Validation With FireFoam". In: *FM Global Open Source Fire Modeling Workshop*. Vol. in pubblicazione. Boston, MA 2011.
- [8] D. Ettorre e L. Iannantuoni. "Simulazione di scenari d'incendio in ambienti confinati con codici CFD: validazione e applicazione in scenari di metropolitana". In: *Convegno Scientifico Nazionale "Sicurezza nei sistemi Complessi"*. Vol. in pubblicazione. Politecnico di Bari 2011.
- [9] OpenFOAM Foundation. *OpenFOAM*. 2012. URL: <http://www.openfoam.org/version2.1.0/>.
- [10] OpenFOAM Foundation. *OpenFOAM User Guide*. Version 2.1.0. 2011.
- [11] FM Global. *FireFOAM*. 2012. URL: <http://code.google.com/p/firefoam-dev/>.
- [12] L. Iannantuoni et al. "Simulazione di Scenari d'incendio in ambienti confinati con codici CFD: Validazione e applicazione in scenari di metropolitana". In: *Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali*. Vol. in pubblicazione. Università di Pisa 2012.
- [13] British Standards Institution. *BS 7974 - The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6)*. 2004.
- [14] B.F. Magnussen e B.H. Hjertager. "On the mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion". In: *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. A cura di The Combustion Institute. 1976, pp. 719–729.

- [15] B.J. McCaffrey. *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. Rapp. tecn. NBSIR, 1979.
- [16] Decreto del Ministero dell'Interno. *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*. Pubblicato in Gazzetta Ufficiale del 22 maggio 2007, n. 117. 9 maggio 2007.
- [17] Decreto del Ministero dell'Interno. *Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi*. Pubblicato in Gazzetta Ufficiale del 12 dicembre 1983, n. 339. 30 novembre 1983.
- [18] NFPA. *A Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. National Fire Protection Association, 2003.
- [19] V. Novozhilov. "Computational fluid dynamics modeling of compartment fires". In: *Progress in Energy and Combustion Science* 27 (2001), pp. 611–666.
- [20] National Institute for Occupational Safety e Health. *Immediately Dangerous to Life and Health*. 1995. URL: <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intrid14.html>.
- [21] C. Ortolani. *Casi di combustione accidentale*. Libreria Clup, 2005.
- [22] C. Ortolani. *Combustione*. Maggioni Editore, 2008.
- [23] J.J. Riley e A.W. Cook. "Subgrid-scale modeling for turbulent reacting flows". In: *Combustion and Flame* 238 (1998), pp. 593–606.
- [24] SFPE. *Handbook of Fire Protection Engineering*. terza edizione. Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- [25] J. Smagorinsky. "General Circulation Experiments with the Primitive Equations". In: *Monthly Weather Review* 91 (1963), pp. 99–164.
- [26] D. B. Spalding e B. E. Launder. "The numerical computation of turbulent flows". In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (3) (1974), pp. 269–289.
- [27] D.B. Spalding. "Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames". In: *Thirteenth Symposium (International) on Combustion*. A cura di The Combustion Institute. 1971, pp. 649–657.
- [28] Decreto del Ministero dei Trasporti. *Norme di Prevenzione incendi nelle metropolitane*. Pubblicato in Gazzetta Ufficiale del 2 marzo 1988, n. 51. 30 novembre 1983.
- [29] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. *UNI 8379 - Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia) - Termini e definizioni*. 2000.
- [30] H. Versteeg e W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman. 1995.
- [31] Y. Wang, P. Chatterjee e J. L. de Ris. "Large eddy simulation of fire plumes". In: *Proceedings of the Combustion Institute* (33) (2011), pp. 2473–2480.