

# POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

## **Prevenzione e sicurezza antincendio nelle stazioni metropolitane: applicazioni di Fire Safety Engineering per l'ottimizzazione dei sistemi di controllo degli incendi nell'utilizzo di modelli analitici di simulazione**



**Relatori:**

Prof. Ing. Roberto Vancetti  
Ing. Emiliano Cereda  
Ing. Filippo Così

**Candidato:**

Caterina Buzano

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

# ABSTRACT

Il presente elaborato affronta il tema della prevenzione incendi nell'ambito delle stazioni metropolitane. Nella prima parte viene fatta un'analisi del quadro normativo vigente e in particolare delle criticità e peculiarità riguardanti le infrastrutture pubbliche in situazioni di emergenza, quali ad esempio aspetti impiantistici e comportamentali. Successivamente vengono descritte le caratteristiche della metropolitana torinese concentrandosi in particolare sulle tipologie di stazioni e sulle soluzioni progettuali adottate. Viene quindi affrontato il caso studio della stazione tipologica "Nizza", andando ad esaminare i sistemi che sono stati impiegati per la rilevazione, la segnalazione, l'allarme e l'estrazione dei fumi. La verifica è stata effettuata mediante simulazioni fluidodinamiche e prove sperimentali. Sono quindi stati messi a confronto sia da un punto di vista quantitativo che da un punto di vista qualitativo i due tipi di indagine, spiegando in modo dettagliato i differenti approcci e scenari d'incendio. Si è approfondito il tema dei sistemi di controllo, studiando gli effetti derivanti dall'installazione di impianti di spegnimento automatico di tipo water mist: in particolare si sono ricercati i parametri utili alla loro definizione sui modelli di calcolo per possibili sviluppi futuri.

The research deals with the topic of fire prevention in the metro stations environment. The first part is devoted to an analysis of the extant normative framework, with a particular focus on the criticalities and peculiarities of public infrastructure in emergency situations, such as plant-engineering-related and behavioural aspects. The following part describes the features of the Turin metro system, especially with reference to the station types and the related engineering solutions. The mentioned section will then provide a case-study of the "Nizza" station model, through the analysis of the systems which have been used for the fire smoke detection, signalling, alarm and extraction. The test has been undertaken with the help of fluid dynamics simulations and experimental trials. The two methods have been then compared both from a quantitative and from a qualitative viewpoint, through a detailed explanation of the different approaches and fire scenarios. An in-depth analysis has been devoted to the issue of control systems, through the study of the effects produced by the installation of automatic fire extinguishing systems of water mist type: in particular the mentioned analysis focused on the parameters useful for their definition on the calculation models for possible further developments.

# Indice

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2. La prevenzione incendi nell'ambito delle stazioni metropolitane .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Stato dell'arte sul quadro normativo vigente .....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Decreto del Ministro dei trasporti dell'11 gennaio 1988 “norme di prevenzione incendi nelle metropolitane” .....	5
2.1.2 D.M. 21 ottobre 2015 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle metropolitane.” .....	6
<b>2.2 Peculiarità e criticità delle stazioni metropolitane .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Caratteristiche tecnologiche ed impiantistiche dell'opera .....	19
2.2.2 Caratteristiche comportamentali degli occupanti.....	20
<b>3. La Metropolitana torinese.....</b>	<b>24</b>
3.1 Storia ed evoluzione .....	25
3.2 Caratteristiche dei treni.....	27
3.3 Tipologia di stazioni .....	29
3.4 Normative applicate .....	30
3.5 Possibili cause di eventi anomali e incidenti .....	30
<b>4. Caso studio: la stazione tipologica “Nizza” .....</b>	<b>32</b>
4.1 Sistema di rilevazione, segnalazione e allarme .....	33
4.2 Sistema di estrazione dei fumi.....	34
4.3 La gestione dei fumi nell'incendio .....	35
4.4 Simulazione fluidodinamica .....	36
4.4.1 Descrizione del dominio computazionale e creazione delle meshes .....	37
4.4.2 Definizione della reazione di combustione e della superficie di fiamma .....	38
4.4.3 Devices, slices e isosuperfici .....	41
4.4.4 Scenari d'incendio .....	42
4.4.5 Definizione delle soglie di prestazione.....	44
4.4.6 Risultati Scenario 1.....	44
4.4.7 Risultati Scenario 2.....	66

4.4.8	Calcolo ASET .....	82
<b>4.5</b>	<b>Simulazioni reali del moto dei fumi.....</b>	<b>83</b>
4.5.1	Descrizione delle prove.....	83
4.5.2	Assetto delle ventilazioni.....	86
4.5.3	Risultati .....	88
4.6	Confronto tra i due tipi di simulazione e conclusioni .....	92
<b>5.</b>	<b>Approfondimento sui sistemi di controllo: installazione di impianti di spegnimento automatico .....</b>	<b>93</b>
5.1	Il sistema water mist .....	95
5.2	Modellazioni CFD .....	97
5.1.1	Definizione del water mist su FDS .....	98
5.1.2	Criticità di FDS.....	100
5.2	Utilizzo del water mist nelle stazioni metropolitane .....	101
<b>6.</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>103</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>105</b>

# 1. Introduzione

Il continuo miglioramento degli standard di sicurezza nella progettazione dei sistemi di trasporto pubblico ha portato gradualmente ad affrontare le tematiche relative alla prevenzione incendi con più attenzione e avvalendosi di programmi di calcolo di fluidodinamica computazionale.

Il principale problema della situazione emergenziale legata agli incendi nelle metropolitane è quello della gestione dei fumi e per questo è necessario prevedere un adeguato sistema di ventilazione di emergenza. L'obiettivo è quello di verificare la corretta progettazione dell'impianto attraverso delle analisi e delle simulazioni fluidodinamiche.

Lo scopo del seguente elaborato è quello di illustrare ed analizzare, dopo un'attenta analisi del quadro normativo vigente e in particolare delle criticità e peculiarità riguardanti le stazioni metropolitane in situazioni di emergenza, i sistemi di controllo degli incendi e dei fumi.

In particolare si affronterà il caso studio della stazione tipologica "Nizza" della metropolitana torinese, andando ad esaminare i sistemi che sono stati impiegati per la rilevazione, la segnalazione, l'allarme e l'estrazione dei fumi. Tale verifica non verrà fatta soltanto mediante simulazioni fluidodinamiche, ma anche attraverso delle prove sperimentali per poter verificare, soprattutto da un punto di vista qualitativo, l'andamento dei fumi ed evidenziare le criticità dei programmi di calcolo come FDS.

Successivamente verrà approfondita l'applicazione e l'ottimizzazione nei modelli analitici di simulazione dei sistemi di controllo automatico degli incendi, facendo particolare riferimento al sistema di tipo water mist.

## 2. La prevenzione incendi nell'ambito delle stazioni metropolitane

La prevenzione incendi secondo la legge italiana, indica il complesso delle attività finalizzata alla prevenzione del rischio e/o finalizzate ad evitare il sorgere di incendi.

Si distinguono due approcci fondamentalmente diversi: approccio prescrittivo e approccio prestazionale.

L'approccio prescrittivo è basato sul concetto che "il rispetto di determinati requisiti nel progetto rappresenti la garanzia del raggiungimento dei livelli minimi di sicurezza". In poche parole l'approccio "consiste nel rispetto di regole tecniche, basate su strumenti di calcolo e consistenti in misure preventive e protettive da rispettare come vincoli di progetto e codificate in disposizioni legislative. Il rispetto di tali regole rappresenta, dunque, garanzia di un livello di rischio residuo accettabile". In particolare nell'approccio prescrittivo "non è ammessa alcuna soluzione progettuale alternativa a quella imposta dal legislatore. Qualora, per caratteristiche strutturali o architettoniche, le stesse risultino non applicabili, la sicurezza antincendio del progetto viene assicurata dall'applicazione di disposizioni suppletive concordate con i VV.F. (procedimento di deroga art. 6 del d.p.r. 151 del 1 agosto 2011)".

Il metodo prestazionale si può considerare un supporto all'approccio prescrittivo.

L'approccio prestazionale infatti consente di raggiungere un livello di dettaglio progettuale maggiore in quanto si basa "sullo studio dell'evoluzione dinamica dell'incendio e quindi sulla previsione scientifica della prestazione della struttura progettata" ed è strutturato "sui criteri che caratterizzano l'ingegneria della sicurezza antincendio, Fire Safety Engineering (F.S.E)". Tale approccio "affronta la valutazione del rischio incendio mediante la previsione di scenari verosimili e lo studio delle prestazioni minime del progetto durante l'evoluzione dell'incendio".<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Raffaele Sabatino, Daniela Freda, Antonella Pireddu, Stefano Baldassarini, Stefano Manna, Mara Lombardi, Nicolò Sciarretta, Mauro Caciolai, Piergiacomo Cancelliere, Filippo Così, Vincenzo Cascioli; *Il codice di prevenzione incendi. La progettazione antincendio. Applicazioni pratiche.*

## **2.1 Stato dell'arte sul quadro normativo vigente**

Le metropolitane sono attività soggette ai controlli di prevenzione incendi secondo la verifica delle condizioni di sicurezza antincendio di cui all'articolo 2, comma 2 per il Regolamento approvato con il D.P.R. 1° agosto 2011, n. 151 entrato in vigore il 7 ottobre 2011. L'attività è la numero 78: aerostazioni, stazioni ferroviarie, stazioni marittime, con superficie coperta accessibile al pubblico superiore a 5.000 m<sup>2</sup>; metropolitane in tutto o in parte sotterranee.

L'attuale quadro normativo di riferimento per la prevenzione degli incendi nelle metropolitane si basa principalmente su due decreti:

- Decreto del Ministro dei trasporti dell'11 gennaio 1988 “norme di prevenzione incendi nelle metropolitane”;
- D.M. 21 ottobre 2015 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle metropolitane”.

Le norme del 1988 non vengono in alcun modo abrogate dal decreto del 2015, ma vengono inglobate all'interno della regola tecnica, imponendo un progressivo adeguamento.

### **2.1.1 Decreto del Ministro dei trasporti dell'11 gennaio 1988 “norme di prevenzione incendi nelle metropolitane”**

“Oggetto delle norme sono le misure di prevenzione e protezione dagli incendi da porre in atto nella realizzazione delle linee metropolitane di nuova costruzione, i cui progetti esecutivi non siano stati approvati alla data di entrata in vigore del decreto. Il campo di applicazione delle Norme di prevenzione riguarda esclusivamente le opere civili e gli impianti fissi delle stazioni sotterranee e delle linee sotterranee. Sono escluse le stazioni fuori terra, le linee fuori terra, i depositi e le officine in superficie con i relativi edifici annessi, le sottostazioni elettriche, salvo quelle non separate, il materiale rotabile salvo i materiali impiegati nelle vetture”.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Decreto Ministeriale del 10 marzo 1998, Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.

Il D.M. 11.01.88 è suddiviso in 10 punti:

1. Premesse;
2. Elementi costitutivi di una metropolitana, quali le stazioni e le gallerie con relativi manufatti;
3. Definizioni, che individuano, ai fini della sicurezza, il percorso di sfollamento, il percorso protetto e l'area protetta;
4. Criteri progettuali per la costruzione delle stazioni;
5. Criteri progettuali per la costruzione delle gallerie;
6. Impianti tecnici di stazione;
7. Impianti tecnici di galleria;
8. Segnalazioni;
9. Materiali impiegati nelle vetture;
10. Norme transitorie.

Le presenti norme non comprendono la possibilità di ricorrere a modellazioni di incendio e non contengono alcuna informazione per guidare il professionista nell'individuare e descrivere lo scenario d'incendio di progetto. Inoltre non viene citato il comportamento del personale (movimento e manutenzione) e degli utenti.

### **2.1.2 D.M. 21 ottobre 2015 “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle metropolitane.”**

Il D.M. 21 ottobre 2015 è stato pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 253 del 30 ottobre 2015 ed è rivolto sia alle metropolitane in esercizio sia a quelle ancora da progettare e costruire.

Tale decreto fornisce le disposizioni per la progettazione, la costruzione e l'esercizio delle metropolitane. Lo scopo è quello di raggiungere gli obiettivi primari di prevenzione dagli incendi, seguendo i successivi criteri:

- minimizzare la probabilità di insorgenza degli incendi e nel caso in cui un incendio si sviluppi limitarne la sua propagazione anche verso attività contigue;
- assicurare l'esodo degli occupanti in caso di incendio;
- garantire la stabilità delle strutture portanti;

- garantire la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza.

La Regola Tecnica di prevenzione incendi consta di nove capi e di un'Appendice Tecnica:

- Capo I Generalità;
- Capo II Elementi costitutivi delle metropolitane;
- Capo III Caratteristiche architettoniche e strutturali delle metropolitane;
- Capo IV Criteri progettuali per l'esodo dalle metropolitane;
- Capo V Impianti di ventilazione di emergenza;
- Capo VI Impianti di protezione attiva, estintori e segnaletica;
- Capo VII Impianti elettrici e di comunicazione;
- Capo VIII Organizzazione e gestione della sicurezza antincendio;
- Capo IX Materiale rotabile;
- Appendice tecnica.

Dei capi sopra citati si riportano di seguito quelli che contengono informazioni propedeutiche e fondamentali per lo scopo del presente lavoro di tesi. In particolare vengono descritti i principali contenuti del Capo IV, V e VI del D.M. 21 Ottobre 2015.<sup>3</sup>

## CAPO IV

### CRITERI PROGETTUALI PER L'ESODO DALLE METROPOLITANE

#### IV.1. Tempo massimo di percorrenza del percorso di sfollamento

Il tempo massimo di evacuazione attraverso un percorso di sfollamento verso un luogo sicuro è fissato in 10 minuti così costituiti:

- galleria di stazione: non oltre 4 minuti dal capo più lontano della banchina all'imbocco del percorso protetto più vicino;
- percorsi protetti: non oltre 6 minuti fino ad un luogo sicuro.

---

<sup>3</sup> Codice di prevenzione incendi D.M. 3 agosto 2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.

I tempi sono calcolati dal momento in cui il primo passeggero sbarca sulla banchina fino a quando l'ultima persona presente nel percorso di sfollamento raggiunge un luogo sicuro.

Nell'ipotesi di sfollamento dalla banchina in tempi inferiori a 4 minuti, è ammesso sommare il tempo residuo ai 6 minuti previsti per la percorrenza dei percorsi protetti, per un tempo totale comunque non superiore ai 10 minuti prescritti.

#### IV.2. Lunghezza massima del percorso di sfollamento

Sono stabilite le seguenti lunghezze massime:

- nella galleria di stazione, dal capo più lontano della banchina all'imbocco del percorso protetto più vicino: 45 m elevabili a 60 m nelle condizioni indicate al successivo capo IV.4;
- nei percorsi protetti, fino al luogo sicuro più vicino: 300 m;
- nelle sedi sotterranee le uscite di sicurezza dovranno essere posizionate ad una distanza reciproca massima di 900 m, in modo che la lunghezza massima del percorso di sfollamento non sia superiore a 450 m. Sono considerate uscite di sicurezza anche le stazioni.

#### IV.3. Affollamento

Il massimo affollamento ipotizzabile in banchina è dato dalla somma di due addendi:

a) il numero dei passeggeri convenzionalmente presenti su un treno, assunto pari alla capacità di un treno di massima composizione, con il carico nominale che è fissato in 4 pers./m<sup>2</sup> calcolato su una superficie pari a quella lorda interna di ogni vagone diminuita del 10%. Nel caso di banchine ad isola, il numero di passeggeri di un treno va moltiplicato per 1,5 per tener conto dell'eventuale contemporaneità di fermata di un treno sull'altro binario;

b) il numero dei passeggeri presenti in banchina, assunto pari a:

-1,5 pers./m<sup>2</sup> per stazioni di corrispondenza o interscambio modale;

-1,0 pers./m<sup>2</sup> per stazioni di transito o terminali.

#### IV.4. Percorsi di sfollamento

La stazione dovrà essere dotata di un sistema di vie di esodo tali da assicurare che da ciascuna banchina si possa raggiungere un luogo sicuro, sempre mediante almeno due percorsi di sfollamento indipendenti con accessi ragionevolmente contrapposti.

Più percorsi di sfollamento possono riunirsi, anche temporaneamente, a condizione che non avvengano rallentamenti dei flussi d'esodo e che sia sempre comunque garantita la possibilità di raggiungere un luogo sicuro mediante almeno due percorsi di sfollamento.

Ciascuna banchina deve essere servita da almeno due distinti passaggi verso la zona protetta, posizionati in modo che i percorsi verso la stessa non siano superiori a 45 m, elevabili a 60 m, ove la banchina sia munita di impianto di aspirazione posto nella galleria di stazione.

La disposizione e la larghezza delle uscite dalla galleria di stazione devono essere sempre verificate in funzione del rispetto del tempo limite di sfollamento della banchina, pari a 4 minuti, muovendosi dal capo più lontano della banchina, in modo da limitare la formazione di code ai passaggi di accesso ai percorsi protetti.

Il tratto protetto del percorso di sfollamento, che inizia immediatamente a valle delle uscite dalla galleria di stazione, dovrà essere progettato per garantire le condizioni sostenibili per la vita umana e dimensionato in funzione dell'affollamento massimo previsto in banchina, del flusso specifico dei passaggi e del tempo massimo di sfollamento dalla banchina, con una larghezza effettiva, di ciascun passaggio, comunque non inferiore a 1,80 m.

#### IV.5. Uscite di sicurezza dalle sedi sotterranee

Le uscite di sicurezza dalle sedi sotterranee potranno essere realizzate:

a) mediante scale di sicurezza larghe almeno 1,50 m installate in pozzi verticali che comunicano con la galleria mediante filtri a prova di fumo, con pressurizzazione positiva o altro sistema di ventilazione equivalente. La superficie in pianta del filtro a prova di fumo non dovrà essere inferiore a 25 m<sup>2</sup>;

b) In caso di gallerie separate a singolo binario, mediante passaggi trasversali di larghezza non inferiore ad 1,80 m ed altezza non inferiore a 2,0 m, delimitati da porte con idonee caratteristiche di resistenza al fuoco.

Le porte di accesso alle uscite di sicurezza devono avere caratteristiche di resistenza al fuoco EI 120, una larghezza minima di 1,80 m ed essere dotate di dispositivi di autochiusura e di maniglioni antipánico.

#### IV.6. Scale fisse

I pianerottoli devono avere la stessa larghezza delle scale senza allargamenti o restringimenti e devono essere lunghi almeno 1,80 m.

È consentito che due o al massimo tre rampe di scale possano confluire in un'unica rampa purché questa abbia larghezza almeno uguale alla somma di quelle confluenti ed il pianerottolo da cui origina l'unica rampa abbia la dimensione longitudinale almeno pari ad 1,5 volte la larghezza della rampa più larga confluyente.

Le pareti delle scale, per un'altezza di 2 m dal pavimento, devono essere prive di sporgenze o rientranze.

Tutte le scale devono essere munite di corrimano collocati entro un incavo del muro o comunque sporgenti non oltre 8 cm.

#### IV.7. Scale mobili

Le scale mobili a servizio di ciascun dislivello da superare, possono essere considerate nel dimensionamento dei percorsi di sfollamento, con le modalità indicate successivamente.

Ai fini del dimensionamento dei percorsi di sfollamento, sono ammessi due tipi di gestione delle scale mobili, in caso di emergenza, che devono essere oggetto di specifica valutazione e definizione nel piano di emergenza:

- blocco delle n scale mobili all'attivazione del sistema di allarme: le n-1 scale mobili per ciascun dislivello potranno essere dimensionate come scale ordinarie, secondo i parametri riportati nell'appendice tecnica, tenendo presente che quelle aventi larghezza pari o superiore a 100 cm possono considerarsi portatrici di un flusso doppio rispetto a quelle di dimensioni minori. Le scale mobili da considerare ai fini del computo, devono essere quelle che creano le condizioni più sfavorevoli ai fini dello sfollamento;

- all'attivazione dell'allarme le scale continuano a funzionare e quelle che hanno un verso contrario alla direzione dell'esodo invertono il senso di marcia, dopo fermata con apposita segnalazione e ripartenza graduale fino alla velocità di marcia, tenendo conto dell'incolumità delle persone.

Il vano motore delle scale mobili deve essere protetto con impianto automatico di spegnimento.

#### IV.8. Ascensori

Gli sbarchi degli ascensori devono essere posizionati nei percorsi protetti e possono continuare a funzionare anche in caso di emergenza.

Sono ammessi ascensori con sbarco diretto nella galleria di stazione, solo nei casi in cui risulti effettivamente impossibile adottare la soluzione sopracitata e comunque nel rispetto di quanto previsto dalla norma UNI 7744. Il funzionamento di tali ascensori dovrà essere interdetto in caso di emergenza. Gli ascensori non dovranno consentire la propagazione dei fumi tra i compartimenti e dovranno essere dotati di chiusure atte a ripristinare le caratteristiche di resistenza al fuoco della galleria di stazione.

Nelle stazioni sotterranee il cui piano banchina si trova ad una profondità superiore a 12 m, dovrà essere previsto, per ciascuna banchina, almeno un ascensore di emergenza utilizzabile anche in condizioni di soccorso e di intervento dei VV.F..

Tali ascensori possono essere attestati al piano atrio qualora:

- il piano atrio è protetto rispetto alla galleria di stazione;
- lo stesso piano non si trova a quota inferiore a -7.5 m dal piano di riferimento;
- sono garantiti, per le operazioni di soccorso, comodi accessi dall'esterno indipendenti dai percorsi presi in conto per lo sfollamento.

Gli ascensori che permarranno in uso anche durante un'emergenza dovranno essere dotati di alimentazione di riserva.

#### IV.9. Tornelli e varchi

Le linee di tornelli o varchi automatici, ove previsti, devono presentare dei passaggi di larghezza utile minima pari a 60 cm.

La larghezza complessiva delle linee di controllo, qualora non ubicate in luogo sicuro, deve essere tale da non rappresentare ostacolo allo sfollamento.

Ciascuna linea di controllo deve inoltre essere dotata di un varco per i disabili, di larghezza minima pari a 90 cm. In prossimità di tale varco deve essere presente un sistema di comunicazione con il locale dell'agente di stazione o, in mancanza di esso, con la centrale operativa del gestore dell'infrastruttura.

In caso di incendio, deve essere garantita l'apertura automatica e permanente delle linee di controllo, al fine di consentire l'esodo delle persone presenti all'interno della stazione.

### CAPO V

#### IMPIANTI DI VENTILAZIONE DI EMERGENZA

##### V.1. Criteri generali

Gli impianti di ventilazione di emergenza costituiscono un elemento fondamentale per la sicurezza nelle metropolitane e devono essere progettati e realizzati secondo la regola dell'arte, al fine di raggiungere i seguenti obiettivi:

- in caso di incendio a bordo di un convoglio che perde mobilità all'interno di una galleria, assicurare che le persone possano evacuare il convoglio usando la galleria come percorso di sfollamento fino alla stazione più vicina o ad una uscita di sicurezza. La velocità dell'aria nella galleria dovrà essere sufficiente a contrastare i fenomeni espansivi dei fumi dell'incendio in senso contrario a quello dell'aria fresca immessa in galleria (backlayering) e comunque non potrà essere inferiore a 1.5 m/s.
- in caso di incendio a bordo di un treno che è fermo in stazione, assicurare che le persone possano evacuare il convoglio percorrendo il tratto di banchina di lunghezza definita al capo IV.2, fino ad entrare nei percorsi protetti; in ogni caso non si deve verificare lo stato critico per la sicurezza umana almeno per i primi 10 minuti dall'apertura delle porte del convoglio;

- controllare la velocità dell'aria nelle prime fasi dell'incendio (fase di crescita) al fine di agevolare l'evacuazione degli utenti in galleria.

Per gallerie di sedi sotterranee di lunghezza inferiore o pari a 300 m non è necessario l'impianto di ventilazione di emergenza.

La combinazione delle logiche di attuazione degli impianti di ventilazione, intendendo sia quelli di aspirazione che di immissione, con le procedure di emergenza, deve far sì che i fumi seguano percorsi opposti a quelli dell'esodo delle persone considerando la possibilità di avviare la ventilazione meccanica in modo graduale e differenziato in funzione della posizione del treno rispetto alle uscite di emergenza e del focolaio all'interno del treno medesimo.

Gli impianti di ventilazione di emergenza dovranno essere progettati secondo i metodi della tecnica aeraulica e l'efficacia globale degli impianti nel raggiungimento degli obiettivi di cui al capo I.1, sarà verificata tramite analisi fluidodinamiche.

La verifica fluidodinamica dell'impianto dovrà essere effettuata anche su uno scenario che preveda l'attivazione degli impianti di ventilazione in condizioni di emergenza, ma senza incendio, in modo da costituire un riferimento progettuale per i successivi collaudi funzionali.

## V.2. Pozzi di estrazione fumi

Ogni tratto di galleria di lunghezza superiore ai 300 m, fra due stazioni successive, dovrà essere attrezzato con un impianto meccanico di estrazione dei fumi la cui tipologia deve essere valutata nell'ambito delle scelte progettuali con l'obiettivo di ottenere le migliori prestazioni in relazione al tipo di galleria.

I pozzi di ventilazione saranno posizionati, in linea generale, a circa metà tratta della galleria; la loro collocazione potrà essere anche diversa, ad esempio in testa alle stazioni, in relazione al cadenzamento dei treni ed all'interdistanza tra le stazioni stesse.

In caso di gallerie separate a singolo binario servite da un unico pozzo, questo deve essere completamente diaframmato in senso verticale in modo da non avere circuitazione dei fumi.

Qualora i pozzi siano utilizzati anche come accesso di emergenza, essi devono essere realizzati in modo che il percorso destinato ai soccorritori sia completamente indipendente e separato dai

percorsi di estrazione/immissione dell'aria e dei fumi. In questo caso lo sbarco dal pozzo alla galleria deve avvenire attraverso filtro a prova di fumo.

## CAPO VI

### IMPIANTI DI PROTEZIONE ATTIVA, ESTINTORI E SEGNALETICA

#### VI.1. Reti di idranti

Le reti di idranti installate nelle metropolitane devono essere progettate, realizzate e gestite secondo la regola dell'arte e quanto previsto nel Decreto del Ministro dell'Interno del 20 dicembre 2012 "Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio installati nelle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi".

Ai fini dell'applicazione della norma UNI 10779, il livello di pericolosità è pari a 3, con sola protezione di tipo interno, e alimentazione idrica almeno del tipo singolo superiore, secondo UNI EN 12845, privilegiando l'alimentazione da acquedotto, ove consentito.

Nella galleria di stazione, dovranno essere installati almeno due idranti a muro DN 45, collocati sul piano di ciascuna banchina in modo da coprire la stessa, tenuto conto del raggio di azione degli idranti a muro.

Nelle sedi confinate, qualunque sia la loro posizione rispetto al piano di riferimento, e nelle sedi sotterranee deve essere installata una tubazione idrica, derivata dalla rete idranti a servizio delle stazioni, dotata di sole valvole di intercettazione DN 45, posizionate ogni 50 m; una valvola di intercettazione DN 45 dovrà essere posizionata in prossimità dello sbarco dei pozzi di accesso di emergenza. Adeguate dotazioni di tubazioni flessibili antincendio e lance devono essere posizionate in appositi armadi alle estremità delle banchine di stazione e nei pozzi di accesso.

All'ingresso di ogni stazione dovrà essere installato, in posizione segnalata e protetta, un idrante soprasuolo minimo DN 100, conforme alla norma UNI 14384, allacciato alla rete idrica comunale, in grado di assicurare una erogazione minima di 500 l/min.

## VI.2. Impianti di spegnimento automatico

Gli impianti di spegnimento automatico, qualora presenti, devono essere progettati, realizzati e gestiti secondo la regola dell'arte e quanto previsto nel Decreto del Ministro dell'Interno del 20 dicembre 2012. "Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio installati nelle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi".

Per gli impianti di spegnimento automatico del tipo sprinkler l'alimentazione idrica deve essere almeno del tipo singolo superiore, secondo UNI EN 12845, privilegiando l'alimentazione da acquedotto, ove consentito.

Nelle attività commerciali di pertinenza della stazione dovrà essere installato un impianto di spegnimento automatico del tipo sprinkler, esteso anche all'esterno delle stesse per una fascia di profondità pari a 4 m, contenente file di due erogatori per tutto il fronte del locale.

Nelle stazioni profonde, in cui il dislivello tra banchina e piano atrio risulta superiore ai 24 m, dovranno essere installati, nella galleria di stazione, impianti di spegnimento automatico ad acqua aventi le seguenti caratteristiche:

- essere dedicati alla mitigazione degli effetti dell'incendio sul convoglio e sulle eventuali facciate di banchina, evitando il più possibile interferenze con il piano di calpestio della banchina;
- essere del tipo a diluvio, preferibilmente con sezionamenti su diversi livelli di ugelli;
- intervenire con azionamento controllato, attivando le diverse sezioni in modo da non interferire con il processo di esodo ed in modo coordinato con la ventilazione della galleria e della stazione.

## VI.3. Impianti automatici di rivelazione e allarme incendi

In ogni stazione deve essere installato un impianto automatico di rivelazione ed allarme degli incendi progettato, realizzato e gestito secondo la regola dell'arte e quanto previsto nel decreto del Ministro dell'Interno del 20 dicembre 2012 "Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio installati nelle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi".

Le sedi sotterranee devono essere dotate di un idoneo sistema in grado di fornire, al centro di controllo, la localizzazione dell'incendio al fine di poter definire le strategie di ventilazione, di sfollamento e di intervento dei soccorsi.

I segnali devono pervenire in un luogo remoto, permanentemente presidiato (24 ore su 24), da dove sia possibile l'agevole individuazione delle aree interessate dal principio d'incendio e avviare le procedure di emergenza.

Gli allarmi provenienti dai pulsanti devono essere tempestivamente verificati da personale addetto prima dell'avvio del segnale di allarme generalizzato; la verifica può essere condotta anche mediante sistemi di video sorveglianza.

Gli impianti automatici di rivelazione degli incendi devono essere installati in ogni locale o ambiente della stazione compresi:

- a) locali tecnici;
- b) locali macchine degli ascensori, vani macchine delle scale mobili e dei corridoi mobili;
- c) cavedi tecnologici e passaggi per cavi sotto le banchine;
- d) lungo le scale ed i corridoi mobili e nelle relative aree di accesso delle banchine;
- e) spazi soprastanti i controsoffitti e sotto stanti i pavimenti flottanti ed all'interno delle condotte di ventilazione.

#### VI.4. Evacuatori di fumo e calore

Gli evacuatori di fumo e calore, ove installati, devono essere progettati, realizzati e gestiti secondo la regola dell'arte e quanto previsto nel Decreto del Ministro dell'Interno del 20 dicembre 2012 "Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio installati nelle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi".

Nell'ipotesi che la superficie di riferimento non rientri nel campo previsto dalla norma UNI 9494-1 2, si potrà far riferimento alle equazioni di calcolo riportate in appendice alla medesima norma tecnica oppure alla norma NFPA 204.

#### VI.5. Estintori di incendio portatili

Nelle metropolitane devono essere installati estintori portatili aventi carica nominale minima pari a 6 kg e capacità estinguente non inferiore a 34A, 89B così dislocati:

- almeno due per ciascuna banchina nella galleria di stazione;
- in numero di uno per ogni 200 m<sup>2</sup> di superficie, nell'atrio.

Nei locali commerciali di pertinenza deve essere installato almeno un estintore ogni 100 m<sup>2</sup> e, comunque, almeno uno per ogni singola attività. In caso di piccolo deposito a servizio di un'attività, deve essere previsto un ulteriore estintore in prossimità dell'accesso a tale deposito.

A protezione dei locali tecnici non aperti al pubblico deve essere installato un estintore portatile avente carica nominale minima pari a 6 kg e capacità estinguente non inferiore a 34A 144B, posizionato all'esterno del locale, nelle immediate vicinanze del vano di accesso.

#### VI.6. Segnaletica di sicurezza

Dovrà essere installata idonea segnaletica di sicurezza, possibilmente anche con diciture in inglese, espressamente finalizzata alla sicurezza antincendio e conforme al decreto legislativo 9 aprile 2008, n.81, che segnali almeno:

- i percorsi di sfollamento e le uscite di sicurezza;
- l'ubicazione dei mezzi fissi e portatili di estinzione incendi;
- i divieti di fumare ed uso di fiamme libere;
- i pulsanti di allarme;
- il divieto di utilizzare gli ascensori in caso di incendio ove previsto.

Le uscite di sicurezza ed i percorsi di sfollamento dovranno essere evidenziati da segnaletica di tipo luminoso mantenuta sempre accesa durante l'esercizio dell'attività, alimentata sia da rete normale che da alimentazione di sicurezza.

Per le specificità connesse all'esodo di persone con disabilità dovrà essere adottata idonea segnaletica di sicurezza.

In corrispondenza degli ingressi alle stazioni dovranno essere posizionati sistemi atti a segnalare, in caso di emergenza, l'eventuale interdizione all'ingresso all'infrastruttura.

## **2.2 Peculiarità e criticità delle stazioni metropolitane**

La metropolitana viene così definita dalla norma UNIFER 8379: “sistema di trasporto rapido di massa, di elevata portata e frequenza nell'ambito delle conurbazioni, costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata con circolazione regolata da segnali e completamente autonoma da qualsiasi altro tipo di traffico. Tale sistema comprende anche le metropolitane leggere ed è caratterizzato da una sede propria isolata e dei seguenti elementi costitutivi:

- sede, escluso l'armamento e la linea elettrica di trazione;
- stazioni;
- pozzi di intertratta e di ventilazione
- opere accessorie ed impianti.”<sup>4</sup>

La popolazione "utente" della stazione metropolitana rispecchia statisticamente la distribuzione eterogenea del Paese e a seconda della fascia oraria analizzata si registrano età e utenti con caratteristiche differenti. In caso di eventi pubblici inoltre si può riscontrare un traffico più elevato.

La peculiarità di questo tipo di trasporto è l'omogeneità del materiale ferroviario che è di tipo modulare per essere il più ripetibile possibile.

---

<sup>4</sup> UNI – UNIFER 8379, Sistemi di trasporto su rotaia od altra guida vincolante. Termini e definizioni.

## 2.2.1 Caratteristiche tecnologiche ed impiantistiche dell'opera

A seconda delle differenti tecnologie impiegate, esistono molteplici tipologie di metropolitane:

- in base al tipo di guida:
  - metropolitana con conducente
  - metropolitana automatica, nella quale i treni viaggiano senza conducente a bordo
- in base al tipo di rotaia utilizzata:
  - metropolitana su rotaia
  - metropolitana su gomma, i cui convogli sono equipaggiati con ruote gommate o miste in ferro e gomma, per una maggiore aderenza e silenziosità
- in base alla sede:
  - metropolitana sopraelevata caratterizzata per il tipo di sede, realizzata su strutture in ferro o in calcestruzzo armato
  - metropolitana sotterranea
  - metropolitana di superficie e completamente separata da tutti gli altri tipi di traffici
- in base al servizio:
  - metropolitana pesante
  - metropolitana leggera<sup>5</sup>

Ad esempio la metropolitana Siemens VAL, che sarà maggiormente descritta nel caso studio del seguente elaborato, è automatica, su gomma, leggera e può essere sotterranea o sopraelevata.

I principali impianti delle metropolitane sono:

- alimentazione elettrica (sottostazioni e linea aerea o terza rotaia);
- impianti di aerazione;

---

<sup>5</sup> <https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana>

- impianti ausiliari (scale mobili, porte di ingresso, vendita biglietti);
- impianti di segnalamento e automazione;
- telecomunicazioni;
- posto di controllo centralizzato (PCC);
- controllo degli accessi e automatica dei biglietti;
- impianti tecnologici specializzati per la lotta incendio e la sopravvivenza delle persone (ventilazione, barriere d'acqua, sprinkler, ecc.).<sup>6</sup>

### **2.2.2 Caratteristiche comportamentali degli occupanti**

Le principali variabili ritenute necessarie a discriminare il comportamento degli individui in situazioni di emergenza sono:

- genere: i sessi maschile e femminile, ad esempio, si comportano diversamente durante una situazione di emergenza: il primo agisce cercando di spegnere l'incendio, mentre il secondo tende a raggiungere i familiari e a mettersi in salvo;
- capacità fisiche e sensoriali: la presenza di persone con ridotte capacità motorie e sensoriali può incidere sull'esodo incrementando i tempi richiesti per l'evacuazione;
- età: un adulto, un bambino e un anziano possiedono differenti tempi di risposta all'allarme poiché possiedono diverse abilità decisionali, sensoriali e di azione;
- familiarità con l'edificio: gli occupanti tendono a ripercorrere, durante l'esodo da un edificio, lo stesso percorso che hanno utilizzato per accedervi, non curandosi della segnaletica d'emergenza. In questo ambito, si inserisce il tema della pianificazione dell'esodo e progettazione della cartellonistica, in quanto, se effettuata in modo oculato, fornisce un aiuto agli utenti nella ricerca delle vie di uscita;
- attaccamento sociale: alcune persone tendono a cercare ed aiutare i propri cari durante una situazione di pericolo;
- attaccamento agli oggetti: alcune persone si preoccupano di recuperare oggetti personali, come avviene negli incendi che si sviluppano nelle proprie abitazioni. In

---

<sup>6</sup> Andra Bruno; *Gestione di emergenze all'interno di una linea metropolitana. Piani di emergenza e loro applicazione*; Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Infrastrutture di Trasporto, Politecnico di Milano; Relatore: Prof. Giandomenico Cassano.

questi casi, la familiarità con l'edificio non porta ad un giovamento poiché l'occupante, sentendosi al sicuro, potrebbe non percepire la situazione di pericolo.

Gli aspetti di cui sopra sono il risultato di considerazioni fornite da riferimenti internazionali (come ad esempio la SFPE Guide to Human Behaviour in Fires, 2019), che spesso correlano al mondo dell'ingegneria (di cui la Fire Safety Engineering fa parte) e della psicologia. Sebbene il concetto di comportamento umano sia lontano dal concetto di razionalità, alcune peculiarità seguono regole molto vicine alla logica.<sup>7</sup>

Di seguito vengono riportate le prestazioni delle infrastrutture in relazione alle caratteristiche e ai comportamenti degli utenti (Tabella 2.1) e una discretizzazione dei profili, eseguita sulla base della guida NFPA “Emergency Evacuation Planning Guide for People with Disabilities” e realizzata in collaborazione con la comunità dei disabili (Figura 2.1).

---

<sup>7</sup> Roberto Vancetti, Emiliano Cereda; *Stazioni metropolitane: la caratterizzazione degli occupanti per le verifiche di esodo ed inclusione con i metodi della FSE.*- [www.insic.it](http://www.insic.it)

Tabella 2.1 – Prestazioni delle infrastrutture in relazione alle caratteristiche e ai comportamenti degli utenti (informazioni tratte da *Caratteristiche funzionali e costruttive delle infrastrutture per la mobilità pedonale* di Alessandro Ranzo, Antonio D'Andrea, Paola Di Mascio e Maria Vittoria Corazza)

Età	Caratteristiche fisiche e psicologiche	Conseguenze comportamentali	Prestazioni della infrastruttura
0-6	difficoltà nel camminare	fiducia nell'accompagnatore	maggiori visuali libere per i veicoli
	la visione periferica e la profondità di campo sono in fase di sviluppo	comportamenti impulsivi e imprevedibili	eliminazione delle barriere architettoniche per carrozzine e passeggini
	incomprensione dei segnali stradali	incapacità di comprensione di situazioni difficili	
	necessità di un accompagnatore		
	difficoltà nel localizzare la direzione dei suoni bassa statura		
7-12	aumenta l'indipendenza, ma ancora si richiede un accompagnatore	comportamenti impulsivi e imprevedibili	maggiori visuali libere per i veicoli
	scarsa profondità di campo visivo		eliminazione delle barriere architettoniche per ausili a ruote
	bassa statura		
13-18	occasionalmente impedimenti nel cammino	senso di invulnerabilità e sottostima del pericolo	maggiori visuali libere per i veicoli ed eliminazione delle barriere architettoniche per ausili a ruote
19-40	occasionalmente impedimenti nel cammino	attività piena, totale sicurezza nell'ambiente e sottostima del pericolo	maggiori visuali libere per i veicoli ed eliminazione delle barriere architettoniche per ausili a ruote
40-65	rallentamento dei riflessi	sottostima del pericolo	maggiori visuali libere per i veicoli
	occasionalmente impedimenti nel cammino		eliminazione delle barriere architettoniche per ausili a ruote
>65	difficoltà nel camminare	impropria stima del pericolo	necessità di aree di riposo
	problemi della vista	maggior timore per la sicurezza personale	riduzione delle differenze di quota
	abbassamento dell'udito	maggior gravità delle conseguenze degli incidenti	superfici di calpestio antiscivolo
	rallentamento dei riflessi		eliminazione delle barriere architettoniche per ausili a ruote
	ridotta tolleranza ai fattori ambientali estremi		
	ridotta agilità ridotto senso di sicurezza		

Utenti senza condizioni di disabilità			Utenti in condizioni di disabilità		
Tipologia di utenti		Dati antropometrici	Tipologia di utenti	Caratteristiche	Dati antropometrici
Utenti standard	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stato di veglia;</li> <li>• assenza di familiarità con l'edificio;</li> <li>• condizioni fisiche e cognitive standard</li> </ul>		Utenti non udenti	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ridotta capacità di localizzazione il suono e tollerare alcune frequenze e volumi;</li> <li>• capacità di comunicazione attraverso il labiale.</li> </ul>	
Anziani	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deficit sensoriali;</li> <li>• &lt; acuità visiva;</li> <li>• &lt; percezione della profondità;</li> <li>• riduzione dell'udito;</li> <li>• &lt; mobilità ed equilibrio</li> </ul>				
Utenti con bambini	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deficit sensoriali;</li> <li>• &lt; acuità visiva;</li> <li>• &lt; percezione della profondità;</li> <li>• riduzione dell'udito;</li> <li>• &lt; mobilità ed equilibrio</li> </ul>				
Gruppi di persone	<ul style="list-style-type: none"> <li>• legami affettivi o sociali ;</li> <li>• movimento contemporaneo di più persone;</li> <li>• medesimo comportamento tra i componenti</li> </ul>				
Utenti con passeggino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• passeggino abbandonato lungo le vie d'esodo;</li> <li>• Ingombro di due persone</li> </ul>		Utenti non vedenti o con ridotta visibilità	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ridotta capacità di mettere a fuoco gli oggetti;</li> <li>• ridotta capacità di distinguere i colori e le immagini;</li> <li>• maggiore sensibilità all'abbagliamento;</li> <li>• utilizzo di cani guida o di bastoni per agevolare il movimento</li> </ul>	
Utenti con valigie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maggiore ingombro dovuto a valigie</li> </ul>				
			Utenti in sedia a rotelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ridotta capacità di movimento e visibilità della segnaletica;</li> <li>• impossibilità di salire e scendere le scale in modo autonomo</li> </ul>	
			Utenti con bastone o stampelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• spostamento, salita e discesa delle scale in maniera autonoma ma lenta</li> </ul>	

Figura 2.1 – Discretizzazione dei profili - tratta dall'articolo pubblicato su *insic Stazioni metropolitane: la caratterizzazione degli occupanti per le verifiche di esodo ed inclusione con i metodi della FSE* di Roberto Vancetti e Emiliano Cereda

Nei luoghi di transito, come la metropolitana, si rileva spesso la presenza di utenti che in caso di emergenza tendono a non abbandonare gli oggetti che portano con sé, quali ad esempio valigie o zaini, rendendo più complicato l'esodo.

I luoghi di transito inoltre sono frequentemente affollati da gruppi di persone aventi legami sociali o affettivi che tendono ad avere lo stesso comportamento e a muoversi insieme anche in situazioni di emergenza.

### 3. La Metropolitana torinese

La metropolitana di Torino è stata inaugurata il 4 febbraio 2006 in occasione dei XX Giochi olimpici invernali. Si tratta di una metropolitana leggera, la prima installata in Italia a essere caratterizzata dalla guida automatica con mezzi VAL 208: 29 treni viaggiano sotto corso Francia, corso Vittorio Emanuele II e via Nizza. Il percorso è lungo 13,2 km percorribili in appena 23 minuti.

La capacità di trasporto raggiunge la portata massima di circa 15 mila passeggeri/ora per direzione, con una frequenza di passaggio dei treni ogni 105 secondi.

Attualmente sono in corso i lavori di prolungamento della Linea 1 (Figura 3.1) verso Sud, da Lingotto a Piazza Bengasi, e verso Ovest, dal parcheggio di Fermi a Cascine Vica (Rivoli).

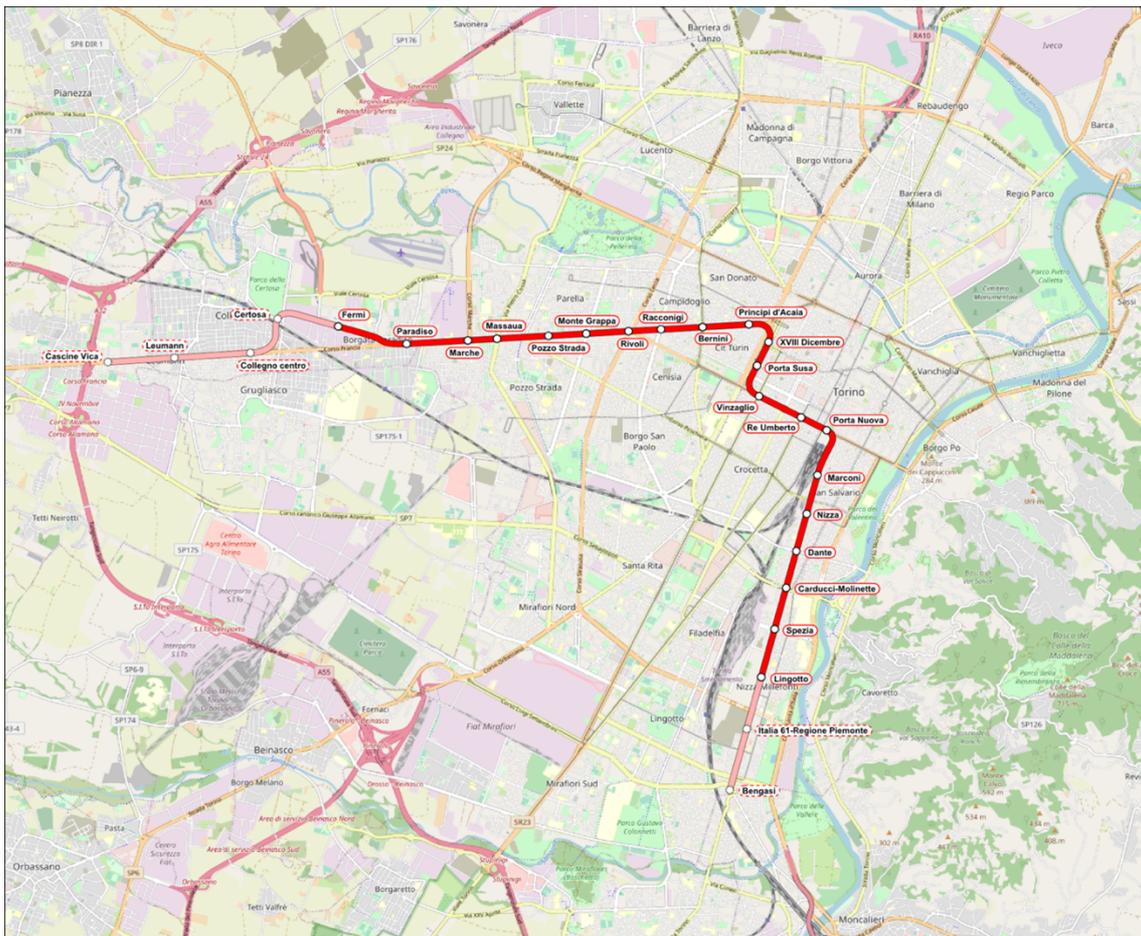


Figura 3.1 – Tracciato Linea 1 - tratta da Wikipedia

“La tecnologia VAL (Veicolo Automatico Leggero) consente di gestire e controllare la metropolitana in modo completamente automatico, garantendo alti livelli di sicurezza, prestazioni e comfort di viaggio. Completamente automatizzato, esso non richiede la presenza di conducenti a bordo dei treni e garantisce la massima sicurezza attraverso un sistema di Controllo Automatico dei Treni (ATC). Oltre che per la sua affidabilità, il VAL è stato scelto perché ritenuto particolarmente adatto alle caratteristiche e ai requisiti della Metropolitana Automatica di Torino.”

“Il sistema di Controllo Automatico del VAL beneficia delle caratteristiche di sicurezza più avanzate nel settore. Il Posto di controllo e comando, situato presso il Comprensorio tecnico di Collegno, supervisiona il sistema per mezzo di telecomandi e telemisure. Da qui gli operatori possono intervenire per modificare lo stato del sistema, il numero di treni in linea, i parametri di funzionamento, oppure per informare i passeggeri in caso di necessità, mediante un sistema di videosorveglianza e comunicazione interfonica. In assenza di intervento il sistema funziona comunque in modo completamente automatico. La molteplicità degli equipaggiamenti disponibili garantisce un’elevata capacità di gestione dei guasti, mentre la funzione di protezione automatica dei treni (ATP) assicura un’adeguata salvaguardia contro i rischi di collisioni ed eccesso di velocità. Il quadro della sicurezza si completa con ulteriori dispositivi: porte automatiche di banchina nelle stazioni per evitare le cadute accidentali; passerella di emergenza facilmente accessibile agli utenti lungo tutta la linea; impianto antincendio e di rilevamento dei fumi sui treni e nelle stazioni”<sup>8</sup>

### **3.1 Storia ed evoluzione**

Negli anni '30, durante la riorganizzazione di Via Roma, fu predisposto un tunnel che avrebbe dovuto far parte del primo percorso sotterraneo. Il progetto è stato rapidamente accantonato e la galleria attualmente fa parte di un ampio ed esteso parcheggio interrato gestito da ACI e GTT.

---

<sup>8</sup> <https://www.infrato.it>

Nel corso degli anni sessanta, dopo il fallimento della monorotaia realizzata nel contesto di Italia 61, fu fondata la Società per la Metropolitana Torino (SMT), con sede in via Santa Teresa. A tal proposito sono stati realizzati alcuni studi di fattibilità e sono stati eseguiti i primi scavi esplorativi, ma anche in questo caso il progetto fu abbandonato e sostituito da una soluzione per la realizzazione di un collegamento sotterraneo tra lo stabilimento Fiat di Mirafiori e i maggiori quartieri operai della periferia. Nel 1975 si rinunciò anche a questa soluzione.

A metà degli anni '80 si decise di dotare la città di un altro sistema, optando per la scelta di una “metropolitana leggera” per realizzare 5 linee metropolitane che coprissero in superficie e sotto la superficie stradale le principali direttrici urbane, utilizzando in parte corsie riservate. Il progetto prevede 5 linee, numerate da 1 a 5, ma solo la linea 3 fu completata con le caratteristiche previste, mentre le linee 1 e 4 vennero gestite come normali linee tranviarie, e le linee 2 e 5 furono gestite sin dal principio con autobus. La linea 9 è stata creata in occasione della Coppa del Mondo FIFA 1990. All'epoca era una metropolitana leggera e in seguito è diventata una normale linea tranviaria.

Nel novembre del 1990 si studiò una linea senza conducente su una delle due possibili tratte Porta Susa-Rivoli oppure Porta Susa-Lingotto, ma i fondi stanziati non furono sufficienti e il progetto venne momentaneamente sospeso per essere recuperato soltanto nell'aprile del 1999. La fusione dell'Atm con la SATTI diede origine al Gruppo Torinese Trasporti (GTT), con l'obiettivo di dotare la città di una linea metropolitana, basata sul nuovo sistema VAL, e ottenere un finanziamento statale del 60%. Nello stesso anno venne approvata un'ulteriore variante al progetto, aggiungendo ai 9,6 km della linea altri 3,6 km di prolungamento da Porta Nuova alla fermata del Lingotto presso Lingotto Fiere Expo e la stazione di Torino Lingotto.

I lavori per la realizzazione della linea 1 incominciarono ufficialmente il 19 dicembre 2000, in occasione dei XX Giochi olimpici invernali. Il 4 febbraio 2006 venne inaugurata la tratta dal capolinea Fermi a piazza XVIII Dicembre. Il 5 ottobre 2007 venne attivato il prolungamento da XVIII Dicembre a stazione di Torino Porta Nuova, con la sola eccezione della stazione Porta Susa poiché non ancora terminata. Il 6 marzo 2011 fu inaugurata la tratta Porta Nuova-Lingotto.

L'ulteriore prolungamento della linea 1 dal Lingotto a piazza Bengasi venne approvato nel 2008 e nel corso del 2009 vennero assegnati i fondi per il suo completamento. La Regione contestualmente ha approvato anche il prolungamento ad ovest lungo l'asse di corso Francia fino a Rivoli.

Il 2 settembre 2009 l'ente regionale ha anche approvato la realizzazione della Linea 2 della Metropolitana, che collegherà la zona Sud con la zona Nord della città.<sup>9</sup>

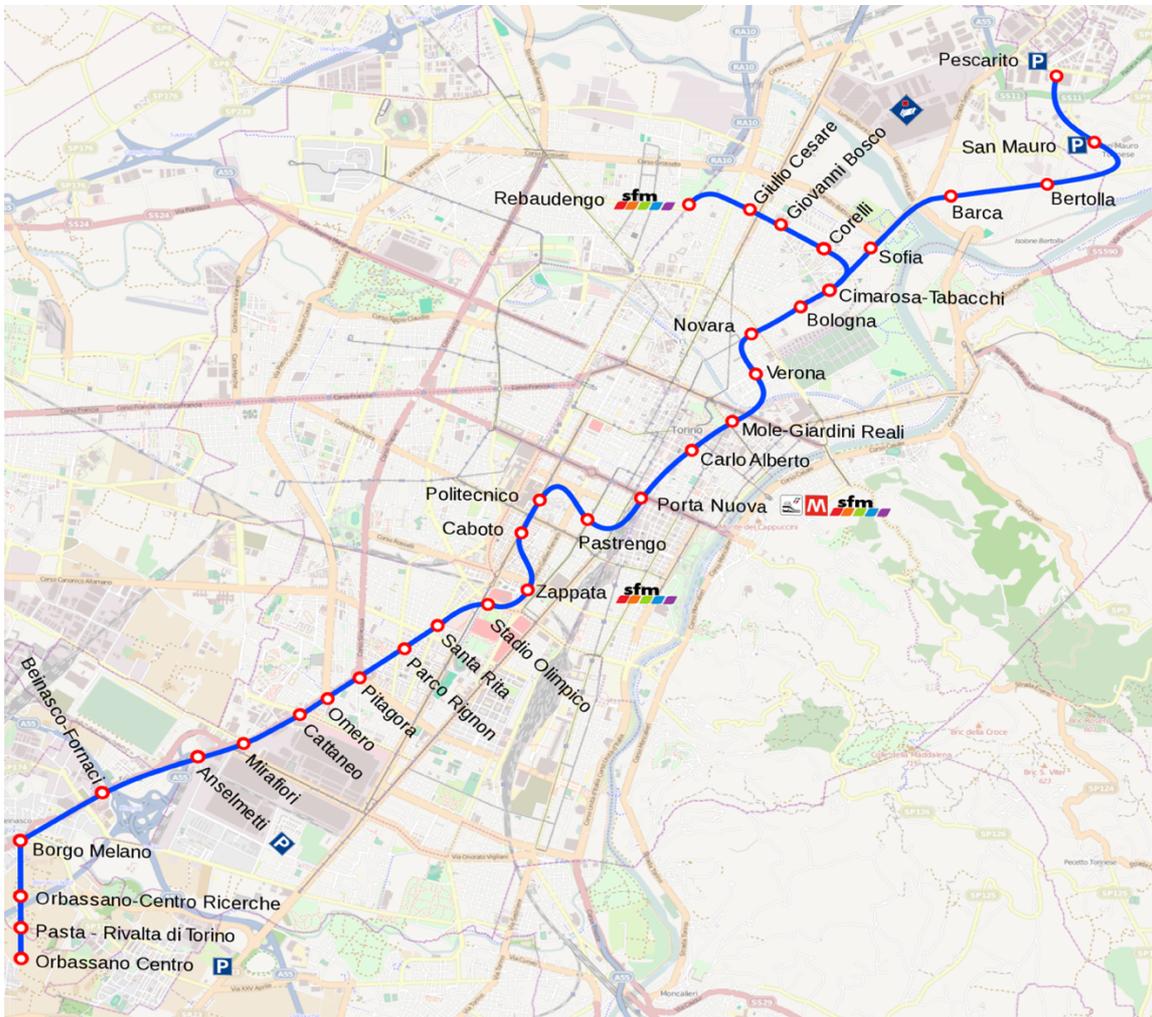


Figura 3.2 – Tracciato della futura Linea 2 - tratta da Wikipedia

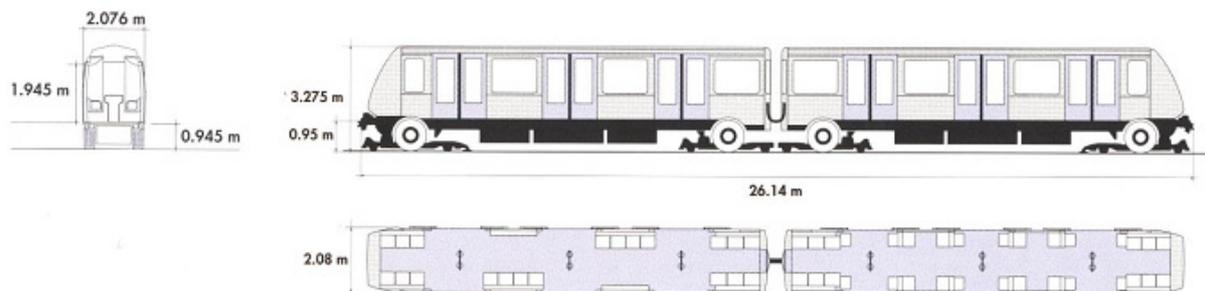
### 3.2 Caratteristiche dei treni

I treni di tipo VAL 208 presentano una lunghezza di 52 m e sono composti da 2 veicoli bidirezionali. Possono raggiungere la velocità massima di 80 km/h e trasportare dai 280 ai 440 passeggeri.

<sup>9</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana\\_di\\_Torino](https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana_di_Torino)

“I convogli sono dotati di ruote di gomma che scorrono lungo guide di acciaio. Questa soluzione consente una maggior aderenza e sicurezza in caso di frenate di emergenza e permette al treno di superare maggiori pendenze rispetto alle metropolitane con ruote in ferro. Le accelerazioni e le decelerazioni sono controllate e costanti, in modo da diminuire eventuali contraccolpi. L’uso di pneumatici garantisce inoltre una notevole riduzione delle vibrazioni, migliorando il comfort dei passeggeri.”<sup>10</sup>

Nella Figura 3.4 vengono riassunte le principali caratteristiche dei treni.



### Caratteristiche

Peso della vettura: 28 tonnellate  
 Superficie utile: 46m<sup>2</sup>  
 Tensione di alimentazione: 750V (CC)  
 Potenza installata per elemento: 520 kW  
 1 motore per ruota (8 per elemento)

### Opzioni

Aria condizionata  
 Sorveglianza tramite video di bordo  
 Visualizzazione dinamica dell'itinerario  
 Organizzazione modulabile dello spazio interno  
 Sistema di assistenza alla manutenzione di bordo

### Capacità (per un treno di 2 elementi)

Da 140 a 245 passeggeri in base al rapporto  
 posti a sedere/densità (da 4 a 6 passeggeri/m<sup>2</sup>)

Figura 3.4 – Caratteristiche dei treni - tratta da Infra.To

<sup>10</sup> <https://www.infrato.it>

### 3.3 Tipologia di stazioni

La tratta della metropolitana attualmente in esercizio, da Fermi a Lingotto, comprende 21 stazioni, 15 delle quali sono state realizzate secondo lo schema della “stazione tipo”.

Il progetto della “stazione tipo” è stato elaborato sulla base della Carta architettonica redatta dallo Studio Bernard Kohn & Associati. La stazione, dotata di un’unica linea di controllo, ha una lunghezza di 60 m e una larghezza di 19 m. È composta da un piano atrio, un piano intermedio e un piano banchina, posto a una profondità di circa 15 m rispetto al livello stradale e separato dai binari per mezzo di un tunnel vetrato (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Tunnel vetrato di una “stazione tipo”

“Nel concepire il progetto si è cercato di privilegiare la valenza trasportistica. Di conseguenza sono stati eliminati tutti gli elementi accessori (servizi igienici, bar, spazi commerciali), privilegiando la velocità del flusso dei passeggeri, la semplicità dell’esercizio e una maggiore fruibilità degli spazi per sicurezza, qualità e comfort.”

“Le stazioni sono state progettate per garantire un’accessibilità totale, adatta ad ogni tipo di utenza. Per consentire l’accessibilità e la fruibilità da parte degli utenti ipovedenti sono stati inseriti appositi percorsi tattili a pavimento, percepibili attraverso il contatto con il piede e con

la punta del bastone. Essi orientano il cammino dell'utente dal piano strada al piano banchina, in coordinamento con la messaggistica Braille in rilievo presente lungo i corrimani delle scale fisse delle stazioni. Gli utenti disabili motori possono accedere alle stazioni utilizzando gli appositi ascensori dotati di doppia pulsantiera che collegano i vari livelli dalla superficie alla banchina.”<sup>11</sup>

### **3.4 Normative applicate**

I lavori per la realizzazione della Linea 1 della metropolitana sono iniziati nel 2000 e sono stati conclusi nel 2006. La normativa antincendi che è stata applicata è quindi quella dell'11 gennaio 1988 “norme di prevenzione incendi nelle metropolitane”.

Pur rientrando nelle 80 attività soggette ai controlli di prevenzione incendi (l'attività è la numero 78: aerostazioni, stazioni ferroviarie, stazioni marittime, con superficie coperta accessibile al pubblico superiore a 5.000 m<sup>2</sup>; metropolitane in tutto o in parte sotterranee) non ha un Certificato di Prevenzione Incendi, poiché il riferimento normativo che introduce tale novità è il Decreto del Presidente della Repubblica del 1° agosto 2011, n. 151, che è entrato in vigore solamente il 7 ottobre del 2011.

### **3.5 Possibili cause di eventi anomali e incidenti**

Le cause di incidente in metropolitana possono essere le seguenti:

1. Cause tecniche;
2. Cause organizzative;
3. Cause esterne al sistema di trasporto.

Nella norma UNI-UNIFER 7617:1976 parte 10, le cause di eventi anomali e incidenti vengono così categorizzate:

1. Causa riferibile ad avaria di organi del mezzo di trasporto o a imperfetto funzionamento delle sue apparecchiature;

---

<sup>11</sup> <https://www.infrato.it>

2. Causa riferibile ad avarie o deficienze della sede dell'impianto, ad avarie o deficienze delle opere d'arte dell'impianto (esempio gallerie e viadotti) o delle opere d'arte di approdo, banchine;
3. Causa riferibile a imperfetto funzionamento delle apparecchiature delle linee di trazione elettrica e degli impianti di sicurezza e segnalamento;
4. Causa riferibile ad avaria o deficienza di impianti fissi di linea o di stazione o di scalo di navigazione e relative apparecchiature;
5. Causa riferibile a inosservanza delle prescrizioni regolamentari da parte di personale dell'Azienda, come del resto da parte di personale di assuntoria o di ditta appaltatrice. Inosservanza anche non volontaria, incluso anche il malore che abbia causato l'inosservanza delle prescrizioni;
6. Causa riferibile a viaggiatori;
7. Causa riferibile a estranei, quindi attentati o animali non trasportati;
8. Causa riferibile a suicidio o omicidio;
9. Causa riferibile a fatto naturale: frana, nubifragio, tromba d'aria alluvione, terremoto, ecc.;
10. Causa non accertata.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> UNI – UNIFER 8379, Sistemi di trasporto su rotaia od altra guida vincolante. Termini e definizioni.

## 4. Caso studio: la stazione tipologica

### “Nizza”

La stazione “Nizza” rientra nelle 15 stazioni realizzate secondo il progetto della “stazione tipo”. È quindi dotata di un’unica linea di controllo, ha una lunghezza di 60 m e una larghezza di 19 m. I suoi spazi comprendono il piano atrio, il piano intermedio e il piano banchina, posto a una profondità di circa 15 m rispetto al livello stradale e separato dai binari per mezzo di un tunnel vetrato.

Di seguito si riportano le piante della stazione “Nizza”, le quali sono state estrapolate da un modello tridimensionale realizzato per le simulazioni di incendio (Figure 4.1, 4.2 e 4.3).

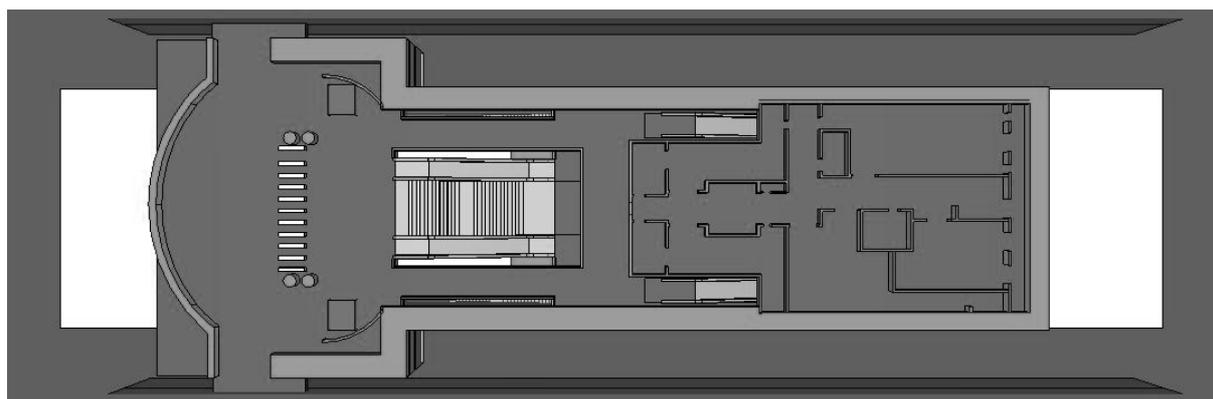


Figura 4.1 – Pianta piano atrio

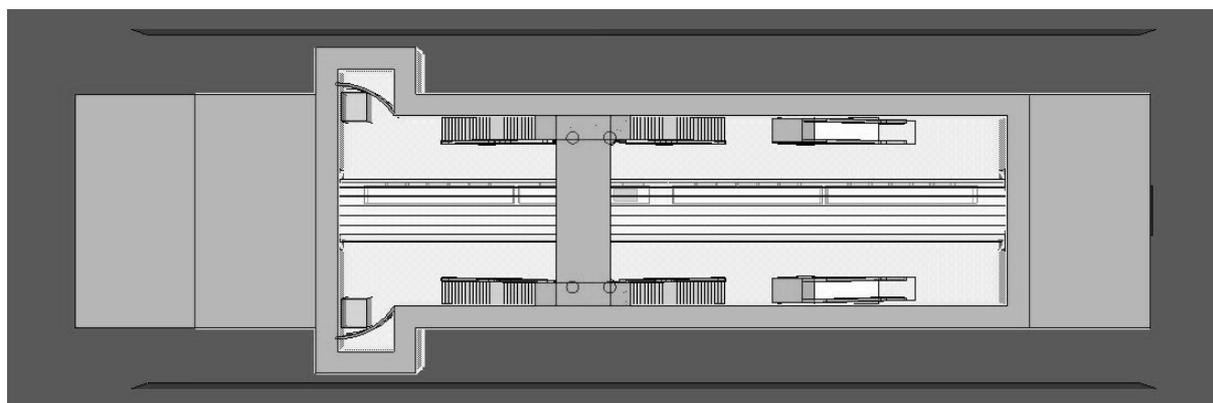


Figura 4.2 – Pianta piano intermedio

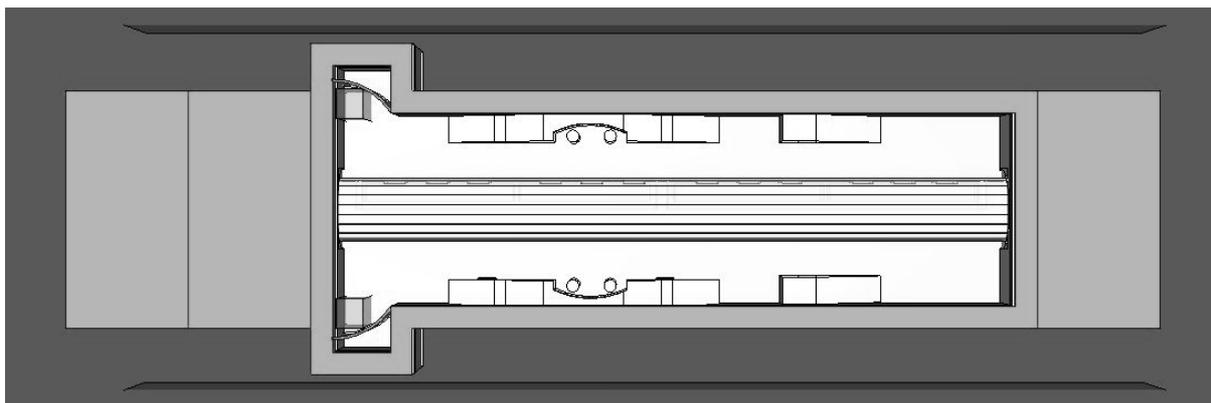


Figura 4.3 – Pianta piano banchina

## 4.1 Sistema di rilevazione, segnalazione e allarme

“Per impianto di allarme incendio si intende un insieme di dispositivi elettronici predisposti per rilevare la presenza di un incendio dentro un edificio, per segnalare l'allarme sonoro e visivo a tutti i presenti e per segnalare l'allarme alla portineria e ai soccorritori esterni.

L'impianto è fondamentalmente formato da una centralina di allarme, la quale riceve il segnale da una serie di "dispositivi di rilevazione" e dalla quale escono i segnali di allarme con una serie di "dispositivi di segnalazione" (sirene e collegamenti ai soccorritori esterni).

I "dispositivi di rilevazione" rappresentano l'*input* per la centralina di allarme e sono essenzialmente i seguenti dispositivi:

- dispositivi di rilevazione fumi e incendi;
- pulsanti manuali di allarme.

I "dispositivi di segnalazione" rappresentano l'*output* per la centralina di allarme e sono essenzialmente i seguenti dispositivi:

- sirene acustiche;
- pannelli luminosi rossi lampeggianti;
- dispositivi di segnalazione ai soccorritori esterni.”<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Impianto\\_di\\_allarme\\_incendio](https://it.wikipedia.org/wiki/Impianto_di_allarme_incendio)

I dispositivi di rilevamento fumi e incendi sono gli elementi dell'impianto che rilevano la presenza di un principio di incendio. Nel caso in esame tali dispositivi sono elettronici e sono stati installati alla sommità dei locali da proteggere, nella parte più alta (soffitto) in quanto sia il fumo che il calore prodotti da un incendio si spostano verso l'alto.

## 4.2 Sistema di estrazione dei fumi

“L’impianto di gestione attiva dei fumi è essenzialmente costituito da un sistema ventilante di espulsione dei fumi e da un’unità di trattamento dell’aria in grado di immettere una sufficiente quantità d’aria di rinnovo atta a pressurizzare gli ambienti. I ventilatori di estrazione fumi, oltre a permettere la messa in depressione dei locali, mantengono una temperatura dell’ambiente relativamente bassa (300 °C – 400 °C), al contrario di quanto si avrebbe nel caso di ambiente sigillato (oltre 1000 °C), temperatura alla quale viene innescata la combustione di qualsiasi materiale per il solo calore radiante, condizione che renderebbe inutile qualsiasi intervento di spegnimento esterno. L’aspirazione forzata permette inoltre, a differenza degli evacuatori di fumo e calore statici, l’estrazione dei fumi freddi che stratificandosi a basso livello, oltre a essere estremamente dannosi per le persone non sono per l’appunto evacuabili per gravità.”<sup>14</sup>

Nel caso in esame il sistema di ventilazione è composto da 6 ventilatori posizionati nella parte bassa della banchina che immettono aria ad una velocità di 3,7 m/s, 10 posizionati nella parte alta della banchina che estraggono l’aria con una velocità di 2,78 m/s e 20 posizionati sul soffitto dell’atrio con una velocità dell’aria pari a 1,39 m/s. Per quanto riguarda la galleria sono stati posizionati, come indicato in figura 4.4, dei pozzi di ventilazione in estrazione e dei pozzi in immissione con una velocità dell’aria pari a 2 m/s.

---

<sup>14</sup> Luca Ferrari; *La gestione dei fumi nell'incendio* <http://www.lucaferrari.info/wp-content/uploads/2015/02/La-gestione-dei-fumi-nell'incendio-RCIFeb15.pdf>

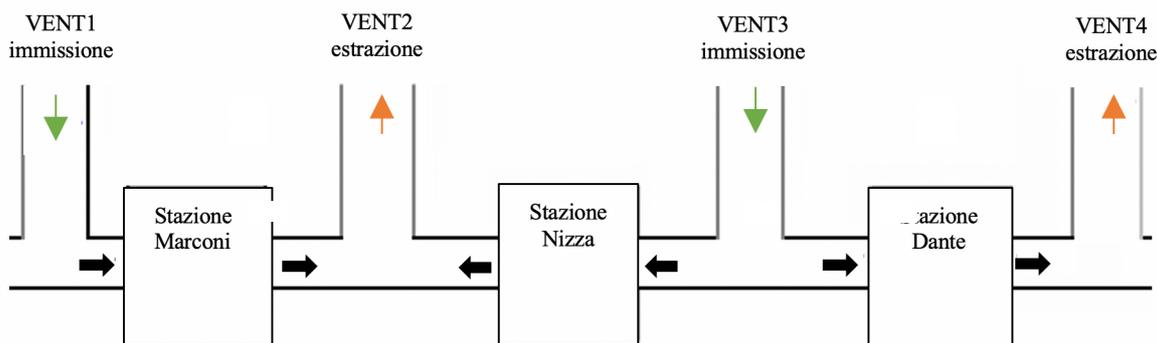


Figura 4.4 – Assetto di ventilazione di progetto (informazioni tratte da un report di Infra.To)

### 4.3 La gestione dei fumi nell'incendio

“Il fumo è la più grande minaccia per la sicurezza in caso d'incendio, non solo perché ostacola le operazioni di soccorso, ma anche perché è spesso la causa del maggior numero di vittime. La deficienza di ossigeno e/o l'eccesso di anidride carbonica, possono condurre alla perdita di conoscenza e alla morte per asfissia. Le sostanze nocive, nei gas di combustione, non si trovano separatamente ma rappresentano una più o meno ampia e variabile mescolanza di gas, vapori, aerosol e particelle solide, il cui effetto è spesso quello di esaltare l'azione nociva di ciascuna sostanza conducendo a morte più rapidamente. Oltre all'azione chimica dei miscugli di gas e particelle in sospensione, i fumi svolgono un'ulteriore azione negativa diminuendo la visibilità, fino ad impedirla. Questa dipende, oltre che dalla quantità di fumo prodotta e dalla densità, anche dagli spessori e disposizione degli strati e infine dalla composizione. La presenza di sostanze irritanti porta ad abbondante lacrimazione, come l'acido cloridrico, o addirittura all'opacizzazione della cornea, come l'acido fluoridrico, ecc. L'effetto ultimo è quello di diminuire la capacità di allontanarsi rapidamente dal luogo del sinistro da parte degli occupanti, che possono essere esposti a concentrazioni letali di gas tossici e trovarvi la morte.”<sup>15</sup>

La diffusione dei fumi in ambiente viene influenzata da fattori tra loro interconnessi, di cui possiamo citare:

<sup>15</sup> Luca Ferrari; *La gestione dei fumi nell'incendio* <http://www.lucaferrari.info/wp-content/uploads/2015/02/La-gestione-dei-fumi-nell'incendio-RCIFeb15.pdf>

- l'effetto camino;
- l'incremento della pressione provocato dall'incendio;
- la dilatazione termica;
- il vento.

La ventilazione nel tunnel è un fattore fondamentale per garantire la visibilità e l'evacuazione dei fumi in caso di incendio, ma se non viene progettato correttamente può creare dei problemi perché potrebbe alimentare l'incendio con l'apporto di ossigeno e con conseguente crescita dell'HRR (Heat Release Rate). Potrebbe inoltre permettere una maggior diffusione dei fumi dai vagoni alla banchina.

Per studiare e risolvere tali problematiche si è analizzato il moto dei fumi mediante simulazioni fluidodinamiche e simulazioni reali. In particolare l'obiettivo è quello di poter verificare, soprattutto da un punto di vista qualitativo, l'andamento dei fumi per capire il funzionamento dei sistemi di ventilazione della stazione e della galleria e per evidenziare le eventuali criticità dei programmi di calcolo.

Nei paragrafi successivi vengono descritti gli scenari di incendio per i quali sono state eseguite delle apposite simulazioni al fine di poterle confrontare con le prove sperimentali.

## **4.4 Simulazione fluidodinamica**

Con l'entrata in vigore del D.M. 3 agosto 2015 (testo unico di prevenzione incendi) è stato possibile studiare, applicando l'approccio prestazionale precedentemente descritto (vedi Capitolo 1), l'evoluzione dinamica dell'incendio attraverso delle simulazioni fluidodinamiche.

La "sezione M" del decreto descrive l'iter progettuale da seguire per la progettazione prestazionale. Essa si compone infatti di due macro fasi che prevedono rispettivamente:

- Analisi preliminare, con lo scopo di individuare gli scenari d'incendio che possono accadere nell'attività in virtù delle caratteristiche del focolare, dell'edificio e degli occupanti e le soglie di prestazione di riferimento;
- Analisi quantitativa che consiste nell'applicazione di modelli di calcolo dai quali si possono estrapolare dati sull'evoluzione dell'incendio e dei suoi effetti, da confrontare con le soglie di prestazione prima definite.

Nel caso in esame per i modelli di calcolo è stato utilizzato il metodo avanzato (la norma ISO 13571 è il riferimento più autorevole), il quale comporta la valutazione quantitativa degli effetti dell'incendio (esposizione a gas tossici asfissianti e irritanti, perdita di visibilità per fumi, esposizione al calore per irraggiamento e convezione) e la loro variazione nel tempo. Il minore tempo tra quelli calcolati con i 4 modelli viene definito ASET (Available Safe Escape Time): tempo tra innesco e momento in cui le condizioni nell'attività diventano tali da rendere gli occupanti incapaci di porsi in salvo.

L'evoluzione dinamica dell'incendio è stata studiata mediante l'utilizzo del modello di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD) Fire Dynamics Simulator (FDS: progettato, sviluppato e distribuito pubblicamente dal NIST, National Institute of Standards and Technology) e in particolare dell'interfaccia grafica Pyrosim.

FDS risolve le equazioni fondamentali dell'energia, della massa, della quantità di moto (si tratta di equazioni non lineari, parzialmente differenziali, tridimensionali e funzioni del tempo, note come equazioni di Navier-Stokes) all'interno di ciascuno dei volumi in cui viene diviso il dominio, tenendo conto delle variazioni che intervengono in ciascuno di essi per effetto di cambiamenti che si hanno in quelli limitrofi, agendo in modo interattivo.

#### **4.4.1 Descrizione del dominio computazionale e creazione delle meshes**

Nella modellazione CFD la scelta della dimensione caratteristica della griglia di calcolo svolge un ruolo importante. La soluzione derivata dal modello è una soluzione approssimata; con l'obiettivo di ridurre sempre di più la differenza tra la soluzione computata rispetto a quella effettiva, si dovrà ridurre il più possibile la dimensione della cella ("size").

Nelle simulazioni di incendio tramite FDS, in genere si preferisce utilizzare una mesh più fine nelle zone prossime alla fiamma in modo da poter visualizzare un profilo di temperatura più accurato nella zona in cui la temperatura è più alta. Nel caso in esame, si è deciso di applicare delle celle di 0,5 m in corrispondenza del piano banchina e del piano intermedio e di 1 m in corrispondenza del piano atrio.

Di seguito si riportano l'immagine delle meshes tratta dalla guida di Pyrosim (Figura 4.5) e quella del caso studio (Figura 4.6).

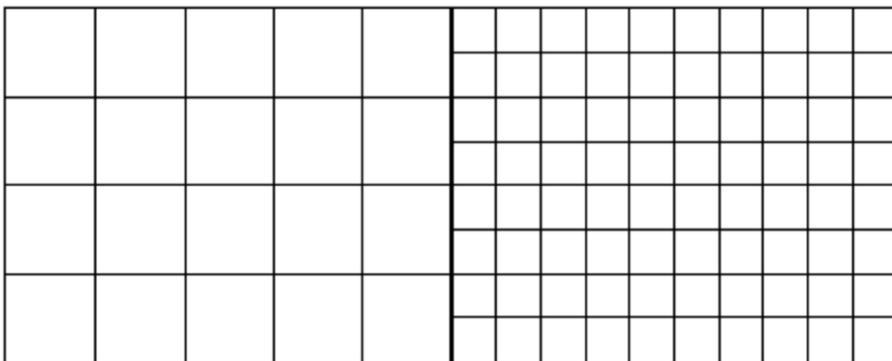
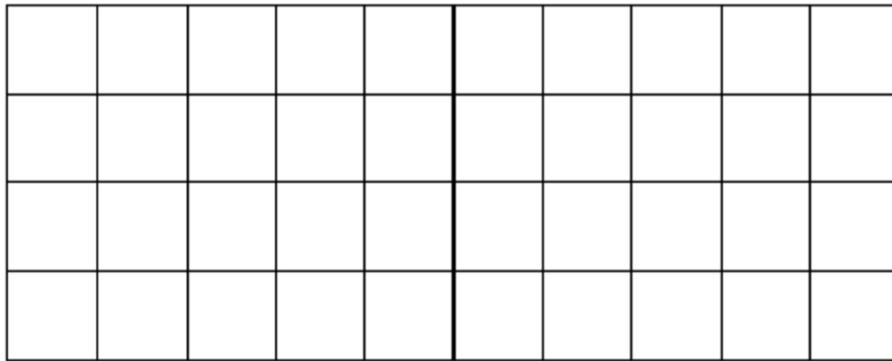


Figura 4.5 – Allineamento meshes - tratta dalla guida di Pyrosim

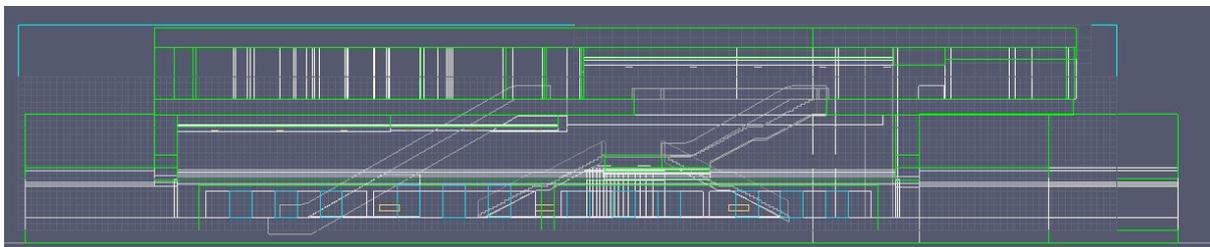


Figura 4.6 – Suddivisione in meshes del caso studio

#### 4.4.2 Definizione della reazione di combustione e della superficie di fiamma

La reazione di combustione può essere inserita in Pyrosim all'interno del menu “*Edit reactions*”.

Di seguito si riportano la composizione (Figura 4.7) e le caratteristiche (Figura 4.8) della reazione scelta per il caso studio. La resa di fuliggine ( $Y_s$ ) è pari a 0,022.

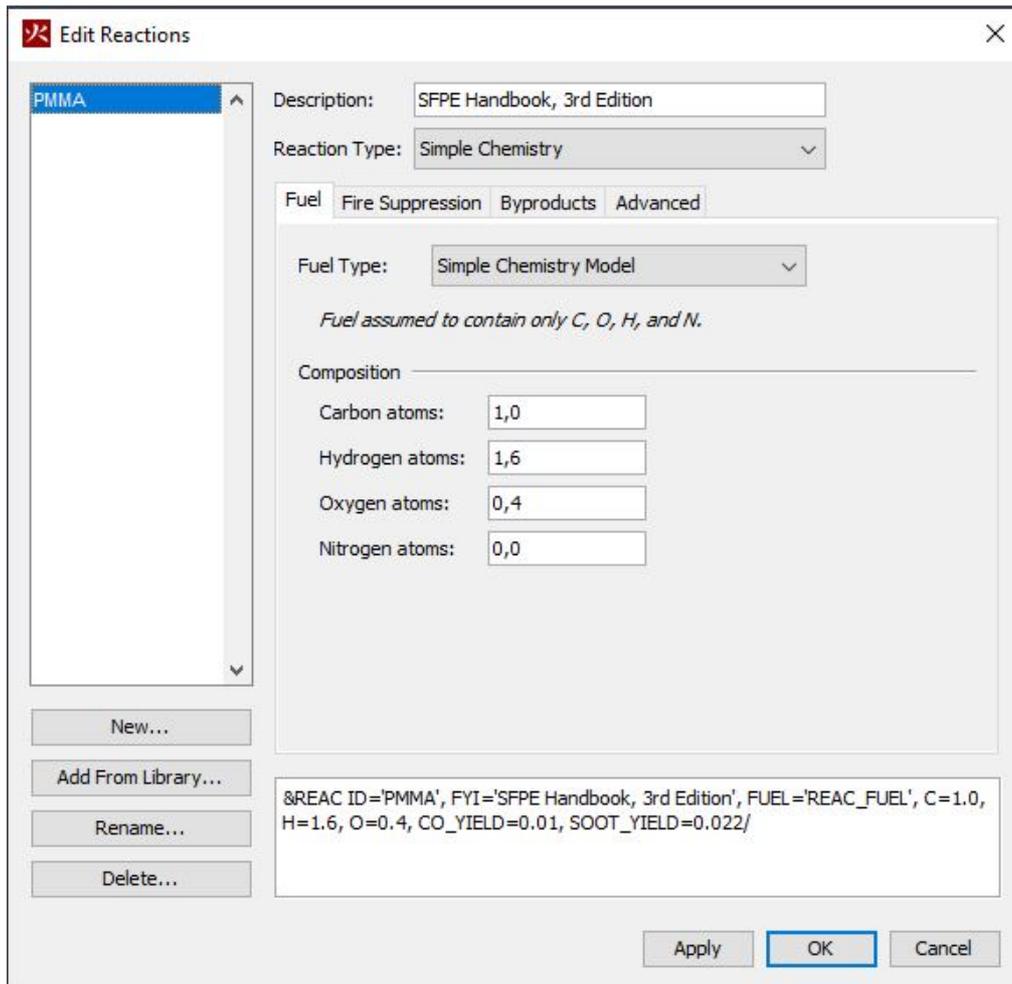


Figura 4.7 – Composizione della reazione

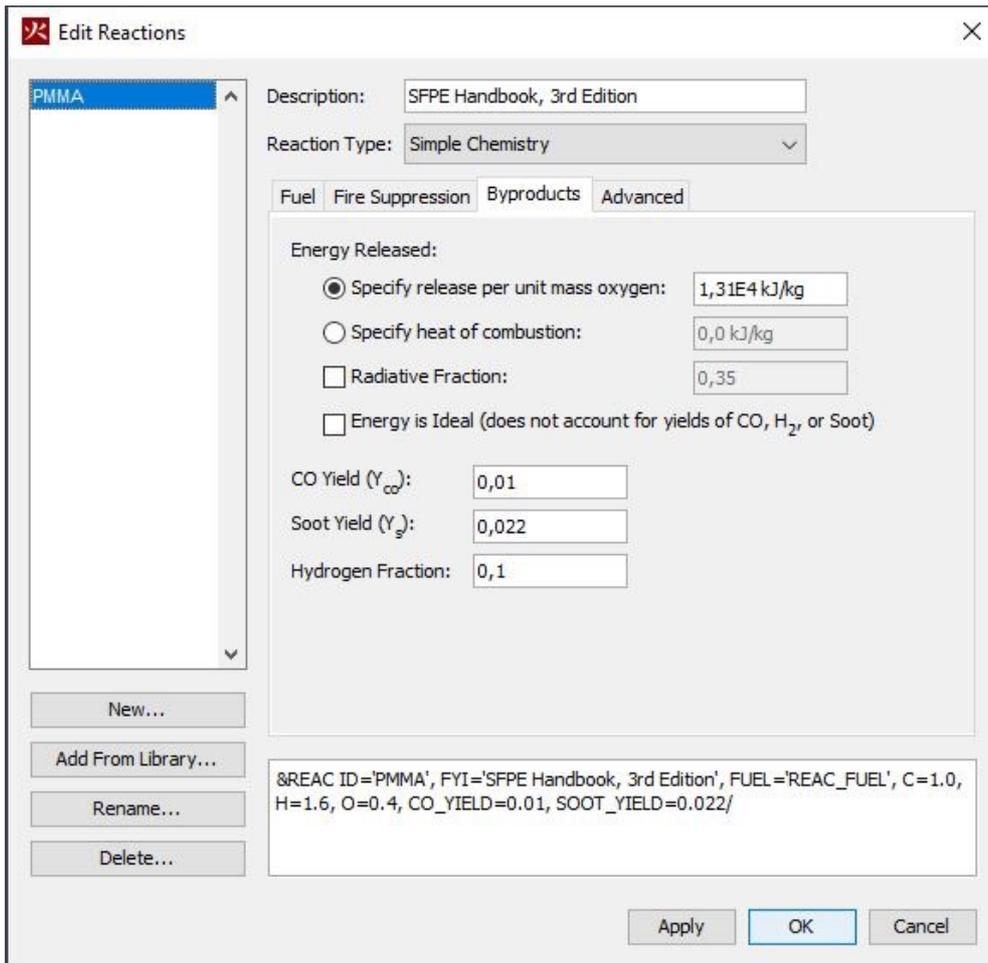


Figura 4.8 – Caratteristiche della reazione

L'incendio all'interno della stazione viene generato da una superficie di fiamma posta sul pavimento di un vagone, che ha come paramento caratteristico l'HRRPUA pari a 3500 kW/m<sup>2</sup>. La dimensione della superficie di fiamma studiata è di 2 m<sup>2</sup> e determina un HRR di 7000 kW, come da normativa.

### 4.4.3 Devices, slices e isosuperfici

Per poter verificare, soprattutto da un punto di vista qualitativo, l'andamento dei fumi ed evidenziare le criticità dei programmi di calcolo come FDS si introducono i devices, le slices e le isosuperfici:

- i devices sono dei rilevatori puntiformi di temperatura, FED (Fractional Effective Dose: registra la concentrazione delle sostanze nocive), irraggiamento e visibilità di tipo *gas-phase device*;
- le slices sono dei piani passanti per il dominio computazionale in grado di annotare le temperature, le visibilità e le velocità, fissata una coordinata x, y o z;
- Le isosuperfici pari a 5 e 10 metri vengono utilizzate per tracciare il contorno tridimensionale delle quantità di fase gassosa.

I devices sono stati posizionati come indicato nelle figure 4.9, 4.10, 4.11 ad un'altezza di 1,80m.

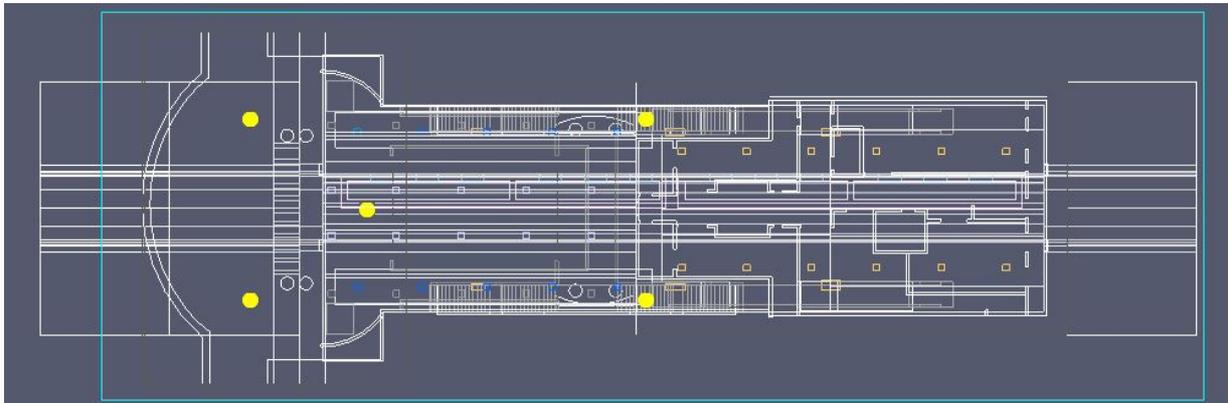


Figura 4.9 – Posizione dei devices nel piano atrio

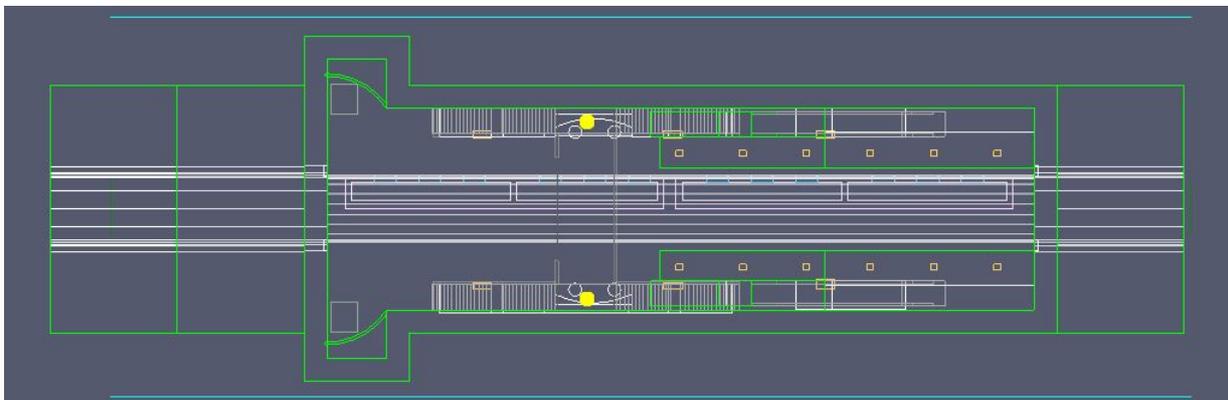


Figura 4.10 – Posizione dei devices nel piano intermedio

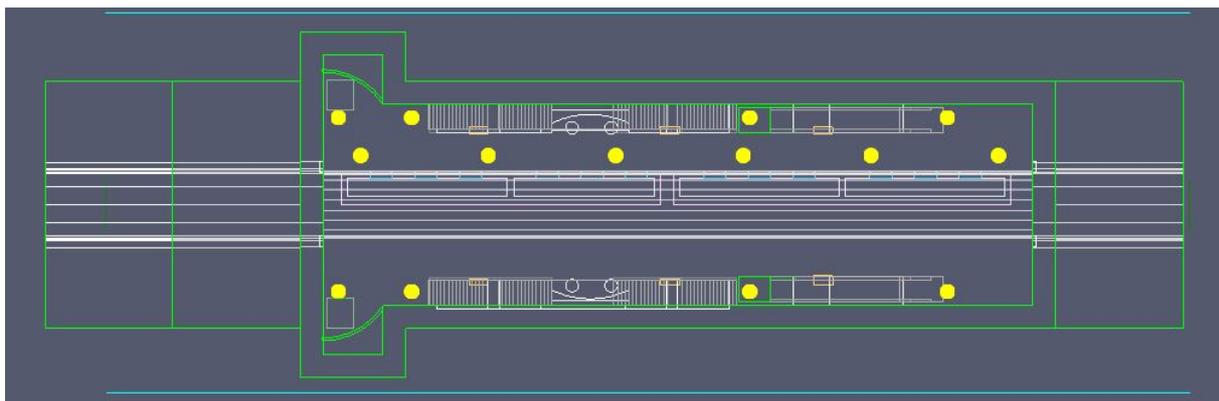


Figura 4.11 – Posizione dei devices nel piano banchina

#### 4.4.4 Scenari d'incendio

Tenuto conto che, ai fini della sicurezza antincendio, va sempre perseguito l'obiettivo di condurre il treno in stazione, secondo il D.M. del 21 ottobre 2015 gli scenari d'incendio di riferimento più importanti, ma non esclusivi, sono:

SCENARIO 1): - l'incendio a bordo di un treno in stazione;

SCENARIO 2): - l'incendio a bordo di un treno fermo in galleria;

SCENARIO 3): - l'incendio di un'eventuale attività commerciale di pertinenza posta nell'atrio della stazione ed avente le caratteristiche geometriche ed impiantistiche riportate nella stessa regola tecnica;

SCENARIO 4): - l'incendio in un locale tecnico.

La potenza d'incendio, e quindi la curva naturale d'incendio, da assumere come base per i calcoli dei parametri dell'incendio quali profili di temperatura, altezza delle fiamme e portata dei fumi sarà stimata, per gli scenari di incendio 1) e 2), sulla base delle caratteristiche di combustibilità dei materiali che costituiscono i vagoni dei convogli. Nel caso in cui risulti una potenza totale inferiore a 7000 kW sarà comunque assunto un incendio di progetto minimo pari a 7000 kW su cui basare ogni calcolo dei parametri dell'incendio. La potenza va intesa come potenza totale di

picco, espressa con una funzione temporale quadratica con coefficiente a pari a 0,014, corrispondente al raggiungimento della potenza di 1000 kW in 270 secondi.<sup>16</sup>

Nel caso in esame, la base di partenza delle simulazioni è stata scelta imponendo il caso più gravoso tra gli scenari ipotizzati: l'incendio a bordo treno in intertratta in arrivo alla stazione.

I differenti scenari hanno riguardato sostanzialmente il diverso posizionamento dell'incendio a bordo treno, ipotizzando che l'incendio si sviluppasse a partire dal quadro elettrico del veicolo di testa o di coda.

Una volta impostato lo scenario di incendio di riferimento tramite la simulazione si verifica se la strategia di ventilazione scelta siano in grado di indirizzare totalmente i fumi da un solo lato della galleria rispetto al punto di incendio.

Di seguito si riportano le piante estrapolate dal modello tridimensionale di Pyrosim con indicata la posizione del focolaio per i due scenari d'incendio (Figure 4.12 e 4.13)

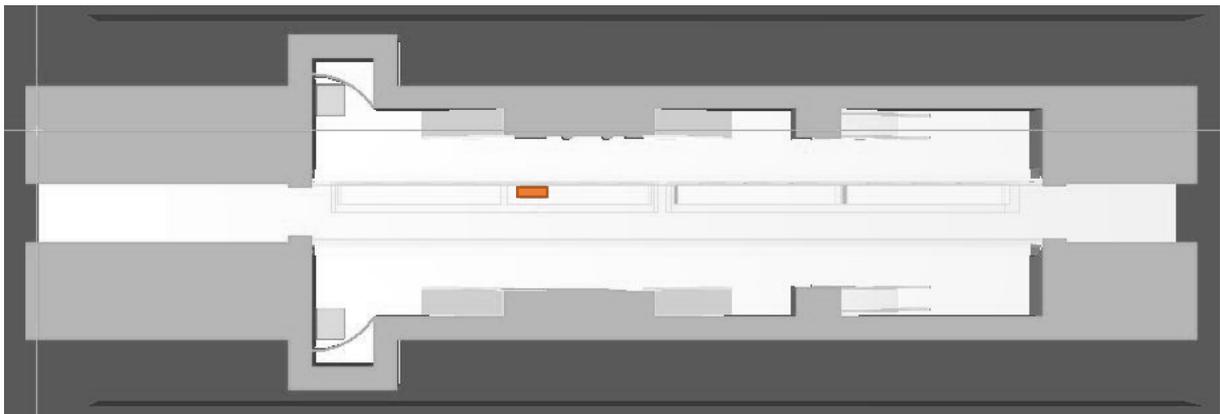


Figura 4.12 – Posizione focolaio scenario 1

---

<sup>16</sup> Codice di prevenzione incendi D.M. 3 agosto 2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.

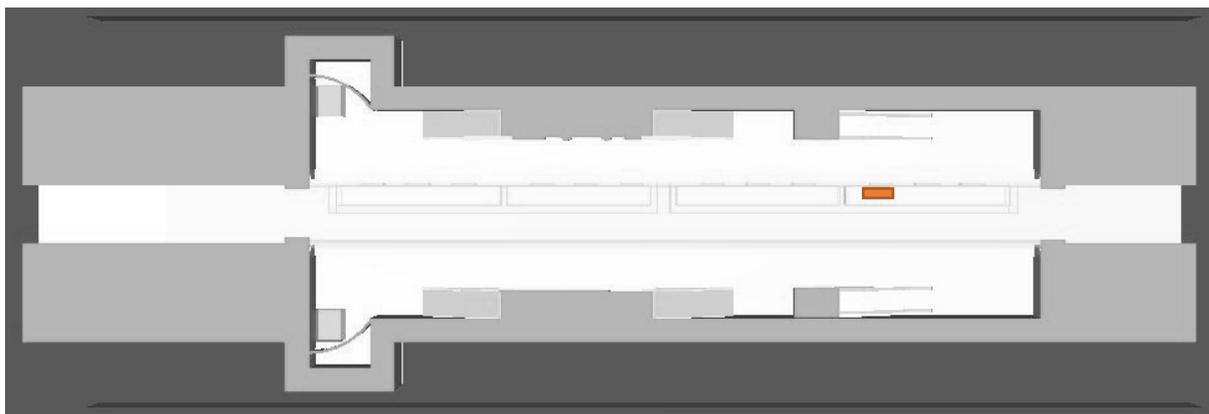


Figura 4.13 – Posizione focolaio scenario 2

#### 4.4.5 Definizione delle soglie di prestazione

I parametri maggiormente significativi per la definizione dell'ASET sono: gas tossici, temperatura, irraggiamento e visibilità. Tali parametri sono stati desunti dal software grazie al posizionamento di devices nel piano atrio, intermedio e banchina.

Di seguito si riportano le soglie di prestazione di occupanti e soccorritori per ogni parametro considerato.

Tabella 4.1 – Soglie di prestazione

Livello di prestazione	soglia_occupanti	soglia_soccorritori	U.M
Gas tossici	0,1	-	-
Temperatura	60	80	°C
Irraggiamento	2,5	3	kW/m <sup>2</sup>
Visibilità	10	5	m

#### 4.4.6 Risultati Scenario 1

Lo scenario 1 ipotizza un incendio a bordo treno che si sviluppa sul veicolo di coda (lato Marconi) con una potenza totale di picco pari a 7000 kW (Figura 4.12).

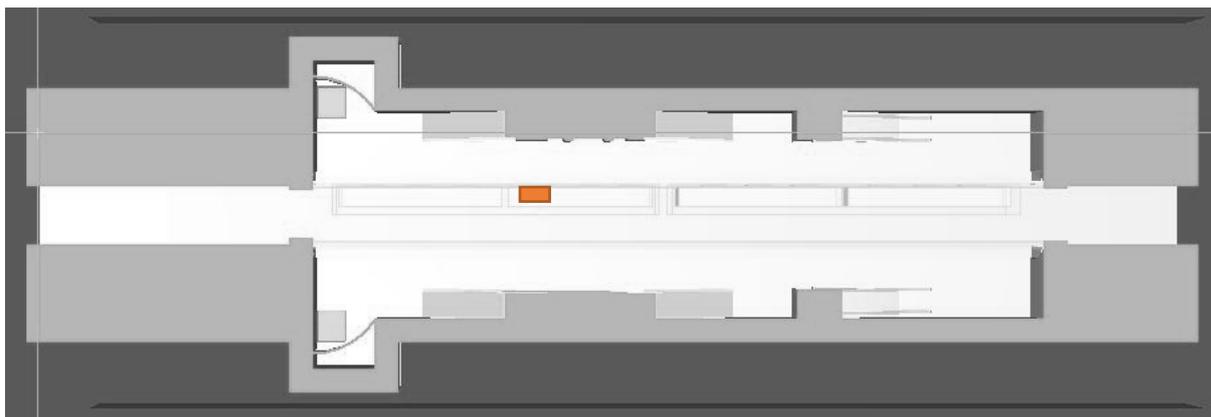


Figura 4.14 – Posizione focolaio scenario 1

Per considerare il tempo che il treno impiega ad arrivare in stazione nel caso in cui l'incendio si sviluppasse in intertratta, le porte si apriranno con un ritardo di 45 secondi.

Il sistema di ventilazione, fondamentale per capire l'andamento dei fumi, è composto da 6 ventilatori posizionati nella parte bassa della banchina che immettono aria ad una velocità di 3,7 m/s, 10 posizionati nella parte alta della banchina che estraggono l'aria con una velocità di 2,78 m/s e 20 posizionati sul soffitto dell'atrio con una velocità dell'aria pari a 1,39 m/s. Per quanto riguarda la galleria sono stati posizionati, come indicato in figura 4.4, dei pozzi di ventilazione in estrazione e dei pozzi in immissione con una velocità dell'aria pari a 2 m/s.

In Figura 4.15 si riporta la curva RHR (o HRR): Rate of Heat Release (o Heat Release Rate). Tale curva esprime l'andamento temporale della potenza termica rilasciata dall'incendio.

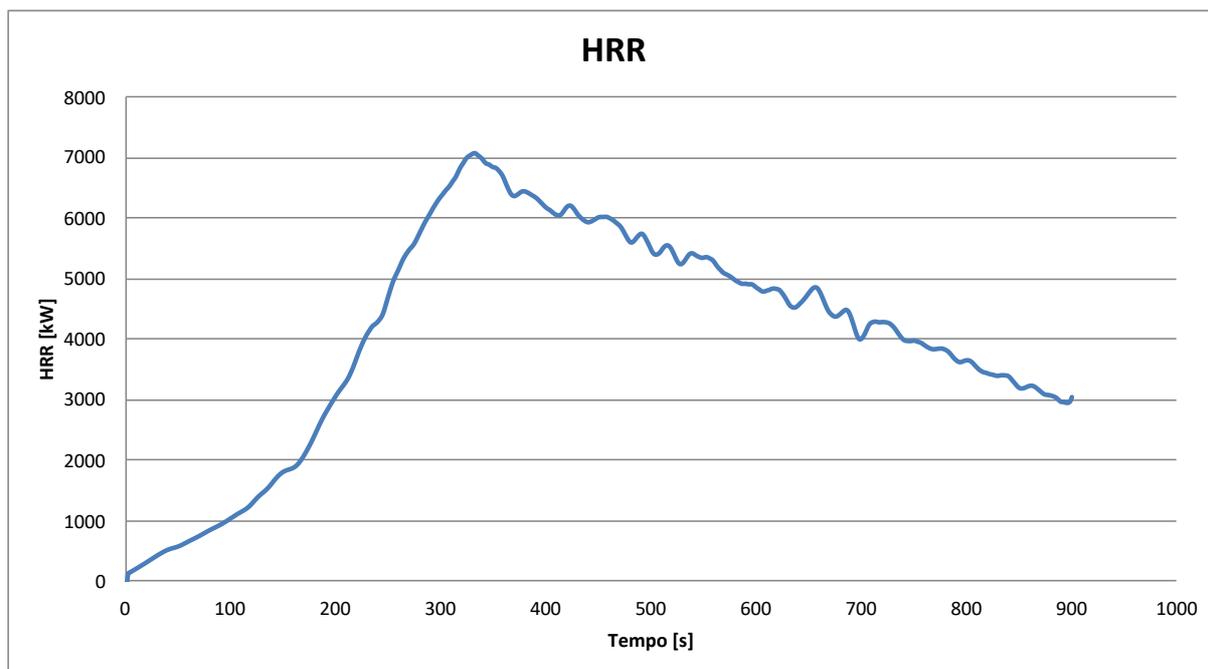


Figura 4.15 – Curva HRR

I risultati ricavati dai devices sono stati tabulati da FDS all'interno di un file chiamato "nomeelaborato\_devc.csv". Tali risultati sono stati successivamente maneggiati mediante il software Excel. Di seguito si riportano gli esiti per i 4 modelli di calcolo.

### Modello visibilità

Il modello dell'oscuramento della visibilità da fumo è basato sul concetto del minimo contrasto percettibile, cioè la minima differenza di luminosità visibile tra un oggetto e lo sfondo.

La soglia di visibilità è pari a 10 m per gli occupanti e 5 m per i soccorritori.

Per questo calcolo sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad un'altezza di 1,80 m. In questo caso sono stati aumentati i punti di verifica per valutare con più precisione l'andamento dei fumi e in quanto la visibilità risulta essere la variabile che maggiormente influenza il valore di ASET.

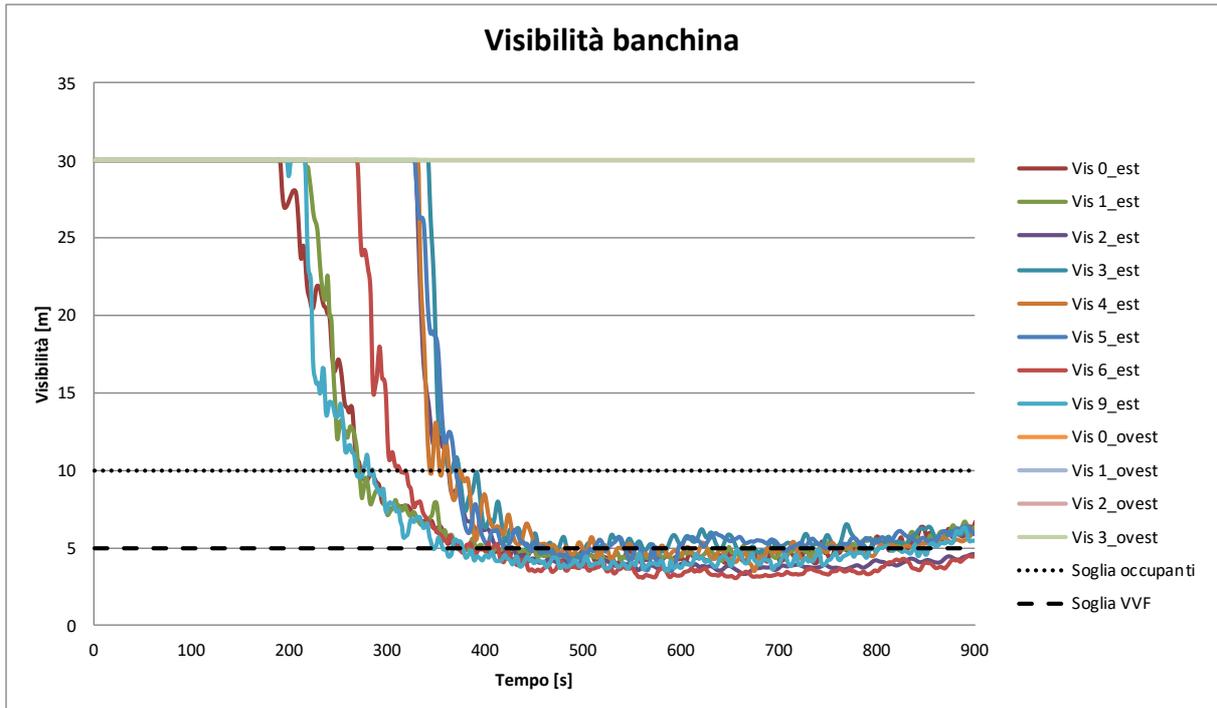


Figura 4.16 – Visibilità banchina

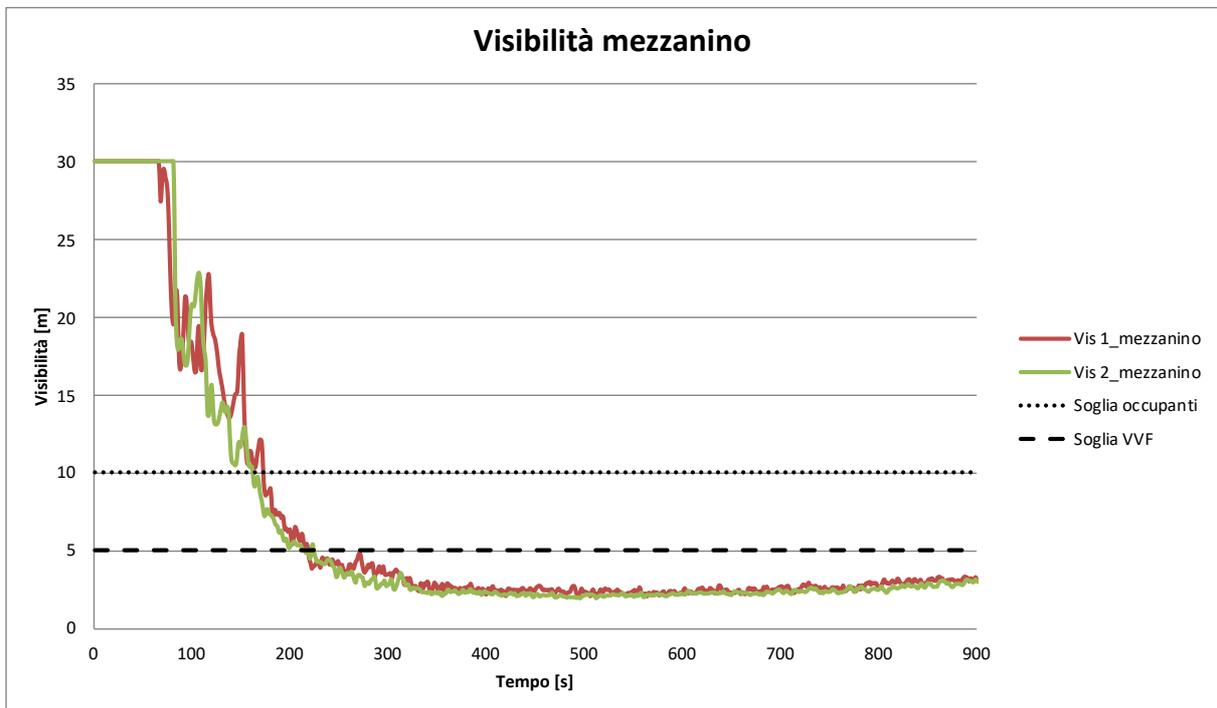


Figura 4.17 – Visibilità mezzanino

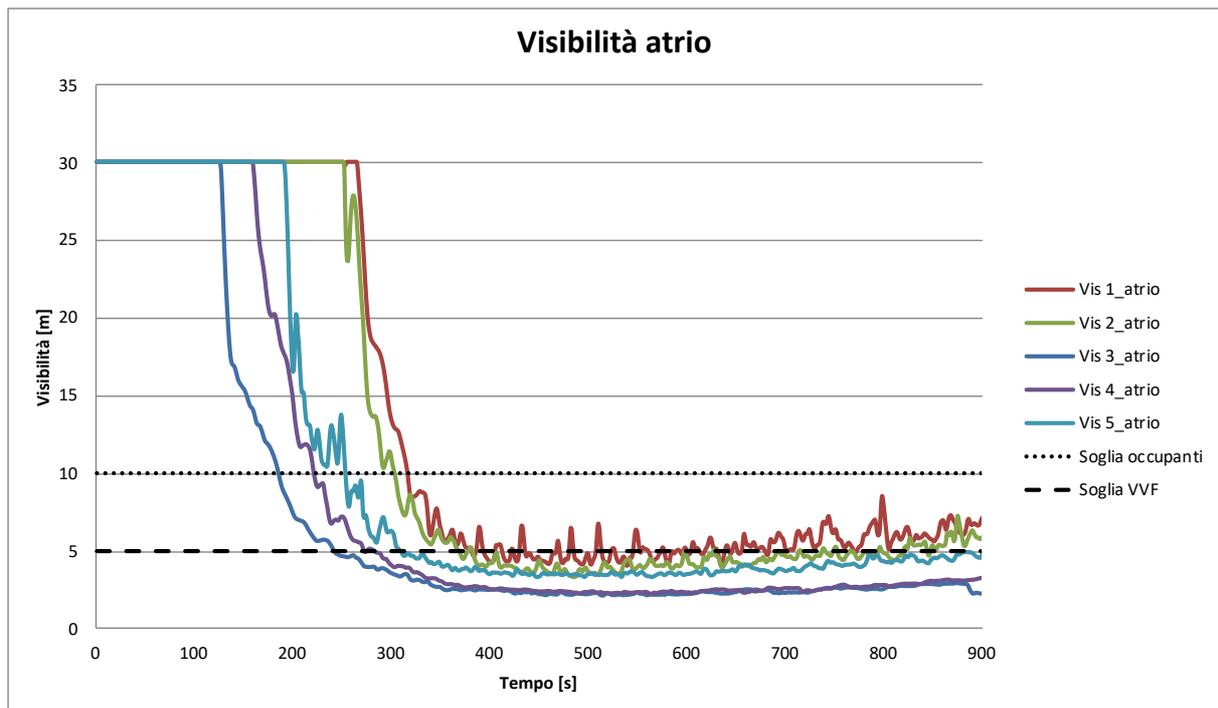


Figura 4.18 – Visibilità atrio

Dalle figure 4.16, 4.17 e 4.18 si può notare come la visibilità raggiunga in tempi brevi (161s rilevati da Vis 2\_mezzanino) la soglia prestazionale posta a 10 m.

### Modello del calore

Per il modello del calore si fa riferimento alla temperatura ambiente, il cui valore di soglia è pari a 60 °C per gli occupanti e 80 °C per i soccorritori. Anche in questo caso sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad altezza di 1,80 m.

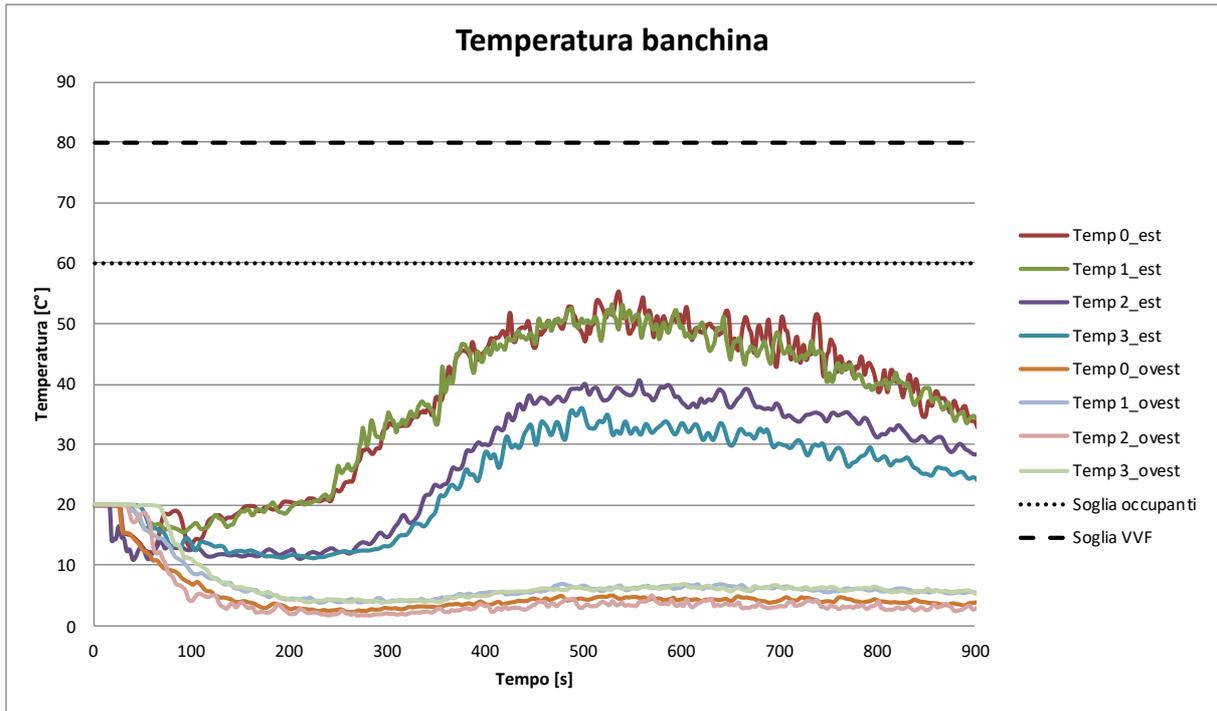


Figura 4.19 – Temperatura banchina

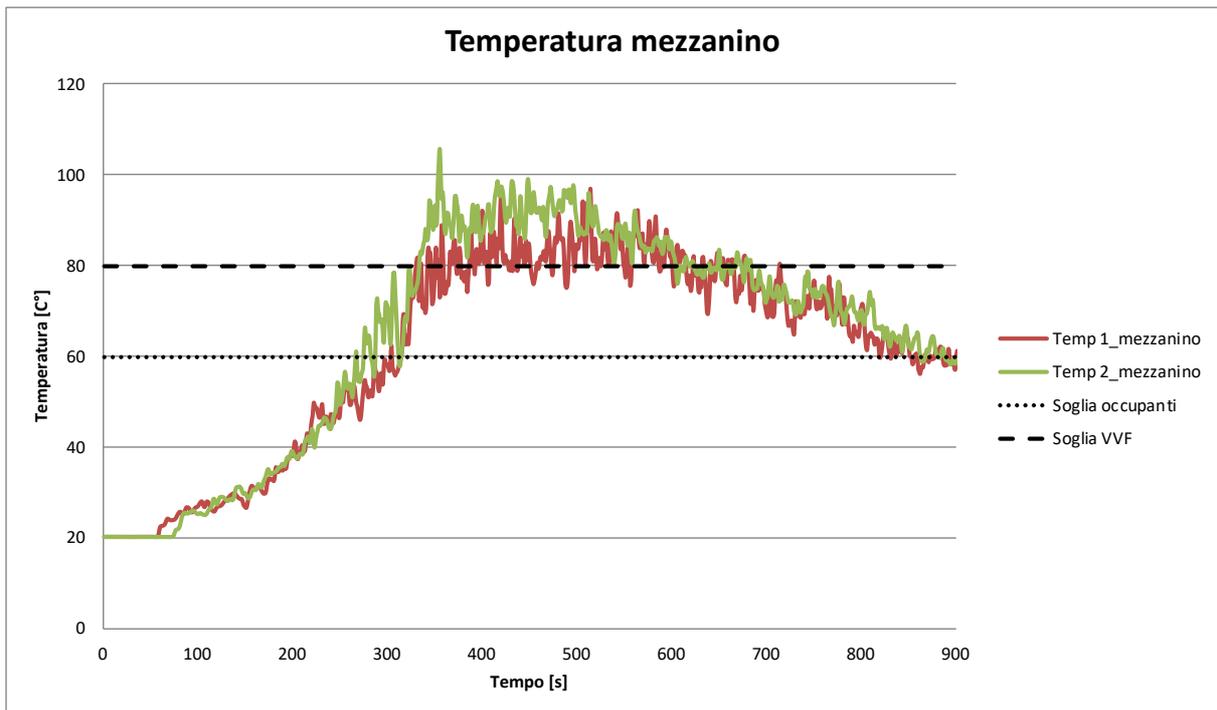


Figura 4.20 – Temperatura mezzanino

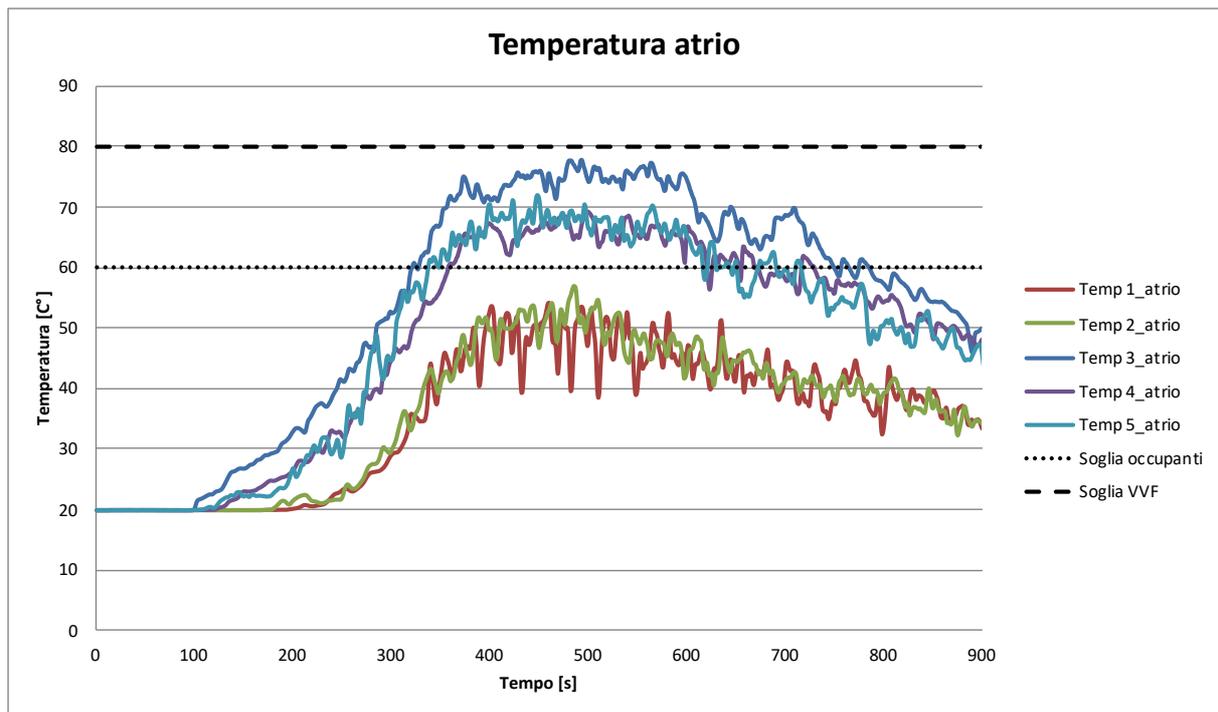


Figura 4.21 – Temperatura atrio

Dalle figure 4.19, 4.20 e 4.21 si può notare come la temperatura rilevata superi il valore di soglia a 269 secondi (rilevati da Temp 2\_mezzanino).

Per il modello di calore si fa riferimento anche all'irraggiamento sugli occupanti il cui valore di soglia è pari a  $2,5 \text{ kW/m}^2$ . Anche in questo caso sono stati previsti dei devices nel modello di Pyrosim posti ad un'altezza di 1,80 m.

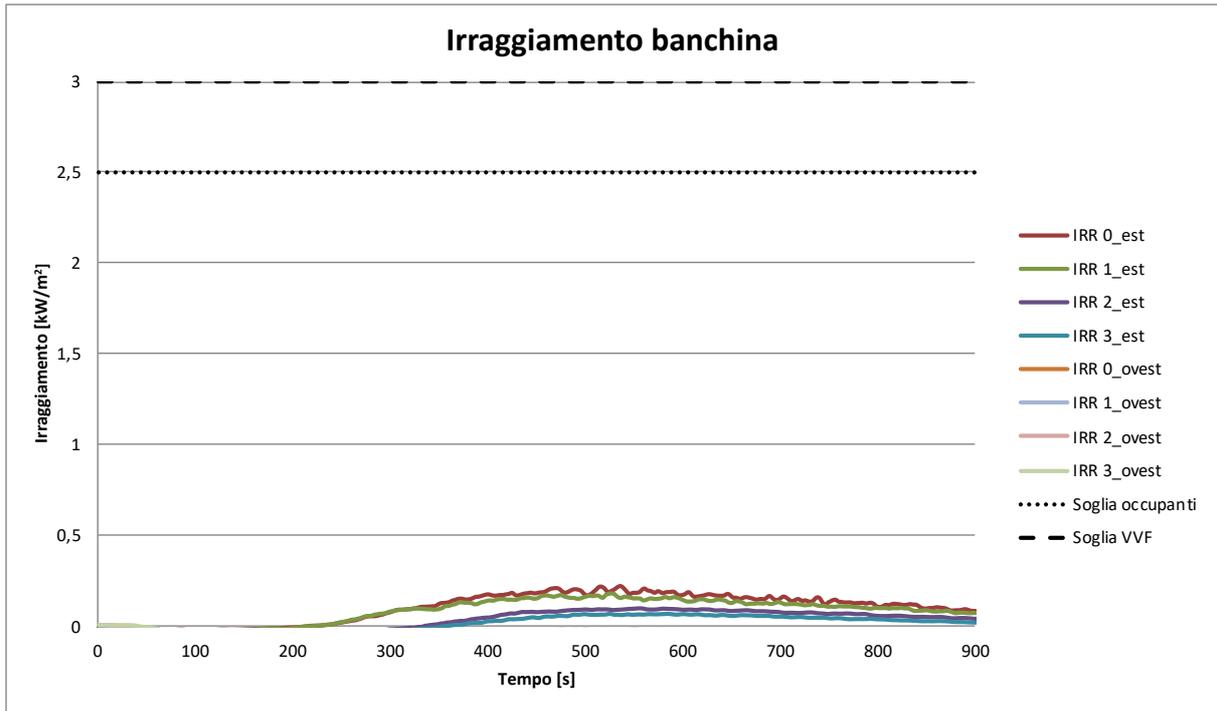


Figura 4.22 – Irraggiamento banchina

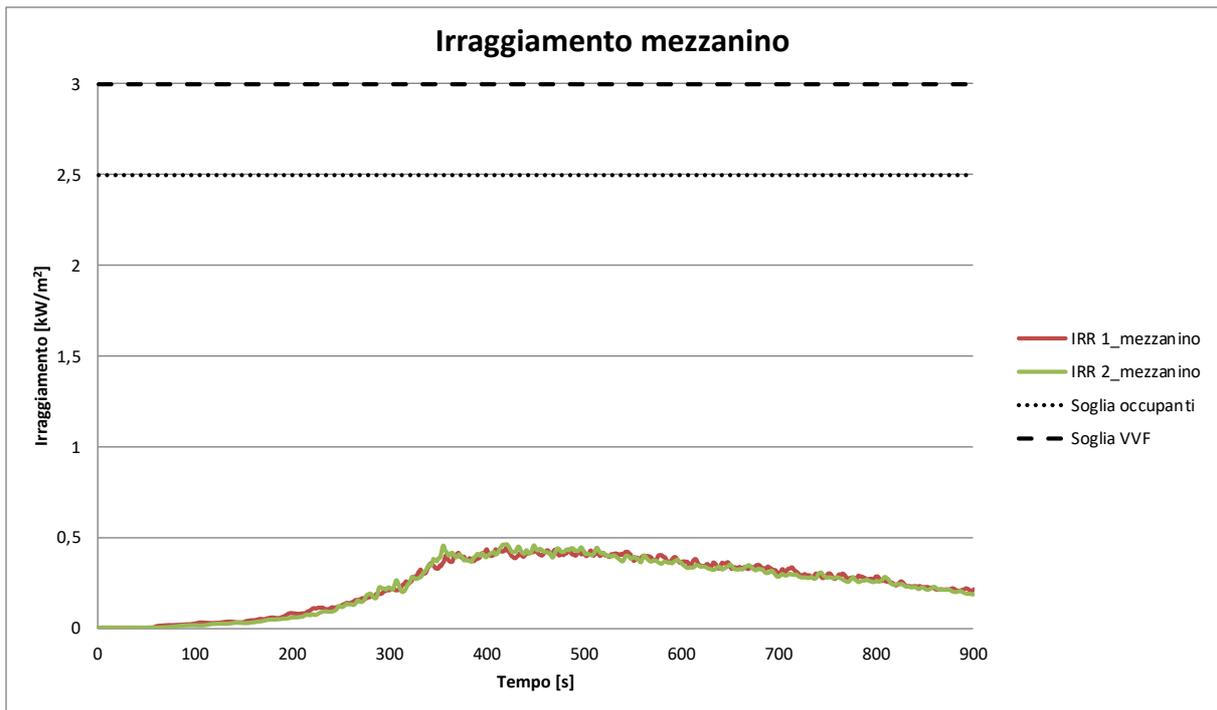


Figura 4.23– Irraggiamento mezzanino

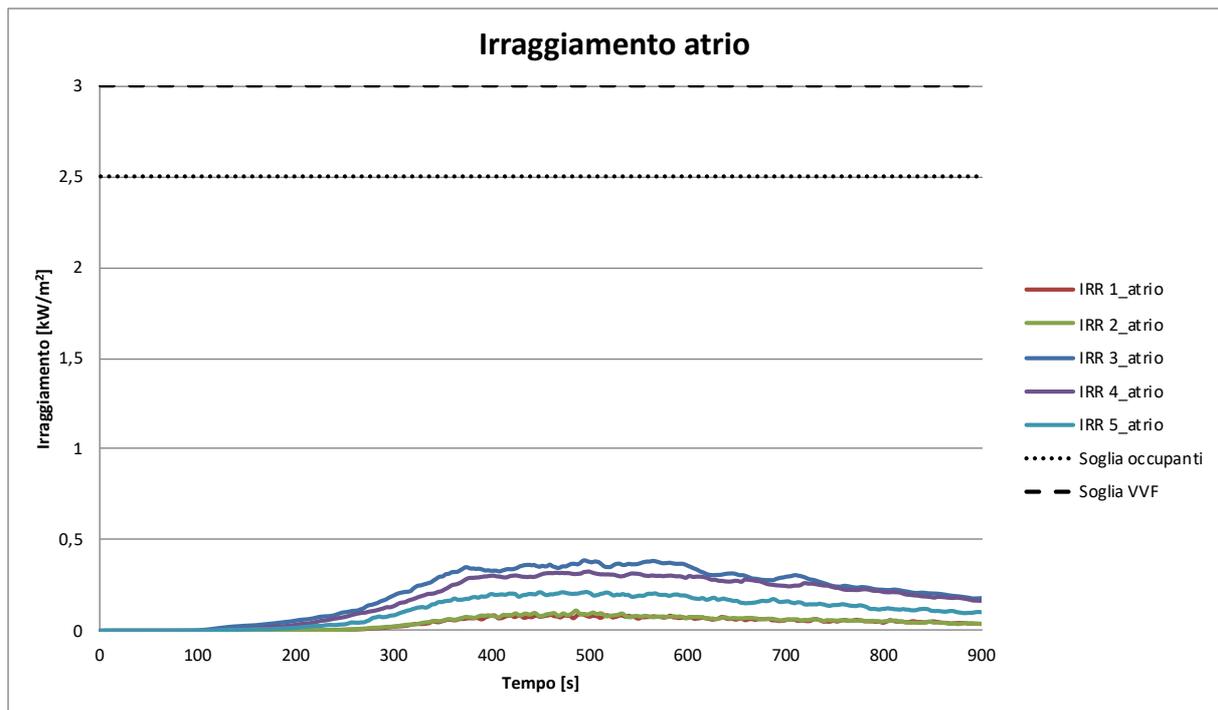


Figura 4.24 – Irraggiamento atrio

Dalle figure 4.22, 4.23 e 4.24 si può notare come i valori dell'irraggiamento siano molto bassi. I valori rilevati infatti rimangono sotto il valore di soglia almeno fino a 900 secondi.

### Modello dei gas tossici

Il modello dei gas tossici impiega il concetto di FED ovvero Fractional Effective Dose. Il valore soglia relativo al FED è pari a 0,1 [-]. Anche per questo calcolo sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad un'altezza di 1,80 m.

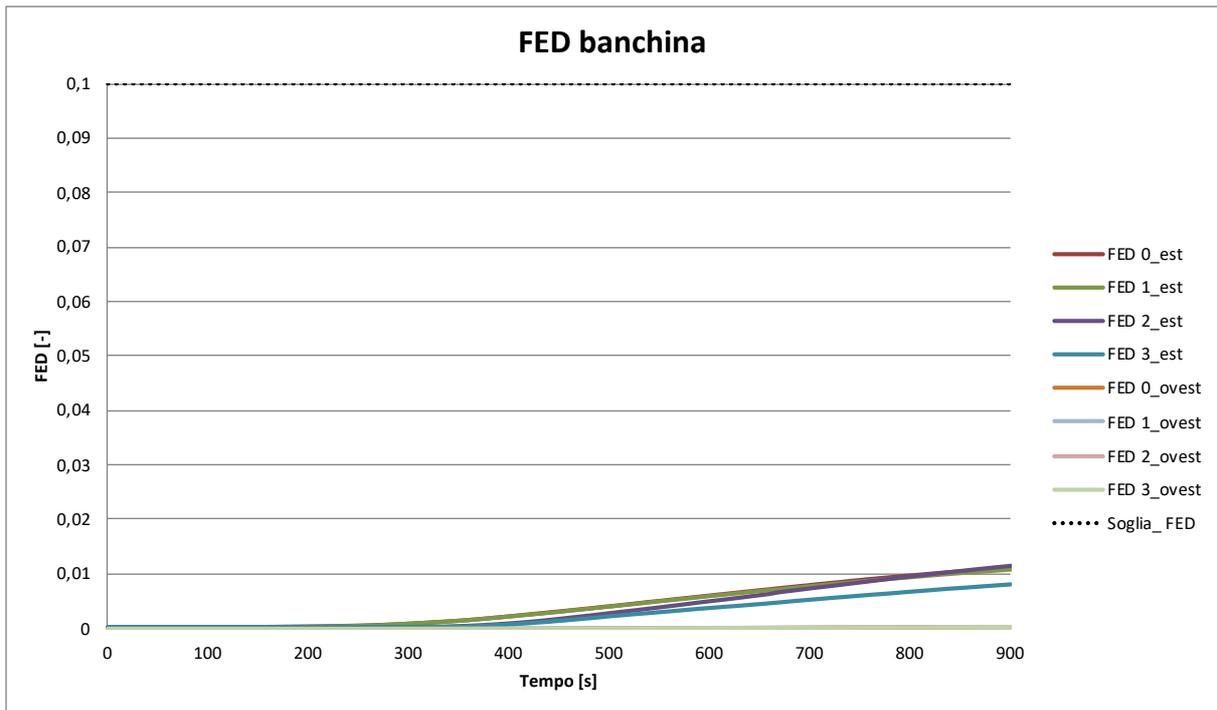


Figura 4.25 – FED banchina

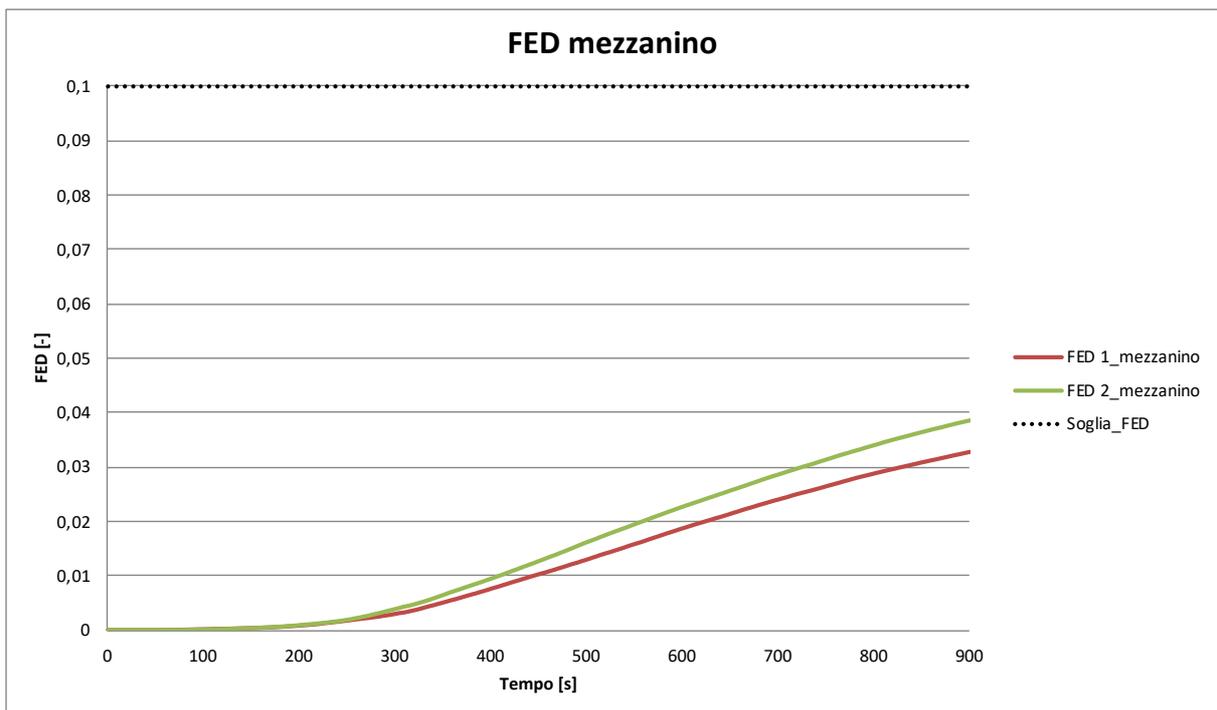


Figura 4.26 – FED mezzanino

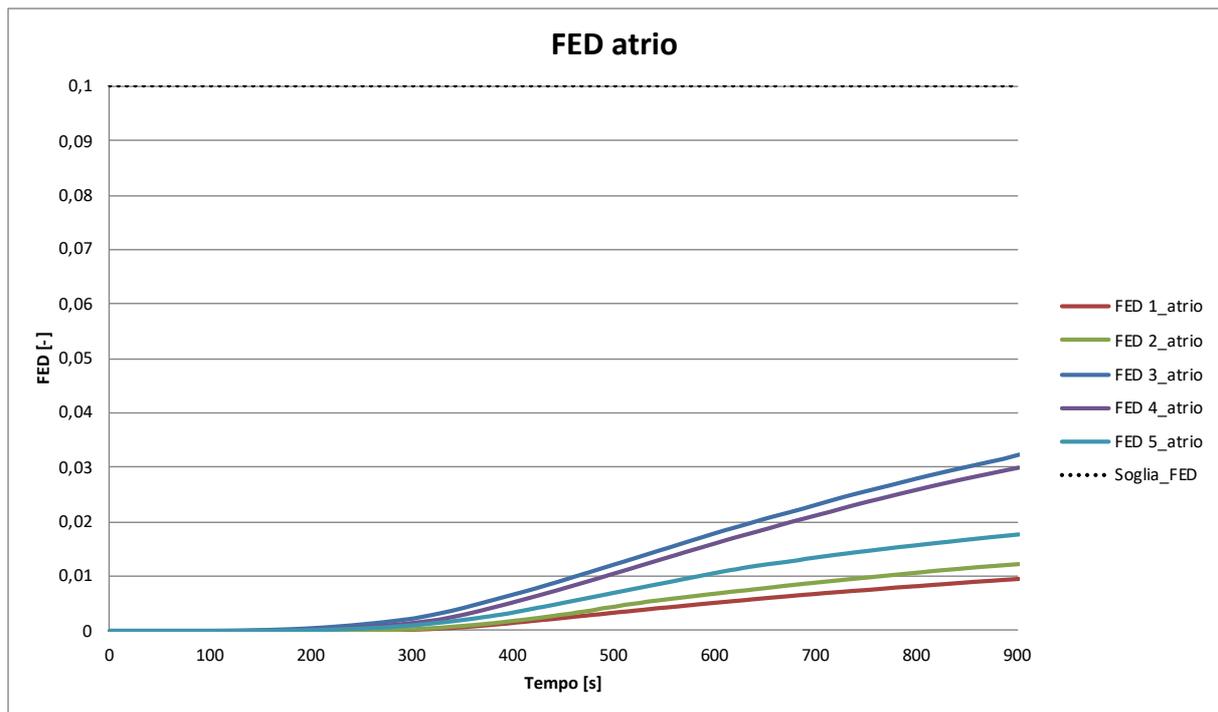


Figura 4.27 – FED atrio

Dalle figure 4.25, 4.26 e 4.27 si può notare come anche i valori della FED siano molto bassi. I valori rilevati infatti rimangono sotto il valore di soglia almeno fino a 900 secondi.

Di seguito vengono riportate le immagini, catturate da Pyrosim, di alcune slices e isosuperfici dopo 180 e 300 secondi, per capire come cambiano la velocità del fumo, la temperatura e la visibilità con lo svilupparsi dell'incendio.

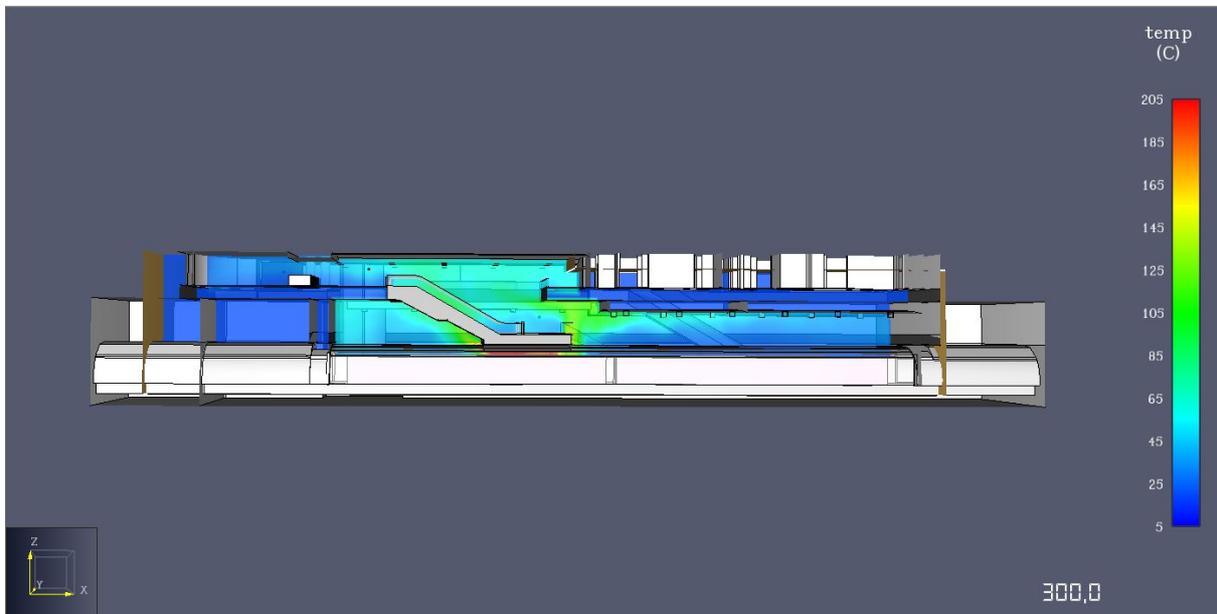
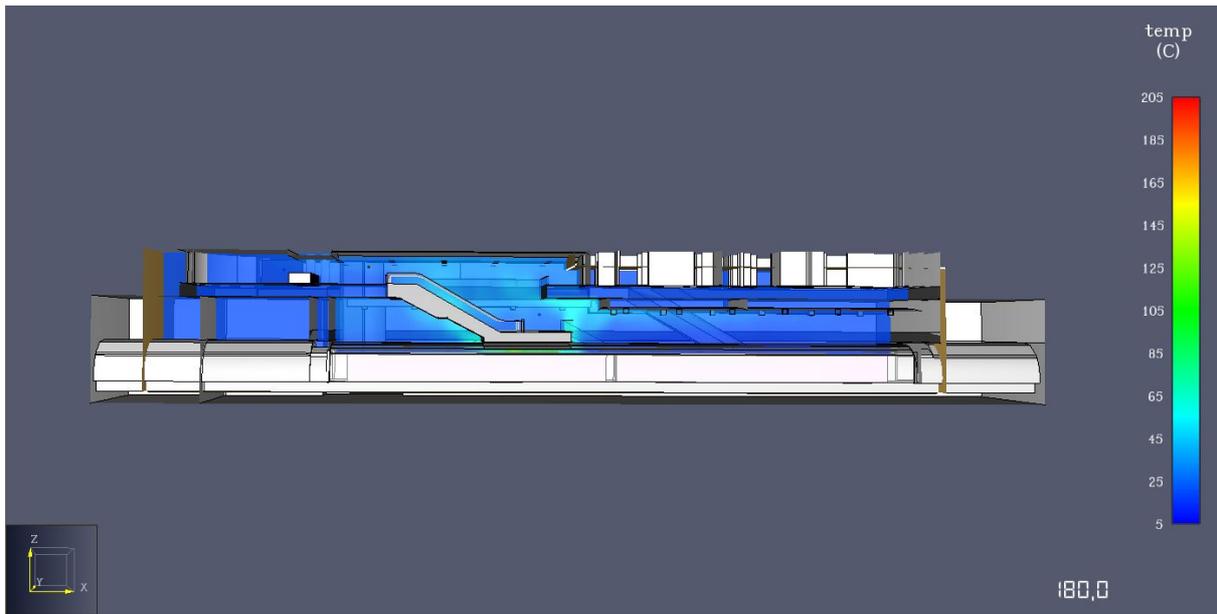


Figure 4.28 e 4.29 – Slice1 temperatura lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

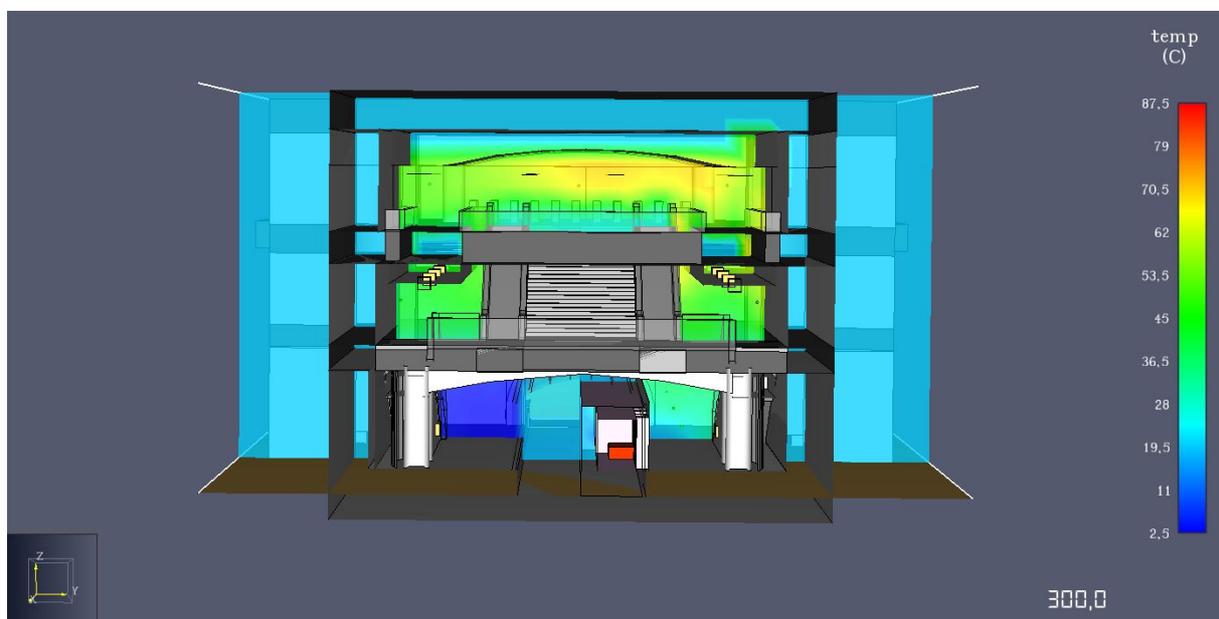
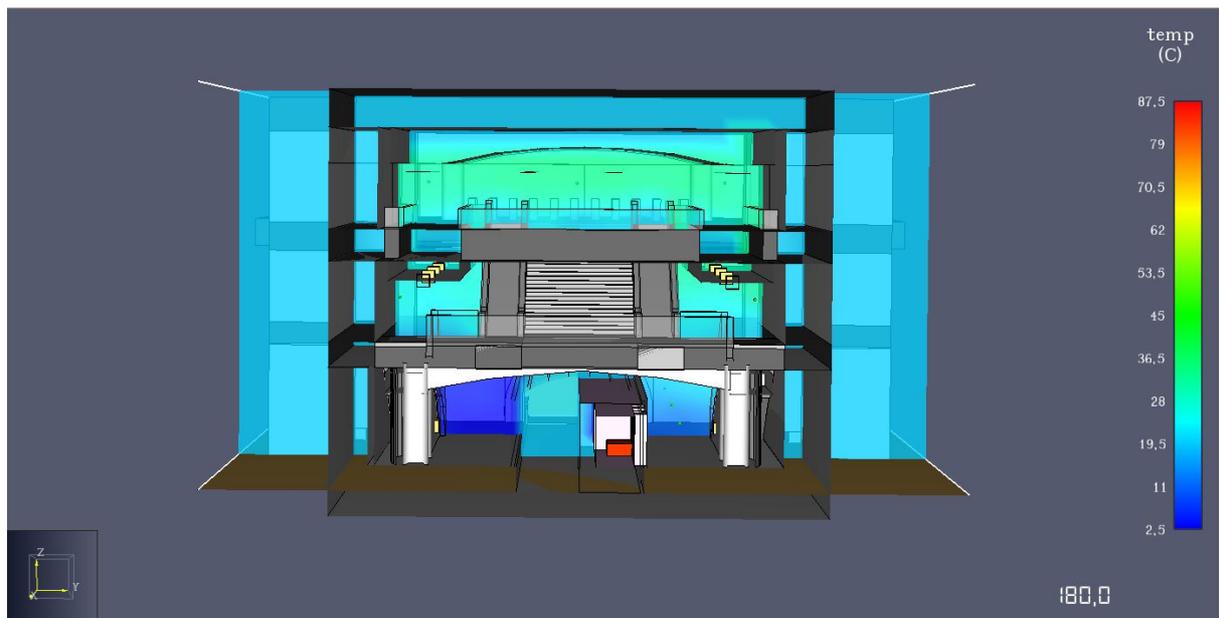


Figure 4.30 e 4.31 – Slice1 temperatura lungo Y rispettivamente dopo 180 e 300 s

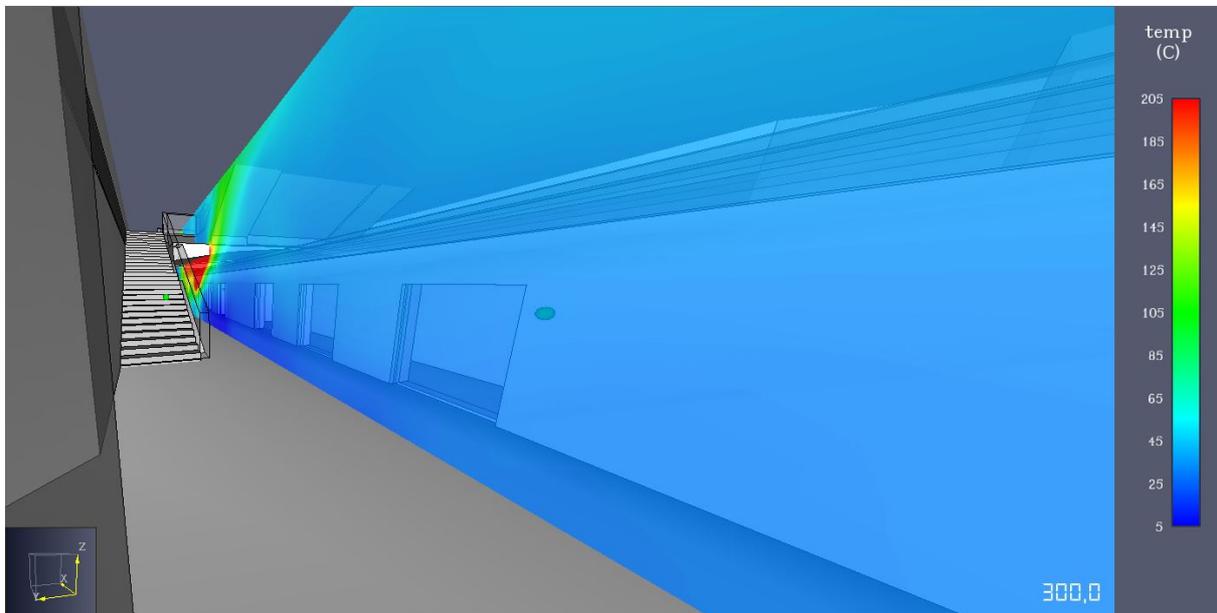
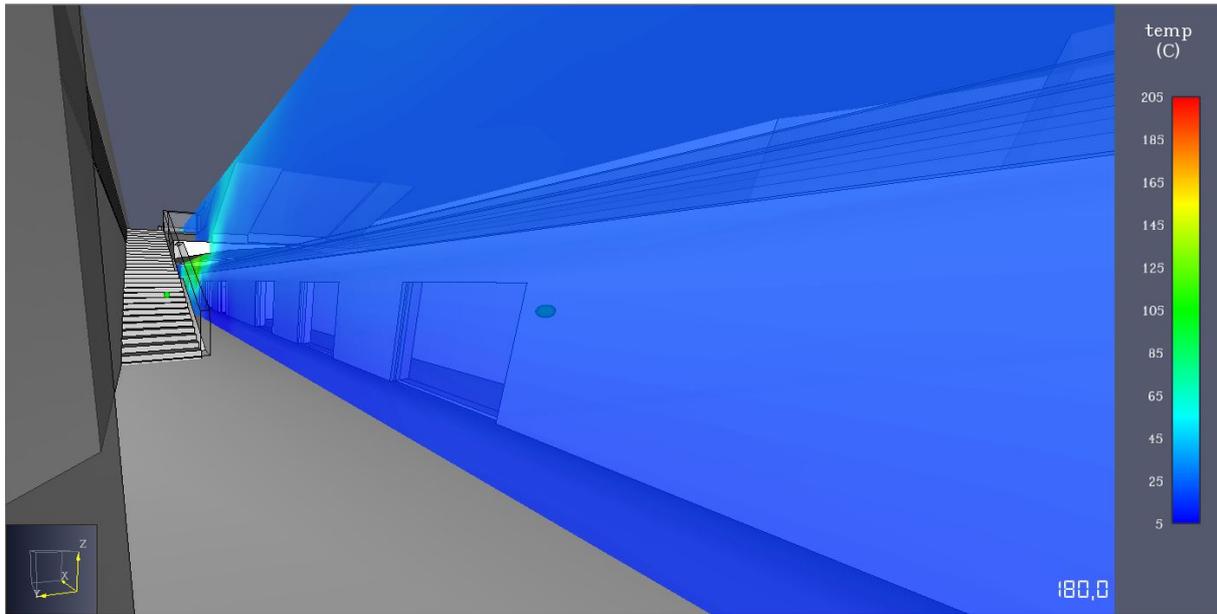


Figure 4.32 e 4.33 – Slice2 temperatura lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

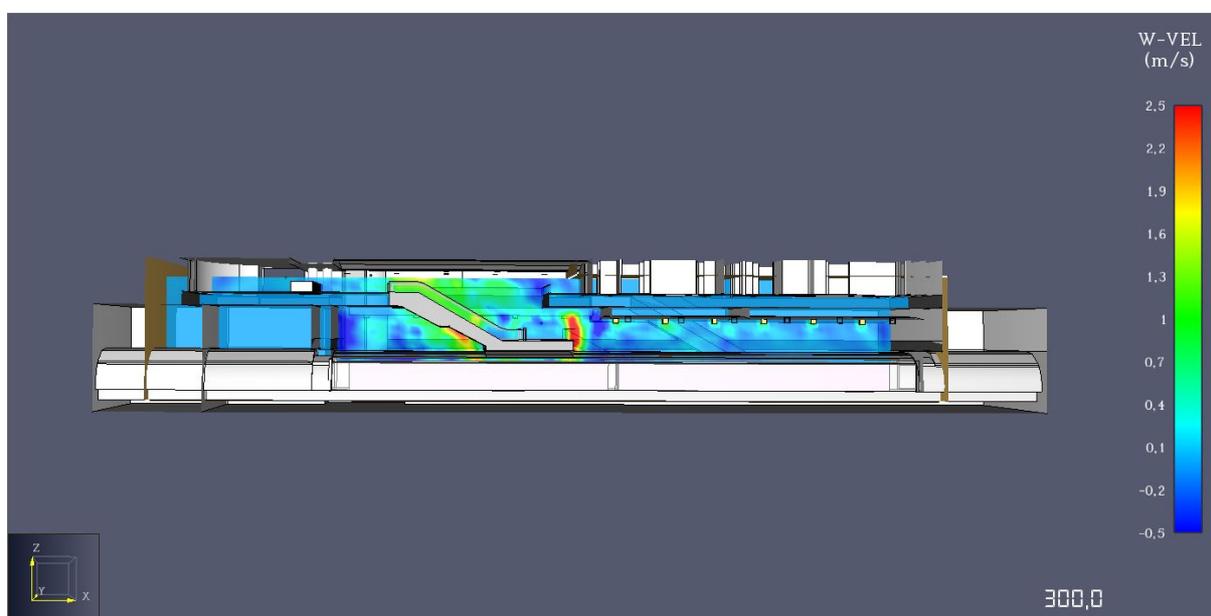
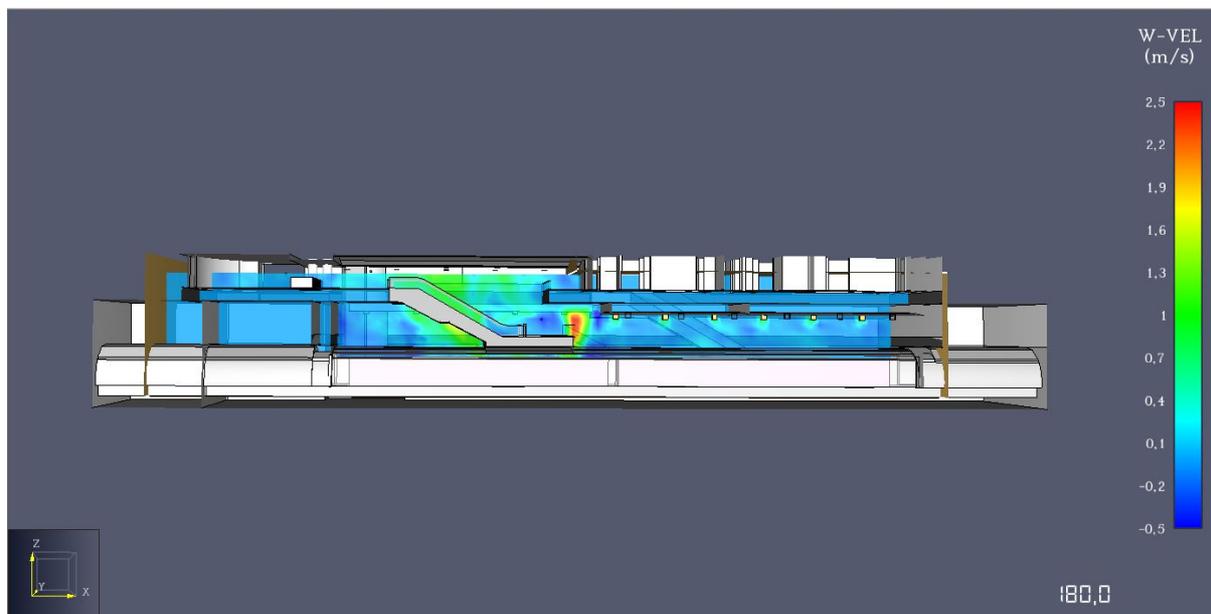


Figure 4.34 e 4.35 – Slice1 velocità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

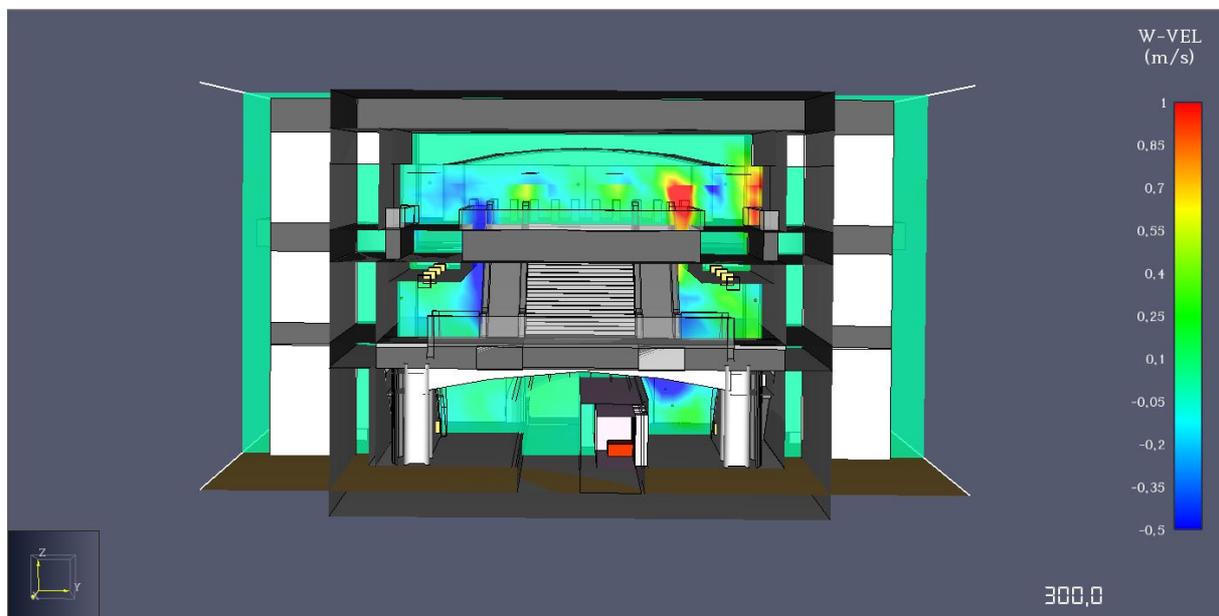
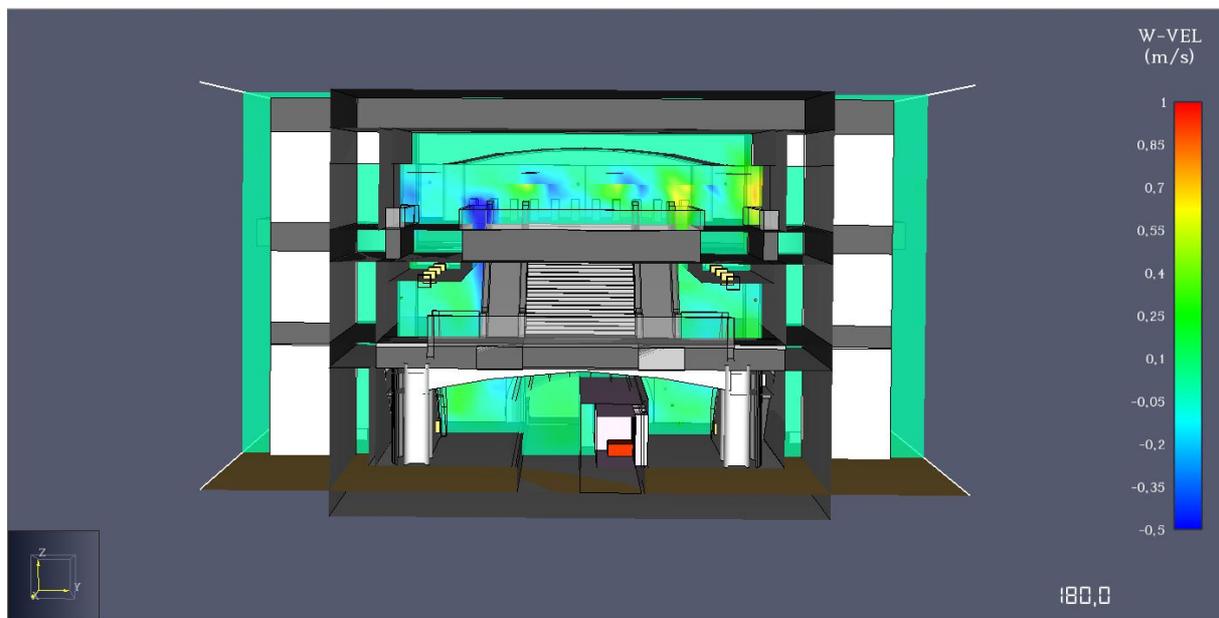


Figure 4.36 e 4.37 – Slice1 velocità lungo Y rispettivamente dopo 180 e 300 s

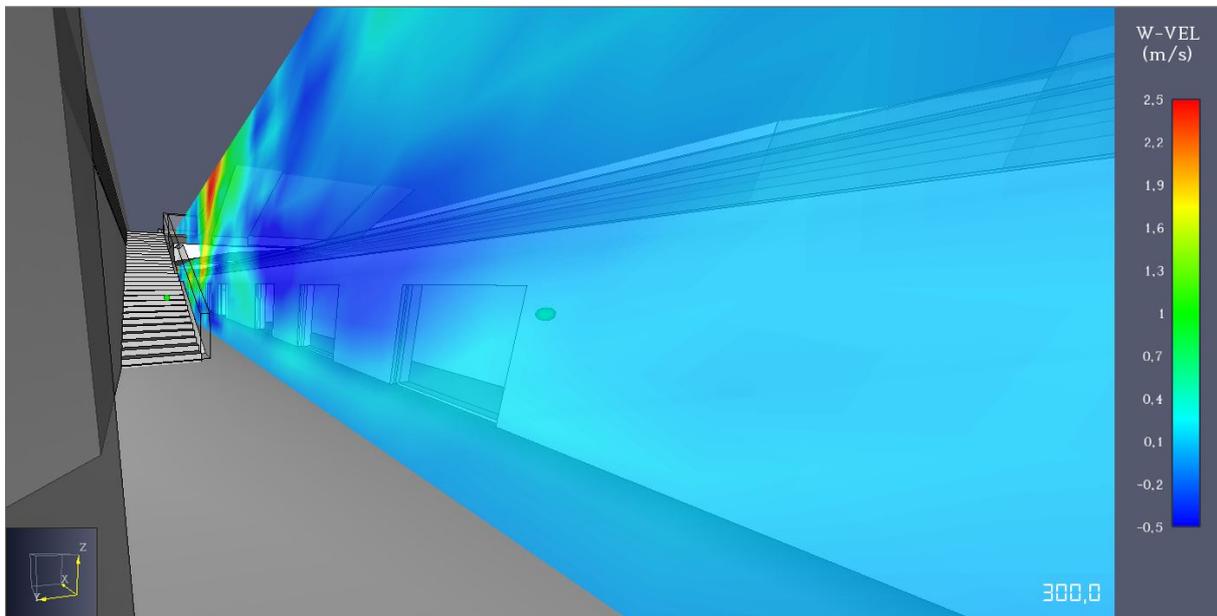
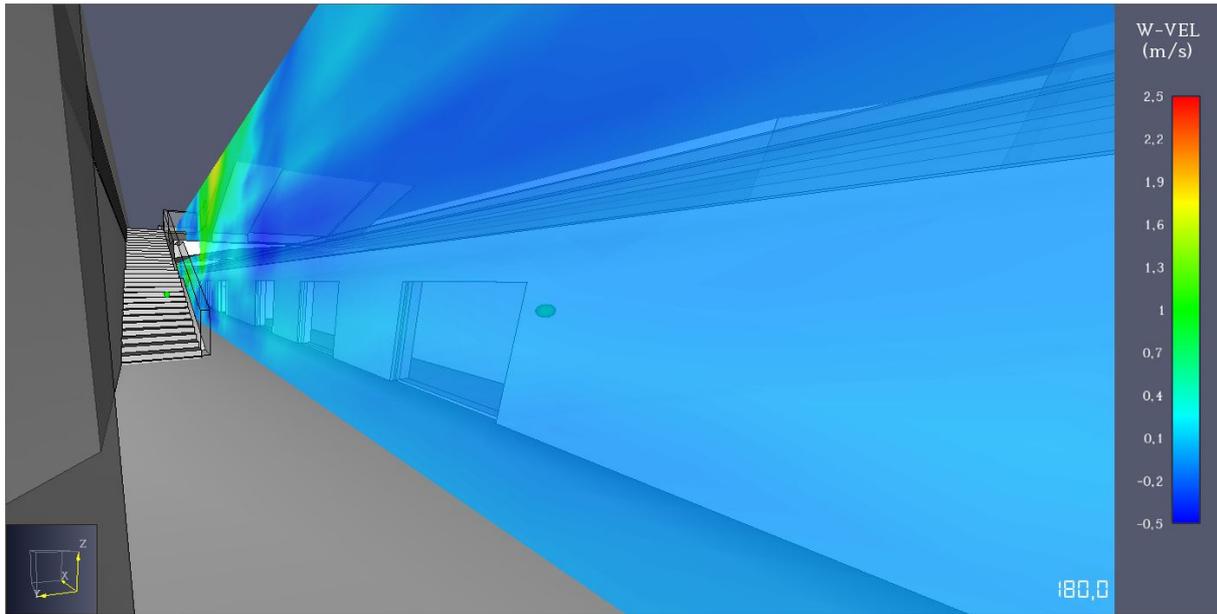


Figure 4.38 e 4.39 – Slice2 velocità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

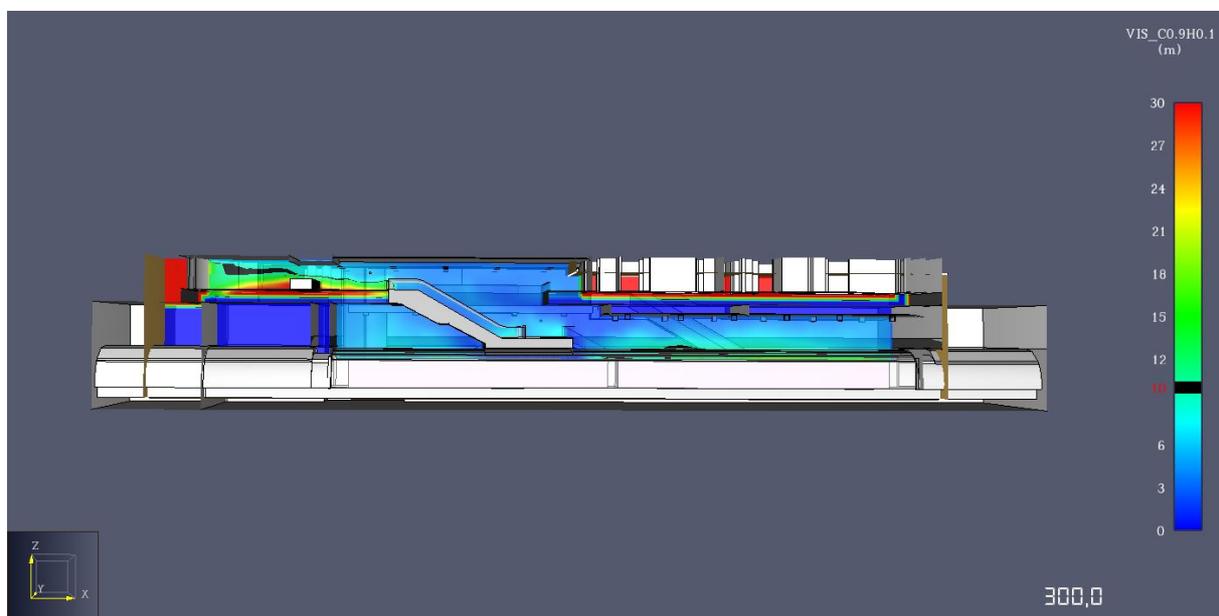
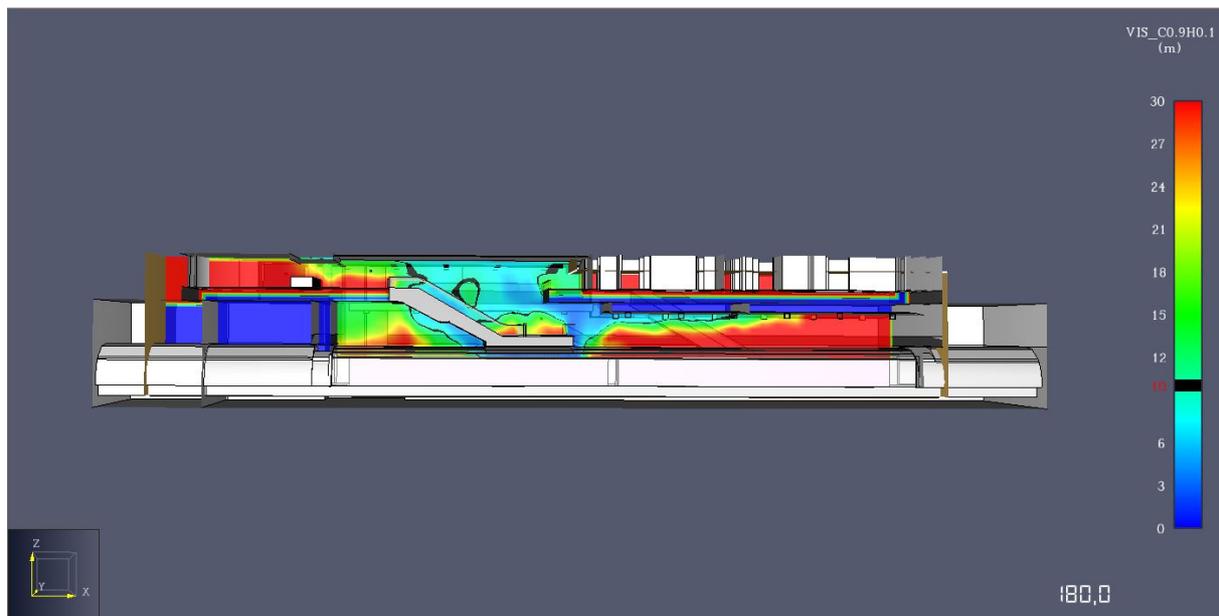


Figure 4.40 e 4.41 – Slice1 visibilità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

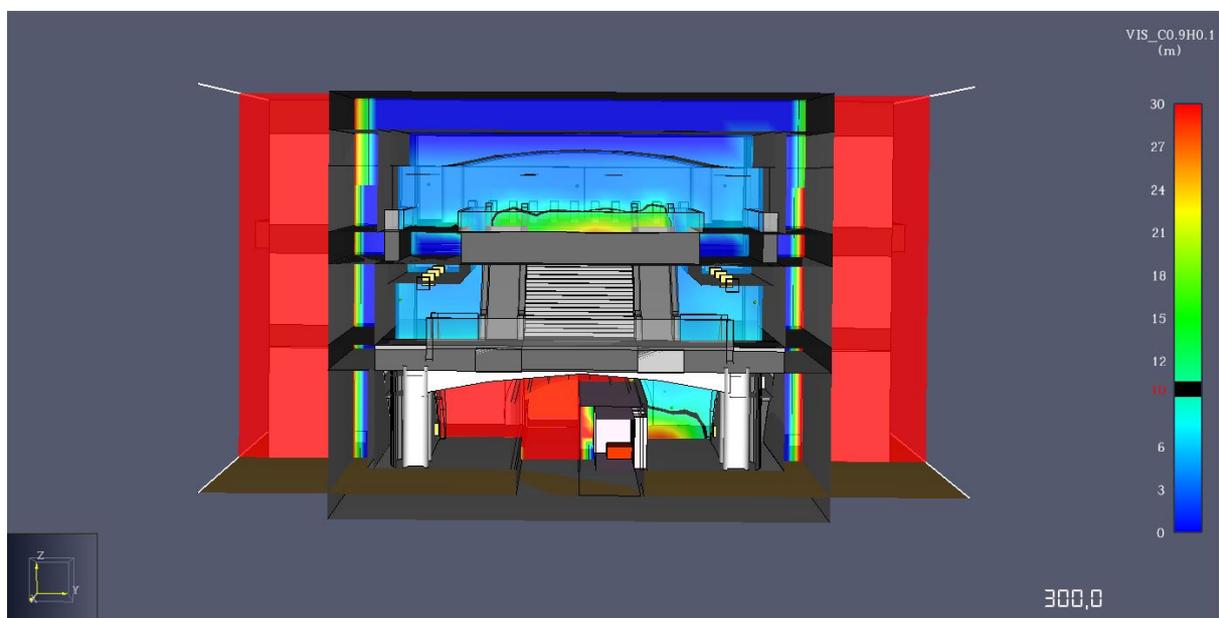
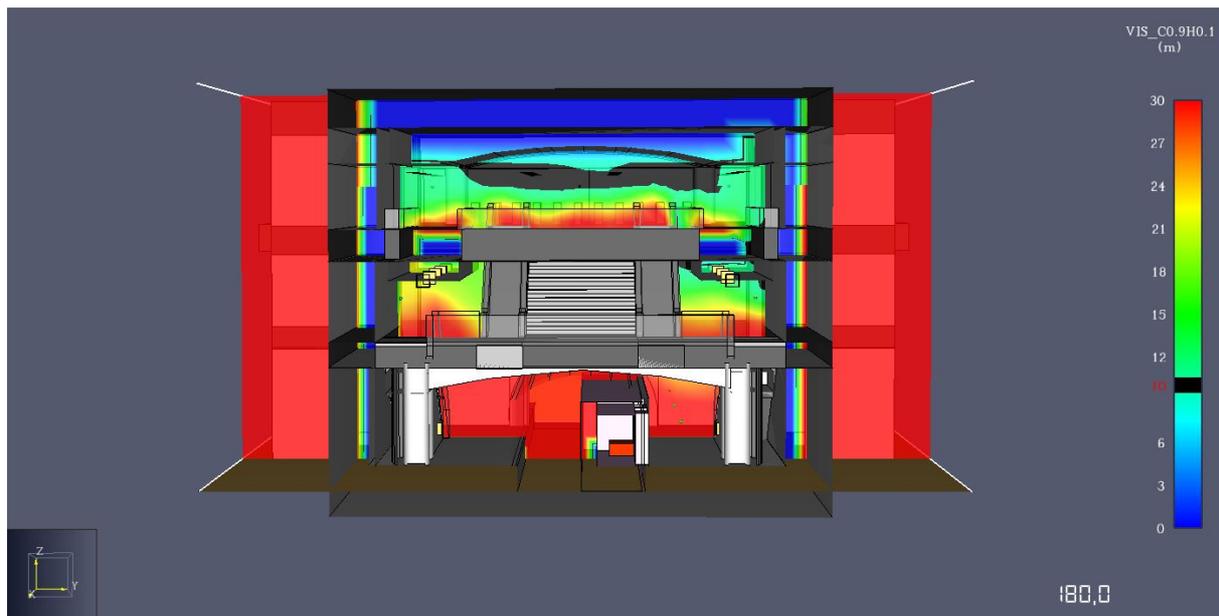


Figure 4.42 e 4.43 – Slice1 visibilità lungo Y rispettivamente dopo 180 e 300 s

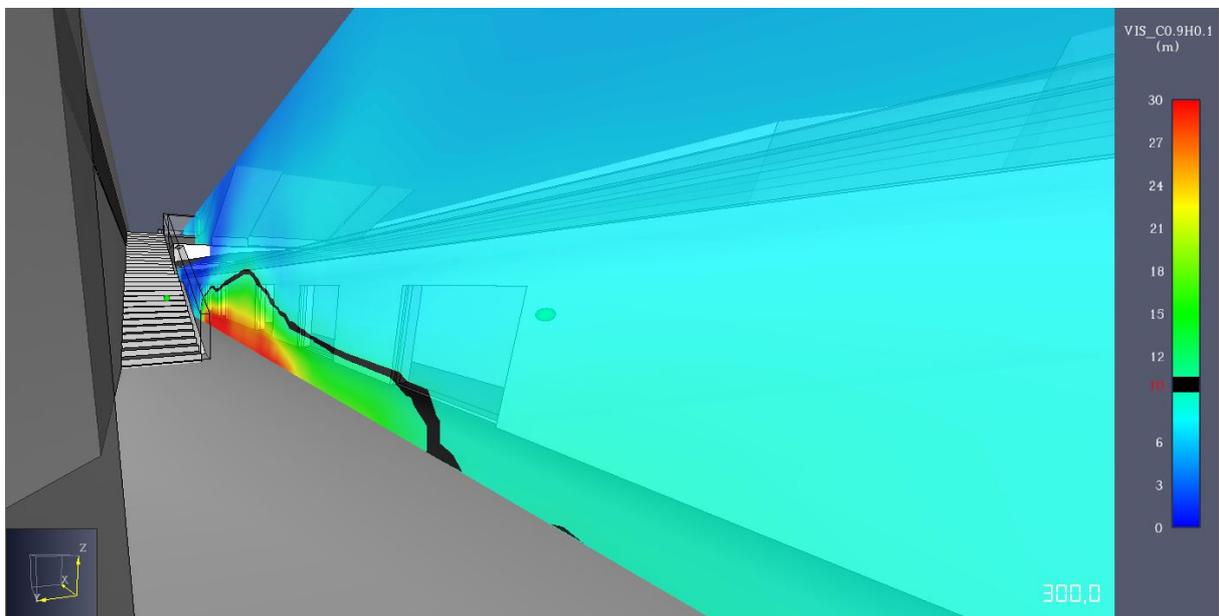
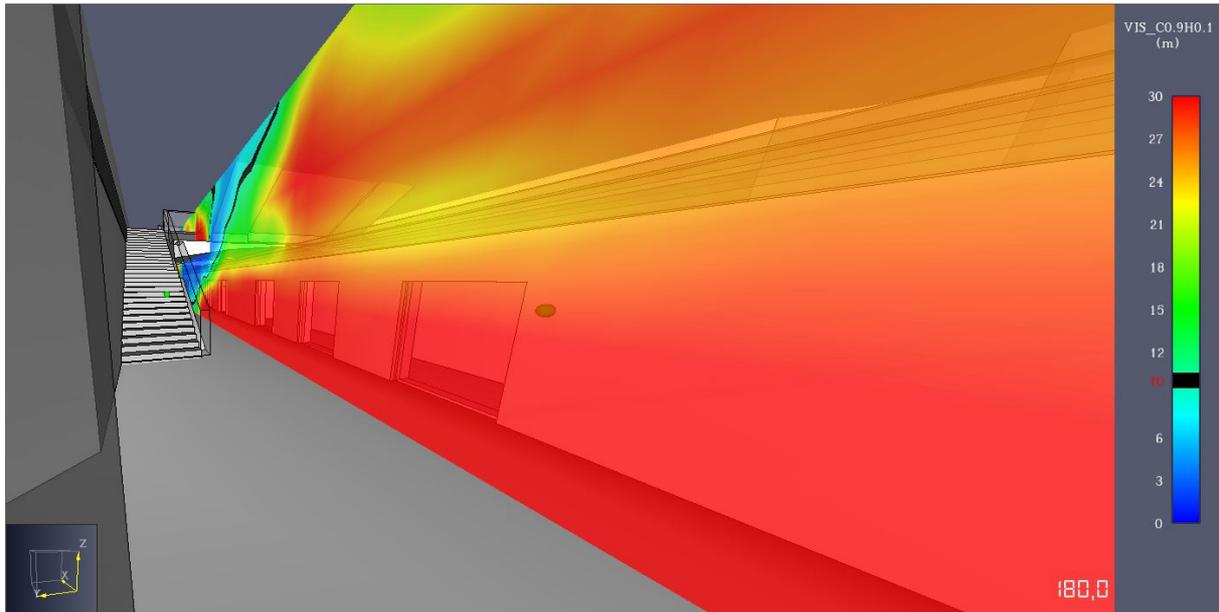


Figure 4.44 e 4.45 – Slice2 visibilità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

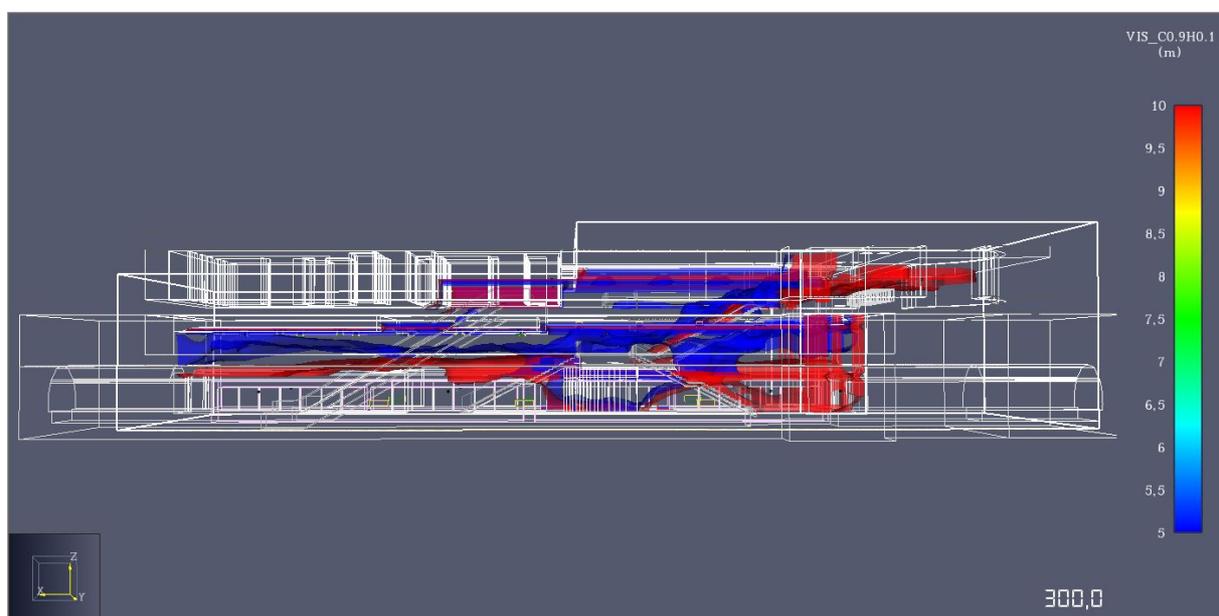
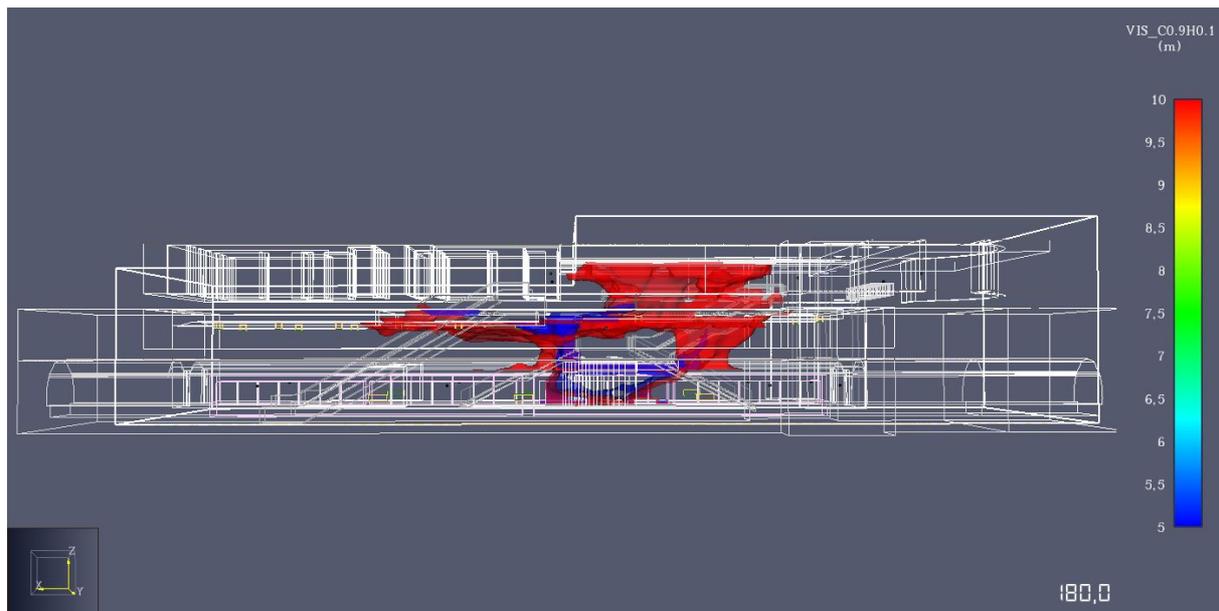


Figure 4.46 e 4.47 – Isosuperficie visibilità rispettivamente dopo 180 e 300 s

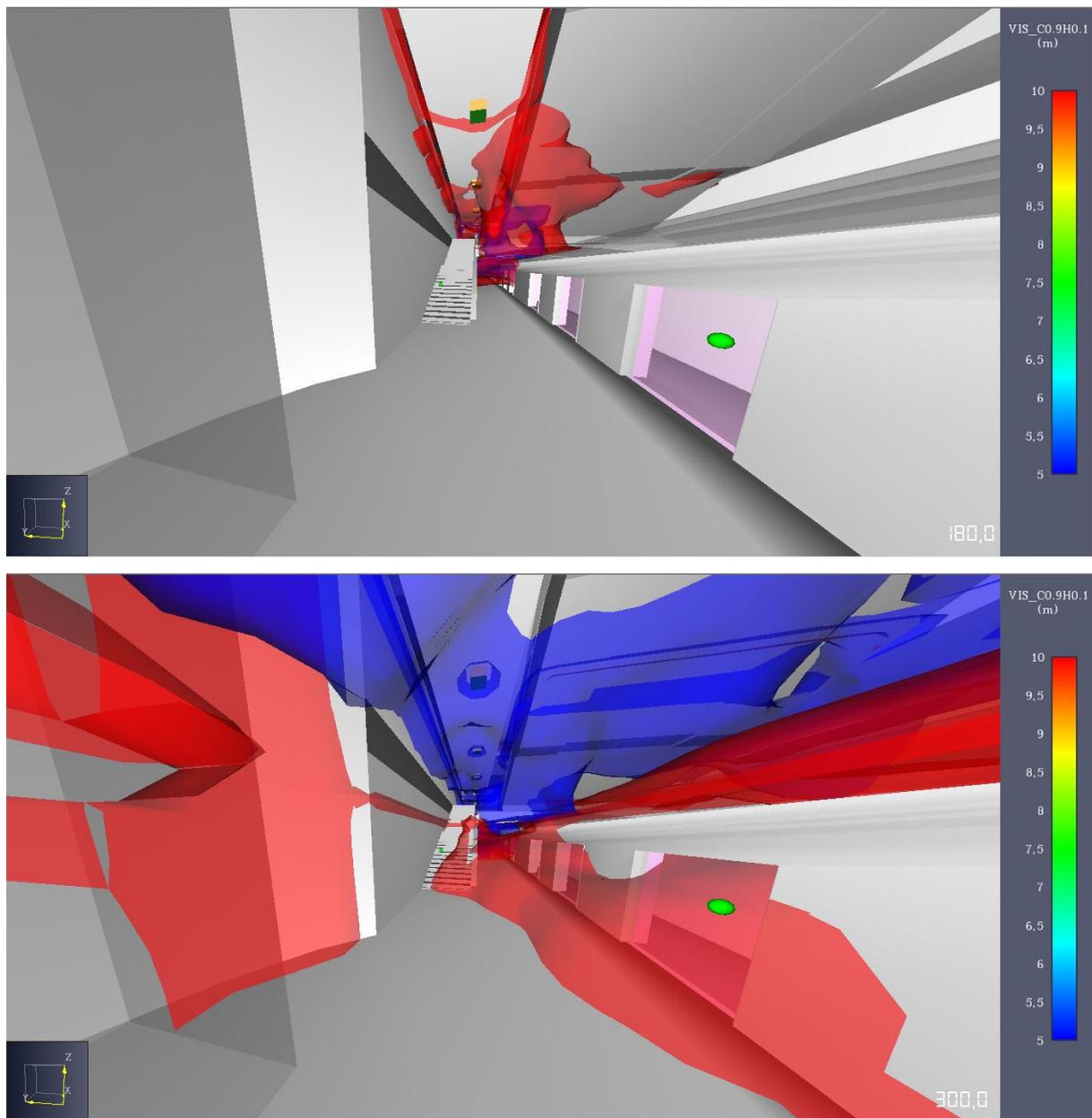


Figure 4.48 e 4.49 – Isosuperficie visibilità rispettivamente dopo 180 e 300 s

Come si può notare anche delle immagini relative alle slices e alle isosuperfici (dalla figura 4.28 alla figura 4.49) l'andamento dei fumi deve essere approfondito andando a testare il sistema di ventilazione attraverso una prova sperimentale.

#### 4.4.7 Risultati Scenario 2

Lo scenario 2 ipotizza un incendio a bordo treno che si sviluppa sul veicolo di testa (lato Dante) con una potenza totale di picco pari a 7000 kW (Figura 4.50).

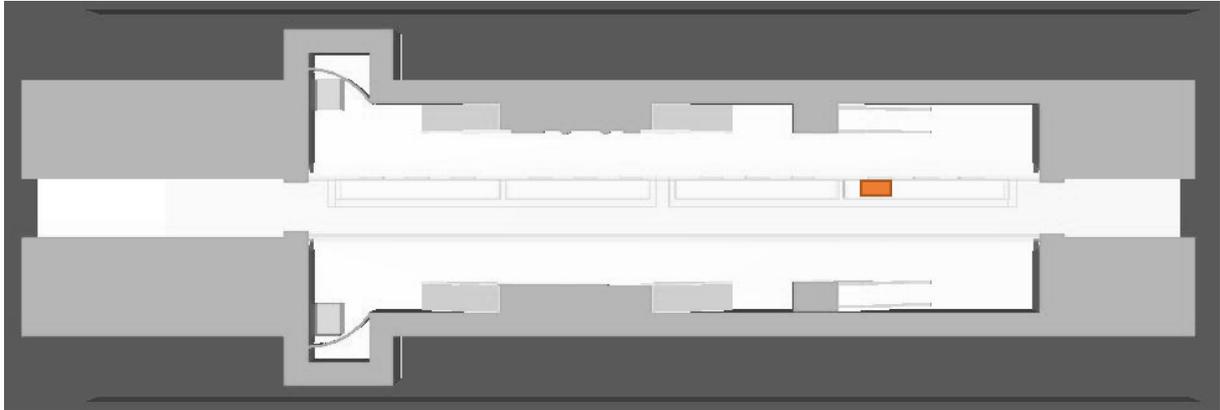


Figura 4.50 – Posizione focolaio scenario 2

In questa simulazione è stata solamente cambiata la posizione del focolaio, per questo motivo il tempo di apertura delle porte, il sistema di ventilazione e la curva RHR sono le medesime dello scenario 1.

Come precedentemente detto, i risultati ricavati dai devices sono stati tabulati da FDS all'interno di un file chiamato "*nomeelaborato\_devc.csv*". Tali risultati sono stati successivamente maneggiati mediante il software Excel. Di seguito si riportano gli esiti per i 4 modelli di calcolo.

##### Modello visibilità

La soglia di visibilità è pari a 10 m per gli occupanti e 5 m per i soccorritori.

Per questo calcolo sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad un'altezza di 1,80 m. In questo caso sono stati aumentati i punti di verifica per valutare con più precisione l'andamento dei fumi e in quanto la visibilità risulta essere la variabile che maggiormente influenza il valore di ASET.

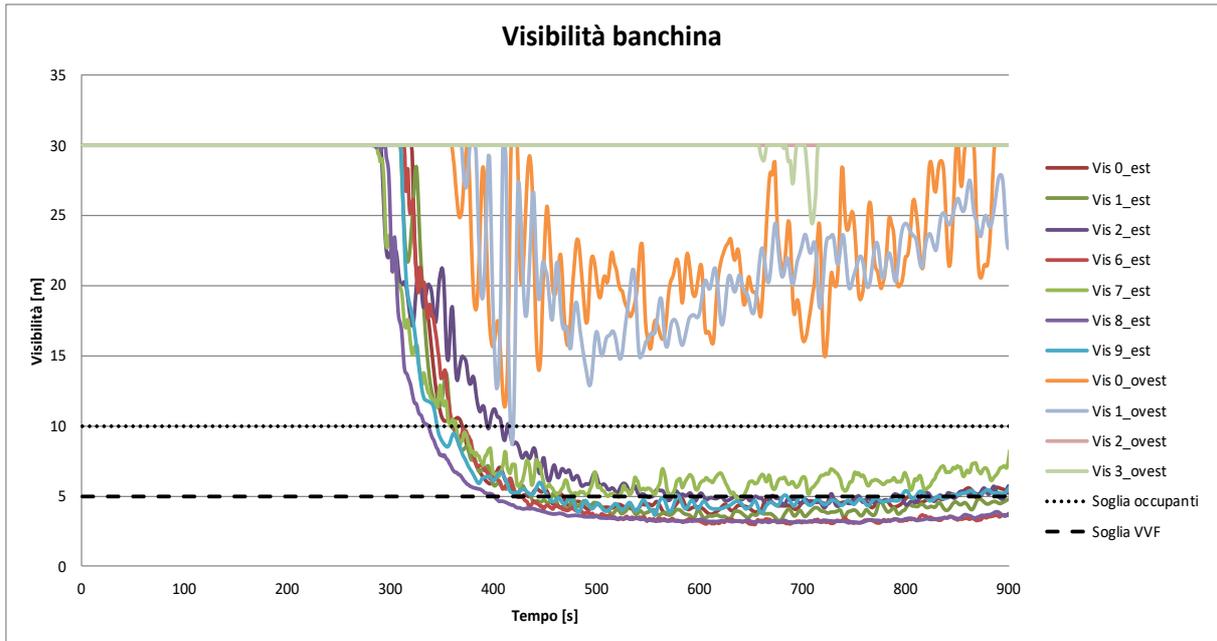


Figura 4.51 – Visibilità banchina

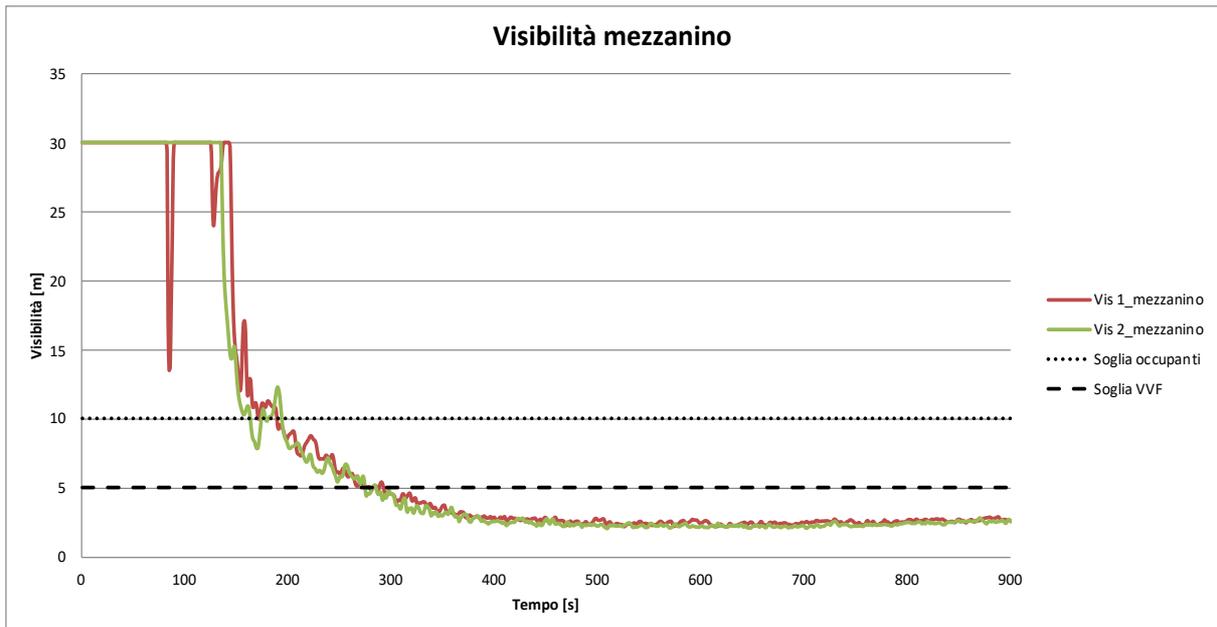


Figura 4.52 – Visibilità mezzanino

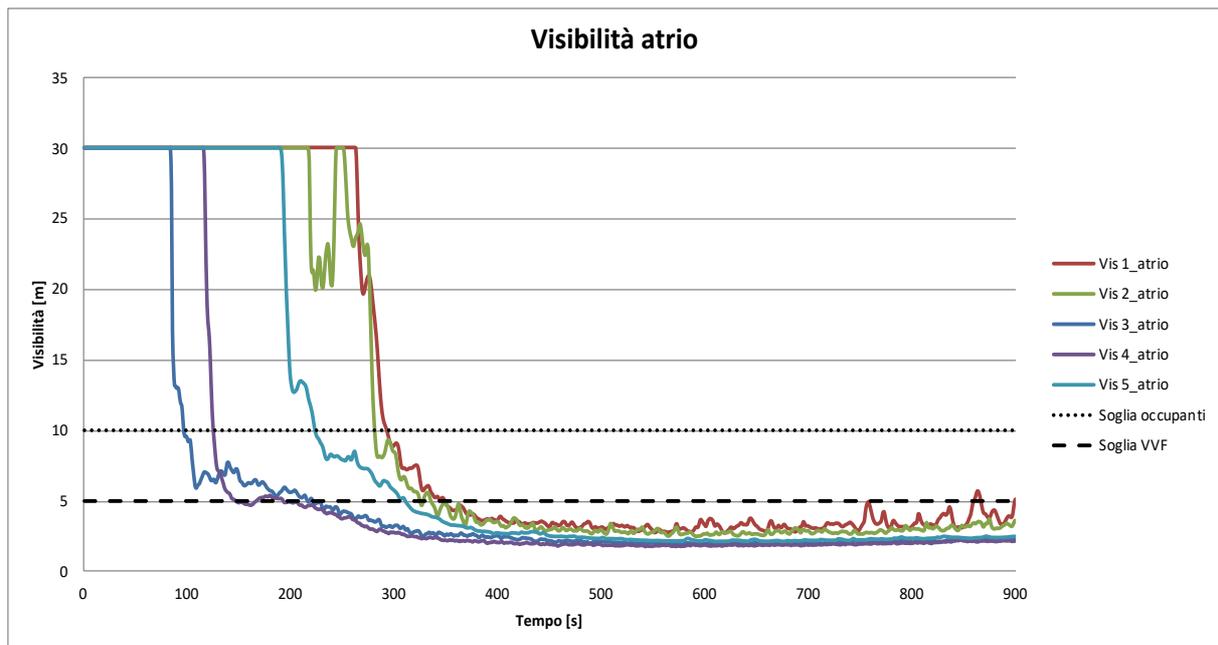


Figura 4.53 – Visibilità atrio

Dalle figure 4.51, 4.52 e 4.53 si può notare come la visibilità raggiunga in tempi molto brevi (99s rilevati da Vis 3\_atrio) la soglia prestazionale posta a 10 m.

### Modello del calore

Per il modello del calore si fa riferimento alla temperatura ambiente, il cui valore di soglia è pari a 60 °C per gli occupanti e 80 °C per i soccorritori. Anche in questo caso sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad altezza di 1,80 m.

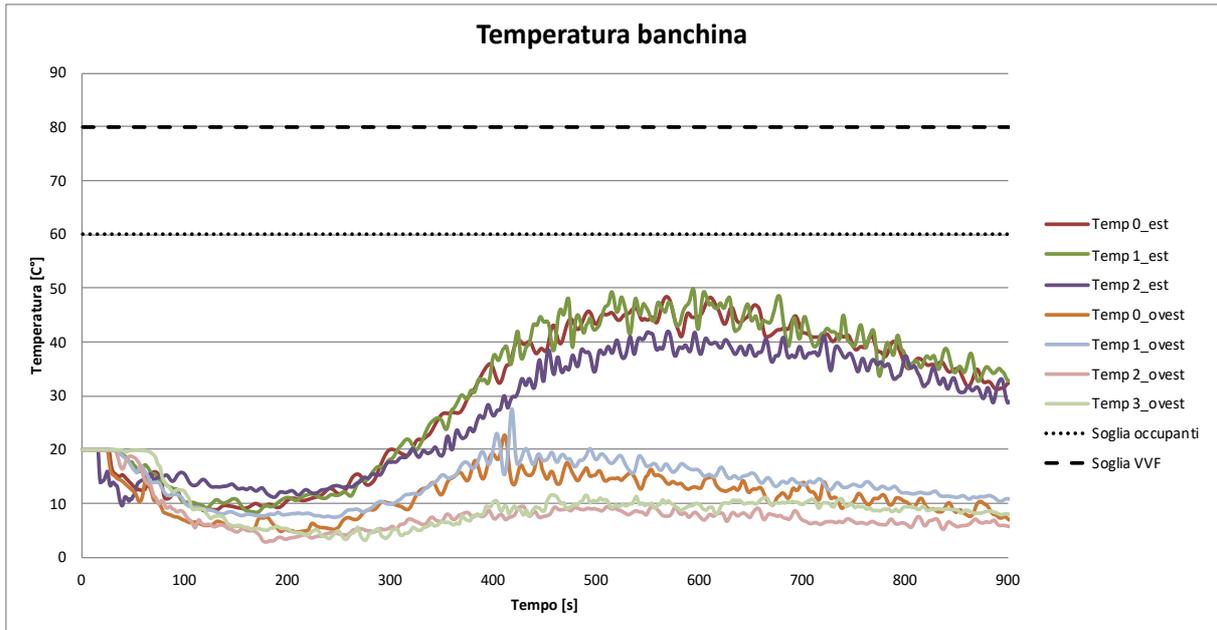


Figura 4.54 – Temperatura banchina

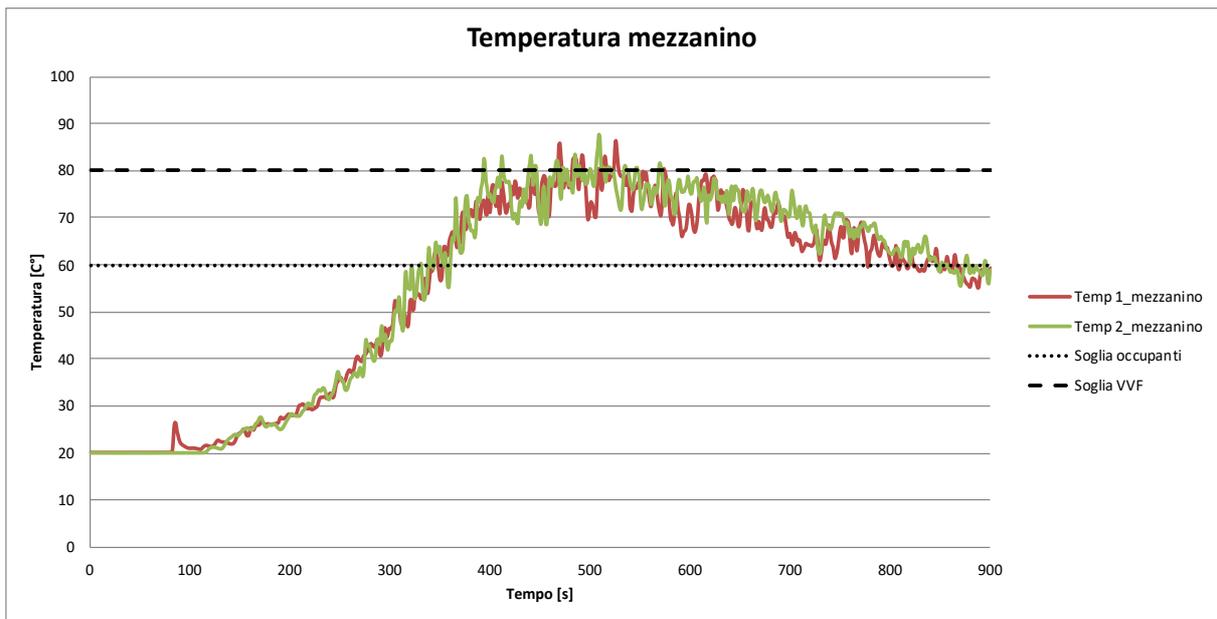


Figura 4.55 – Temperatura mezzanino

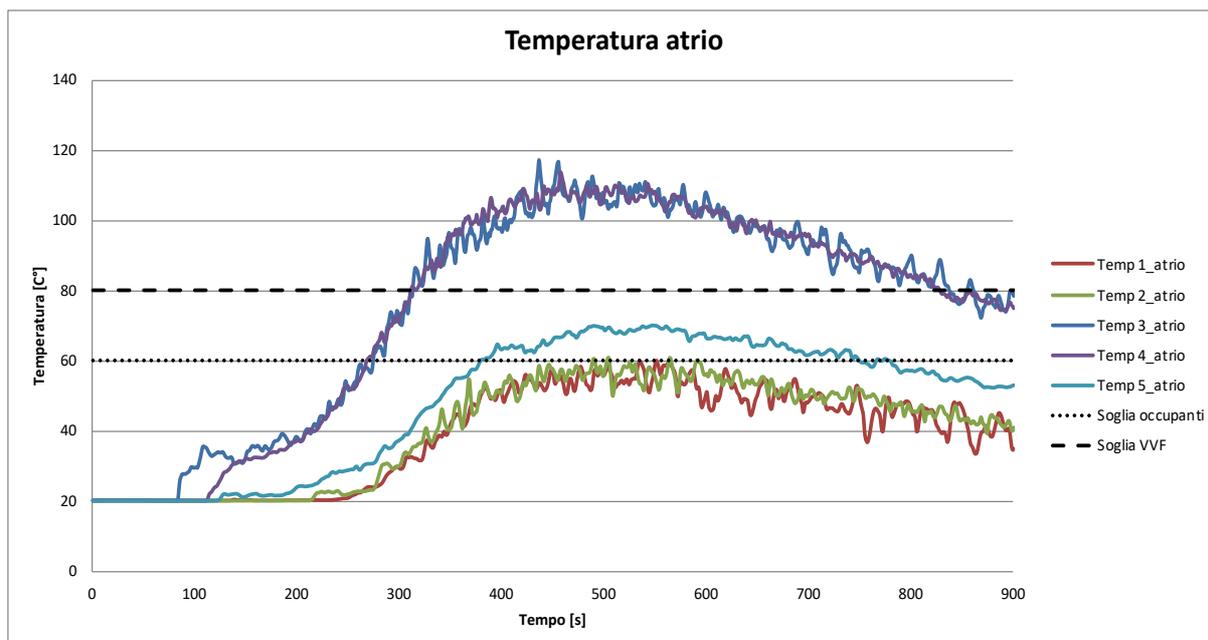


Figura 4.56 – Temperatura atrio

Dalle figure 4.54, 4.55 e 4.56 si può notare come la temperatura rilevata superi il valore di soglia a 271 secondi (rilevati da Temp 4\_atrio).

Per il modello di calore si fa riferimento anche all'irraggiamento sugli occupanti il cui valore di soglia è pari a  $2,5 \text{ kW/m}^2$ . Anche in questo caso sono stati previsti dei devices nel modello di Pyrosim posti ad un'altezza di 1,80 m.

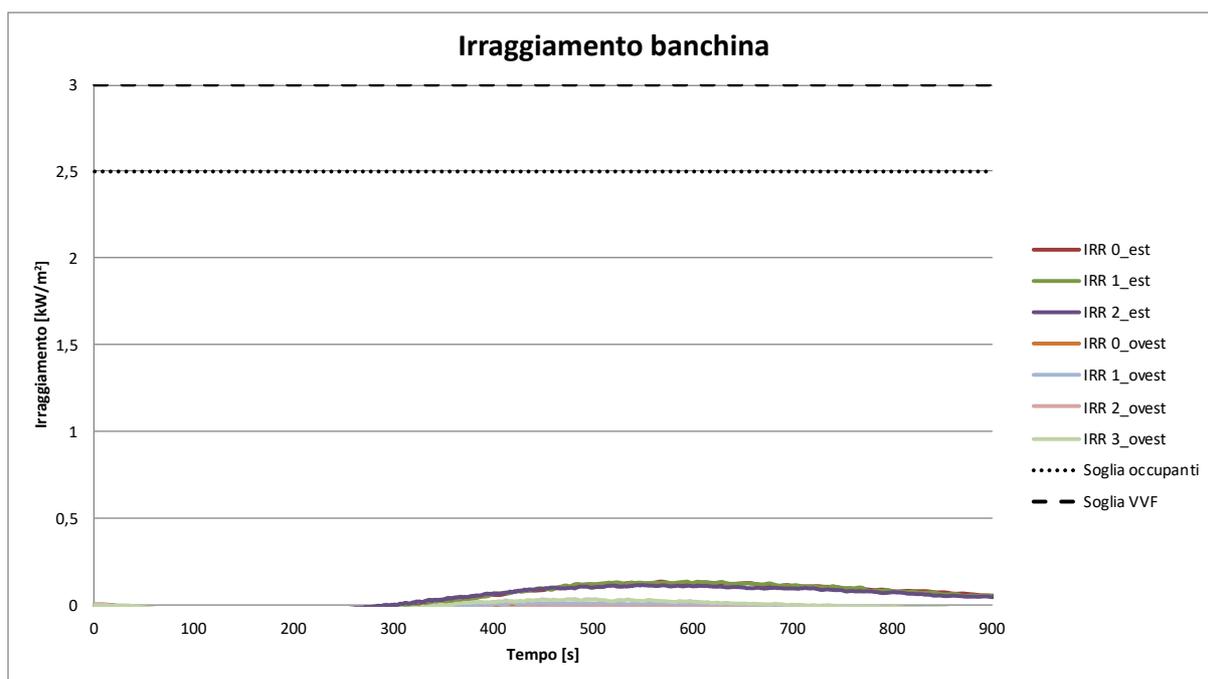


Figura 4.57 – Irraggiamento banchina

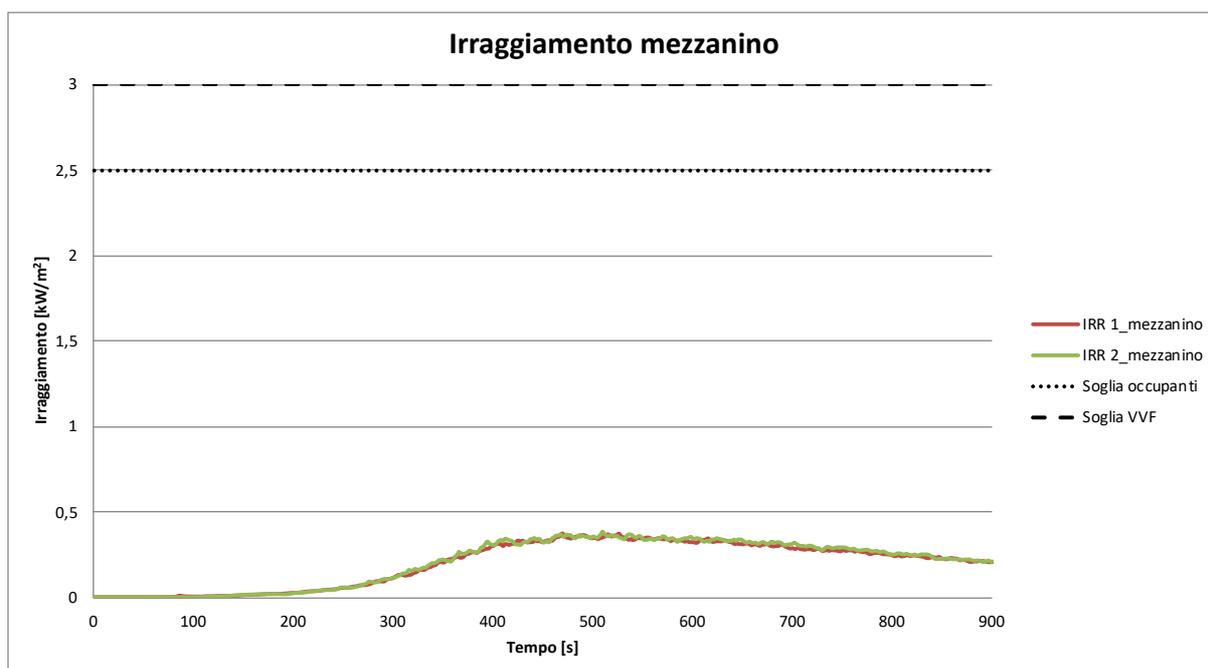


Figura 4.58 – Irraggiamento mezzanino

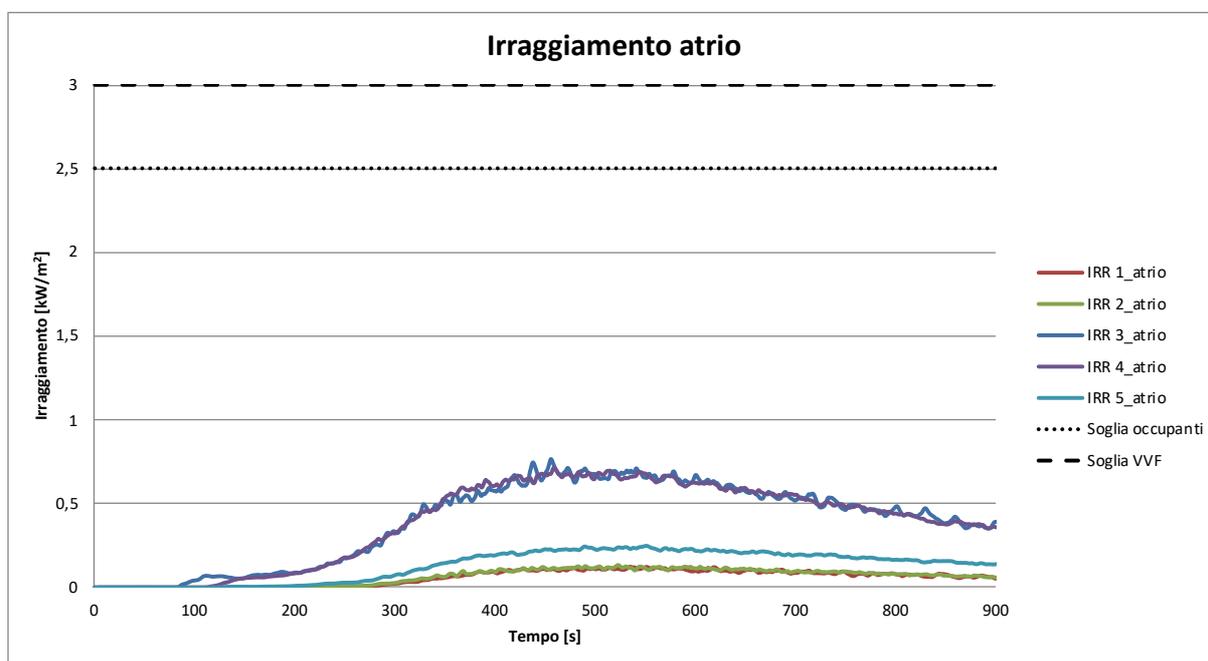


Figura 4.59 – Irraggiamento atrio

Dalle figure 4.57, 4.58 e 4.59 si può notare come i valori dell'irraggiamento siano molto bassi. I valori rilevati infatti rimangono sotto il valore di soglia almeno fino a 900 secondi.

## Modello dei gas tossici

Il valore soglia relativo al FED è pari a 0,1 [-]. Anche per questo calcolo sono stati posizionati all'interno del programma Pyrosim dei devices posti ad un'altezza di 1,80 m.

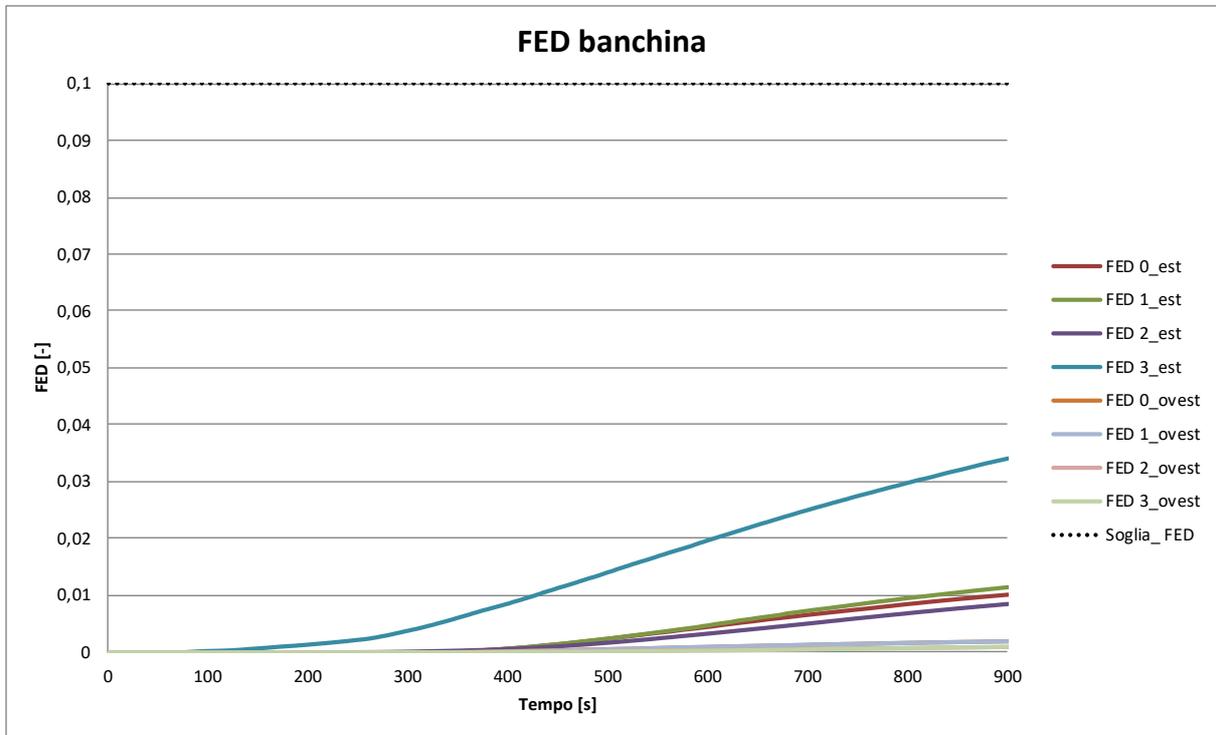


Figura 4.60 – FED banchina

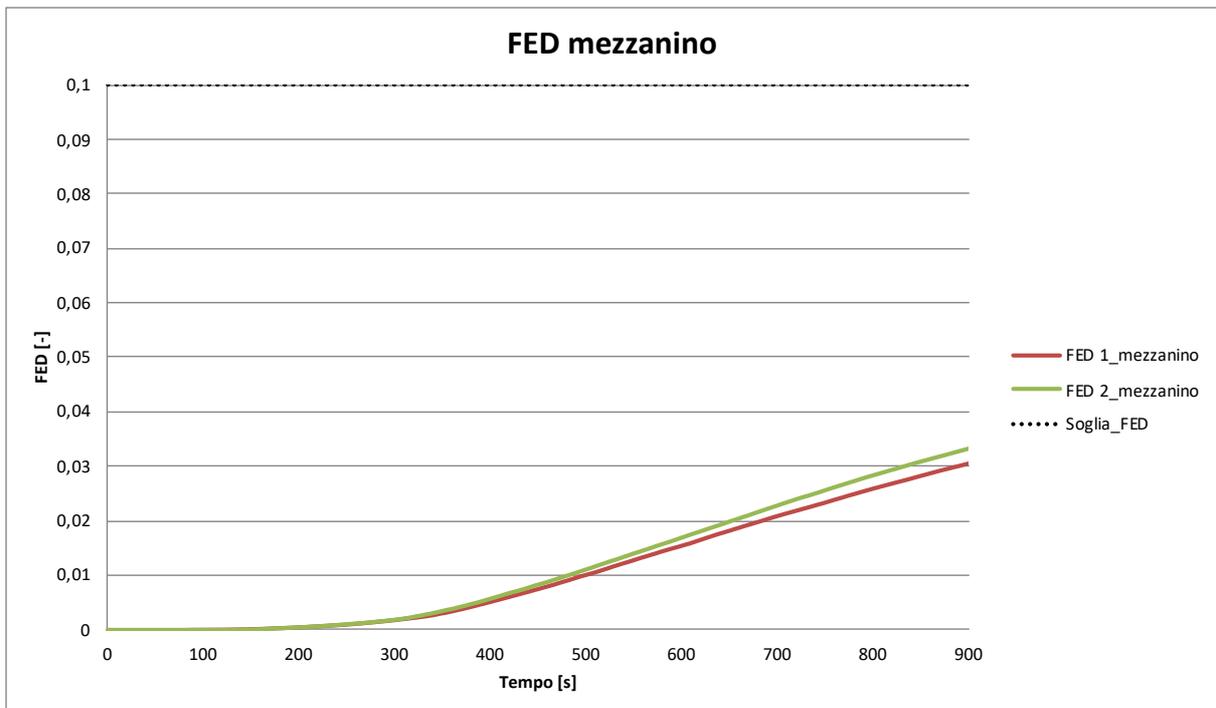


Figura 4.61 – FED mezzanino

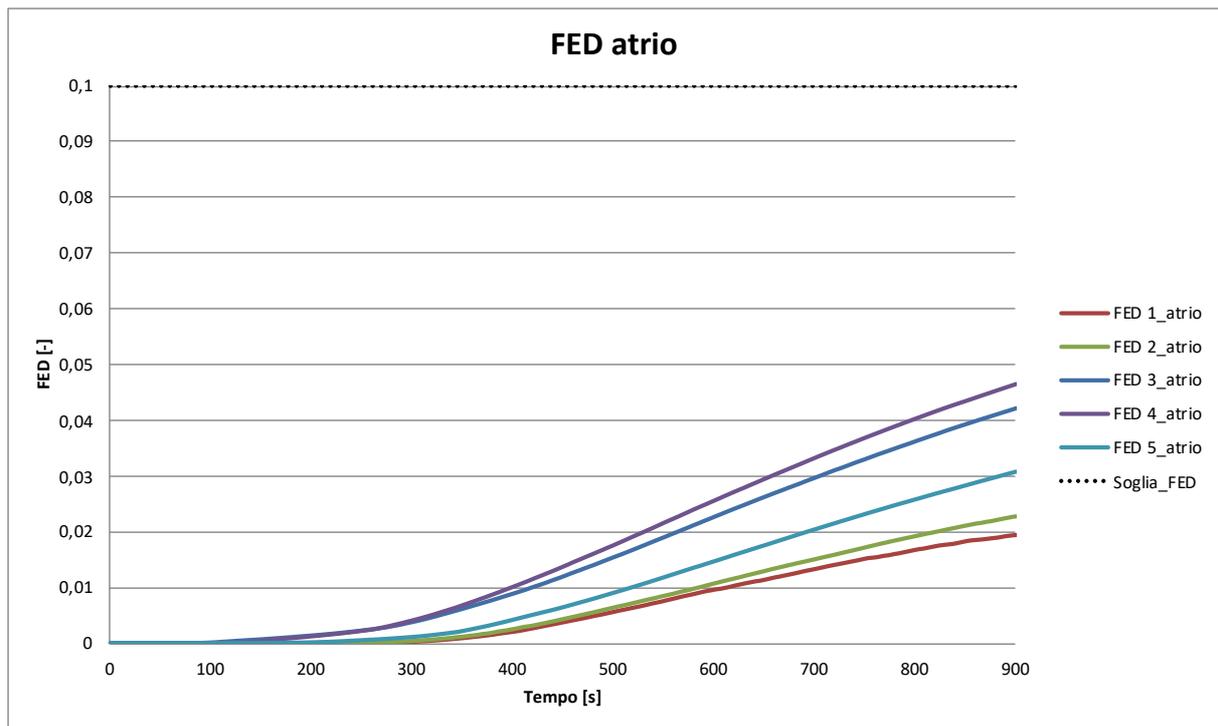


Figura 4.62 – FED atrio

Dalle figure 4.60, 4.61 e 4.62 si può notare come anche i valori della FED siano molto bassi. I valori rilevati infatti rimangono sotto il valore di soglia almeno fino a 900 secondi.

Di seguito vengono riportate le immagini, catturate da Pyrosim, di alcune slices e isosuperfici dopo 180 e 300 secondi, per capire come cambiano la velocità del fumo, la temperatura e la visibilità con lo svilupparsi dell'incendio.

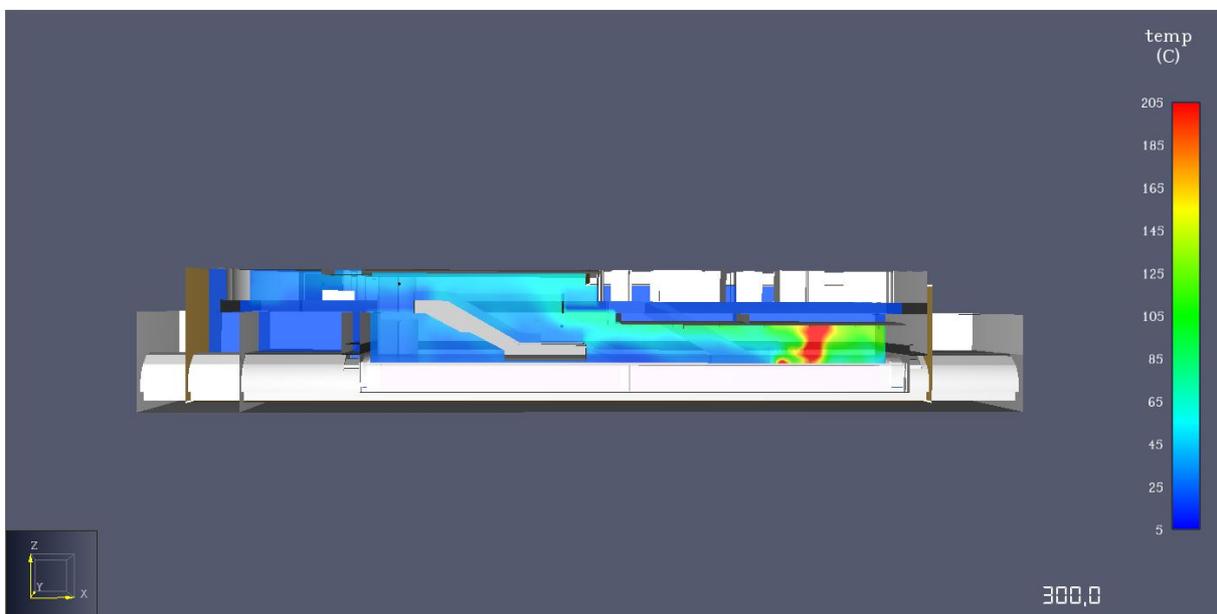
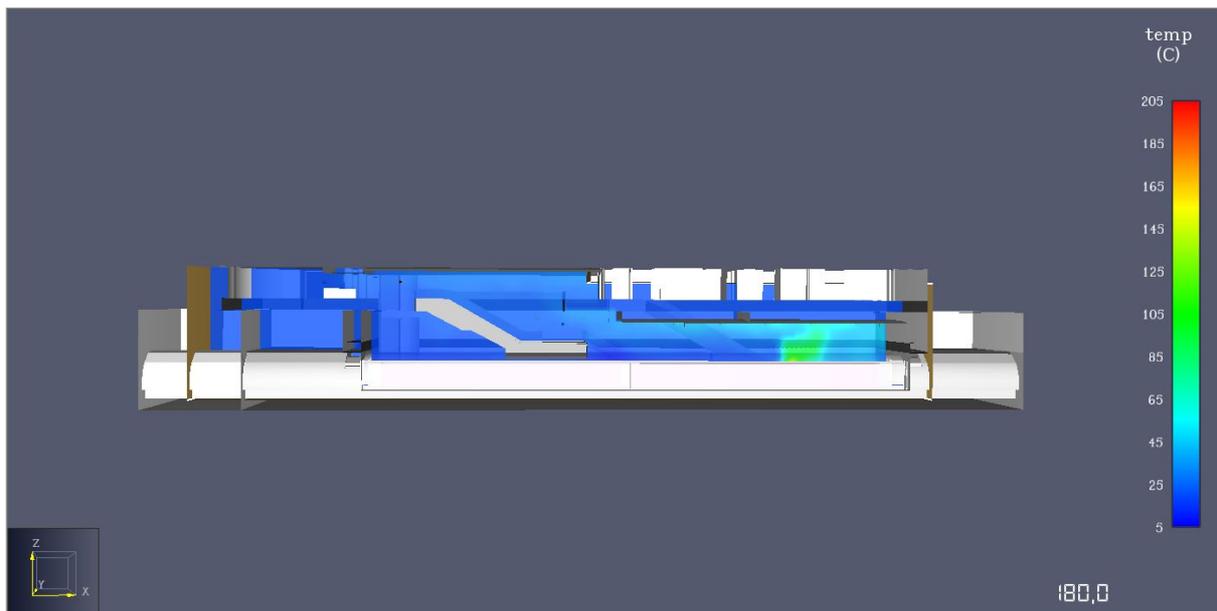


Figure 4.63 e 4.64– Slice1 temperatura lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

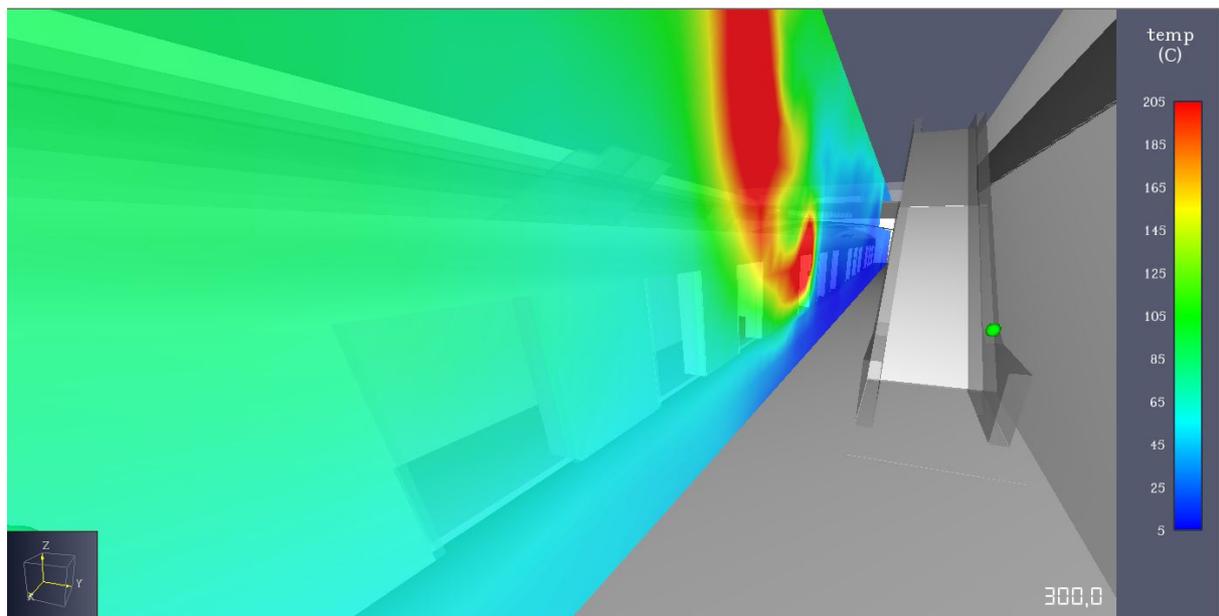
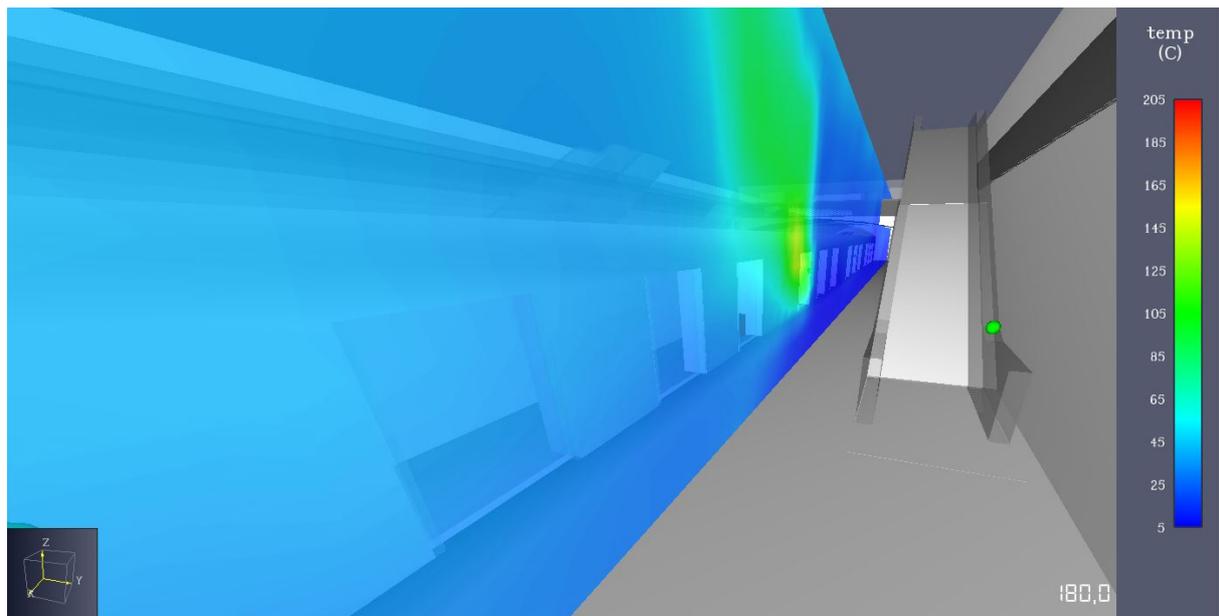


Figure 4.65 e 4.66 – Slice2 temperatura lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

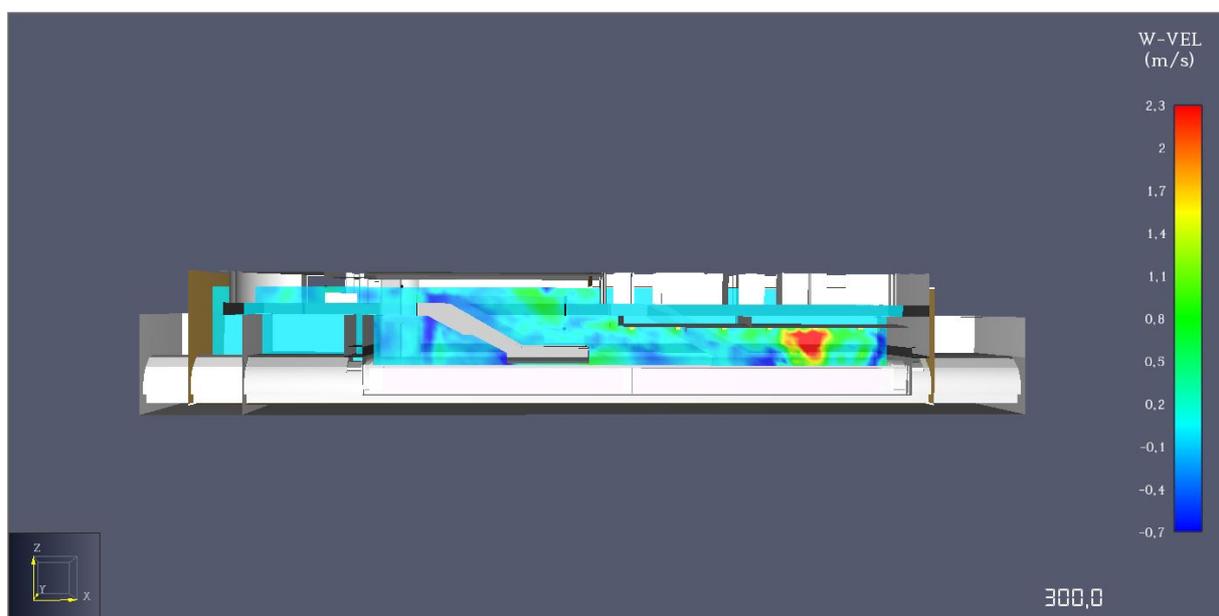
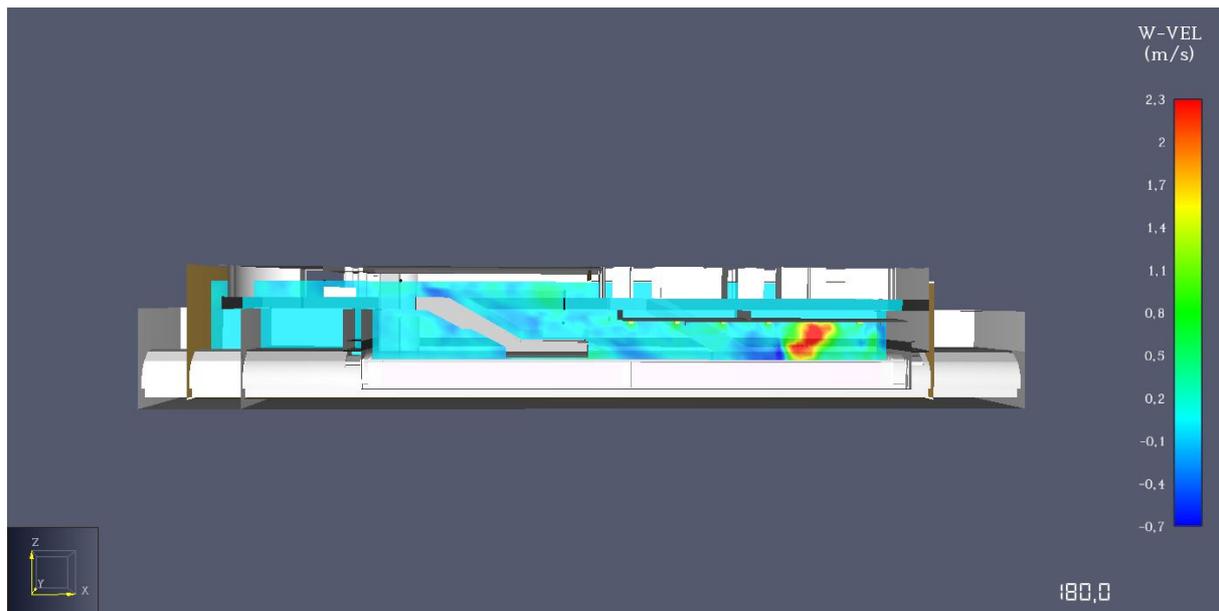


Figure 4.67 e 4.68 – Slice1 velocità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

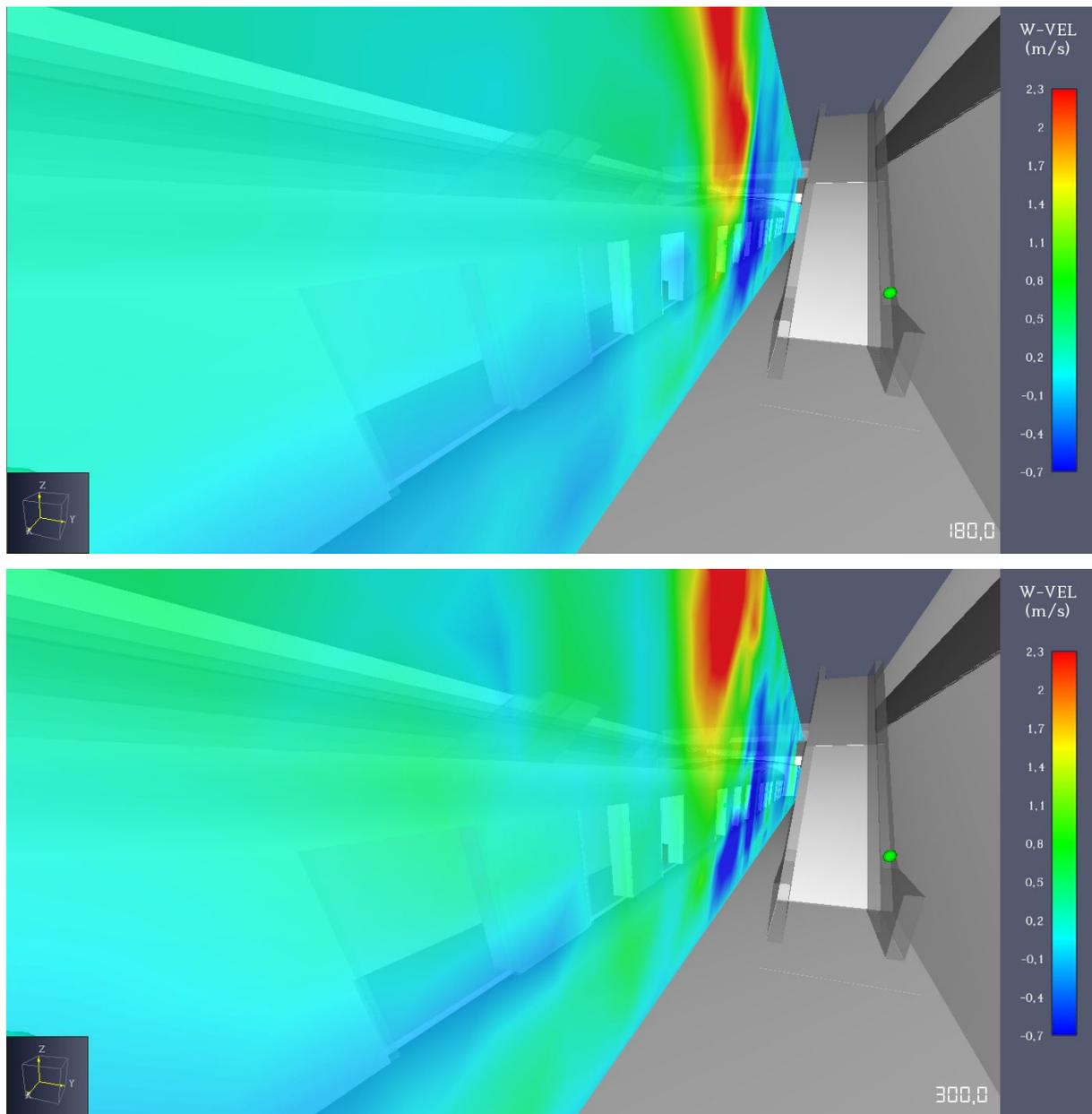


Figure 4.69 e 4.70 – Slice2 velocità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

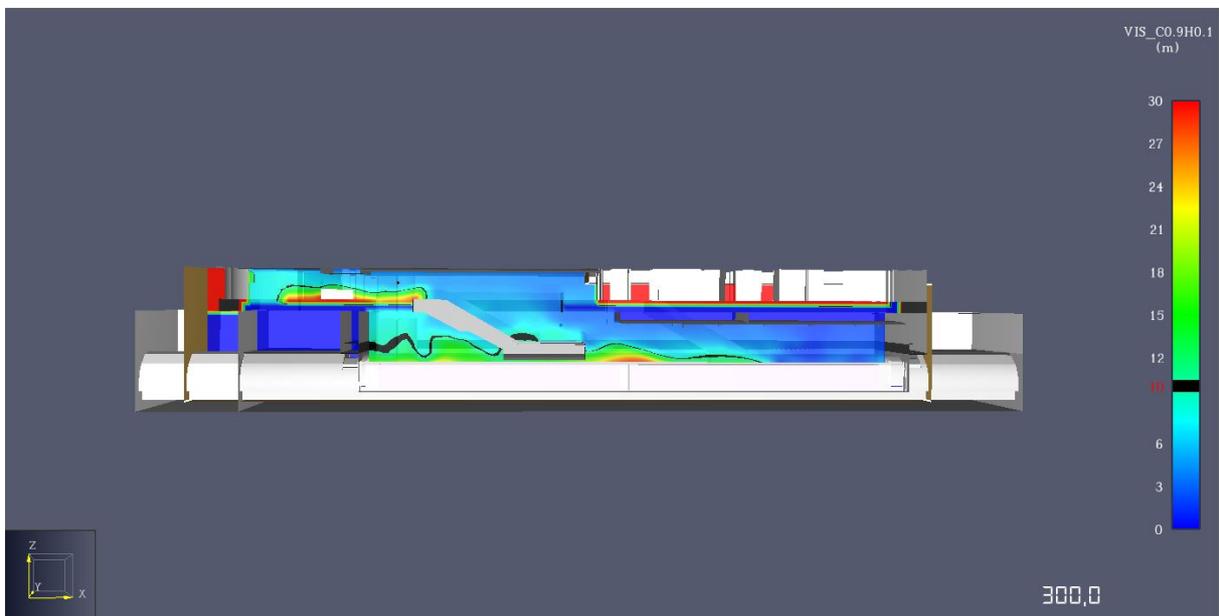
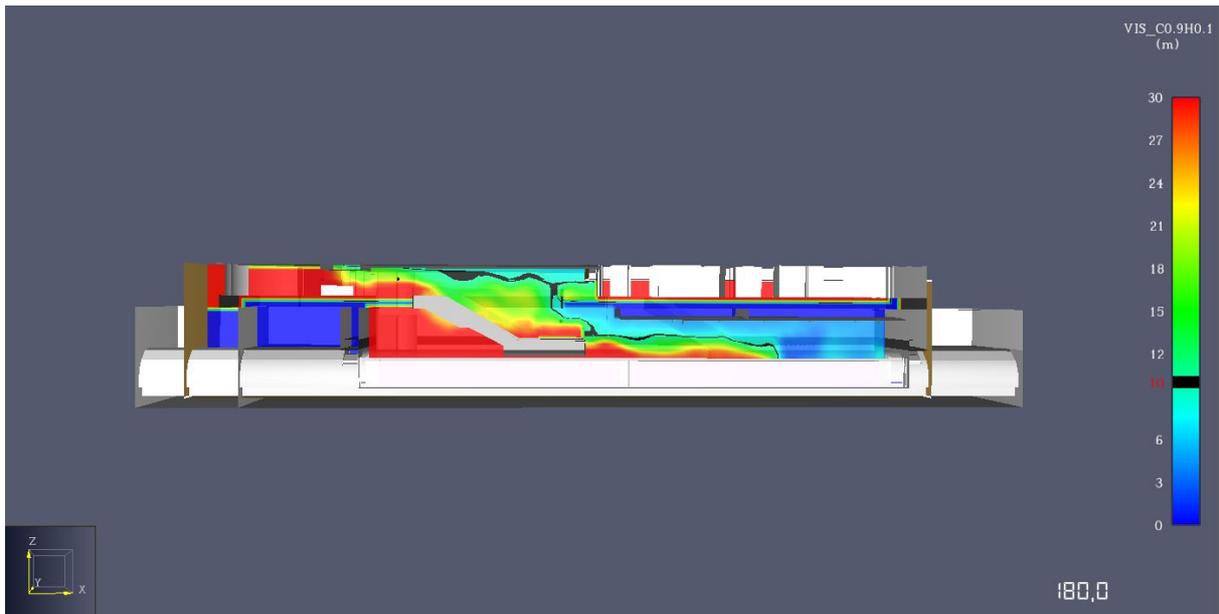


Figure 4.71 e 4.72 – Slice1 visibilità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

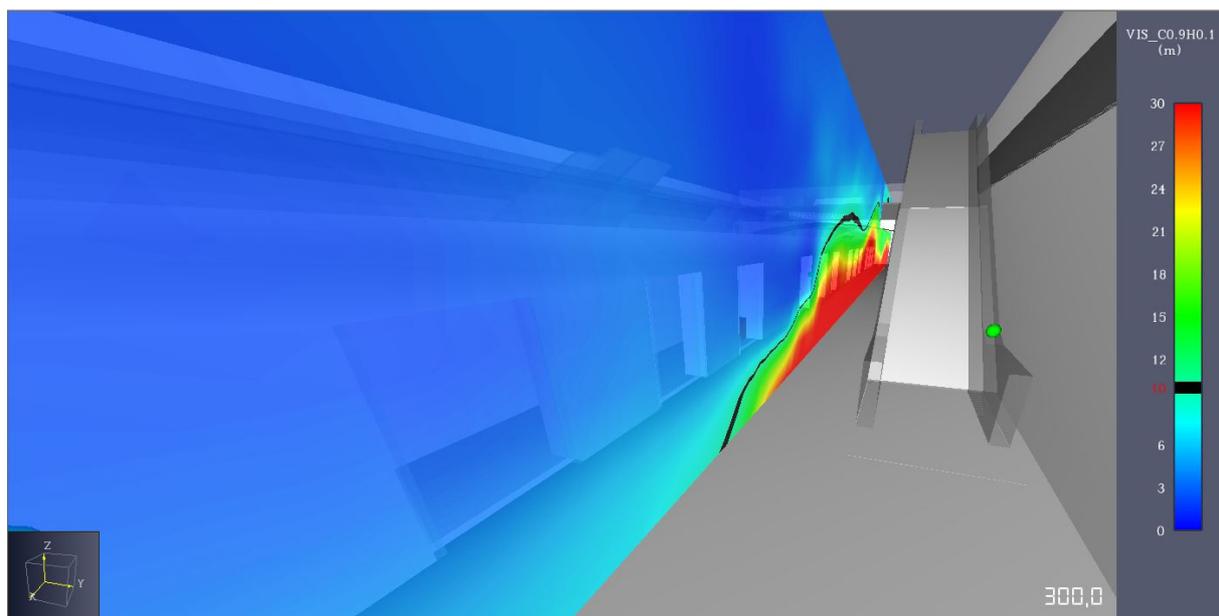
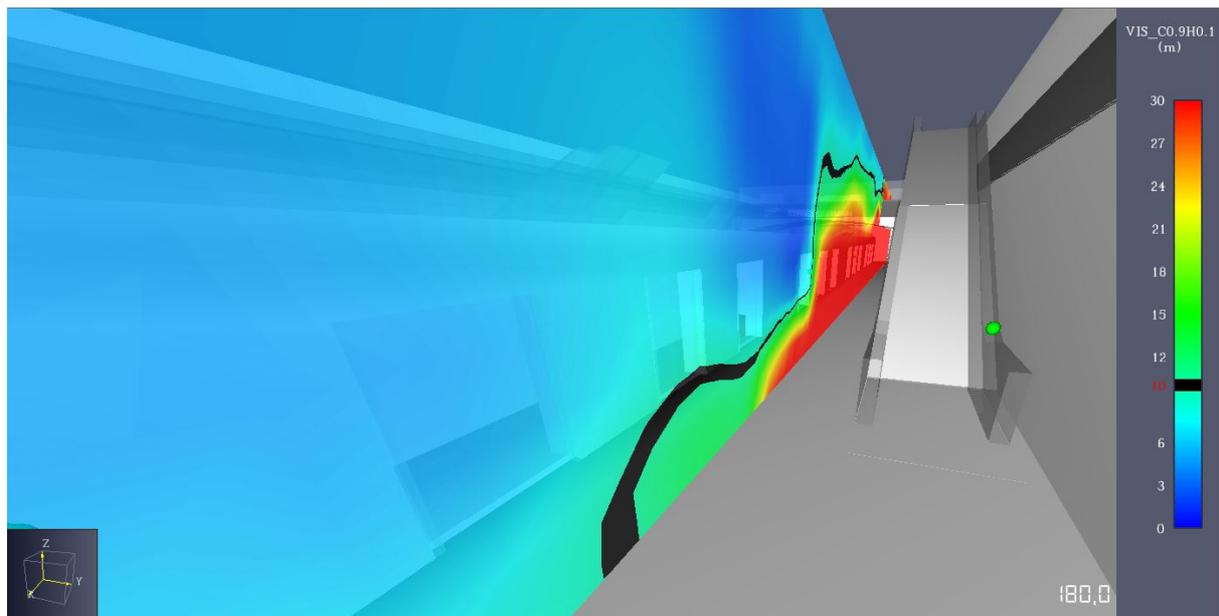


Figure 4.73 e 4.74 – Slice2 visibilità lungo X rispettivamente dopo 180 e 300 s

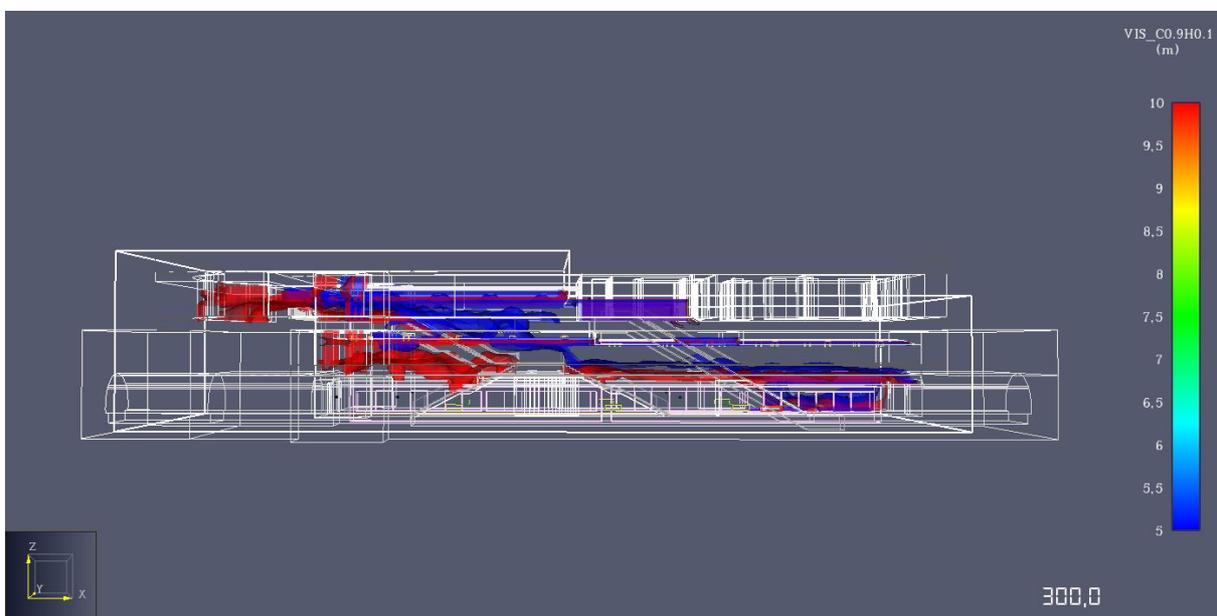
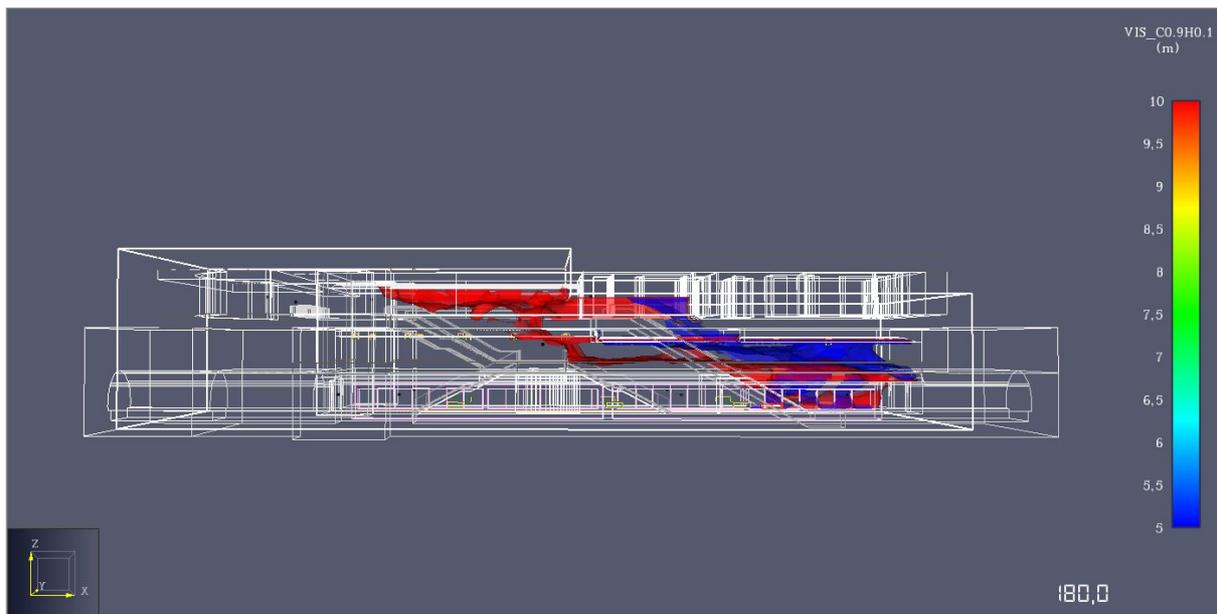


Figure 4.75 e 4.76 – Isosuperficie visibilità rispettivamente dopo 180 e 300 s

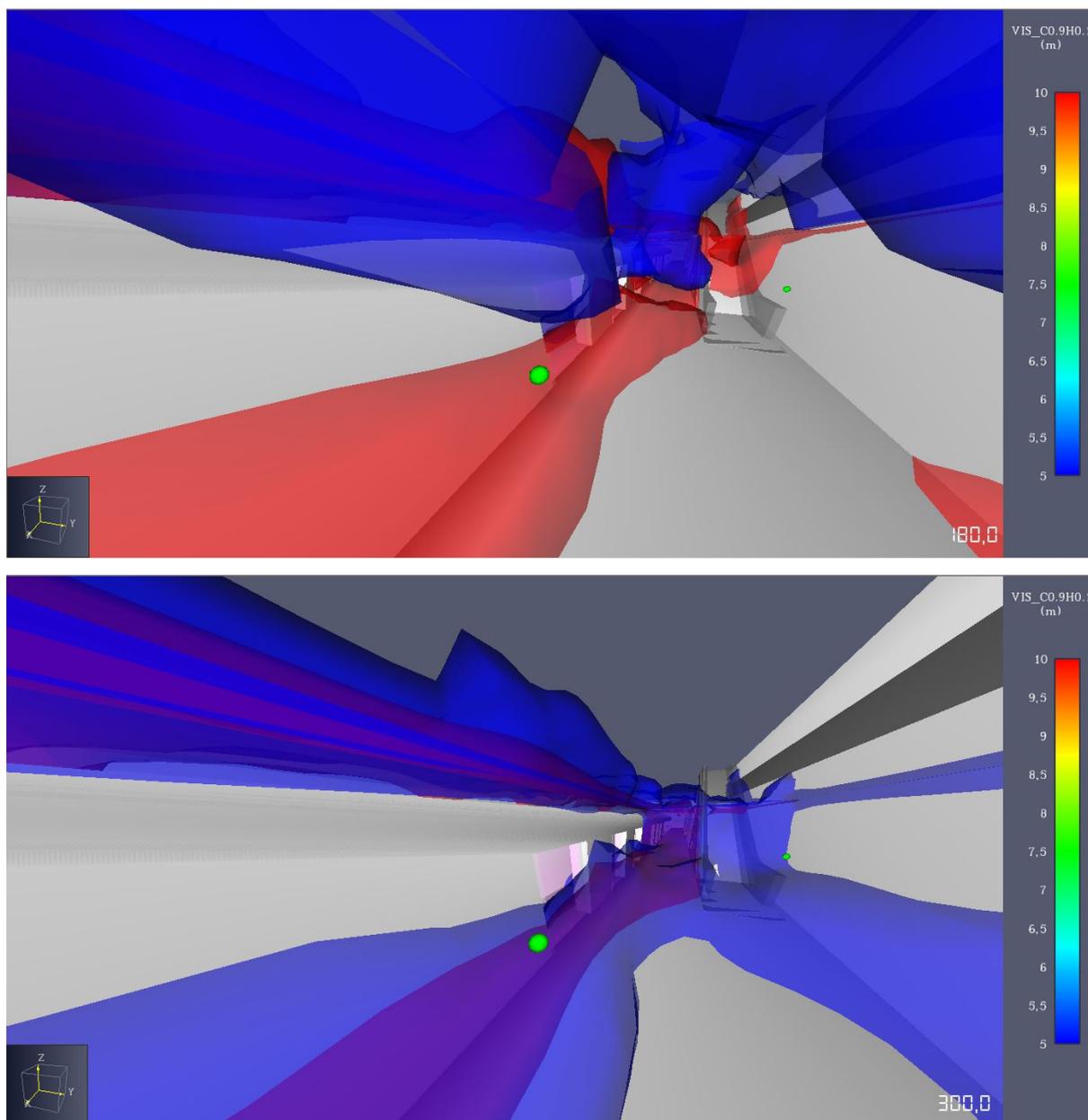


Figure 4.77 e 4.78 – Isosuperficie visibilità rispettivamente dopo 180 e 300 s

Come si può notare anche delle immagini relative alle slices e alle isosuperfici (dalla figura 4.63 alla figura 4.78) anche per quanto riguarda questo scenario l'andamento dei fumi deve essere approfondito andando a testare il sistema di ventilazione attraverso una prova sperimentale.

In particolare nel secondo scenario d'incendio i fumi sembrano muoversi più velocemente verso le zone alte della stazione creando maggiori problemi di visibilità.

#### 4.4.8 Calcolo ASET

Il valore di ASET viene assunto pari al minimo dei valori trovati in precedenza.

Tabella 4.2 – Valori di ASET

	Scenario 1	Scenario 2
Visibilità	161s	99s
Temperatura	269s	271s
Irraggiamento	/	/
Gas tossici	/	/
ASET	161s	99s

Il valore di ASET è pertanto decisamente basso poiché pari a 161 secondi per quanto riguarda il primo scenario e addirittura 99 secondi per quanto riguarda il secondo scenario. Si deve evidentemente controllare il sistema di ventilazione e in particolare quello della galleria.

## **4.5 Simulazioni reali del moto dei fumi**

Al fine di testare l'efficacia del sistema di ventilazione di galleria a partecipare all'estrazione fumi in stazione, sono state svolte delle simulazioni reali mediante l'utilizzo di due macchine per la produzione di fumo bianco.

### **4.5.1 Descrizione delle prove**

Le prove non sono del tipo quantitativo assoluto, in quanto il fumo prodotto non può essere paragonato e soprattutto non possiede le caratteristiche di quello previsto nelle varie simulazioni fluidodinamiche precedentemente descritte (carico di incendio da 7MW composto da elementi di varia natura), ma si è voluto verificarne i vari aspetti qualitativi, soprattutto per quanto concerne l'andamento dei fumi.

Anche in questo caso, per poter confrontare i due tipi di simulazione, la base di partenza delle prove è stata scelta imponendo il caso più gravoso tra gli scenari ipotizzati nell'ambito dei progetti di realizzazione della metropolitana: l'incendio a bordo treno in intertratta in arrivo alla stazione.

I differenti scenari sono i medesimi delle simulazioni fluidodinamiche e quindi hanno riguardato sostanzialmente il diverso posizionamento dell'incendio a bordo treno, ipotizzando che l'incendio si sviluppasse a partire dal quadro elettrico del veicolo di testa o di coda.

Per lo scenario di tipo 2 (incendio sviluppato a partire dal veicolo di testa) sono state eseguite due prove, una mantenendo l'assetto della ventilazione di progetto, l'altra cambiando la disposizione dei pozzi di estrazione ed immissione.

Di seguito si riportano le prove svolte e i rispettivi scenari d'incendio (Figure 4.79, 4.80 e 4.81).

- **Prova 1:** incendio del veicolo di coda lato Marconi con estrazione da VENT2 come da progetto

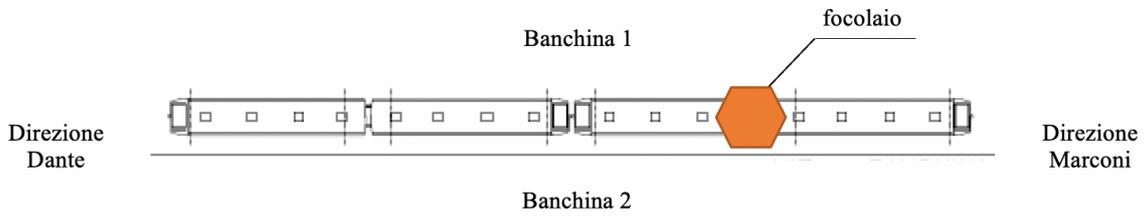


Figura 4.79 – Scenario d’incendio prova 1 (informazioni tratte dal report di Infra.To)

- **Prova 2:** incendio del veicolo di testa lato Dante con estrazione da VENT2 come da progetto

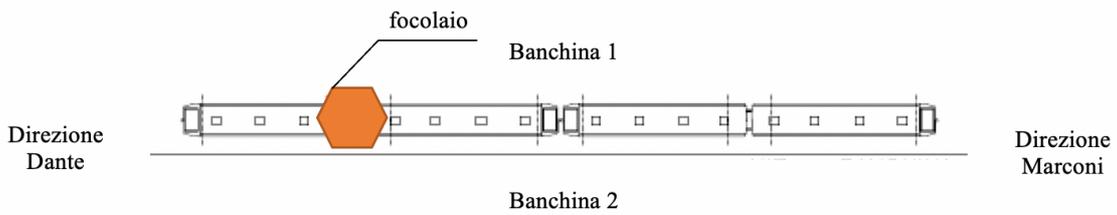


Figura 4.80 – Scenario d’incendio prova 2 (informazioni tratte dal report di Infra.To)

- **Prova 3:** incendio del veicolo di testa lato Dante con estrazione da VENT3

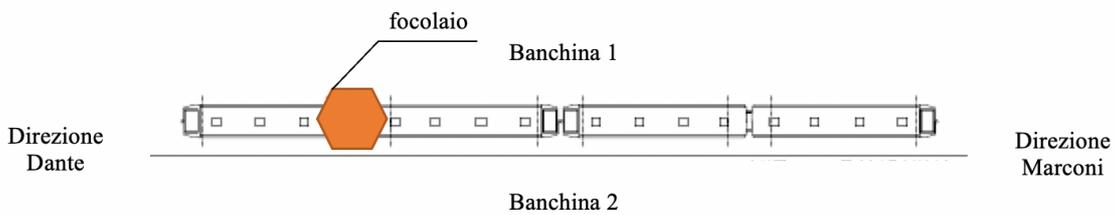


Figura 4.81 – Scenario d’incendio prova 3 (informazioni tratte dal report di Infra.To)

Per le prove è stata utilizzata una macchina per la produzione del fumo, verificando il comportamento aeraulico dell'impianto di ventilazione di stazione e di galleria e stimando qualitativamente i seguenti punti:

- verifica dell'andamento del fumo trattato dalla ventilazione di galleria e dalla ventilazione di stazione;
- tempistiche di evacuazione fumi;
- visibilità nelle banchine e nelle vie di esodo.

La macchina fumi viene posizionata all'interno di una vettura (Figura 4.82) e collegata alla presa industriale più vicina.



Figura 4.82 – Macchina del fumo utilizzata per le prove

## 4.5.2 Assetto delle ventilazioni

### Prova 1: incendio veicolo di coda lato Marconi con estrazione da VENT2 come da progetto

La ventilazione è stata mantenuta come da progetto sia per l'assetto di stazione che per l'assetto di emergenza. In stazione si avrà quindi immissione a livello della banchina ed estrazione nella parte alta (atrio e mezzanino). In galleria immissione da VENT1 e VENT3 ed estrazione da VENT2 e VENT4 come indicato in figura 4.83.

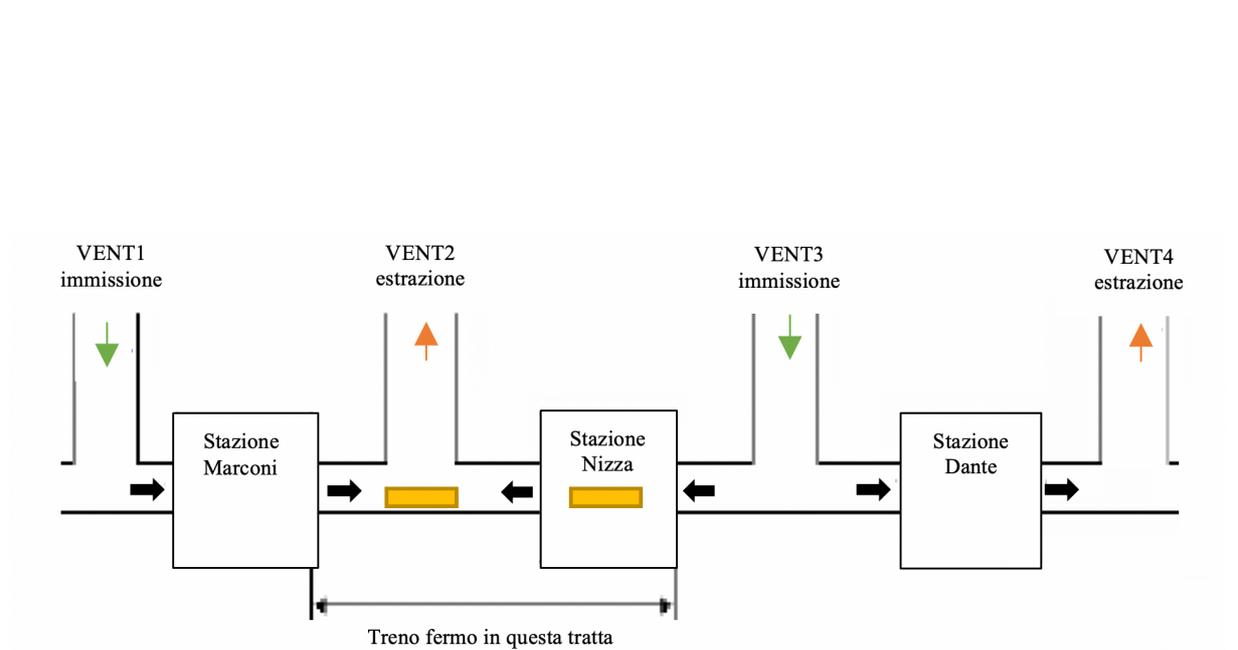


Figura 4.83 – Assetto delle ventilazioni prova 1

### Prova 2: incendio veicolo di testa lato DANTE con estrazione da VENT2 come da progetto

La ventilazione è stata mantenuta come da progetto sia per l'assetto di stazione che per l'assetto di emergenza. In stazione si avrà quindi immissione a livello della banchina ed estrazione nella parte alta (atrio e mezzanino). In galleria immissione da VENT1 e VENT3 ed estrazione da VENT2 e VENT4 come indicato in figura 4.84.

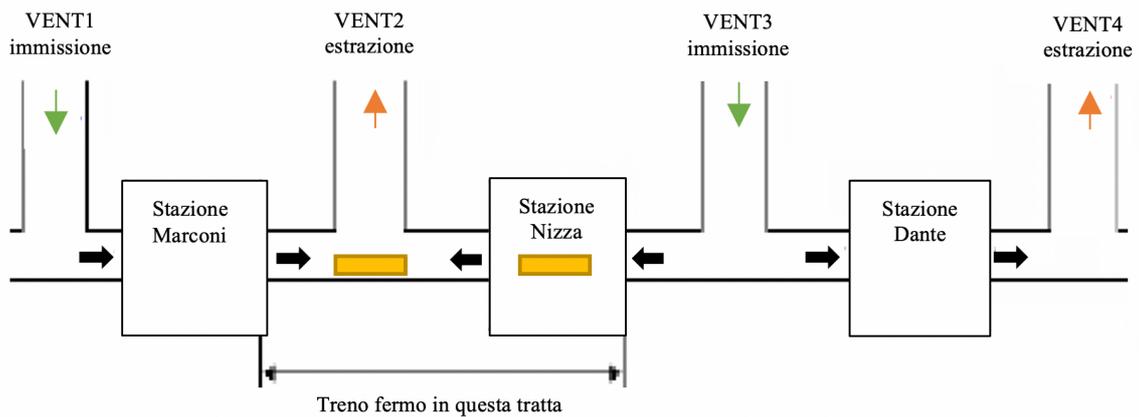


Figura 4.84 – Assetto delle ventilazioni prova 2

Prova 3: incendio veicolo di testa lato DANTE con estrazione da VENT3

Con l'attivazione della PES di Dante invece che di Nizza, è stato avviato in estrazione il VENT3, visto che il lato dell'incendio si trovava da quella parte.

In stazione si avrà sempre immissione a livello della banchina ed estrazione nella parte alta (atrio e mezzanino). In galleria invece immissione da VENT2 e VENT4 ed estrazione da VENT3 e VENT5 come indicato in figura 4.85.

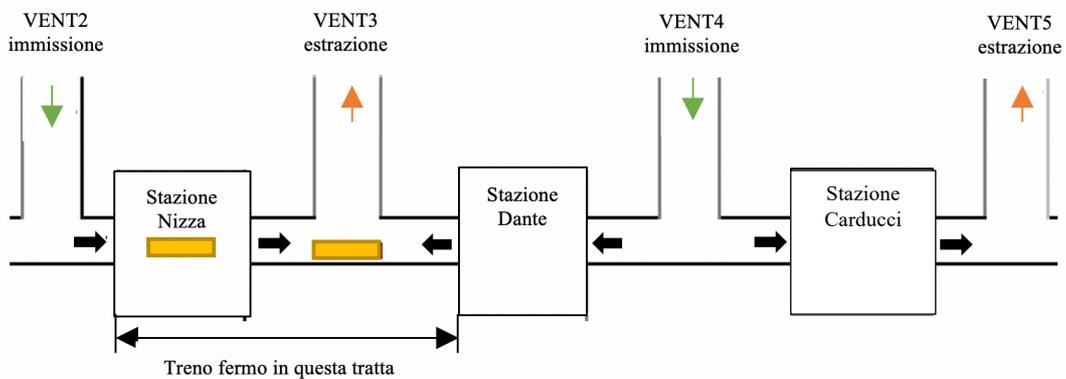


Figura 4.85 – Assetto delle ventilazioni prova 3

### 4.5.3 Risultati

La velocità della ventilazione media misurata in galleria è conforme a quanto previsto dal progetto (2m/s).

#### Prova 1: incendio veicolo di coda lato Marconi con estrazione da VENT2 come da progetto

In questa prova compresa negli schemi standard si attiva in estrazione il VENT2 (lato Marconi) premendo la PES della stazione Nizza manualmente dal PCC. La banchina lato Bengasi rimane sostanzialmente pulita e il fumo prodotto rimane confinato nella parte a monte della banchina (Figure 4.86 e 4.87).

Dopo 10 minuti si spegne la macchina fumo ipotizzando l'estinzione dell'incendio, e dopo altri 10-12 minuti la stazione è ripulita.



Figura 4.86 – Andamento dei fumi prova 1 – tratta dal report di Infra.To



Figura 4.87 – Andamento dei fumi prova 1

Prova 2: incendio veicolo di testa lato DANTE con estrazione da VENT2 come da progetto

In automatico la strategia di emergenza di stazione non attiva la ventilazione di galleria (condizioni normali di emergenza banchina). Questo permette alla ventilazione di stazione di non subire perturbazioni e stratificare nella sola zona dell'incendio (Figura 4.88).



Figura 4.88 – Andamento dei fumi prova 2 senza ventilazione di galleria – tratta dal report di Infra.To

Quando si attiva la PES della stazione di Nizza con attivazione della ventilazione di galleria verso il VENT2 (lato Marconi), il fumo in testa al veicolo si sposta in coda e riempie tutta la banchina stratificando prima in basso sulle porte di banchina e poi anche sulle scale e verso l'atrio (Figura 4.89).

Dopo 10 minuti si spegne la macchina fumo ipotizzando l'estinzione dell'incendio. Dopo altri 20-25 minuti la stazione è ripulita.



Figura 4.89 – Andamento dei fumi prova 2 con ventilazione di galleria attivata – tratta dal report di Infra.To

### Prova 3: incendio veicolo di testa lato DANTE con estrazione da VENT3

In questa prova non compresa negli schemi standard si attiva il VENT3 (lato Dante) in estrazione premendo la PES della stazione Dante manualmente dal PCC. Dopo pochi minuti la banchina viene ripulita e il fumo prodotto rimane confinato negli interstizi tra le porte di banchina e le porte veicolo (Figura 4.90).

Dopo 10 minuti si spegne la macchina fumo ipotizzando l'estinzione dell'incendio, e dopo altri 4-5 minuti la stazione è ripulita.



Figura 4.90 – Andamento dei fumi prova 3: il fumo rimane confinato negli interstizi tra le porte della banchina e le porte del veicolo

Il fumo nelle prove 1 e 3 incontra una barriera d'aria proveniente dalla galleria, che ne interdice l'ingresso in banchina per una quantità sostanziale.

Nella prova 2, con incendio sviluppato nel veicolo lontano dal ventilatore di estrazione di galleria, il fumo invece tende a stratificare per portarsi dal lato opposto della banchina, invadendo e rendendo inagibili le vie di fuga.

## 4.6 Confronto tra i due tipi di simulazione e conclusioni

Dai risultati delle simulazioni fluidodinamiche e da quanto emerge dalle prove, si può notare come la galleria abbia un ruolo predominante nella gestione della ventilazione di emergenza rispetto alla stazione, nonostante l'interfaccia banchina/galleria abbia una superficie di apertura minima. A seconda di come viene attivata la ventilazione infatti il fumo si sposta e riempie tutta la banchina o rimane confinato negli interstizi tra le porte di banchina e le porte veicolo. È stato possibile fare questo tipo di considerazione solamente in seguito ai risultati delle prove effettuate sul posto poiché con FDS non è stato possibile considerare in modo adeguato l'interfaccia banchina/galleria, la quale richiederebbe un'eccessiva divisione del dominio computazionale.

Tuttavia le simulazioni fluidodinamiche hanno permesso di verificare gli aspetti quantitativi legati al carico di incendio da 7MW composto da elementi di varia natura e ad individuare i problemi legati all'andamento dei fumi. Le prove effettuate sul posto infatti non sono del tipo quantitativo assoluto, in quanto il fumo bianco prodotto dalle macchine non può essere paragonato e soprattutto non possiede le caratteristiche di quello previsto nelle varie simulazioni.

Grazie alle prove con la macchina fumo è stato possibile capire come migliorare notevolmente la difesa contro i fumi della stazione. In base allo scenario d'incendio infatti si è notato che è necessario coordinare i pozzi di estrazione ed immissione:

- l'incendio del veicolo a monte (lato Fermi) deve far attivare la strategia della stazione coinvolta;
- l'incendio del veicolo a valle (lato Bengasi) deve far attivare la strategia della stazione a valle.

## **5. Approfondimento sui sistemi di controllo: installazione di impianti di spegnimento automatico**

Gli Impianti fissi di spegnimento automatico d'incendio sono quegli impianti che “tramite opportuni dispositivi (rivelatori d'incendio), intervengono automaticamente per l'estinzione di un incendio, fin dalle fasi iniziali”. Sono denominati in funzione del tipo di estinguente utilizzato.

Gli impianti ad acqua sono utilizzati per fuochi di “classe A” (combustibili solidi) e si dividono a loro volta in sistemi a pioggia o a diluvio.

Il sistema a pioggia o sprinkler è uno dei sistemi fissi di spegnimento d'incendio più efficace e più diffuso, spesso installato in “aree con elevate concentrazioni di persone (come alberghi, grandi magazzini ecc.), in depositi ed in genere dove l' incendio può svilupparsi rapidamente”. Questo sistema ha la finalità di individuare ed estinguere l'incendio fin dalle fasi iniziali e può essere:

- ad umido: caratterizzato dalla presenza costante dell'acqua nelle tubazioni, fino alle testine di erogazione;

- a secco: l'acqua è presente solo a monte della valvola di controllo; il sistema a secco è spesso “utilizzato quando l'impianto si trova installato all'esterno di strutture edilizie ed in località dove le temperature risultano spesso sotto lo 0°, per evitare possibili gelate”.

Nello sprinkler ad una prestabilita temperatura gli erogatori automatici “si aprono consentendo la fuoriuscita del getto d'acqua che urta violentemente contro un piattello detto ‘distributore’, che per sua forma suddivide il getto in opportune goccioline creando ‘l'effetto pioggia”.

I sistemi di spegnimento d'incendio “a diluvio” risultano simili a quelli a pioggia, ma la “differenza sostanziale sta nel fatto che, mentre gli erogatori sprinkler si attivano individualmente, quelli installati negli impianti a diluvio si attivano tutti insieme (quando si apre la valvola automatica), scaricando l'acqua in tutti i locali protetti dal sistema”.

Gli impianti a schiuma sono invece utilizzati per l'estinzione dei fuochi di "classe B" (liquidi infiammabili) e "l'effetto sull'incendio avviene essenzialmente per soffocamento, in quanto la schiuma tende a disporsi sulla superficie del combustibile, separando quest'ultimo dall'aria". Questi impianti "trovano notevole applicazione nella protezione incendi nelle attività industriali e nei depositi di liquidi infiammabili".

Gli impianti a polvere chimica sono "di norma utilizzati per la protezione antincendio di luoghi a rischio d'incendio di modeste dimensioni": sono costituiti da "apparecchi pressurizzati (del tutto simili ad un estintore), contenenti la polvere chimica, che entra in funzione automaticamente in caso di incendio". Sono idonei per fuochi di classe "A", "B", "C" e per quelli da apparecchiature elettriche in tensione.

Gli impianti ad anidride carbonica e ad estinguenti sostitutivi degli halon "sono ottimi estinguenti per fuochi di "classe A, B e C" e per apparecchiature elettriche sotto tensione".

Trovano "idoneo utilizzo nei locali chiusi, in quanto l'effetto dell'estinguente, per risultare efficace, deve raggiungere una sufficiente percentuale di saturazione della cubatura del locale da proteggere". Ad esempio vengono installati "in locali adibiti a archivi, magazzini, depositi, cabine elettriche, gruppi elettrogeni ecc., dove la presenza delle persone è generalmente saltuaria". Infatti questi impianti sono pericolosi per l'uomo, perché "il sistema, per sua natura, togliendo ossigeno dall'aria, può dare notevoli problemi di respirazione". La loro installazione, nei luoghi dove è possibile la presenza di persone, deve essere accompagnata "da un opportuno dispositivo automatico di segnalazione acustica e/o ottica che informi, con congruo anticipo, le persone che potrebbero trovarsi nel locale di allontanarsi prima dell'intervento di scarica del gas". Dunque deve essere predisposto un idoneo ritardo della scarica dell'estinguente "per permettere alle persone eventualmente presenti di abbandonare il locale in totale sicurezza" in seguito alla segnalazione acustica e/o ottica. È evidente che è necessario informare il personale appartenente all'area di installazione del sistema sul comportamento da adottare nel caso in cui si attivi il dispositivo di allarme acustico dell'impianto.

Un impianto automatico di estinzione ad acqua consta di più parti:

- Fonte di alimentazione (acquedotto, serbatoi, vasca, serbatoio in pressione);
- Pompe di mandata;

- Centralina valvolata di controllo e allarme;
- Condotte montanti principali;
- Rete di condotte secondarie;
- Serie di testine erogatrici (sprinkler).

L'erogazione di acqua può essere comandata da un impianto di rilevazione - incendi, oppure essere provocata direttamente dalla apertura delle teste erogatrici: per fusione di un elemento metallico o per rottura, a determinate temperature, di un elemento termosensibile a bulbo che consente in tal modo la fuoriuscita d'acqua.

## **5.1 Il sistema water mist**

Un sistema antincendio water mist utilizza come agente estinguente una finissima nebbia d'acqua (Figura 5.1). In generale, sono definiti water mist tutti gli ugelli espressamente progettati per ottenere uno spruzzo costituito da almeno il 99% di singole goccioline di diametro inferiore ai 1000 microns.

Le micro-goccioline permettono il controllo, la soppressione e l'estinzione delle fiamme grazie a tre meccanismi:

- raffreddamento delle fiamme e dei gas presenti tramite evaporazione;
- inertizzazione dell'ossigeno tramite evaporazione;
- attenuazione del calore radiante.

Inoltre la maggior parte dei componenti dei gas di combustione ha natura idrofila e tende ad aderire alle goccioline più minute, lo stesso vale per le particelle di fuliggine, che si legano anch'esse alle goccioline d'acqua.

L'efficacia del sistema antincendio water mist dipende da alcune caratteristiche proprie dell'impianto, come ad esempio la distribuzione delle dimensioni delle gocce, la densità di scarica e la dinamica di funzionamento in relazione ai diversi scenari di incendio nei quali

assumono fondamentale importanza fattori quali la protezione del combustibile, la dimensione delle fiamme e le condizioni di ventilazione.<sup>17</sup>



Figura 5.1 – Esempio di ugello di tipo water mist – tratta da Simatantincendi

L'uso del sistema antincendio water mist offre diversi vantaggi, soprattutto se paragonato a sistemi con agenti estinguenti gassosi o agli sprinkler tradizionali:

- attivazione immediata;
- elevata efficienza nel sopprimere una vasta gamma di incendi;
- riduzione dei danni causati dall'acqua;
- basso impatto ambientale;
- nessun problema di tossicità;
- maggior efficacia dello scambio termico convettivo che caratterizza le gocce dei sistemi water mist rispetto al caso dai sistemi tradizionali (sprinkler);
- maggior attenuazione della radiazione termica che scaturisce dall'intervento di una cortina di spray d'acqua;

---

<sup>17</sup> Giovanni Manzini, Ph. D. (Applied Thermal Engineering group); *Stima dell'efficacia dei sistemi water mist nel controllo, nella soppressione e nell'estinzione degli incendi*; A.I.I.A. XI Convegno Nazionale "La Tecnologia Water Mist - Stato dell'arte e Prospettive".

- maggior raffreddamento prodotto dall'iniezione di mist su reagenti e prodotti della combustione;
- applicabilità e rilevante efficacia sugli incendi di classe B;
- utilità erogazioni su focolai nascosti (protetti) e indirette;
- abbattimento dei prodotti della combustione e del particolato.

Svantaggi rispetto ai sistemi tradizionali (pioggia e diluvio):

- elevata sensibilità alla ventilazione (naturale, forzata);
- difficoltà a raggiungere e mantenere un'opportuna concentrazione di mist nell'intorno della zona di combustione;
- elevata sensibilità alle caratteristiche dello spray e alla disposizione degli erogatori;
- elevata sensibilità alle caratteristiche del combustibile;
- destratificazione dei prodotti della combustione e del particolato;
- riduzione della visibilità.

## 5.2 Modellazioni CFD

I sistemi antincendio a nebbia d'acqua (WM) rappresentano una tecnologia promettente per una varietà di applicazioni nei campi della protezione antincendio. Tuttavia, le prestazioni di WM dipendono molto dalla natura degli spruzzi prodotti dagli ugelli. I parametri che determinano il comportamento di uno spruzzo sono la portata d'acqua, l'angolo di spruzzo, l'altezza dello spruzzo, la dimensione della goccia e la velocità della goccia. Sono stati compiuti numerosi sforzi per caratterizzare il comportamento degli spray prodotti dagli ugelli e la ricerca è ancora in corso per comprendere l'influenza di questi parametri sulla dinamica dello spray.

La dinamica degli spray può essere studiata in due modi, ovvero mediante esperimento o simulazione numerica. L'indagine sperimentale sul comportamento degli spray prodotti dagli ugelli richiede molte risorse. La modellazione computazionale invece può essere un valido strumento di indagine.

Esistono numerosi studi computazionali, che, principalmente, si sono concentrati sull'interazione degli spruzzi d'acqua con un pennacchio di fuoco, sulle prestazioni degli

irrigatori e sul tempo di estinzione degli incendi; ma sono state condotte solo ricerche limitate sulle caratteristiche degli spray prodotti dagli ugelli water mist.

La maggior parte degli studi sulla caratterizzazione dei pattern di spruzzatura è correlata agli spray degli irrigatori convenzionali. Poiché la dimensione delle gocce di acqua nebulizzata è inferiore a quella delle gocce di sprinkler convenzionali, la dinamica degli spruzzi di acqua nebulizzata differisce da quella degli sprinkler convenzionali. È quindi essenziale quantificare le caratteristiche degli spray prodotti dagli ugelli water mist.

### 5.1.1 Definizione del water mist su FDS

Le principali caratteristiche degli spray per la definizione del water mist su FDS sono:

- Modello di distribuzione delle goccioline

FDS prende un campione di goccioline sferiche per calcolare il modello di distribuzione. La distribuzione delle dimensioni delle goccioline è espressa in termini della sua frazione di volume cumulativa (CVF), che è rappresentata da una combinazione di distribuzioni log-normale e Rosin-Rammler.

$$F(d) = \begin{cases} (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_0^{D_{CVF}} (\sigma D)^{-1} e^{-\frac{[\ln(\frac{D}{D_m})]^2}{2\sigma^2}} dD & (D_{CVF} \leq D_m) \\ 1 - e^{-0.693(D_{CVF}/D_m)^\gamma} & (D_{CVF} > D_m) \end{cases}$$

Dove:

- $D$  è il diametro generico della gocciolina,  $D_m$  è il diametro mediano della gocciolina. Il diametro mediano delle goccioline è una funzione del diametro dell'orifizio dello sprinkler/ugello, della pressione di esercizio e della geometria;
- $\gamma$  e  $\sigma$  sono costanti empiriche utilizzate per l'adattamento della curva dei modelli di distribuzione (in generale  $\gamma = 2.4$  e  $\sigma = 0.5$ ).

Di seguito si riportano i diametri medi in relazione alla pressione.

	15 bar	80 bar	100 bar
Sauter mean Diameter	41.30 $\mu\text{m}$	33.07 $\mu\text{m}$	23.70 $\mu\text{m}$

- Modello di trasporto delle goccioline

In FDS, il trasporto delle goccioline d'acqua è modellato dall'approccio Lagrangiano. La velocità e la posizione delle goccioline sono calcolate dalla teoria della conservazione della quantità di moto. La posizione e la velocità di ciascuna gocciolina vengono calcolate dalle seguenti equazioni.

$$\frac{d}{dt} (mv_p) = mg - \frac{1}{2} \rho C_d \pi r^2 (v_p - v_a) |v_d - v_a|$$

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p$$

Dove, il coefficiente di resistenza, dipende principalmente dal numero di Reynolds basato sulla velocità relativa aria-gocciolina, che può essere definita da:

$$C_d = \begin{cases} 24/Re & Re < 1 \\ 24(0.85 + 0.15Re^{0.687})/Re & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

Il numero di goccioline di Reynolds è definito da

$$Re = \frac{\rho |v_d - v_a| 2r}{\mu(T)}$$

dove  $\mu(T)$  è la viscosità dinamica dell'aria alla temperatura T.

- Variabili di input

Una volta impostato il dominio computazionale, bisogna definire le variabili di input, che sono la portata dell'acqua, l'angolo di spruzzo, l'altezza dello spruzzo e la velocità della goccia. Tali dati vengono forniti dalle schede tecniche del prodotto.<sup>18</sup>

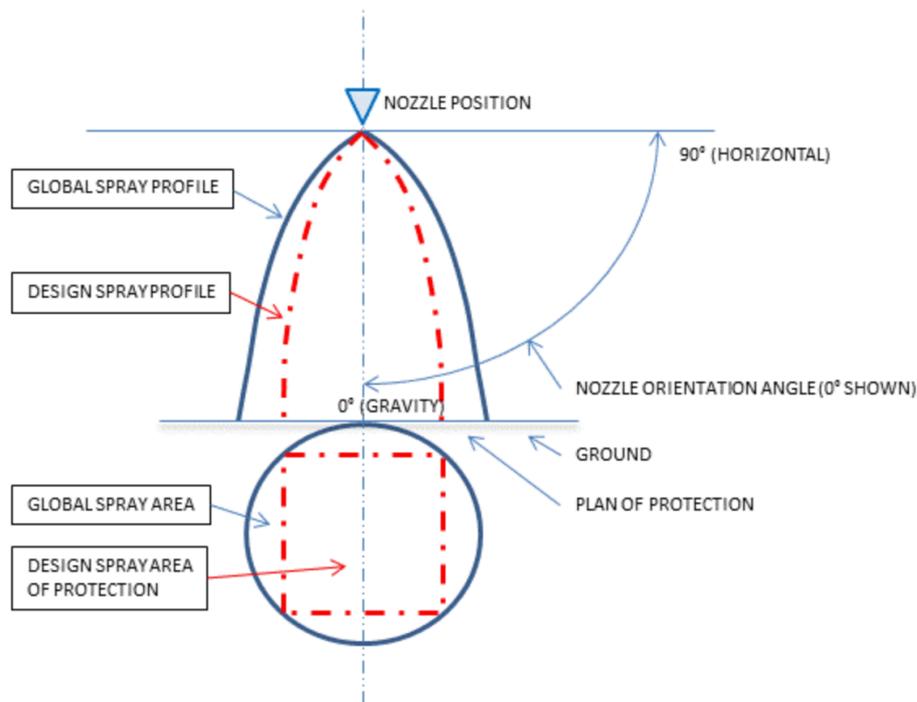


Figura 5.2 – Profilo spray water mist – tratto da Spraytecs

### 5.1.2 Criticità di FDS

I modelli di trasporto di FDS risentono molto delle dimensioni molto piccole delle gocce e generano errori di rilievo nel calcolo degli scambi di massa, di energia e di quantità di moto tra le stesse e gli aeriformi circostanti.

---

<sup>18</sup> H.M.I. Mahmud, K.A.M. Moinuddin and G.R. Thorpe; *Characterization of a water-mist spray: Numerical modelling and experimental validation*; 18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia 3-7 December 2012.

## 5.2 Utilizzo del water mist nelle stazioni metropolitane

Basandosi sull'esperienza dell'applicazione dei water mist negli edifici, sembra che l'utilizzo di tali impianti nell'area pubblica della stazione potrebbe sopprimere l'incendio o controllare il propagarsi del fuoco e del fumo e proteggere la struttura sotterranea.

Le principali preoccupazioni sull'uso del sistema di soppressione a base d'acqua in una stazione della metropolitana sono:

- Visibilità lungo il percorso di evacuazione

Quando viene attivato il sistema a base d'acqua, la visibilità dell'ambiente sarà ridotta a causa del vapore che si viene a creare vicino al luogo dell'incendio. Una scarsa visibilità può prolungare il tempo dei passeggeri impiegato per evacuare dalla stazione. Tuttavia, la riduzione della visibilità è significativa solo intorno all'area del sito dell'incendio.

Nella maggior parte dei casi, il water mist consente alle persone di allontanarsi dal luogo dell'incendio e trasferirsi verso l'uscita. Inoltre, in caso di incendio, verrà attivato il sistema di estrazione dei fumi installato nella stazione. Migliorerà la visibilità estraendo fumo e vapore, consentendo così ai passeggeri di fuggire lungo i percorsi di evacuazione. Pertanto, la preoccupazione di visibilità può essere mitigata.

- Vapore dell'acqua

Il vapore derivante dall'evaporazione dell'acqua scaricata sul fuoco dall'impianto WM potrebbe provocare delle ustioni ai passeggeri.

Alcune ricerche hanno suggerito che l'attivazione del sistema a base d'acqua potrebbe raffreddare la temperatura intorno al luogo dell'incendio, bloccando il trasferimento di calore radiante dal fuoco. Quindi, se i passeggeri si possono scottare a causa del vapore del WM, possono anche subire ustioni dal calore radiante trasferito dal fuoco in assenza dell'impianto.

Anche in questo caso inoltre si può installare il sistema di estrazione del fumo, il quale estrarrebbe sia il fumo che il vapore.

- Percorso di evacuazione scivoloso

Quando viene attivato il WM, il pavimento bagnato dall'acqua può diventare scivoloso e aumentare il rischio di lesioni durante l'evacuazione. Inoltre, spruzzare acqua sui passeggeri può metterli a disagio, soprattutto se la temperatura dell'aria della stazione è bassa.

L'attivazione dell'impianto di solito interessa solo l'area intorno al fuoco e, per i passeggeri vicini, fermare la propagazione del fuoco, proteggendo dal calore radiante, potrebbe essere più importante che mantenere il percorso di evacuazione a secco. Inoltre, un'adeguata selezione di finiture per pavimenti e corrimano può ridurre l'impatto del pavimento scivoloso o del corrimano scivoloso. Pertanto anche questa preoccupazione può essere mitigata.

- Falsa attivazione

Un'altra preoccupazione riguardante l'installazione di sistemi a base d'acqua nell'area pubblica della stazione è il suo impatto sul funzionamento della metropolitana quando il water mist ha riscontrato un guasto al sistema.

L'attivazione accidentale dell'acqua del WM, causata dalla qualità del sistema componenti, usura o manutenzione inappropriata, può portare all'interruzione del servizio della metropolitana e danneggiare apparecchiature come scale mobili. Tali danni alle apparecchiature (ad es. Guasto alla scala mobile, ecc.) possono a loro volta causare problemi di sicurezza per i passeggeri.

- Rapporto costi-benefici

Poiché l'area pubblica della metropolitana è ben controllata dagli operatori e sono state introdotte molte misure di mitigazione (ad esempio materiale da costruzione ignifugo) per ridurre il rischio di incendio, potrebbe non essere conveniente installare e mantenere il water mist in una stazione.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Steven K.H. LAI<sup>a</sup>, Tim K.W. CHO<sup>a</sup>, William Y.M. XIE<sup>b</sup>, Hadi WIJAYA<sup>c</sup>, K.W. ANG<sup>c</sup>; *Use of Fire Suppression Systems in Underground Stations and Metro Tunnels*; WSP (Asia) Limited, Hong Kong, WSP Consultant Pte Limited, Singapore.

## 6. Conclusioni

Dopo aver definito i due tipi di approccio della prevenzione incendi, il quadro normativo di riferimento e le caratteristiche delle stazioni metropolitane, facendo particolare riferimento a quella torinese, si sono potuti studiare i sistemi di controllo degli incendi, la loro definizione nei modelli di calcolo computazionale come FDS e i loro limiti.

In particolare dai risultati delle simulazioni fluidodinamiche e da quanto emerge dalle prove sperimentali riguardanti il caso studio di una stazione tipologica della metropolitana, si può dire che la galleria svolge un ruolo predominante nella gestione della ventilazione di emergenza rispetto alla stazione, nonostante l'interfaccia banchina/galleria abbia una superficie di apertura minima. A seconda di come viene attivata la ventilazione infatti il fumo si sposta e riempie tutta la banchina o rimane confinato negli interstizi tra le porte di banchina e le porte veicolo.

FDS non permette di considerare in modo adeguato l'interfaccia banchina/galleria, la quale richiederebbe un'eccessiva divisione del dominio computazionale. Tuttavia le simulazioni fluidodinamiche hanno permesso di verificare gli aspetti quantitativi legati al carico di incendio da 7MW composto da elementi di varia natura e ad individuare i problemi di visibilità. Le prove effettuate sul posto infatti non sono del tipo quantitativo assoluto, in quanto il fumo bianco prodotto dalle macchine non può essere paragonato e soprattutto non possiede le caratteristiche di quello previsto nelle varie simulazioni.

Per quanto riguarda l'utilizzo e la definizione dei water mist nei modelli di calcolo computazionale esistono ancora diversi dubbi. Sono stati compiuti numerosi sforzi per caratterizzare il comportamento degli spray prodotti dagli ugelli e la ricerca è ancora in corso per comprendere l'influenza di questi parametri sulla dinamica dello spray.

La maggior parte degli studi sulla caratterizzazione dei pattern di spruzzatura è correlata agli spray degli irrigatori convenzionali. La dimensione delle gocce di acqua nebulizzata è inferiore a quella delle gocce di sprinkler convenzionali e i modelli di trasporto di FDS risentono molto delle dimensioni ridotte delle gocce e generano errori di rilievo nel calcolo degli scambi di massa, di energia e di quantità di moto tra le stesse e gli aeriformi circostanti. È quindi necessario svolgere delle ulteriori ricerche sugli spray prodotti dagli ugelli water mist, le cui

caratteristiche principali sono: il modello di distribuzione e di trasporto delle goccioline, la portata dell'acqua, l'angolo di spruzzo, l'altezza dello spruzzo e la velocità della goccia.

# Bibliografia

Marco Bramani, Paolo Fugazza; *Prevenzione incendi in gallerie metropolitane*.

Raffaele Sabatino, Daniela Freda, Antonella Pireddu, Stefano Baldassarini, Stefano Manna, Mara Lombardi, Nicolò Sciarretta, Mauro Caciolai, Piergiacomo Cancelliere, Filippo Cosi, Vincenzo Cascioli; *Il codice di prevenzione incendi. La progettazione antincendio. Applicazioni pratiche nell'ambito del d.m. 3 agosto 2015 e s.m.i.*; INAIL -Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici; Responsabili scientifici: Raffaele Sabatino, Mara Lombardi, Tolomeo Litteri.

D.P.R. 151/2011.

Decreto Ministeriale del 10 marzo 1998, Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.

Codice di prevenzione incendi D.M. 3 agosto 2015 Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.

UNI – UNIFER 8379, Sistemi di trasporto su rotaia od altra guida vincolante. Termini e definizioni.

Andra Bruno; *Gestione di emergenze all'interno di una linea metropolitana. Piani di emergenza e loro applicazione*; Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Infrastrutture di Trasporto, Politecnico di Milano; Relatore: Prof. Giandomenico Cassano.

<https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana>.

Roberto Vancetti, Emiliano Cereda; *Stazioni metropolitane: la caratterizzazione degli occupanti per le verifiche di esodo ed inclusione con i metodi della FSE.*- [www.insic.it](http://www.insic.it).

Alessandro Ranzo, Antonio D'Andrea, Paola Di Mascio e Maria Vittoria Corazza; *Caratteristiche funzionali e costruttive delle infrastrutture per la mobilità pedonale*.

<https://www.infrato.it>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana\\_di\\_Torino](https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana_di_Torino)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Impianto\\_di\\_allarme\\_incendio](https://it.wikipedia.org/wiki/Impianto_di_allarme_incendio)

Luca Ferrari; *La gestione dei fumi nell'incendio* <http://www.lucaferrari.info/wp-content/uploads/2015/02/La-gestione-dei-fumi-nell'incendio-RCIFeb15.pdf>

Antonio Pettorusso; *Modellazione numerica di un incendio in galleria*; Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino; Relatori: Prof. Giorgio Zavarise, Prof. Romano Borchiellini.

<https://simatantincendi.com/impianti-water-mist/>

<http://www.spraytecs.com/it/ugelli-componenti/ugelli-watermist>

<http://italproim.it/service/impianti-water-mist/>

H.M.I. Mahmud, K.A.M. Moinuddin and G.R. Thorpe; *Characterization of a water-mist spray: Numerical modelling and experimental validation*; 18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia 3-7 December 2012.

A. Jenfta,b, P. Bouleta, A. Collina, G. Pianetb, A. Bretonb, A. Mullerb; *Can we predict fire extinction by water mist with FDS?*; 21<sup>ème</sup> Congres Francais de Mecanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013.

Giovanni Manzini, Ph. D. (Applied Thermal Engineering group); *Stima dell'efficacia dei sistemi water mist nel controllo, nella soppressione e nell'estinzione degli incendi*; A.I.I.A. XI Convegno Nazionale "La Tecnologia Water Mist - Stato dell'arte e Prospettive".

Csaba SZIKRA<sup>1</sup> and László BEDA<sup>2</sup>; *FDS simulation of the combined use of sprinklers and water mist fire extinguishing systems*; Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC) 2014.

Steven K.H. LAI<sup>a</sup>, Tim K.W. CHO<sup>a</sup>, William Y.M. XIE<sup>b</sup>, Hadi WIJAYAC<sup>c</sup>, K.W. ANG<sup>c</sup>; *Use of Fire Suppression Systems in Underground Stations and Metro Tunnels*; WSP (Asia) Limited, Hong Kong, WSP Consultant Pte Limited, Singapore.