

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E INDUSTRIALE

## **Tesi di laurea magistrale in Ingegneria della sicurezza civile e industriale**

L'incendio in galleria autostradale:  
scenari, conseguenze e valutazioni con l'approccio  
della *Fire Safety Engineering* (FSE)

*Relatore: Prof. Angelo Bertolazzi*

*Correlatori: Prof. Paolo Mocellin  
Prof. Emiliano Pasquini*

*Laureando: Giovanni Rigoni*

ANNO ACCADEMICO 2022-2023



*“The weight of this sad time we must obey,  
Speak what we feel, not what we ought to say.  
The oldest hath borne most: we that are young  
Shall never see so much, nor live so long.”  
(King Lear, V, III)*



# Riassunto

L'obiettivo del presente lavoro è quello di fornire una panoramica sugli aspetti significativi dell'infrastruttura galleria autostradale e dei veicoli che la impiegano, caratterizzando la probabilità incidentale presente, allo scopo di fornire una chiave di lettura sulla rilevanza del fenomeno dell'incidentalità in galleria e, soprattutto, dell'associato scenario di incendio.

Successivamente, sono stati individuati degli scenari di incendio tipo aggregando l'aspetto geometrico dell'infrastruttura e le caratteristiche chimico-fisiche della sorgente dell'incendio. L'analisi è stata condotta attraverso lo strumento della *Fire Safety Engineering* e, in particolare, il codice *Fire Dynamics Simulator* consentendo una valutazione accurata di alcuni parametri quali la temperatura, la visibilità e la dose inalata di effluenti pericolosi.

Alla luce delle diverse configurazioni simulate, le gallerie con curve e gli scenari che coinvolgono diverse automobili costituiscono le casistiche più severe, soprattutto a causa dell'elevato carico di incendio e della quantità di effluenti prodotta. In ogni caso, non si evidenziano situazioni critiche per l'evacuazione degli occupanti né per la tenuta delle strutture, anche se le condizioni degli scenari più gravosi possono influire negativamente sulla facilità di intervento dei soccorritori.



# Indice

Introduzione .....	11
Analisi delle tipologie costruttive di una galleria per la costruzione geometrica dei modelli .....	13
1.1: Glossario e terminologie adottate.....	13
1.1.1: Elementi geometrici .....	13
1.1.2: Aspetti infrastrutturali .....	15
1.2: Sezione trasversale tipo e metodi di calcolo .....	16
1.2.1: Requisiti geometrici della strada .....	16
1.2.2: Determinazione dell'intradosso.....	18
1.3: Caratteristiche tipiche della ventilazione delle gallerie.....	20
1.3.1: Ventilazione longitudinale .....	20
1.3.2: Ventilazione semi-trasversale .....	20
1.3.3: Ventilazione trasversale .....	20
1.3.4: La ventilazione in caso di emergenza .....	21
1.4: Fattori per la scelta del tracciato di una galleria.....	22
1.4.1: Tracciato rettilineo .....	22
1.4.2: Tracciato inclinato.....	23
1.4.3: Tracciato in curva.....	24
Probabilità di incidente nelle gallerie stradali .....	25
2.1: Elementi di valutazione della probabilità di incidente in una galleria .....	25
2.2: Difficoltà nel soccorso .....	30
Definizione del focolare tipo di incendio per veicoli con diversa alimentazione .....	32
3.1: La distribuzione dei veicoli in Italia.....	32
3.1.1: Categorie di Open.....	32
3.1.3: Alimentazioni .....	35
3.1.4: Auto elettriche e diffusione.....	38
3.2: Panoramica dei combustibili utilizzati per alimentare i veicoli .....	39
3.2.1: Alimentazioni dei veicoli e quantitativi di combustibile .....	39
3.2.2: Poteri calorifici.....	41
3.2.3: Auto ad alimentazione elettrica.....	42
3.3: Composizione media dei veicoli .....	46
3.3.1: Automobili .....	46
3.3.2: Trattori stradali.....	46
3.3.3: Vetture ad alimentazione elettrica.....	47

3.4: Tipologia degli effluenti rilasciati durante un incendio .....	48
3.4.1: Prodotti della combustione di componenti dell'automobile .....	48
3.4.2: Prove di combustione di automobili intere .....	50
3.5: Curve HRR ( <i>Heat Release Rate</i> ).....	53
3.5.1: Automobili .....	53
3.6: Definizione dei focolari di incendio.....	55
3.6.1: Definizione della tipologia di reazione .....	55
3.6.2: Modelli di automobile .....	55
3.6.3: Modello di Pool Fire .....	57
Definizione degli scenari di incendio.....	59
4.1: <i>Meshing</i> del modello .....	60
4.1.1: Modello di galleria rettilinea .....	60
4.1.2: Modello di galleria inclinata .....	61
4.1.3: Modello di galleria curva .....	62
4.2: Parametri di riferimento .....	63
4.2.1: Curva HRR.....	64
4.2.2: Temperatura .....	64
4.2.3: Visibilità.....	64
4.2.4: FED .....	64
4.3: Scenario in campo aperto .....	66
4.3.1: Automobile elettrica in campo aperto A.1 .....	67
4.3.2: Automobile tradizionale in campo aperto A.2 .....	73
4.4: Scenari in galleria rettilinea piana.....	76
4.4.1: Automobile elettrica in galleria rettilinea piana B.1 .....	76
4.4.2: Automobile tradizionale in galleria rettilinea piana B.2 .....	82
4.4.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria rettilinea piana B.4 .....	85
4.5: Scenari in galleria rettilinea inclinata.....	91
4.5.1: Automobile elettrica in galleria rettilinea inclinata C.1 .....	91
4.5.2: Automobile tradizionale in galleria rettilinea inclinata C.2 .....	94
4.5.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria rettilinea inclinata C.4.....	98
4.6: Scenari in galleria piana con doppia curva.....	103
4.6.1: Automobile elettrica in galleria piana con doppia curva D.1 .....	103
4.6.2: Automobile tradizionale in galleria piana con doppia curva D.2.....	107
4.6.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria piana con doppia curva D.4.....	111
4.7: Considerazioni sui risultati.....	115
Analisi comparata dei risultati .....	117



5.1: Temperatura .....	117
5.2: FED .....	123
5.3: Visibilità .....	127
5.4: Andamento dello strato di fumi.....	131
Conclusioni .....	135
Riferimenti bibliografici .....	139
Appendice A: mappa dei sensori impiegati .....	141
Appendice B: esempio di implementazione del modello in FDS .....	143
B.1: Esempi della modellazione degli ostacoli e della mesh .....	143
B.1.1: Esempio della modellazione degli ostacoli .....	143
B.1.2: Esempio della modellazione della mesh.....	144
B.2: Esempi della modellazione dei focolari.....	145
B.2.1: Esempio della modellazione dell'automobile elettrica.....	145
B.2.2: Esempio della modellazione dell'automobile tradizionale.....	146



# Introduzione

L'incendio in una galleria stradale rappresenta una condizione limite particolarmente critica dell'incidente stradale che può arrecare danni ingenti sia dal punto di vista meramente economico che per la perdita di vite umane, come testimoniato dagli eventi tristemente famosi dell'incendio del Traforo del Monte Bianco (24/03/1999) e del Tunnel del Tauri (25/05/1999).

Per fornire una stima iniziale del fenomeno, è sufficiente considerare che ogni anno sul territorio italiano i Vigili del Fuoco sono chiamati ad intervenire più di 200 volte per estinguere incendi in gallerie stradali.

L'obiettivo di questo lavoro è, quindi, fornire una valutazione preliminare delle conseguenze di diversi scenari di incendio, differenziando sia secondo dei casi-tipo strutturali che impiegando diverse sorgenti dell'incendio in relazione anche ai diversi sistemi di trazioni (motori a combustione interna, motori elettrici) .

Lo strumento che rende possibile queste analisi è l'impiego della *Fire Safety Engineering*, che dalla sua introduzione si sta diffondendo sempre di più in relazione anche al metodo prestazionale della progettazione antincendio che, rispetto al vecchio approccio prescrittivo, consente una valutazione diversa dei differenti scenari di incendio, confrontando alcuni parametri, come temperatura, visibilità e *FED*, con dei valori di riferimento per la salvaguardia della vita umana. Concretamente, ciò è permesso dall'uso di un *software* di simulazione fluidodinamica agli elementi finiti chiamato FDS (*Fire Dynamics Simulator*), sviluppato dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e specializzato nella soluzione di flussi di fluido originati dal fuoco e a bassa velocità.

Per rendere più agevole la costruzione dello scenario e la visualizzazione dei risultati, si è fatto uso dell'interfaccia grafica fornita dal *software PyroSim*, pensato per complementare FDS per renderlo più intuitivo, in quanto l'input di FDS è un file di testo di cui sono riportati alcuni estratti nel corso di questo lavoro, di difficile comprensione senza una notevole esperienza del *software*.

Nonostante i vantaggi offerti da questo approccio ingegneristico siano notevoli, è bene tener presente i limiti legati alla FSE, tra i quali figurano i tempi di calcolo, che possono essere anche molto lunghi, specialmente se si scegliesse una discretizzazione troppo fitta, e la forte dipendenza dei risultati dai dati in input.

Ciononostante, grazie alle soluzioni fornite dai *software*, siano esse in termini di temperatura, visibilità o concentrazione di sostanze, ci si è posto l'obiettivo di fare delle considerazioni legate all'evacuazione degli occupanti e alla sicurezza dei soccorritori, confrontandole con parametri tratti dal Codice di Prevenzione Incendi.



# Capitolo 1

## Analisi delle tipologie costruttive di una galleria per la costruzione geometrica dei modelli

### 1.1: Glossario e terminologie adottate

Con il fine di avere un linguaggio comune e corretto da impiegare nei paragrafi successivi, è opportuno definire alcuni elementi caratteristici della galleria e dell'infrastruttura stradale ad esso collegata; buona parte delle informazioni sotto presentate è stata attinta dal manuale Strade ferrovie aeroporti [1].

Per comodità concettuale, essi sono stati suddivisi in due categorie principali: geometrico/strutturali e infrastrutturali.

#### *1.1.1: Elementi geometrici*

Gli elementi geometrici caratteristici, desunti dal manuale [1], sono:

**Numero di fornici** (o canne): si dice che una galleria è a doppio fornice (fornice propriamente indica un'apertura soggetta al transito delle persone) quando si ha il traffico in una sola direzione per ciascuna sezione; al contrario, una galleria è detta a singolo fornice quando si ha la circolazione del traffico in entrambe le direzioni sotto uno stesso arco; esempi di queste due diverse configurazioni sono riportati nelle Figure 1.1 (doppio fornice) e 1.2 (singolo fornice).



**Figura 1.1:** la galleria dei Colli Berici, situata tra le uscite dell'autostrada A4 di Vicenza Est e Vicenza Ovest, è un tipico esempio di galleria a doppio fornice.



**Figura 1.2:** *il Traforo del Monte Bianco, qui visto dal lato francese, è a singolo fornice ed è una delle gallerie più importanti in Europa*

**Lunghezza della galleria:** elemento fondamentale per caratterizzare una galleria, sia per il suo aspetto infrastrutturale che per il rischio ad esso connesso, come si esaminerà in modo più approfondito nel capitolo 3.

**Numero e larghezza delle corsie:** sia il numero per senso di marcia che il numero totale è importante sia a livello strutturale che a livello di valutazione del rischio, viste le interazioni tra i veicoli possono essere anche di carattere radicalmente diverso; sarà esaminato nel paragrafo 1.2.1.

**Geometria della sezione trasversale:** determinata sulla base di vari criteri, descritti nel paragrafo 1.2, ha influenza sia sulla propagazione di fumo e calore che sulla sicurezza globale dell'infrastruttura.

**Tipologia di costruzione:** le diverse metodologie costruttive adottabili influiscono notevolmente sulle geometrie realizzabili.

### *1.1.2: Aspetti infrastrutturali*

Gli aspetti infrastrutturali caratteristici, sempre tratti dal manuale [1], sono:

**Volume di traffico per fornice:** quanti veicoli transitano in un intervallo di tempo generico influenza sia la probabilità di incidente che il numero massimo di persone coinvolte, ed è quindi un elemento chiave nella definizione del rischio associato all'uso dell'infrastruttura.

**Rischio di congestione:** questo aspetto può innalzare notevolmente il numero di occupanti coinvolti da un incidente e da un possibile incendio da esso derivante.

**Tempo di intervento dei servizi di emergenza:** se eccessivamente lungo può aumentare le conseguenze sulla salute delle vittime e rendere l'intervento di soccorso anche molto più complesso; è in parte determinato dal tempo impiegato tra il verificarsi dell'emergenza e l'arrivo in centrale operativa della chiamata, che in una galleria sprovvista di copertura telefonica o altri sistemi di allarme può essere rilevante.

**Presenza e percentuale dei veicoli pesanti:** anch'essi aumentano sia la probabilità che la magnitudo dell'evento incidentale, principalmente a causa del carico trasportato.

**Presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose:** se consentito può determinare un innalzamento considerevole della gravità dell'incidente.

**Caratteristiche delle strade di accesso:** possono essere più o meno percorribili con mezzi di notevoli dimensioni, aumentando la difficoltà di intervento dei soccorritori.

**Velocità consentita:** aumenta sia la probabilità che le conseguenze dell'incidente iniziale.

**Condizioni geografiche e meteorologiche:** in condizioni particolari possono avere un ruolo iniziatore nel causare l'incidente, come la presenza di ghiaccio, nebbia o di un quantitativo notevole di acqua.

## 1.2: Sezione trasversale tipo e metodi di calcolo

### 1.2.1: Requisiti geometrici della strada

Trattandosi di una galleria stradale, è utile capire, in prima battuta, quali siano i requisiti geometrici per la sede stradale. Queste informazioni si possono trarre dal Decreto Ministeriale 5-11-2001: Norme funzionali e geometriche per la costruzione di strade [2].

In particolare, si è fatto riferimento alla tipologia autostradale (parte della rete primaria extraurbana) a due corsie di marcia in un unico senso, con aggiunta una corsia di emergenza.

La norma prescrive una larghezza minima delle corsie di marcia pari a 3.75 m e di 3 m per la corsia di emergenza. In aggiunta a queste, si deve aggiungere a sinistra uno spazio per la banchina, di larghezza minima pari a 0.7 m; nel caso in considerazione, non è necessario aggiungere uno spartitraffico, in quanto la soluzione a doppio fornice consente di trattare i due sensi di marcia in maniera di per sé separata.

Per quanto riguarda le caratteristiche specifiche delle gallerie, è prescritto di non variare le larghezze delle corsie in ingresso, aspetto critico per la sicurezza negli imbocchi; questo però non si va ad applicare in modo retroattivo sulle gallerie esistenti, nelle quali spesso viene ridotta o eliminata la corsia di emergenza e/o ristrette le corsie di marcia, aspetto che mette maggiormente in difficoltà l'autista nei tratti dove è più probabile un incidente, come esaminato nel paragrafo 2.2.

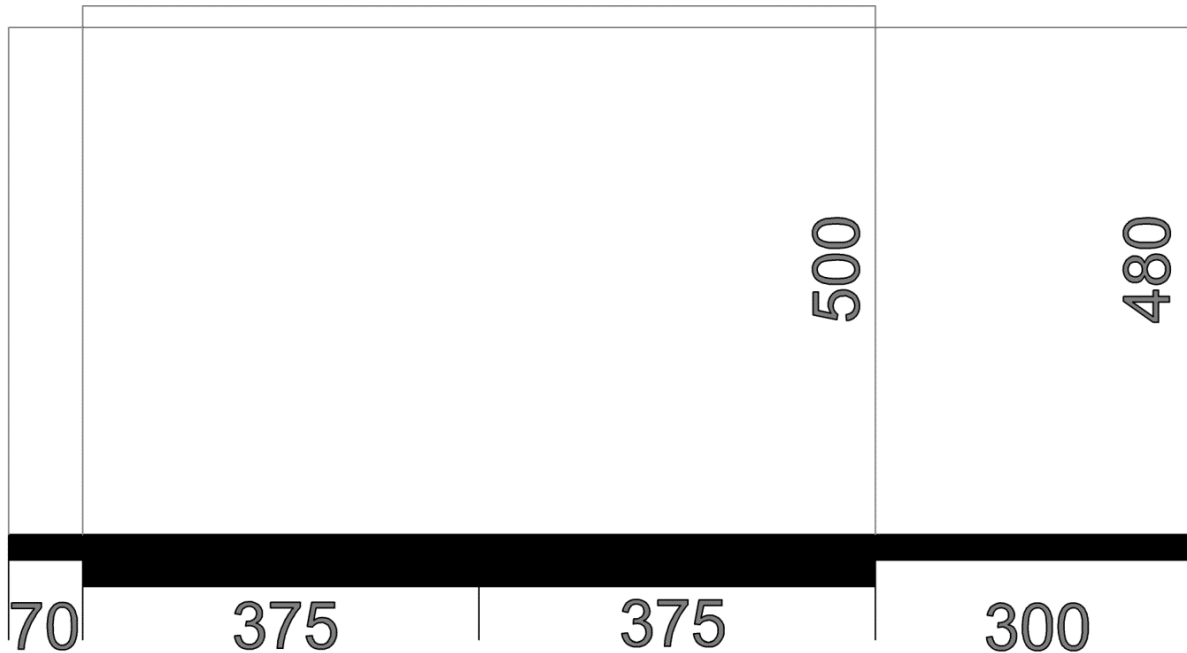
Questo lavoro, per non entrare in considerazioni molto specifiche per una singola galleria, che limiterebbero notevolmente la sua utilità, si propone quindi di analizzare una galleria di ipotetica nuova costruzione su un tratto autostradale di caratteristiche sopra riportate.

Inoltre, nelle gallerie sono presenti requisiti specifici per l'altezza minima sovrastante le corsie, nella fattispecie pari ad almeno 4.80 m al di sopra delle banchine e delle corsie di emergenza e di 5 m sopra alle corsie di marcia; per comodità di lettura, queste caratteristiche sono riportate nella Tabella 1.1 e, graficamente, nella Figura 1.3.

**Tabella 1.1:** *Caratteristiche geometriche degli elementi stradali, [DM 5/11/2001, art. 4.1.2].*

<b>Tipologia</b>	<b>Larghezza</b>	<b>Altezza</b>
Corsia di marcia	375 cm	500 cm
Corsia di emergenza	300 cm	480 cm
Banchina a sinistra	70 cm	480 cm





**Figura 1.3:** Rappresentazione schematica degli spazi richiesti in una galleria, elaborata dal [DM 5-11-2001]

Inoltre, è buona norma, onde evitare l'accumulo di pioggia o di altri liquidi, prevedere una leggera inclinazione della sede stradale, per convogliarlo verso dei canali di scolo; nei modelli creati, per limitazioni interne al *software* impiegato, si è scelto di non tenerne conto, in quanto la piccola variazione di altezza non sarebbe stata rilevata dal programma a causa della *mesh* notevolmente più grossolana per esigenze numeriche.

Vista la lunghezza pari a 1000 metri per tutti i tipi di galleria presi in studio, non è strettamente obbligatoria la presenza delle piazzole di sosta, previste per gallerie di lunghezza superiore; questo, oltre a consentire una notevole semplificazione dei modelli geometrici, pone in una condizione di *worst case scenario* dal punto di vista infrastrutturale.

### 1.2.2: Determinazione dell'intradosso

La sezione trasversale dipende fortemente dalla consistenza del terreno attraversato che influenza anche le tipologie di sistema di attacco che possono essere impiegate; nelle gallerie di costruzione moderna, si ricorre generalmente all'impiego di carri di perforazione.

Le variazioni nella consistenza che possono verificarsi lungo l'asse longitudinale rendono nella pratica difficile la definizione a priori della spinta esercitata sull'arco, comportando nella pratica il bisogno di un costante aggiornamento della sezione (specialmente della forma dell'estradosso) durante lo scavo.

Ciononostante, esistono numerose teorie che consentono la determinazione preliminare dei valori delle spinte, come quelle di Heim et al.; da queste si può arrivare a definire valori delle forze agenti sul rivestimento e da queste arrivare a determinare lo spessore e la forma dell'intradosso.

Nel presente lavoro questo processo è stato svolto in maniera meramente qualitativa, in quanto esula dagli obiettivi principali, e determinare una precisa sezione richiede dati in input estremamente specifici al singolo caso in esame; pertanto, si è scelta una sezione che può essere il più rappresentativa possibile delle gallerie presenti nella realtà italiana.

In generale, i terreni italiani non godono di un'elevata consistenza, pertanto soluzioni senza rivestimento (adottato spesso nelle gallerie brevi scavate nella roccia viva, particolarmente famose sono quelle nel granito norvegese) trovano limitatissima applicazione. Restano quindi disponibili le soluzioni che coinvolgono rivestimenti ad arco, sia esso a tutto sesto, policentrico o parabolico.

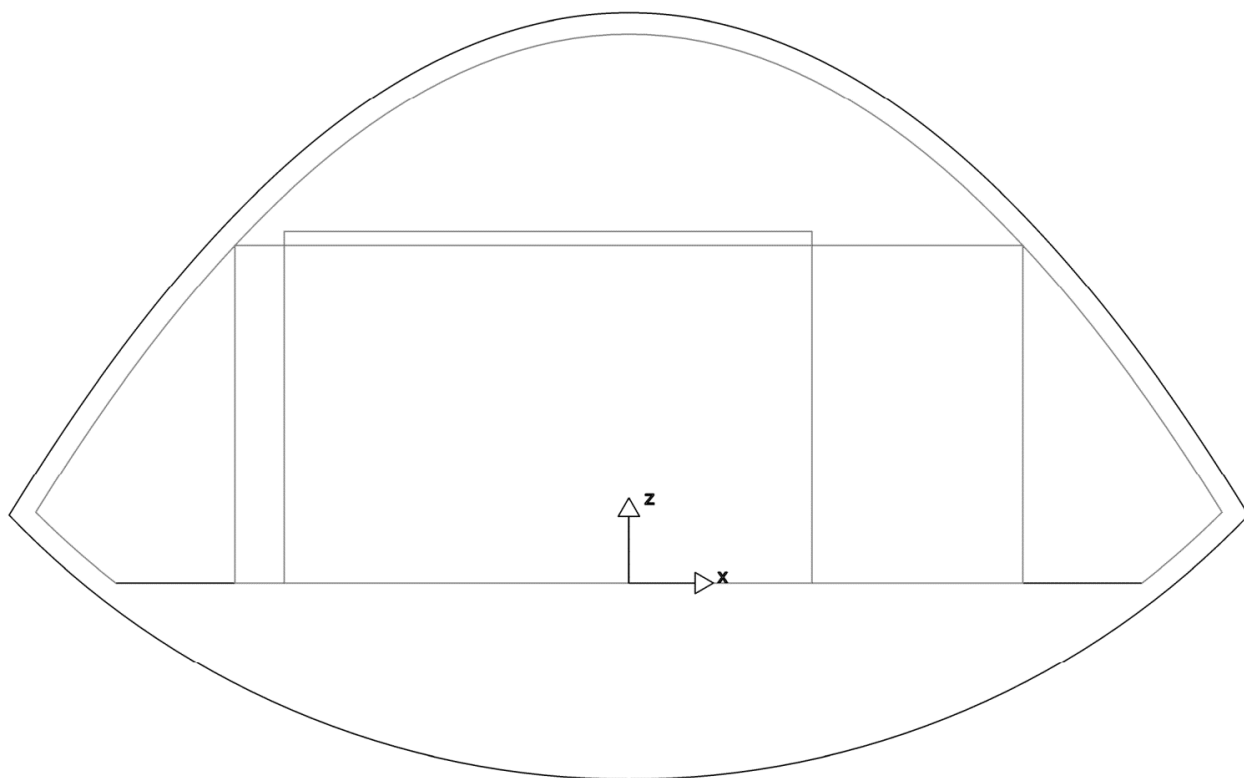
Quest'ultima tipologia è consigliabile specialmente in caso a scarsa consistenza, pertanto, volendo analizzare il caso più critico, si è scelta questa tipologia di intradosso.

Per determinare l'intradosso, si è costruito un sistema di riferimento cartesiano  $Oxz$  centrato nella metà della carreggiata fissata nel paragrafo precedente, con l'obiettivo di trovare l'Equazione della parabola ad asse verticale passante per i punti  $(-5.60 \text{ m}; 4.80 \text{ m})$ ,  $(5.60 \text{ m}; 4.80 \text{ m})$  e di altezza massima pari a  $7.8 \text{ m}$  dalla sede stradale; in altre parole, ciò implica che il vertice avrà coordinate cartesiane  $x_v, z_v = (0; 7.8 \text{ m})$ .

Queste condizioni consentono di trovare la parabola di Equazione (1.1)

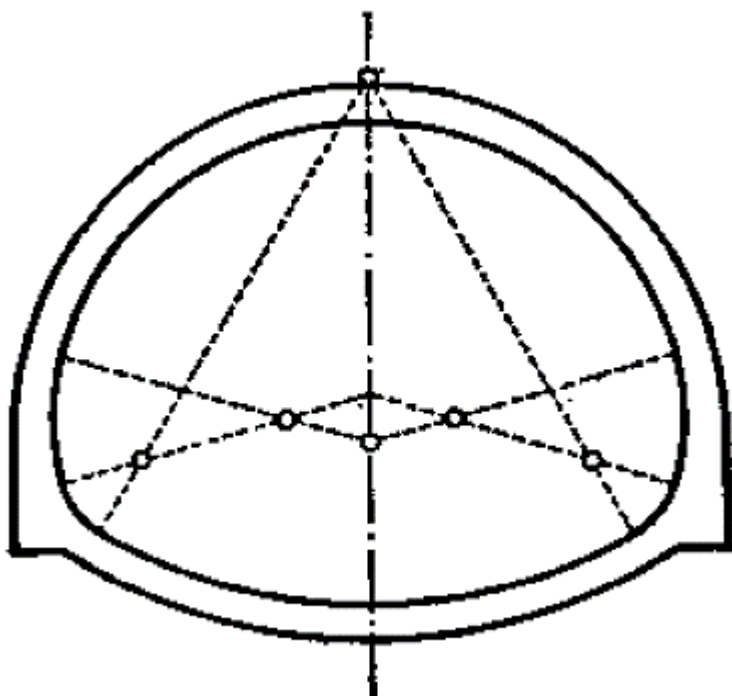
$$z = -\frac{75}{784}x^2 + 7.8 \quad (1.1)$$

che diventerà la parte superiore dell'intradosso; per la parte inferiore, si è scelto di approssimarla con un arco di raggio pari a  $11.92 \text{ m}$  e centro in  $(0; 9.43 \text{ m})$ ; queste dimensioni sono state scelte per lasciare uno spazio per due marciapiedi da  $1.7 \text{ m}$  ai margini della sede stradale; mettendo assieme quanto visto finora, la sezione assumerà l'aspetto della Figura 1.4 della pagina successiva.



**Figura 1.4:** *Geometria della sezione impiegata.*

Questa sezione, opportunamente inspessita, diventerà la base da cui partire per costruire i modelli geometrici da cui si avvieranno gli scenari in analisi nel Capitolo 4; per consentire un paragone con una di riferimento, è riportata in seguito una sezione con arco policentrico tratta da [1].



**Figura 1.5:** *Geometria di una sezione tipo, tratta da [G. Tesoriere, 1985].*

### **1.3: Caratteristiche tipiche della ventilazione delle gallerie**

Un aspetto chiave nello sviluppo degli scenari di incendio è svolto dalla ventilazione presente nella galleria; essa può essere realizzata con modalità caratterizzabili secondo tre macroclassi: trasversale, semi-trasversale e trasversale.

Le informazioni presentate nei paragrafi successivi sono tratte dallo studio [3].

#### *1.3.1: Ventilazione longitudinale*

Nella ventilazione longitudinale il ricambio d'aria e lo smaltimento dei fumi (siano essi derivanti dall'ordinario funzionamento dei veicoli a combustione interna o prodotti da un incendio) sono gestiti facendo passare l'interrezza dei fluidi attraverso i portali; non necessariamente in questo tipo la ventilazione è naturale; spesso per aiutare il flusso sono presenti ventilatori o *jet fans*.

Il deflusso dei prodotti della combustione ordinaria dei motori a combustione interna è aiutato dall'effetto pistone che il traffico veicolare crea con le pareti della galleria e rende questa tipologia consigliabile per fornici che ospitano un solo senso di marcia; per gallerie lunghe l'efficacia di questa soluzione diminuisce marcatamente, in quanto i fumi, gradualmente raffreddati nel loro percorso verso l'uscita, cominciano a scendere verso il basso, limitando la visibilità e aumentando in generale il rischio per gli occupanti e i soccorritori.

#### *1.3.2: Ventilazione semi-trasversale*

Per gallerie più lunghe, comincia ad essere opportuno ricorrere a soluzioni più complesse, come la ventilazione semi-trasversale, dove vi è, ad intervalli spaziali regolari, o apporto di aria fresca dall'esterno oppure rimozione dei fumi dalla galleria; ciò è reso possibile o da un tubo con dei ventilatori posto sotto l'intradosso e avente delle aperture per la sua lunghezza, oppure con afflusso diretto dall'esterno, utilizzando cunicoli di servizio, spesso presenti per adiuvarle le operazioni di scavo.

#### *1.3.3: Ventilazione trasversale*

La ventilazione completamente trasversale è caratterizzata sia dallo smaltimento dei fumi che dall'apporto di aria fresca. Questa soluzione è indicata per gallerie lunghe e molto trafficate, anche se richiede notevoli investimenti per la sua realizzazione; le modalità di realizzazione sono simili a quelle già descritte per la ventilazione semi-trasversale.

#### *1.3.4: La ventilazione in caso di emergenza*

La gestione della ventilazione in caso di incendio in galleria è un tema complesso e di soluzione non univoca; oltre alle caratteristiche dell'infrastruttura, infatti, dipende anche dalla tipologia di incendio e anche dal traffico effettivamente presente.

Ciò è causato dal contrasto tra l'esigenza di mantenere abbastanza alto lo strato dei fumi per consentire l'evacuazione degli occupanti e il tentativo di soffocare l'incendio privandolo del comburente: la prima imporrebbe di massimizzare la portata di aria fresca verso l'interno, alimentando però l'incendio; la seconda porta a minimizzarla per abbassare la potenza dell'incendio, riducendo in particolare le conseguenze negative sulle strutture, al costo di consentire un prematuro mescolamento dei fumi, rendendo più difficoltosa l'evacuazione.

Questi quesiti non si pongono qualora non vi sia alcuna ventilazione artificiale, come nei casi presi in esame da questo lavoro.

## 1.4: Fattori per la scelta del tracciato di una galleria

Lo studio del profilo longitudinale della galleria dovrà necessariamente partire da considerazioni più generali sull'infrastruttura nel suo complesso; alcune situazioni sito-specifiche possono far deviare il tracciato che sarebbe idealmente percorso di diversi metri, per evitare zone di terreno con caratteristiche che ne rendono difficoltoso l'attraversamento, come la presenza di grandi quantitativi di acqua tra i vuoti interstiziali.

Ancora una volta, non essendo la progettazione di una galleria argomento principe del presente lavoro, è ritenuto opportuno limitarsi a trovare dei casi che possono essere significativi per un buon numero di gallerie esistenti o realizzabili, suddividendole in tre categorie: rettilinea, inclinata e con curva, le cui caratteristiche saranno esposte nei paragrafi immediatamente successivi.

### 1.4.1: Tracciato rettilineo

Per la realizzazione del modello rettilineo si è semplicemente estruso l'area della sezione lungo un segmento di lunghezza pari a 1000 m, ottenendo il modello tridimensionale riportato in Figura 1.6.

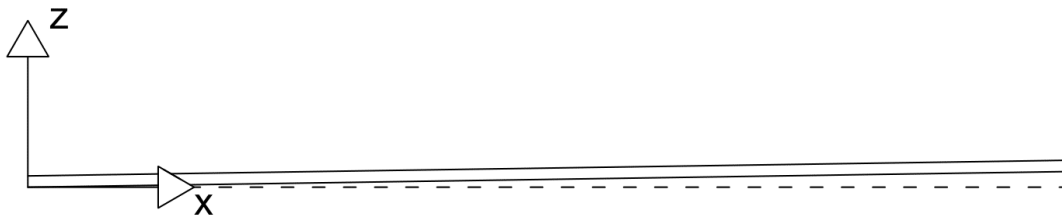


**Figura 1.4:** Tracciato del modello rettilineo

### 1.4.2: Tracciato inclinato

Leggermente più complesso è risultato essere la costruzione del modello inclinato; innanzitutto, si è deciso di individuare come inclinazione di progetto una pendenza pari all'1.5%, che si colloca nella parte più alta delle pendenze consigliate per una galleria stradale, che idealmente non dovrebbe superare il 2-2.5%, compromesso dettato dal raggiungere una buona verosimiglianza e, al contempo, garantire un certo grado di distacco dallo scenario di galleria rettilinea piana.

Per la realizzazione concreta del modello si possono seguire due strade maestre: estrarre lungo una traiettoria inclinata già partendo dal modello tridimensionale in *AutoCAD*, come rappresentato in Figura 1.7 oppure ottenere un risultato simile dal punto di vista fisico inclinando il vettore accelerazione di gravità  $g$  interno a *PyroSim* in un modello di galleria rettilinea.

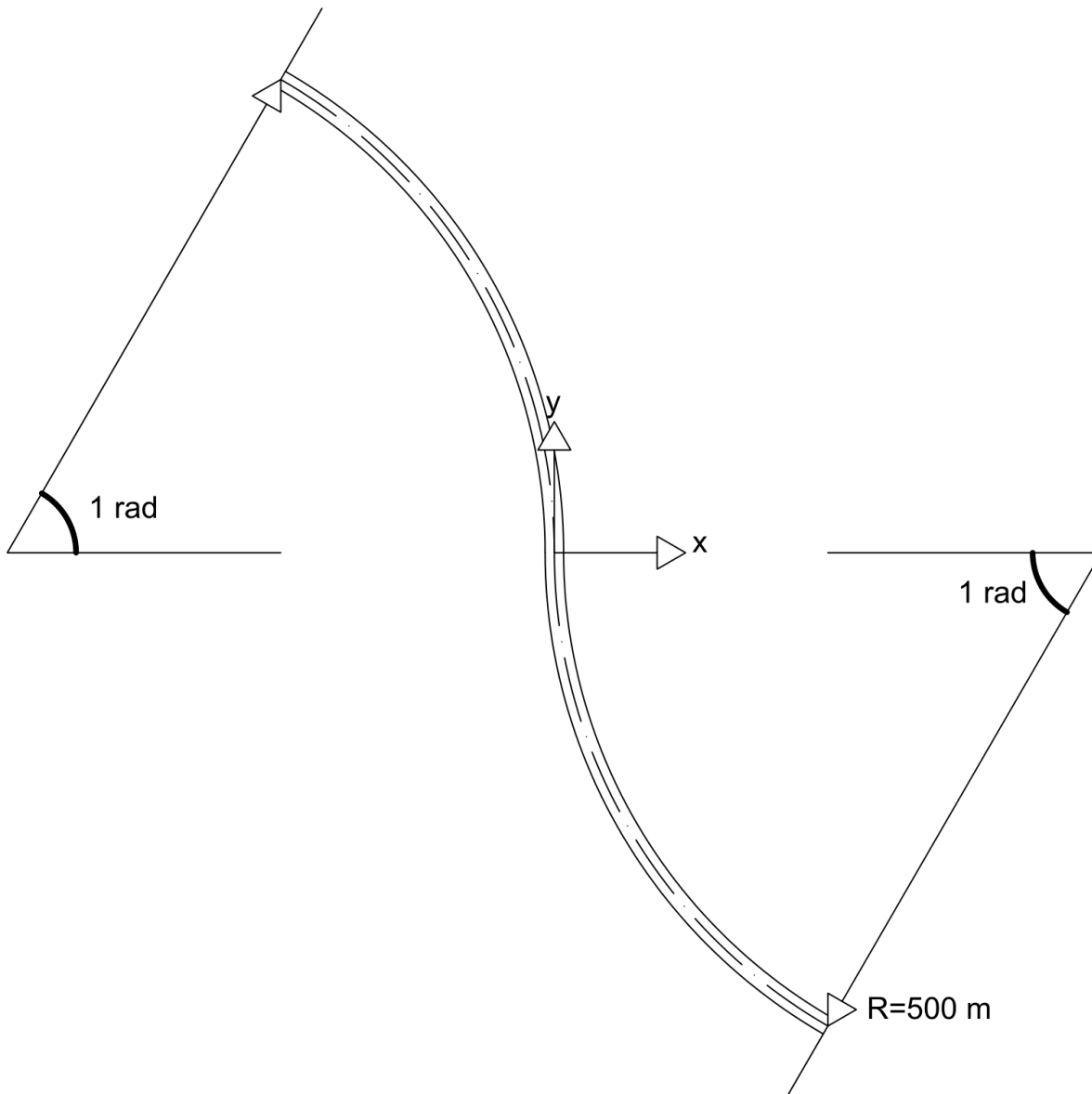


**Figura 1.7:** *Tracciato del modello inclinato*

Per ragioni di efficienza numerica, meglio esplicitate nel paragrafo 1.5.2, si è scelto di intraprendere quest'ultima soluzione.

### 1.4.3: Tracciato in curva

Il modello di galleria in curva è quello più ricco tra i tre presi in considerazione. Esso è stato realizzato estrudendo l'area della sezione lungo due traiettorie ottenute da archi di raggio pari a 500 m, uno verso le x negative e l'altro verso le x positive, come mostrato nella Figura 1.8.



**Figura 1.8:** Tracciato del modello con doppia curva

Come si vedrà nel paragrafo relativo alla creazione della *mesh*, PyroSim e FDS hanno una certa difficoltà nel gestire elementi curvi, specialmente nel caso di una lunga galleria, andando facilmente incontro a situazioni di *numerical instability*. Ciò ha reso questo modello particolarmente impegnativo nella realizzazione.



# Capitolo 2

## Probabilità di incidente nelle gallerie stradali

### 2.1: Elementi di valutazione della probabilità di incidente in una galleria

Per impostare i modelli nel modo più realistico possibile e per fornire un'approssimazione del tasso di incidentalità, si sono esaminati diversi studi di letteratura e linee guida sul tema: un primo documento analizzato sono le "Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente", redatto dall'ANAS nel 2009 [4].

Al suo interno si possono trovare diverse metodologie per una valutazione specifica del rischio in una specifica galleria impiegando un buon numero di dati in ingresso, come la tipologia costruttiva, la struttura delle corsie, il tracciato, la composizione e la velocità del traffico.

Attraverso elaborazioni di dati di incidentalità non disponibili al pubblico, lo studio perviene alla seguente Tabella 2.1.

**Tabella 2.1:** Tassi di accadimento di incidenti e incendi in galleria, tratti da [ANAS, 2009]

<b>Tasso di accadimento degli incidenti in galleria</b>	
Incidenti con soli danni materiali	
Tunnel urbani	da 40 a 150 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel autostradali	da 30 a 80 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel extra-urbani bi-direzionali	da 20 a 100 per $10^8$ veicoli/km
Incidenti con danni alle persone	
Tunnel urbani	da 10 a 50 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel autostradali	da 0 a 15 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel extra-urbani bi-direzionali	da 0 a 20 per $10^8$ veicoli/km
Feriti	
Tunnel urbani	da 10 a 50 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel autostradali	da 0 a 15 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel extra-urbani bi-direzionali	da 0 a 20 per $10^8$ veicoli/km
Morti	
Tunnel urbani	da 0 a 3 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel autostradali	da 0 a 1 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel extra-urbani bi-direzionali	da 0 a 2 per $10^8$ veicoli/km
<b>Tasso di accadimento degli eventi di incendio in galleria</b>	
Tunnel urbani	da 0 a 10 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel autostradali	da 0 a 10 per $10^8$ veicoli/km
Tunnel extra-urbani bi-direzionali	da 0 a 15 per $10^8$ veicoli/km

La distinzione tra danni alle persone e ferimento è che i primi riguardano degli aspetti globali della salute della persona, come l'intossicazione dai fumi e l'incapacitamento da esso conseguente, mentre per ferimento si intende un danno che comporta una lesione allo strato cutaneo, spesso accompagnato da sanguinamento.

Inoltre, per eventi di incendio il documento intende quelli derivati da un incidente stradale che ne è causa primaria.

Si può vedere come il panorama incidentale presentato dalla linea guida sia abbastanza variegato e complesso; purtroppo, visto che la provenienza di questi dati non è verificabile e la pubblicazione avvenuta più di un decennio fa, si è deciso di non impiegare questi dati per effettuare una ricomposizione del rischio; ciononostante, i numeri presentati sono preziosi per far intuire la portata dei fenomeni di incidente e di incendio.

Un secondo studio analizzato è il [5]; in questo studio si analizzano diversi aspetti che influiscono sulla percezione dell'autista in prossimità di una galleria, come il rallentamento e allontanamento dal margine destro della carreggiata, l'aumento del carico di lavoro e, soprattutto, l'effetto "buco nero" sperimentato dell'ingresso.

Lo studio raccoglie diverse soglie per suddividere le zone della galleria, derivate da diversi approcci impiegati da diversi autori, con la zona 1 avente lunghezze che vanno dai 50 ai 100 m dal portale, con le altre zone progressivamente più distanti dall'entrata; i risultati dell'indagine sono riportati in Tabella 2.2.

**Tabella 2.2:** Tassi di incidentalità per zona della galleria, in incidenti per milione di veicoli/km [S. Bassan, 2016].

Tipologia di tunnel (Paese)	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Totale zone 2-4
Tunnel autostradale (Cina)	0.56	0.53	0.58	0.45	0.5
Unidirezionale (Austria)	0.3	0.05		0.095	0.0725
Bidirezionale (Austria)	0.3	0.1		0.075	0.0875
Tutti i tunnel (Norvegia)	0.3	0.23	0.16	0.1	0.13
Tutti i tunnel più lunghi di 500 m (Norvegia)	0.3	0.32	0.18	0.08	0.13
Unidirezionale urbano (Norvegia)	0.31	0.38	0.16	0.12	0.14
Unidirezionale extraurbano (Norvegia)	0.27	0.06	0.06	0.03	0.04
Singolo fornice (Norvegia)	0.24	0.26	0.19	0.07	0.1
Unidirezionale (Svizzera, Norvegia)	0.175	0.15	0.12	0.03	0.131

Si può subito notare come la prima porzione della galleria presenti un tasso di incidentalità notevolmente più elevato rispetto al resto della lunghezza; per mitigarlo, una possibilità è collocare l'imbocco in curva, per consentire un più graduale adattamento alle condizioni di buio interne, seguita dall'evitare variazioni di larghezza e numero delle corsie, per mettere l'autista maggiormente a suo agio.

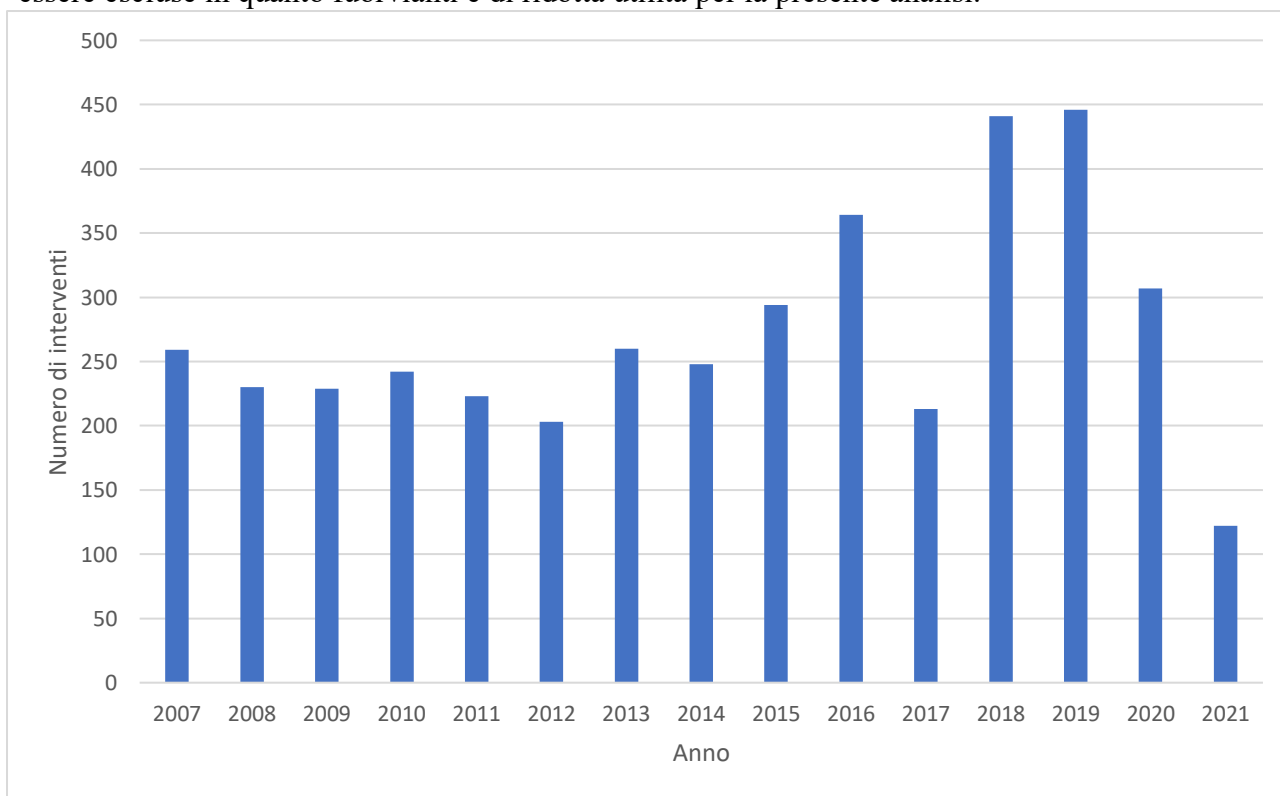
La naturale conseguenza della maggiore incidentalità agli imbocchi è che in una galleria "corta", di lunghezza inferiore ai 500 m, il tasso di incidentalità per km risulti molto più alto; ciò è confermato dal rapporto INAIL [22], che, distinguendo tra incidente stradale e incidente lavoro-correlato, evidenzia come nelle gallerie più corte vi si un maggiore numero di incidenti per entrambe le categorie.

Infine, grazie alla collaborazione con il Comando dei Vigili del Fuoco di Padova, si è potuto esaminare il database degli interventi effettuati dai Vigili del Fuoco nella sua versione v1, contenente tutti gli interventi dal 2007 al 2021, con un numero totale di entrate, corrispondente alle chiamate di intervento pervenute ai vari Comandi provinciali o regionali, superiore ai 15 milioni; tra tutti questi si sono filtrati solo quelli avvenuti in galleria stradale, riducendo il numero di eventi a 4081; la versione v1 è stata preferita alla v2, che contiene gli incendi dal 2007 alla data di visualizzazione, in quanto le poche informazioni in più non compensano la ridotta possibilità di elaborazione.

I record contengono le seguenti informazioni: un numero, data, sede, area (Nord, centro, sud, isole), regione, provincia, comune, indirizzo e geolocalizzazione, ora della chiamata, uscita, arrivo, partenza e rientro, luogo, tipologia dell'intervento, sostanza coinvolta e causa.

Categorie di secondaria importanza per quest'analisi sono quelle legate alla data e alla localizzazione, mentre la durata, il luogo, la tipologia, la sostanza e la causa sono sicuramente le più interessanti.

Alcune tipologie, come gli interventi legati ad allagamenti e dissesti statici delle strutture, possono essere escluse in quanto fuorvianti e di ridotta utilità per la presente analisi.

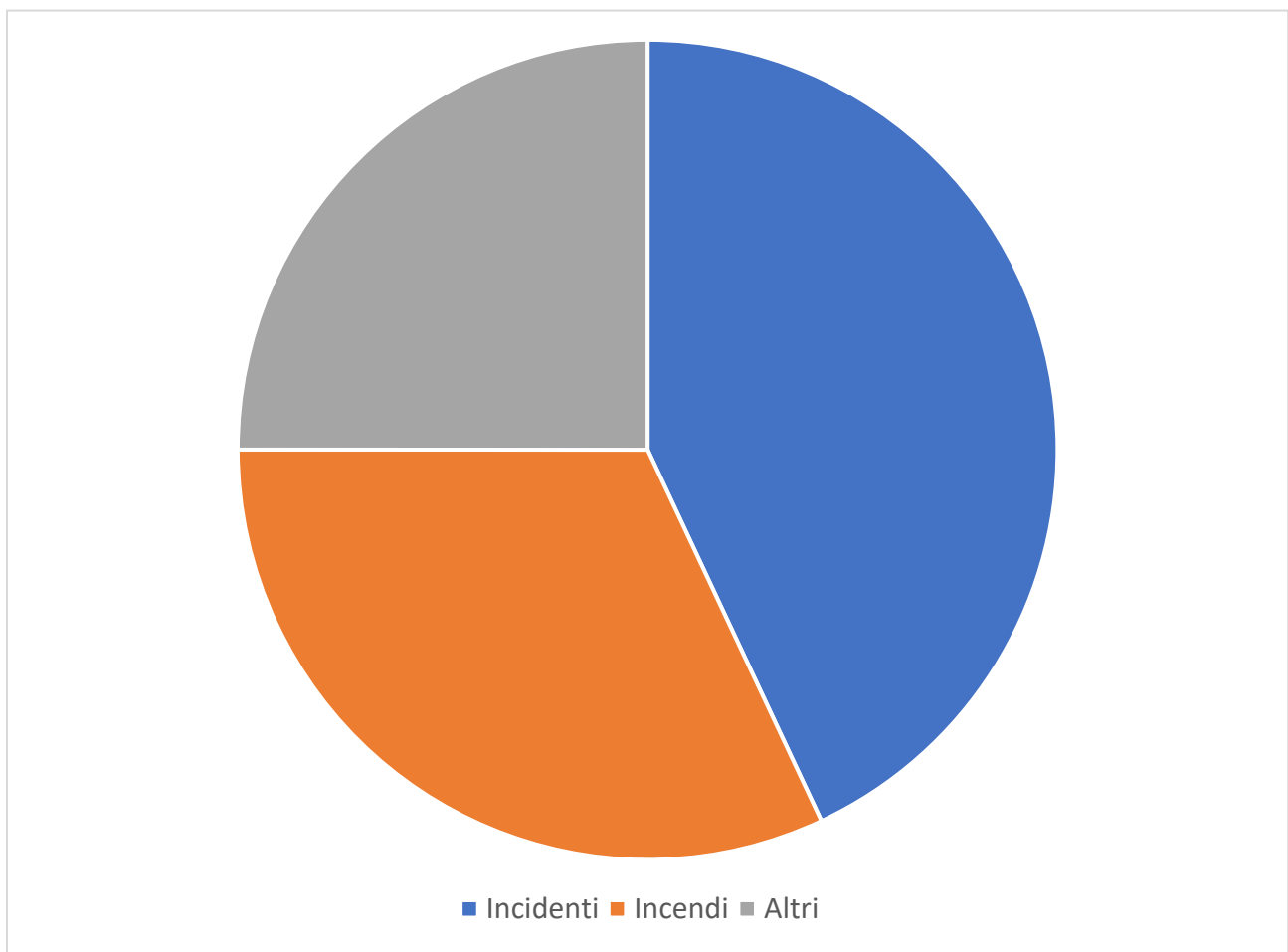


**Figura 2.1:** Numero di interventi dei Vigili del Fuoco in galleria per anno [25].

Nella Figura 2.1 è riportato il numero di interventi effettuati per ogni anno nel periodo in considerazione; i dati del 2020 e del 2021 deviano dalla normale distribuzione, in quanto le restrizioni dovute alla pandemia Covid-19 ha influito in maniera negativa sul traffico veicolare in generale.

Nonostante gli interventi in galleria siano relativamente rari, a causa della limitata estensione spaziale delle gallerie, il loro numero è rimasto quasi costante nel corso degli anni in esame.

Il database consente anche di distinguere gli interventi per soccorso in seguito ad incidente da quelli dovuti ad incendio, come riportato in Figura 2.2



**Figura 2.2:** *Tipologia di interventi in galleria*

Questa suggerisce un'equiprobabilità tra incendi e incidenti, in contrasto con la letteratura già esaminata; l'apparente anomalia, però, è rapidamente giustificata riflettendo sulla natura del database: i Vigili del Fuoco sono chiamati ad intervenire soltanto in caso di un incidente di gravità considerevole, ad esempio quando vi sono delle persone intrappolate all'interno dei veicoli incidentati. Questo comporta un *underreporting* del numero di incidenti rispetto al numero effettivamente avvenuto.

Un'ultima osservazione da fare circa il database e i suoi limiti è che anche un sottopasso urbano viene spesso considerato come galleria stradale, pur avendo caratteristiche fisiche radicalmente differenti rispetto alle gallerie propriamente dette, basti pensare alla lunghezza estremamente ridotta.

Per la collocazione delle automobili ci si è però distaccati dal punto di massima probabilità (posto ai limiti della galleria) e ci si è posti nella peggiore condizione possibile dal punto di vista fluidodinamico, concentrandosi più sul punto di massimo danno possibile, ovvero l'incendio con origine nel punto centrale della galleria.

Qualitativamente, scenari in prossimità dei portali comporteranno un rapido miscelamento dei fumi con l'aria esterna e un deflusso più immediato degli stessi, rendendo sicuramente più semplice l'evacuazione e l'estinzione dell'incendio.

## 2.2: Difficoltà nel soccorso

L'ultimo aspetto che si tratta in questo capitolo riguarda la gestione operativa dell'emergenza da parte dei soccorritori; un utile riferimento è costituito dal regolamento (UE) N. 1303/2014 della Commissione [6], che, pur riguardando le gallerie ferroviarie, con i dovuti accorgimenti può fornire degli spunti per la praticabilità delle operazioni di soccorso anche in quelle stradali; per riassumere i punti notevoli del provvedimento, si fa uso della Tabella 2.3.

**Tabella 2.3:** *Praticabilità dell'intervento in galleria ferroviaria sotto diverse condizioni, elaborato dal [Regolamento (UE) N. 1303/2014]*

	Obiettivi	Condizione 1		Condizione 2		Condizione 3		Condizione 4	
		Raggiungibilità accessi primari	Sì	Raggiungibilità accessi primari	Sì	Raggiungibilità accessi primari	Sì	Raggiungibilità accessi primari	Sì
		Sezionamento e messa a terra effettuato	No	Sezionamento e messa a terra effettuato	Sì	Sezionamento e messa a terra effettuato	Sì	Sezionamento e messa a terra effettuato	Sì
		Disponibilità bimodale/ carrello attrezzato	No	Disponibilità bimodale/ carrello attrezzato	No	Disponibilità bimodale/ carrello attrezzato	Sì	Disponibilità bimodale/ carrello attrezzato	Sì
		Disponibilità convoglio evacuazione	No	Disponibilità convoglio evacuazione	No	Disponibilità convoglio evacuazione	No	Disponibilità convoglio evacuazione	Sì
Scenario A - Incendio, esplosione, ...	Contrasto evento	Non immediatamente praticabile		Non immediatamente praticabile		Parzialmente praticabile		Parzialmente praticabile	
	Salvataggio persone coinvolte	Non immediatamente praticabile		Non immediatamente praticabile		Non immediatamente praticabile		Parzialmente praticabile	
Scenario B - Collisione, deragliamento	Contrasto evento	Non immediatamente praticabile		Parzialmente praticabile		Immediatamente praticabile		Immediatamente praticabile	
	Salvataggio persone coinvolte	Non immediatamente praticabile		Non immediatamente praticabile		Parzialmente praticabile		Immediatamente praticabile	
Scenario C - Sosta prolungata	Contrasto evento	Non Pertinente		Non Pertinente		Non Pertinente		Non Pertinente	
	Salvataggio persone coinvolte	Non immediatamente praticabile		Parzialmente praticabile		Parzialmente praticabile		Immediatamente praticabile	

L'impiego di linee guida delle gallerie ferroviarie è dovuto all'assenza di disponibilità di versioni per gallerie stradali, causata dalle diverse tipologie di proprietà dell'infrastruttura; infatti, mentre le gallerie ferroviarie sono prevalentemente di costruzione statale o di controllate dallo stato, quelle ferroviarie sono per la maggior parte di gestione privata, comportando una minore facilità di reperimento di documenti omologhi.

Come si può vedere, in alcune condizioni di carenza di mezzi e condizioni di sicurezza, l'intervento comporterebbe troppi rischi anche per i soccorritori, limitando fortemente l'efficacia nelle operazioni.

# Capitolo 3

## Definizione del focolare tipo di incendio per veicoli con diversa alimentazione.

### 3.1: La distribuzione dei veicoli in Italia

Con il fine di identificare degli scenari di incendio possibili e credibili, è utile andare ad analizzare quali categorie di veicoli circolino sulla rete stradale italiana e in quale proporzione; per fare ciò ci si può rifare al database ACI denominato Open Parco Veicoli [7], che contiene i dati relativi al parco veicolare al 31 dicembre di ogni anno dal 2015 al 2021, basandosi sul Pubblico Registro Automobilistico.

Vi sono dei limiti a questo approccio, riassumibili in due ragioni principali: la prima è che la circolazione nelle gallerie non necessariamente rispecchia la distribuzione media nazionale dei veicoli immatricolati, di cui un esempio è riportato nei paragrafi seguenti; la seconda è la circolazione di veicoli non iscritti al PRA ma registrati in altri stati, fenomeno che potrebbe rivelarsi problematico specialmente nelle gallerie poste al confine settentrionale o in sua prossimità.

Ciononostante, questi dati, pur non essendo completamente rappresentativi dell'effettiva circolazione nelle gallerie ma perlomeno sicuri e affidabili, possono essere una preziosa base per poter dare una maggiore concretezza agli scenari che si andranno a selezionare, anche se il suo carattere è sicuramente preliminare.

#### *3.1.1: Categorie di Open*

Il primo passo di questa analisi è costituito dal definire le categorie di veicoli; Open Parco veicoli ne identifica 14, basandosi, almeno parzialmente, sul Titolo III del Codice della Strada.

Esse sono riassunte nella Tabella 3.1.



**Tabella 3.1:** *Categorie di veicolo previste da OPEN, tratto da [OPEN Parco Veicoli, 2022]*

AUTOVETTURE	veicoli destinati al trasporto di persone, aventi al massimo nove posti, compreso quello del conducente.
AUTOBUS	veicoli destinati al trasporto di persone equipaggiati con più di nove posti compreso quello del conducente.
AUTOCARRI MERCI	veicoli destinati al trasporto di cose e delle persone addette all'uso o al trasporto delle cose stesse.
AUTOVEICOLI PER TRASPORTI SPECIFICI	veicoli destinati al trasporto di determinate cose o di persone in particolari condizioni, caratterizzati dall'essere muniti permanentemente di speciali attrezzature relative a tale scopo.
AUTOVEICOLI PER USO SPECIALE	veicoli caratterizzati dall'essere muniti permanentemente di speciali attrezzature e destinati prevalentemente al trasporto proprio. Su tali veicoli è consentito il trasporto del personale e dei materiali connessi col ciclo operativo delle attrezzature e di persone e cose connesse alla destinazione d'uso delle attrezzature stesse.
MOTOCICLI	veicoli a due ruote, adibiti a trasporto persone con cilindrata superiore a 50 cc.
MOTOCARRI	veicoli a tre ruote destinati al trasporto di cose.
MOTOVEICOLI PER TRASPORTI SPECIFICI	veicoli a tre ruote destinati al trasporto di determinate cose o di persone in particolari condizioni e caratterizzati dall'essere muniti permanentemente di speciali attrezzature relative a tale scopo.
MOTOVEICOLI PER USO SPECIALE	veicoli a tre ruote caratterizzati da particolari attrezzature installate permanentemente sugli stessi; su tali veicoli è consentito il trasporto del personale e dei materiali connessi con il ciclo operativo delle attrezzature.
MOTOCARROZZETTE	veicoli a tre ruote destinati al trasporto di persone, capaci di contenere al massimo quattro posti compreso quello del conducente ed equipaggiati di idonea carrozzeria.
QUADRICICLI	veicoli a quattro ruote destinati al trasporto di cose con al massimo una persona oltre al conducente nella cabina di guida, ai trasporti specifici e per uso speciale, la cui massa a vuoto non superi le 0,55t, con esclusione della massa delle batterie se a trazione elettrica, capaci di sviluppare su strada orizzontale una velocità massima fino a 80 km/h. Detti veicoli, qualora superino anche uno solo dei limiti stabiliti sono considerati autoveicoli.
RIMORCHI	veicoli destinati ad essere trainati dagli autoveicoli e dai filoveicoli (veicoli a motore elettrico non vincolati da rotaie e collegati a una linea aerea di contatto per l'alimentazione) con esclusione degli autosnodati.
SEMIRIMORCHI	veicoli costruiti in modo tale che una parte di essi si sovrapponga all'unità motrice e che una parte notevole della loro massa o del loro carico sia sopportata da detta motrice.
TRATTORI STRADALI	veicoli destinati esclusivamente al traino di rimorchi o semirimorchi.

Nel database stesso, queste 14 categorie, data la scarsa diffusione di alcune, vengono riassunte in 11, ovvero: Autobus (AB), Autocarri trasporto merci (AM), Autoveicoli speciali/specifici (AS), Autovetture (AV), Motocicli (MC), Motocarri e quadricicli trasporto merci (MM), motocicli e quadricicli speciali/specifici (MS), non definito (ND), rimorchi e semirimorchi trasporto merci (RM), rimorchi e semirimorchi speciali/specifici (RS), trattori stradali o motrici (TS).

Nella Tabella 3.2 sono riportate le categorie e il numero di veicoli relativo, aggiornato al 31 dicembre 2021.

**Tabella 3.2:** *Numero di veicoli in Italia al 31/12/21, suddiviso per categoria [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

Categoria	AB	AM	AS	AV	MC	MM	MS	ND	RM	RS	TS	Totale
Numero	100199	4290042	783996	39822723	7152760	243052	87369	22	303621	125609	205086	53114479
[%]	0.1886	8.0770	1.4760	74.9753	13.4667	0.4576	0.1645	0.0	0.5716	0.2365	0.3861	

Da questi dati emerge la preponderanza numerica delle automobili, che saranno quindi sicuramente oggetto di approfondimento nei paragrafi seguenti.

Altre percentuali significative, pur essendo molto meno diffusi degli autoveicoli, sono rappresentate dai motocicli e dagli autocarri per trasporto merci; i primi però trasportano una quantità esigua di carburante e un loro incendio è di dimensioni molto ridotte anche rispetto alle autovetture, pertanto si è scelto di non approfondire il loro ruolo negli incendi in galleria; i secondi possono, oltre al proprio carburante, trasportare merci più o meno infiammabili, potenzialmente con carico d'incendio anche molto elevato; perciò, si approfondiranno anch'essi.

Per analoghe motivazioni si è scelto di includere nell'analisi preliminare anche i trattori stradali, che possono trasportare carichi ancora maggiori.

Per il numero maggiore di persone trasportate, e di conseguenza maggiormente esposte allo scenario, si sono inclusi anche gli autobus.

Per consolidare la validità della scelta si può fare riferimento anche ai dati di circolazione del Tunnel del Monte Bianco, a singolo fornice con una corsia per ciascun senso di marcia, lunga 11.6 km e che collega il versante valdostano con il versante francese che annualmente pubblica il numero di veicoli transitati [26], suddivisi per categorie simili a quelle utilizzate da Open Registro veicoli.

In seguito, sono riportati i dati di traffico relativi agli anni dal 2017 al 2021.

**Tabella 3.3:** *Volume di traffico nel Traforo del Monte Bianco suddiviso per anno [Società Traforo del Monte Bianco, 2022].*

Anno	Auto e moto	% Auto e moto	Autobus	% Autobus	Camion	% Camion	Totale
2017	1352359	67.95	16276	0.81	621484	31.22	1990119
2018	1316754	67.31	17224	0.88	622201	31.80	1956179
2019	1315528	66.97	20566	1.04	628011	31.97	1964105
2020	727751	55.98	6489	0.49	565682	43.51	1299922
2021	853564	57.829	5541	0.37	616891	41.79	1475996

Da questi dati si può vedere come, almeno in questo particolare tunnel, la presenza di camion (siano essi autocarri o trattori stradali) risulti molto più elevata della percentuale di veicoli riportati da Open Registro veicoli, ciò è dovuto, almeno in parte, alla presenza di veicoli iscritti in altre nazioni, per esempio la Francia, ma anche alle caratteristiche intrinseche dell'infrastruttura, che, collegando due territori industrialmente sviluppati, presenta una domanda per il trasporto merci molto elevata. Pertanto, la scelta di includere trattori stradali e autocarri nell'approfondimento è maggiormente giustificata anche da un punto di vista puramente probabilistico, oltre al già citato maggiore carico d'incendio.

### *3.1.3: Alimentazioni*

Per approfondire l'analisi, si è proceduto ad analizzare quali siano le alimentazioni delle categorie di veicoli più interessanti, sempre utilizzando Open Parco Veicoli.

Le alimentazioni disponibili sono: altre, benzina, benzina e gas liquido, benzina e metano, elettricità, gasolio, gasolio e gas, ibrido/benzina, ibrido/gasolio, metano e non definito.

Nelle pagine seguenti si possono trovare le distribuzioni delle alimentazioni rispettivamente delle autovetture, degli autobus, dei trattori stradali e degli autocarri per trasporto merci.

**Tabella 3.4:** *Distribuzione delle alimentazioni delle autovetture [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

<b>Alimentazione</b>	<b>Numero</b>	<b>[%]</b>
Altre	609	0.002
Benzina	17806656	44.71
Benzina e gas liquido	2782057	6.99
Benzina e metano	809157	2.03
Elettricità	118034	0.30
Gasolio	17093277	42.92
Ibrido benzina	927006	2.33
Ibrido gasolio	104488	0.26
Metano	175807	0.44
Non definito	5632	0.01
Totale	39822723	

Le autovetture presentano la maggiore variabilità di alimentazioni, con le maggiori rappresentate da benzina e gasolio, seguite dalle doppie alimentazioni benzina-GPL e benzina-metano, con una quota consistente di veicoli ibridi ed elettrici, in rapida crescita, come si andrà ad approfondire nel paragrafo 4.1.5. Nel caso delle autovetture, il panorama variegato e il loro numero elevato rispetto alle altre categorie sono meritevoli di un approfondimento completo su quasi tutte le alimentazioni.

**Tabella 3.5:** *Distribuzione delle alimentazioni negli autobus [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

<b>Alimentazione</b>	<b>Numero</b>	<b>[%]</b>
Altre	13	0.01
Benzina	414	0.41
Benzina e gas liquido	271	0.27
Benzina e metano	579	0.58
Elettricità	744	0.74
Gasolio	93453	93.27
Ibrido benzina	8	0.001
Ibrido gasolio	266	0.27
Metano	4367	4.36
Non definito	84	0.08
Totale	100199	

L'alimentazione a gasolio rappresenta quindi la stragrande maggioranza per gli autobus, con una quota rilevante ma molto minoritaria di bus a metano e altre alimentazioni; pertanto, si approfondiranno le caratteristiche dei soli autobus alimentati a gasolio.

**Tabella 3.6:** *Distribuzione delle alimentazioni dei trattori stradali [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

<b>Alimentazione</b>	<b>Numero</b>	<b>[%]</b>
Altre	8	0.004
Benzina	154	0.08
Benzina e gas liquido	40	0.02
Benzina e metano	46	0.02
Elettricità	24	0.01
Gasolio	200964	97.99
Gasolio e gas	31	0.02
Ibrido benzina	1	0.0005
Ibrido gasolio	1	0.0005
Metano	3302	1.61
Non definito	515	0.25
Totale	205086	

Come per gli autobus, la maggioranza schiacciante dei trattori stradali è alimentata a gasolio, con le altre alimentazioni che, sommate, superano appena il 2%. Di conseguenza, l'unica alimentazione approfondita sarà quella a gasolio.

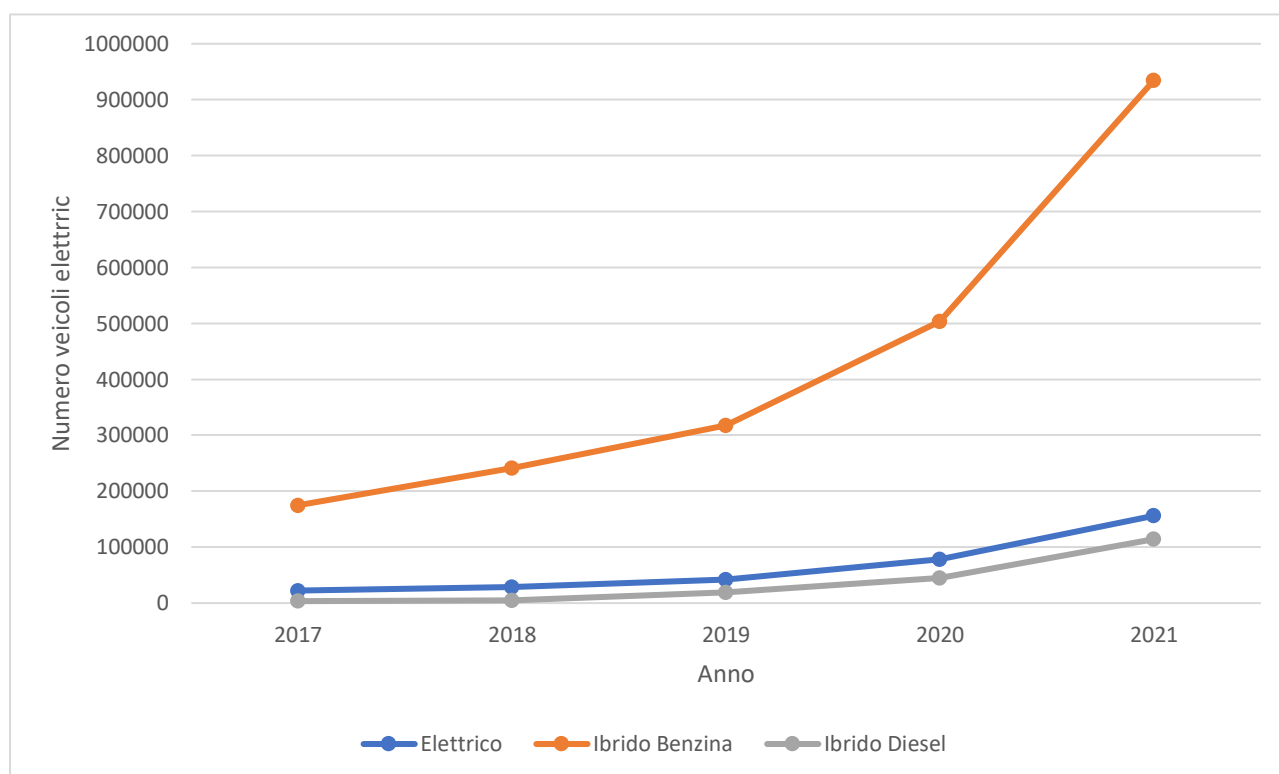
**Tabella 3.7:** *Distribuzione delle alimentazioni autocarri trasporto merci [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

<b>Alimentazione</b>	<b>Numero</b>	<b>[%]</b>
Altre	56	0.001
Benzina	195323	4.55
Benzina e gas liquido	56595	1.31
Benzina e metano	76693	1.79
Elettricità	9209	0.21
Gasolio	3915722	91.27
Ibrido benzina	6999	0.16
Ibrido gasolio	9289	0.22
Metano	19500	0.45
Non definito	656	0.015

Anche in questo caso il gasolio ha un ruolo preponderante, seguito da una piccola percentuale di alimentazioni a benzina e altre. La scelta di approfondire ricade quindi sulle alimentazioni a gasolio

### 3.1.4: Auto elettriche e diffusione.

Di particolare rilievo per il futuro è la crescita della diffusione dei veicoli ibridi ed elettrici, che porta nuove problematiche nella gestione dello spegnimento degli incendi dei veicoli. Per dare una misura del fenomeno nel grafico seguente (Figura 3.2) si riportano i dati di Open Parco veicoli delle alimentazioni elettriche, ibrido benzina e ibrido diesel negli anni dal 2017 al 2021.



**Figura 3.2:** *Crescita dei veicoli elettrificati [OPEN Parco Veicoli, 2022].*

Questa crescita, se dovesse seguire questi ritmi, renderebbe rapidamente obsoleta un'analisi concentrata solamente sui veicoli a combustione interna e pertanto si è deciso di preparare gli scenari tenendo conto anche di queste alimentazioni che si stanno sempre più diffondendo.

## **3.2: Panoramica dei combustibili utilizzati per alimentare i veicoli**

Nei paragrafi precedenti si è visto quali categorie di veicoli abbiano una presenza rilevante sulla rete stradale italiana e, correlando la diffusione di una determinata categoria di veicoli con la probabilità di incidenti, è stata identificata una misura preliminare di probabilità che le diverse tipologie di veicolo siano coinvolte in un incidente in galleria.

La probabilità è però solo una delle due componenti che vanno a determinare il rischio di un dato evento, in quanto è necessario specificare anche l'impatto associato. Per dare una stima preliminare delle conseguenze dell'incendio, che saranno analizzate in maniera più approfondita servendosi delle simulazioni, si può far riferimento alla quantità di combustibile presente in una specifica tipologia di veicolo e alle sue proprietà.

Queste componenti hanno una certa variabilità anche all'interno delle singole categorie, per cui sono stati considerati i valori medi associati ai veicoli in circolazione. Inoltre, l'analisi è stata ristretta alle combinazioni di alimentazioni e categorie più rilevanti.

### *3.2.1: Alimentazioni dei veicoli e quantitativi di combustibile*

Il punto di partenza per esaminare il comportamento al fuoco dei veicoli consiste nella determinazione della quantità e delle caratteristiche chimiche dei combustibili. In particolare, si può fare riferimento alla dimensione dei serbatoi, almeno per quanto riguarda le vetture alimentate a combustibile tradizionale. Invece, per i veicoli elettrici è necessario adottare un altro approccio, approfondito nelle sezioni che seguono.

Nel caso di combustibile tradizionale, si può fare riferimento alle schede di sicurezza ([9-12]) che riportano anche una serie di proprietà fisiche e chimiche (Tabella 3.8).

**Tabella 3.8:** *Principali caratteristiche dei combustibili tradizionali [Q8 Quaser srl e Repsol Italia spa, 2021].*

	<b>Benzina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Metano</b>	<b>GPL</b>
<b>Punto di fusione</b>	-60° C	≤-5° C	-182.5° C	-188/-138° C
<b>Ebollizione</b>	25-260° C	150-400° C	-185/-159° C	-162/-0.5° C
<b>Punto di infiammabilità</b>	-40° C	>56° C @101 kPa	-188° C	-104/-60° C
<b>Limiti di esplosività o infiammabilità</b>	LEL 1.4%; UEL 7.6%	LEL 1%; UEL 6%	LEL 4.4%; UEL 15%	LEL 1.8%; UEL 15%
<b>Tensione di vapore</b>	4-140 kPa @ 37.8° C	0.4 kPa @ 40° C	-	1550 kPa @ 40° C
<b>Densità a 20° C e 1 atm</b>	650 kg/m <sup>3</sup>	822 kg/m <sup>3</sup>	0.71 kg/m <sup>3</sup>	1.9 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densità nelle condizioni di utilizzo</b>	650 kg/m <sup>3</sup>	822 kg/m <sup>3</sup>	150 kg/m <sup>3</sup> a 200 atm	500 kg/m <sup>3</sup> a 15 atm
<b>Temperatura di autoaccensione</b>	>280° C	>225° C	635-670° C	287-537° C

I quantitativi sono stati invece determinati da una stima del volume medio di un serbatoio riscontrato nella specifica categoria di veicoli. Per le autovetture ad alimentazione tradizionale, tale volume varia tra 30 e 70 l. Nel caso di veicoli a doppia alimentazione, i serbatoi tipici di metano e GPL sono di entità rispettivamente pari a 32 l e 15 kg (Tabella 3.9).



**Tabella 3.9:** *Quantitativi di combustibile in diverse categorie di veicoli.*

	<b>Autovetture</b>	<b>Autovetture</b>	<b>Autovetture</b>	<b>Trattori stradali</b>	<b>Autobus</b>
	Benzina, Diesel	Benzina e metano	Benzina e GPL	Diesel	Diesel
<b>Alimentazione primaria</b>	30-70 l	30-70 l	30-70 l	300-1000 l	300-500 l
<b>Valore medio per il calcolo</b>	45 l	45 l	45 l	600 l	400 l
<b>Alimentazione secondaria</b>		32 l	15 kg		

Di conseguenza, per i calcoli e le stime seguenti, sono stati considerate le seguenti dimensioni per i vari tipi di serbatoi:

- 45 l per l'alimentazione primaria,
- 32 l per l'alimentazione a GPL e benzina,
- 15 kg per l'alimentazione a metano delle automobili,
- 600 l per i trattori stradali,
- 400 l per gli autobus.

### *3.2.2: Poteri calorifici*

In questo paragrafo si vuole fornire una stima del calore legato alle categorie e alle alimentazioni sopra citati (Tabella 4.9). Tali valori sono stati calcolati facendo riferimento all'Equazione (4.1), dove  $Q$  è il calore liberato dalla combustione, misurato in  $J$ ,  $m_c$  è la massa del combustibile, misurata in kg, e  $H_c$  è il potere calorifico inferiore, misurato in  $J/kg$ .

$$Q = m_c * H_c \quad (4.1)$$

**Tabella 3.10:** *Calore liberato da diversi combustibili.*

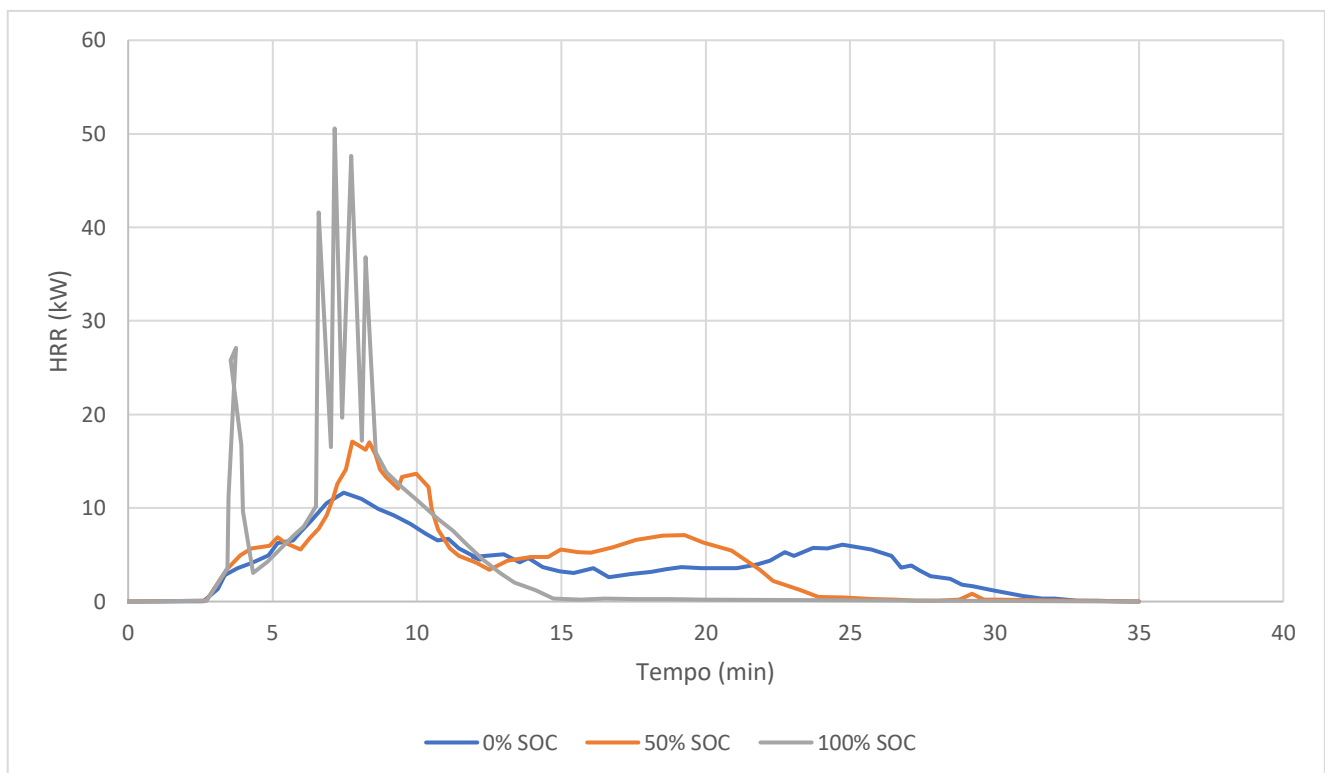
	<b>Benzina</b>	<b>Benzina e gas liquido</b>	<b>Benzina e metano</b>	<b>Gasolio</b>
<b>Autovetture</b>				
Potere calorifico primario (MJ/kg)	43.6	43.6	43.6	44.4
Potere calorifico secondario (MJ/kg)	/	46.1	52	/
Calore totale del combustibile (MJ)	1334.16	2101.264	2114.16	1668.33
<b>Trattori stradali</b>				
Potere calorifico primario (MJ/kg)	/	/	/	44.4
Potere calorifico secondario (MJ/kg)	/	/	/	/
Calore totale del combustibile (MJ)	/	/	/	22244.4
<b>Autobus</b>				
Potere calorifico primario (MJ/kg)	/	/	/	44.4
Potere calorifico secondario (MJ/kg)	/	/	/	/
Calore totale del combustibile (MJ)	/	/	/	14829.6

Dove il calore totale liberato dal combustibile in caso di combustione completa può rappresentare un indicatore da assegnare alla magnitudo dell'incendio associato.

### *3.2.3: Auto ad alimentazione elettrica*

Le auto elettriche sono state considerate in maniera diversa rispetto a quelle con alimentazione tradizionale. Infatti, la modalità di partecipazione al fuoco è diversa come testimoniato da diversi studi [13-14].

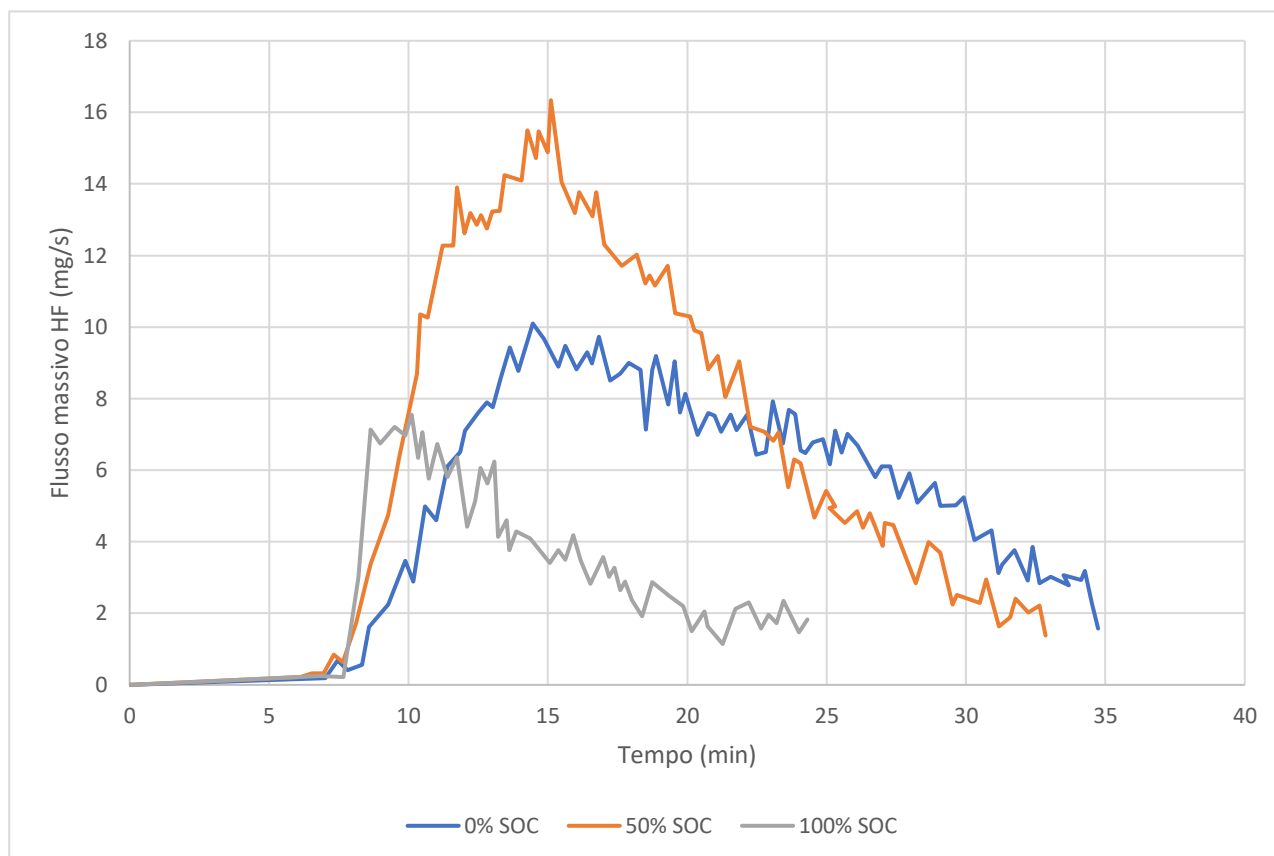
Nel primo studio [13] è stato testato il comportamento al fuoco di piccole batterie (capacità ~35 Ah) simili a quelle tipicamente impiegate nelle automobili, del tipo agli ioni di litio, con diverso SOC (*State Of Charge*). Tale parametro influenza le concentrazioni delle specie chimiche presenti e dunque rilasciate in caso di incendio. Lo studio riporta la curva HRR (*Heat Release Rate*, espresso in kW) e la portata di acido fluoridrico (HF) rilasciata, in mg/s, in funzione del tempo (Figure 3.8-3.9). Di particolare interesse è la produzione di HF in quanto è un prodotto estremamente tossico in caso di esposizione ed inalazione. In Tabella 3.11 sono riportati alcuni valori soglia per i luoghi di lavoro di una soluzione composta al 48% da HF in acqua, desunti da una scheda di sicurezza [15]. Si nota come già a ridotte quantità l'effetto possa essere rilevante.



**Figura 3.3:** Curva HRR di una batteria per automobile in funzione del livello di carica (SOC) [Larsson et al., 2014].

Dalla Figura 3.3 si può notare come la curva HRR delle batterie dipenda in modo marcato dal relativo stato di carica (SOC), sia per il valore di picco che per l'andamento. In particolare, per gli stati di carica più bassi, si notano delle riprese consistenti dell'intensità dell'incendio dopo il picco iniziale, peraltro dopo una fase di decrescita. Tuttavia, batterie con elevato stato di carica sono responsabili di intensità dell'incendio maggiore, quantomeno nella prima fase.

Per lo scenario che coinvolge batterie con elevato stato di carica, infatti, la curva HRR ha un andamento più irregolare e con picchi elevati, esponendo a maggiore pericolo gli occupanti dell'automobile.



**Figura 3.4:** Flusso massivo di HF liberato durante un incendio di batteria (massa 1.2 kg) [Larsson et al., 2014].

Per quanto riguarda la portata massiva di HF, si nota come la massima quantità emessa provenga dallo scenario a carica media, seguito da quello a SOC pari a 0 % e da quello a carica completa (100 %). Quest'ultimo è caratterizzato dall'emissione più bassa di HF e per una durata inferiore.

**Tabella 3.11:** Limiti di esposizione acuta all'acido fluoridrico [Carl Roth GmbH, 2020].

Limite per 8 ore IOELV	Limite a breve termine (15 minuti), STEL
1.5 mg/m <sup>3</sup>	2.5 mg/m <sup>3</sup>
1.8 ppm	3 ppm

La scheda di sicurezza, inoltre, caratterizza meglio la tipologia di pericoli determinati dall'esposizione ad acido fluoridrico. Tra queste, è evidenziata la tossicità acuta per via orale, cutanea e in caso di inalazione, la molteplicità delle vie di esposizione è motivata dalla nocività sia nella forma

gassosa che in quella acquosa. In un incendio entrambe possono essere presenti, la prima per emissione diretta dalla combustione e la seconda per mescolamento con il vapore acqueo prodotto dalla combustione a cui segue la condensazione.

Il secondo studio [14], invece, si è proposto l'obiettivo di analizzare i rischi emergenti legati all'aumento consistente di vetture alimentate a batteria. In particolare, questi coinvolgono sia il conducente che i passeggeri e anche i soccorritori chiamati ad intervenire sull'incendio a seguito di un incidente. Il focolare di incendio, infatti, potrebbe emettere sostanze chimiche più pericolose che nel caso di incendio di un autoveicolo a combustione tradizionale. In seconda battuta, lo studio ha testato altre batterie agli ioni di litio per verificare il tempo di spegnimento e il quantitativo di acqua necessario per raggiungerlo (Tabella 3.12).

**Tabella 3.12:** *Scenari di spegnimento di incendio con origine dalle batterie impiegate nelle automobili elettriche [Lazarenko et al., 2018].*

<b>Tipo di batteria</b>	<b>Tempo totale per lo spegnimento (min)</b>	<b>Tempo con flusso d'acqua (min)</b>	<b>Quantità totale (l)</b>
<b>Ibrida</b>	5.88	2.20	1040
<b>Ibrida</b>	36.60	3.53	1673
<b>Ibrida e componenti interni</b>	49.67	9.77	4012
<b>Elettrica</b>	26.52	14.03	6639
<b>Elettrica</b>	37.60	21.37	9989
<b>Elettrica e componenti interni</b> <sup>1</sup>	13.88	9.32	4410

È interessante notare come il tempo richiesto per lo spegnimento di una batteria sia lungo e richieda una grande quantità di acqua. Questo primo aspetto è particolarmente critico, in quanto espone i soccorritori ad una quantità di sostanze tossiche prodotte dalla combustione che può essere molto più elevata rispetto ad un incendio di un veicolo tradizionale. Un altro aspetto degno di nota è il ruolo che l'esperienza gioca nel controllo e spegnimento di questa tipologia di incendi, con una drastica riduzione sia dei tempi che dei quantitativi di acqua impiegati, con conseguente riduzione dell'esposizione alle sostanze emesse dalle batterie.

---

<sup>1</sup> Uno dei vigili del fuoco coinvolti aveva già esperienza con il pacco batteria specifico, in quanto aveva partecipato allo spegnimento di un incendio il giorno precedente, riducendo notevolmente il tempo impiegato.

### 3.3: Composizione media dei veicoli

Per dare un carattere più completo all'analisi è necessario esaminare la composizione chimica delle diverse categorie di veicolo. Questo perché, in sede di incendio, non è solo il combustibile a bruciare ma anche altre componenti, inclusi gli pneumatici e la componentistica plastica.

#### 3.3.1: Automobili

Diversi studi hanno analizzato o stimato la composizione media di un autoveicolo [16] e alcuni dati rappresentativi sono riportati in Tabella 3.13.

**Tabella 3.13:** *Composizione media delle automobili in termini di materiale costruttivo [Al-Quradaghi et al., 2020].*

	Massa totale (kg)	Ferro, acciaio (kg)	Alluminio (kg)	Vetro (kg)	Plastica (kg)	Pneumatici (kg)	Batteria (kg)	Fluidi (kg)	Altro (kg)
Auto a benzina	1240	742	68	40	114	31	14	50	86
Auto a gasolio	1463	959	72	40	114	31	14	50	86
Valore medio	1352	851	70	40	114	31	14	50	86
Percentuale sul totale	100%	63%	5%	3%	8%	2%	1%	4%	6%

Alla luce della Tabella 3.13 si evince come i materiali combustibili presenti derivino da materiale plastico e pneumatici (per tutte le auto) e anche da batterie (solo per le auto elettriche).

#### 3.3.2: Trattori stradali

Discorso diverso vale per gli autocarri e i trattori stradali, in quanto la loro composizione chimica pur essendo comparabile a quella delle automobili varia con il carico trasportato. Ad esempio, diversa è la situazione tra un trattore stradale che trasporta una sostanza pericolosa e infiammabile (es. GPL) e un altro che trasporta un carico di natura metallica (es. tubazioni in metallo). Il primo, infatti, ha un carico d'incendio di gran lunga superiore.

Di conseguenza, si è scelto di non sviluppare ulteriormente il tema dell'incendio di trattori stradali, in quanto la variabilità collegata al carico trasportato è troppo consistente per indirizzare in maniera puntuale l'attività svolta.

### *3.3.3: Vetture ad alimentazione elettrica*

La differenza principale della composizione delle vetture elettriche va ricercata nell'assenza di combustibile che è invece sostituito dal pacco batteria. Di conseguenza, si assume che la composizione chimica di un'automobile elettrica sia la stessa di una tradizionale, alla quale viene aggiunto il contributo legato al pacco batterie. Esso ha generalmente una massa di circa 250-300 kg per una batteria di 50 Ah. Al contrario, nelle automobili tradizionali la batteria di avviamento ha una massa variabile tra 10 e 30 kg.

Inoltre, mentre un incendio di automobile tradizionale ha la sua origine intimamente legata con l'accensione del combustibile da essa trasportata, in un'automobile elettrica le cause principali sono meno evidenti e più complesse, tra le cause principali degli incendi di questa tipologia di vettura, infatti, vi sono guasti di natura elettrica, come cortocircuiti, surriscaldamenti, sovraccarichi e danni meccanici o una combinazione di più di questi fattori.

### **3.4: Tipologia degli effluenti rilasciati durante un incendio**

Definita la composizione chimica delle automobili, è di interesse per la determinazione dello scenario definire i prodotti rilasciati dalla combustione di un veicolo e la loro resa. Grazie ad alcuni studi, effettuati in condizioni controllate, è possibile disporre di una stima delle concentrazioni delle specie chimiche prodotte. Questo è fondamentale, poi, per valutare l'esposizione delle persone coinvolte dall'incidente e dei soccorritori.

Per determinare i prodotti di combustione di un'automobile si possono seguire due strategie: determinare le emissioni dei singoli componenti (§3.4.2), oppure eseguire un'analisi con riferimento all'intera automobile (§3.4.3). Come si vedrà inseguito, quest'ultima è la strada scelta per lo sviluppo dei modelli di incendio, poiché è ritenuta più rappresentativa delle condizioni reali di combustione delle automobili.

#### *3.4.1: Prodotti della combustione di componenti dell'automobile*

Lo studio che si è preso per riferimento è [17], dove sono state analizzate le emissioni (quantità prodotta per unità di massa di combustibile bruciata) di diversi componenti comuni di automobili sotto condizioni di pirolisi e di fiamma (Tabella 3.14).



**Tabella 3.14:** Emissioni, espresse in resa di un determinato prodotto, generate dai componenti di un'automobile in regime di pirolisi e di fiamma.

Componente	Condizioni di test	CO <sub>2</sub> (g/kg)	CO (g/kg)	HCN (g/kg)	NO (g/kg)	NH <sub>3</sub> (g/kg)	HCl (g/kg)	SO <sub>2</sub> (g/kg)
<b>Pannello della porta</b>	Pirolisi	410	43	2.1	0	0	120	0
	Fiamma	1500	72	2.9	7.4	0	160	0
<b>Componente del sistema di ventilazione</b>	Pirolisi	0	360	0	0	0	0	0
	Fiamma	2100	27	0	0	0	0	0
<b>Tappetino</b>	Pirolisi	0	49	4.9	0	0	0	0
	Fiamma	2400	43	0.9	9.5	0	0	0
<b>Cruscotto</b>	Pirolisi	260	25	3.8	0	0	0	0
	Fiamma	1800	23	1.2	6.4	0	0	0
<b>Materiale di tappezzeria dal sedile anteriore</b>	Pirolisi	250	43	1.7	0	0	51	0
	Fiamma	1800	78	2.4	5.7	0.4	66	9.9
<b>Materiale di tappezzeria dal sedile posteriore</b>	Pirolisi	0	26	3.9	0	0	0	0
	Fiamma	1700	88	5.3	7.5	0.35	8.1	10
<b>Pannello laccato dalla scocca dell'automobile</b>	Pirolisi	0	21	0	0	0	0	0
	Fiamma	610	96	2.7	0	0	0	0
<b>Fili elettrici</b>	Pirolisi	260	32	0	0	0	340	0
	Fiamma	1100	86	0	0	0	390	0
<b>Pneumatici</b>	Pirolisi	0	81	0	0	0	0	21
	Fiamma	1400	30	0	0	2.3	0	11

Dai dati riportati in Tabella 3.14 si evince che la combustione dei componenti delle automobili è legata principalmente a quelli di natura plastica. In particolare, la presenza di composti clorurati, come il PVC, causa l'emissione di acido cloridrico HCl, particolarmente tossico e corrosivo.

### *3.4.2: Prove di combustione di automobili intere*

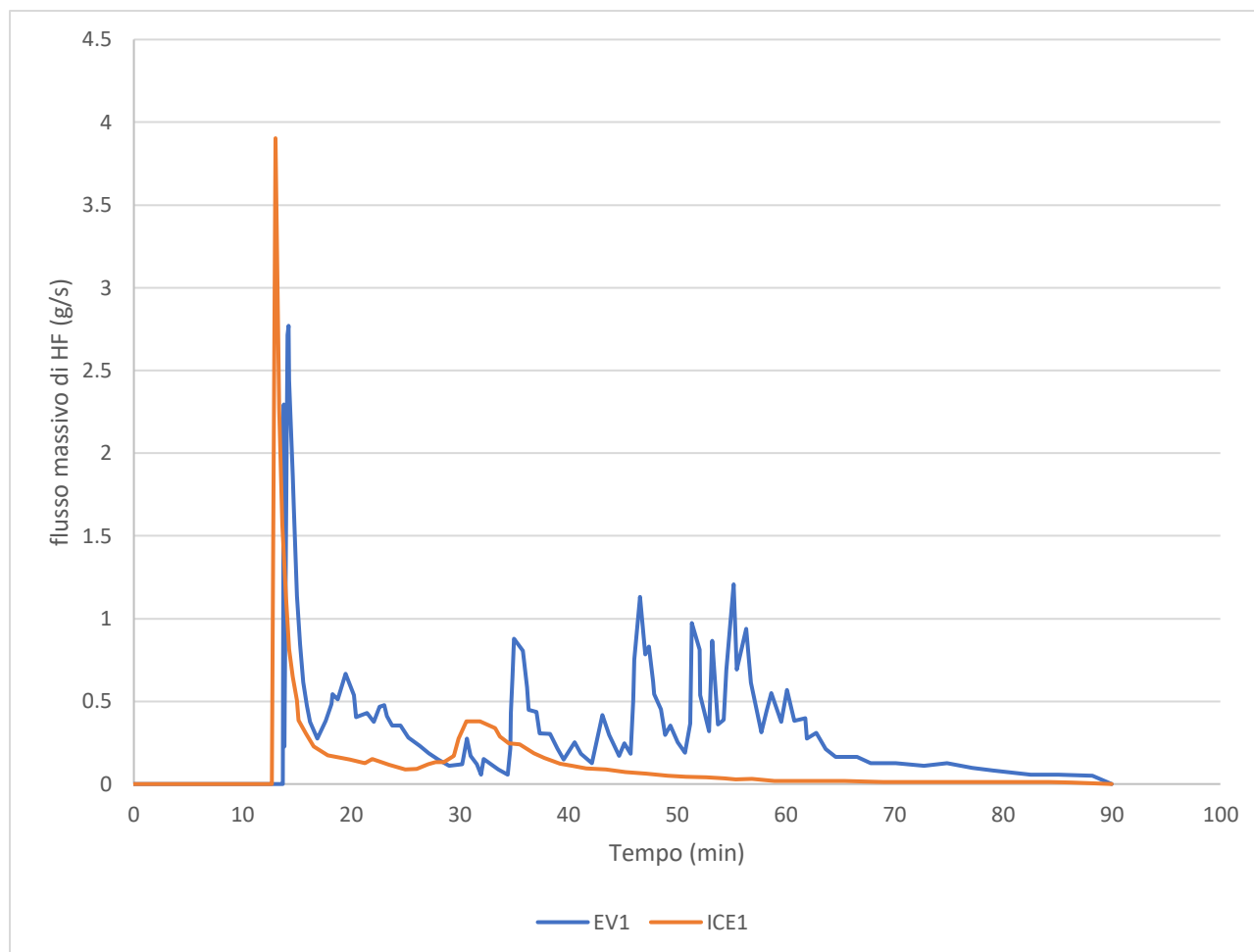
Per il secondo approccio, si è scelto di impiegare lo studio [18]. In esso sono riportati gli esiti degli esperimenti in condizioni controllate di combustione di due coppie di automobili: una a combustione interna e un'altra con alimentazione elettrica. Questo studio fornisce altresì le curve HRR, i rendimenti per ciascun prodotto della combustione e l'emissione di HF nel tempo per entrambe le categorie di veicolo.

In Tabella 3.15 sono riportati i rendimenti e le quantità di sostanze emesse per le singole automobili.

**Tabella 3.15:** Emissioni di specifici prodotti a seguito dell'incendio di autoveicoli.

	<b>Automobile elettrica 1 (EV1)</b>	<b>Automobile tradizionale 1 (ICE1)</b>	<b>Automobile elettrica 2 (EV2)</b>	<b>Automobile tradizionale 2 (ICE2)</b>
<b>Voltaggio nominale (V)</b>	330 V	-	355 V	-
<b>Capacità (Ah)</b>	50 Ah	-	66.6 Ah	-
<b>Energia (kWh)</b>	16.5 kWh	-	23.5 kWh	-
<b>Massa (kg)</b>	1122 kg	1128 kg	1501 kg	1404 kg
<b>Massa persa (kg)</b>	212 kg	192 kg	278.5 kg	275 kg
<b>Massa persa (%)</b>	19 %	17 %	18.6 %	19.6 %
<b>CO<sub>2</sub> (g)</b>	460400	508000	618490	722640
<b>CO<sub>2</sub> (mg/g perso)</b>	2172	2646	2220.8	2627.8
<b>CO (g)</b>	10400	12040	11700	15730
<b>CO (mg/g perso)</b>	49	63	42	57.2
<b>Soot (g)</b>	2430	2380	2860	2730
<b>Soot (mg/g perso)</b>	11.5	12.4	10.3	9.9
<b>NO (g)</b>	500	679	770	740
<b>NO (mg/g perso)</b>	2.4	3.5	2.8	2.7
<b>NO<sub>2</sub> (g)</b>	198	307	349	410
<b>NO<sub>2</sub> (mg/g perso)</b>	0.9	1.6	1.3	1.5
<b>HF (g)</b>	1540	621	1470	813
<b>HF (mg/g perso)</b>	7.3	3.2	5.3	3
<b>HCl (g)</b>	2060	1990	1930	2140
<b>HCl (mg/g perso)</b>	10	10.4	6.9	7.8
<b>HCN (g)</b>	113	167	148	178
<b>HCN (mg/g perso)</b>	0.5	0.9	0.5	0.6

In Figura 3.5 è riportato l'andamento della produzione di acido fluoridrico in funzione del tempo.



**Figura 3.5:** Emissioni di HF di un'automobile con motore a combustione interna (ICE 1) ed elettrico (EV1).

È possibile confrontare la produzione di acido fluoridrico dell'intera automobile con quelli già visti delle singole batterie. Si nota come le emissioni siano molto più persistenti e i *flare up* del veicolo elettrico avvengano su un intervallo di tempo relativamente lungo. Questi ultimi sono caratterizzati da una notevole intensità se comparati con il picco iniziale. Ciò è motivato dalla conformazione costruttiva del pacco batterie che, di norma, è ermetico per garantirne l'integrità verso la perdita di contenimento.

### 3.5: Curve HRR (*Heat Release Rate*)

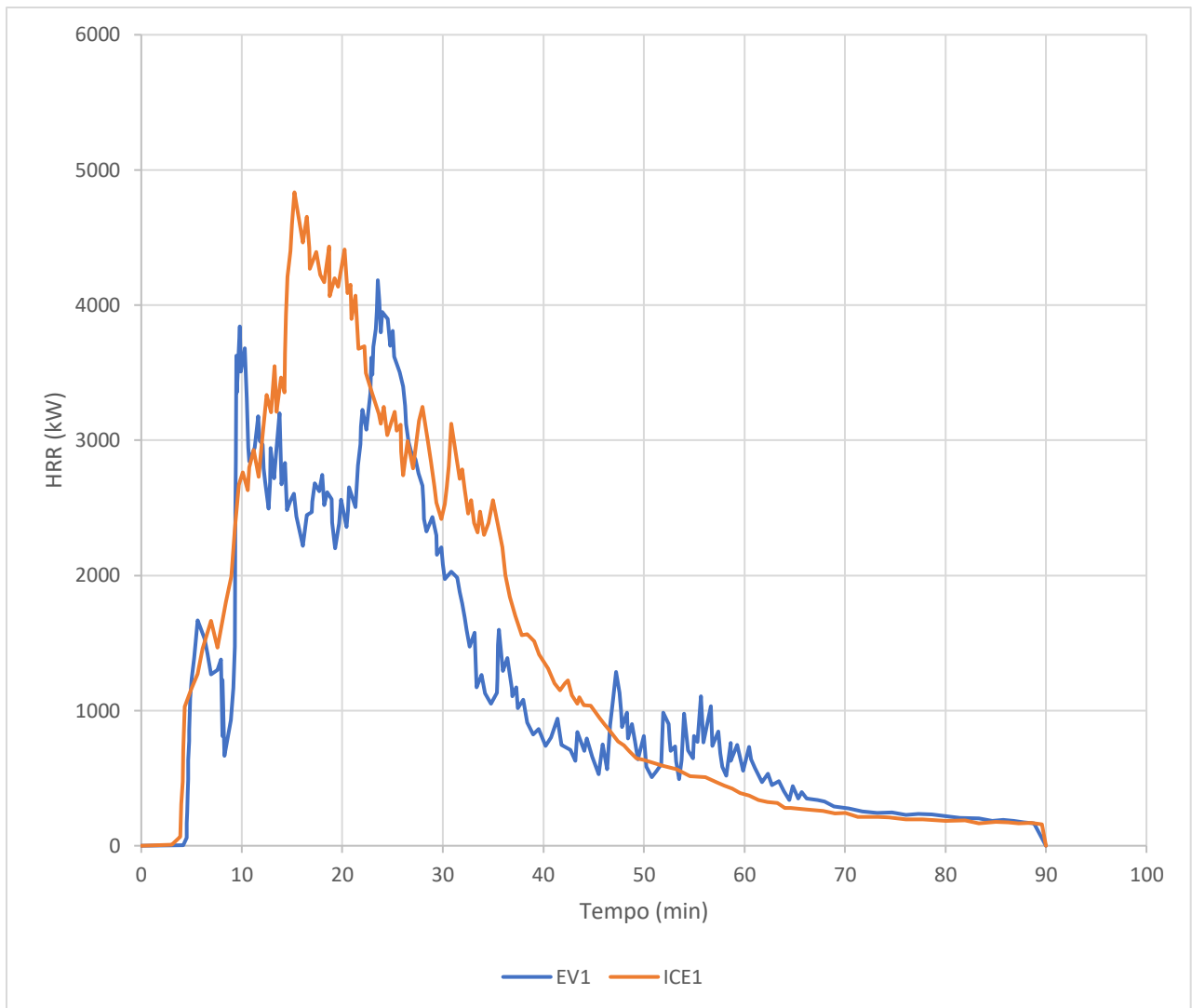
Finora sono state approfondite le tematiche relative alla composizione dei veicoli, e alle emissioni associate. Tuttavia, questa è solo una parte del problema, infatti è necessario anche determinare quali siano gli effetti termici associati allo scenario di incendio. Questo viene generalmente reso con il concetto di curva *Heat Release Rate* (HRR) che definisce l'andamento della potenza termica liberata in funzione del tempo. Allo scopo sono stati utilizzati alcuni studi e, in particolare, si è fatto riferimento a [18].

#### 3.5.1: Automobili

Similmente a quanto visto precedentemente, lo studio fornisce dati circa la curva HRR, la massa persa durante lo scenario di incendio e il calore rilasciato (Tabella 3.16, Figura 3.6).

**Tabella 3.16:** *Caratteristiche termiche dell'incendio di vari tipi di automobili.*

	<b>Automobile elettrica 1 (EV1)</b>	<b>Automobile tradizionale 1 (ICE1)</b>	<b>Automobile elettrica 2 (EV2)</b>	<b>Automobile tradizionale 2 (ICE2)</b>
<b>Massa (kg)</b>	1122 kg	1128 kg	1501 kg	1404 kg
<b>Massa persa (kg)</b>	212 kg	192 kg	278.5 kg	275 kg
<b>Massa persa (%)</b>	19 %	17 %	18.6 %	19.6 %
<b>HRR massimo (kW)</b>	4200 kW	4800 kW	4700 kW	6100 kW
<b>Calore rilasciato (MJ)</b>	6314 MJ	6890 MJ	8540 MJ	10000 MJ
<b>Calore rilasciato/massa persa (MJ/kg)</b>	29.8 MJ/kg	35.9 MJ/kg	30.7 MJ/kg	36.4 MJ/kg



**Figura 3.6:** Curve HRR di un'automobile con motore a combustione interna (ICE 1) ed elettrico (EV1).

Analizzando la Figura 3.6 si nota come le curve siano simili per quanto riguarda il calore totale e la massima potenza. Tuttavia, l'andamento nel tempo della curva è diverso ed è motivato dall'innesco ritardato del pacco batterie rispetto ad un incendio del serbatoio di carburante. Un altro aspetto rilevante e diverso nei due casi è la quantità di calore rilasciata per unità di massa persa. Nel caso delle automobili ad alimentazione tradizionale questo è sensibilmente maggiore a causa del combustibile presente. Infine, nel caso di incendi che coinvolgono automobili con alimentazione elettrica sono presenti i *flare up* che sono caratteristici delle batterie.

### 3.6: Definizione dei focolari di incendio

La metodologia alla base della determinazione del focolare di incendio è consistita in due distinte fasi: 1) definizione della tipologia di reazione (§3.6.1) e 2) definizione del modello geometrico di automobile e dei parametri in *input* alla modellazione (§ 3.6.2).

#### 3.6.1: Definizione della tipologia di reazione

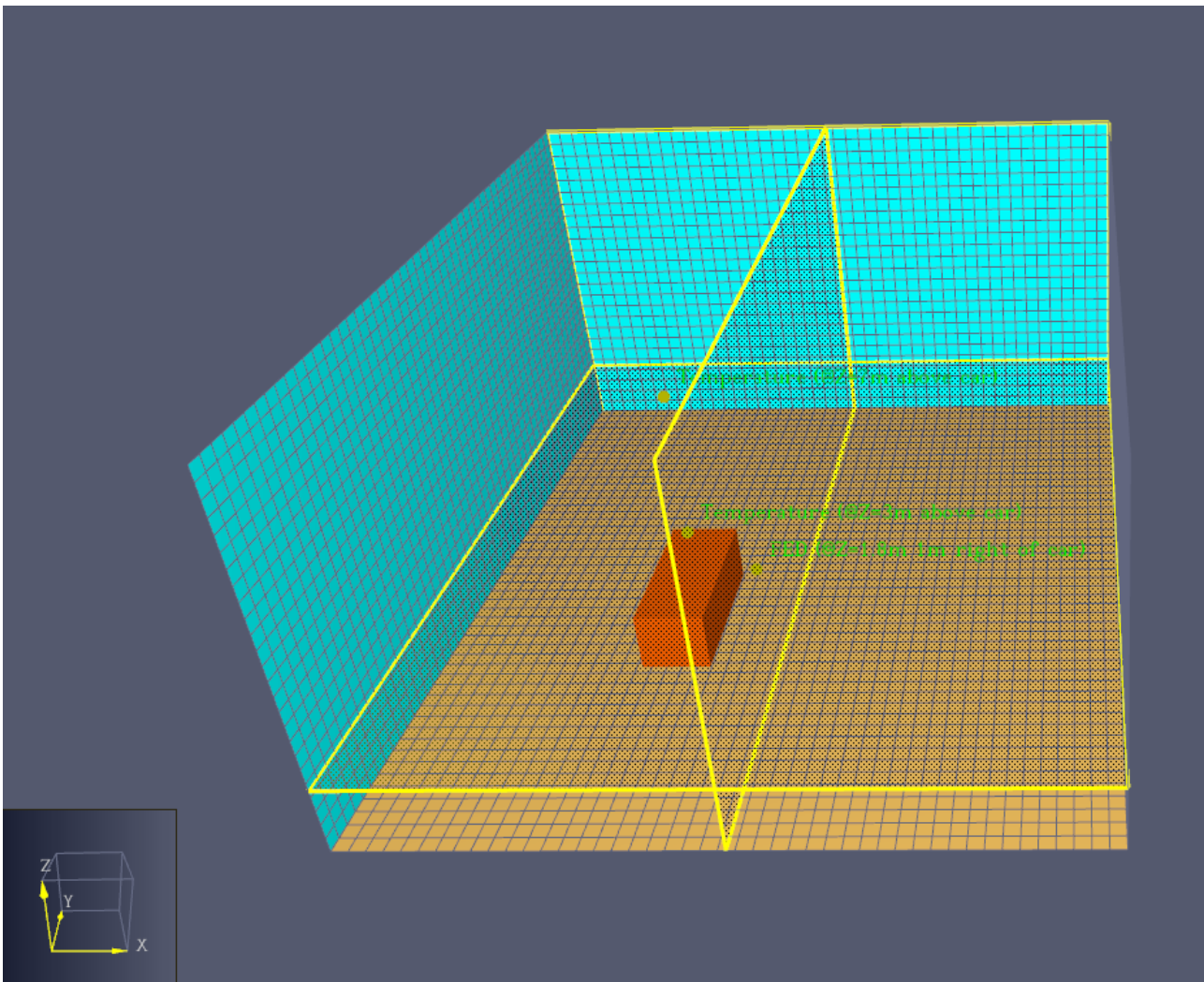
L'approccio che si è scelto per rappresentare le autovetture negli scenari di incendio è l'impiego delle reazioni denominate *Simple Chemistry* in PyroSim. Esse non necessitano una definizione della specifica reazione chimica ma considerano le proprietà della miscela che partecipa al fenomeno di combustione. Tale approccio consente di superare il problema della definizione dei reagenti potendo gestire direttamente la definizione dei prodotti della combustione attraverso il concetto di resa di reazione. Di base il software consente di operare con le rese a specifici prodotti, tra cui CO, fuliggine (*soot*) e HCN. Si è reso dunque necessario, attraverso la definizione del flusso massivo di HF in funzione del tempo, definire un'ulteriore resa a HF.

In sintesi, quindi, gli elementi in *input* per la definizione dello scenario sono riassunti in Tabella 3.17. In particolare, si tratta del calore rilasciato per unità di massa bruciata, la resa in CO, *soot* e HCN, le curve HRR (definite per unità di superficie, ovvero in termini di HRRPUA, *Heat Release Rate per Unit of Area*) e il flusso massivo di HF in funzione del tempo. A riguardo, è stata assunta una superficie media di un'autovettura media pari a 25 m<sup>2</sup>.

#### 3.6.2: Modelli di automobile

Le automobili sono state modellate tramite dei parallelepipedi di lunghezza pari a 4 m, larghezza di 1.80 m e altezza 1.55 m, distanti 20 cm dalla pavimentazione stradale (Figura 3.12). È possibile approssimare in modo più accurato il sistema utilizzando una *mesh* più fine. Tuttavia, ciò è limitato dalla disponibilità di potenza di calcolo. Ad ogni modo, i risultati ottenuti non sono sensibili al grado di *refinement* della *mesh* come da verifiche eseguite.

Le caratteristiche delle superfici sono state implementate secondo le indicazioni riportate in Tabella 3.17, diversificando la combustione di un'autovettura elettrica da quella ad alimentazione tradizionale.



**Figura 3.12:** Rappresentazione del modello di automobile così come implementato in PyroSim.

**Tabella 3.17:** Parametri impiegati per la modellazione dell'incendio di un'automobile [18].

Parametro in input	Automobile elettrica	Automobile tradizionale
Rendimento CO	0.049	0.063
Rendimento Soot	0.0115	0.0124
Rendimento HCN	0.0005	0.0009
Calore specifico di combustione (MJ/kg)	29.8	35.9
Superficie (m <sup>2</sup> )	25.18	25.18
Massimo flusso massivo HF (kg/m <sup>2</sup> s)	0.00011	0.000156
Massimo HRR specifico (kW/m <sup>2</sup> )	167.36	193.38



### 3.6.3: Modello di Pool Fire

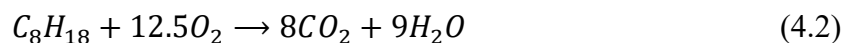
Per consentire un rapido confronto con uno scenario di combustione con parametri noti dalla letteratura, si è deciso di implementare anche uno scenario di *Pool Fire* avente origine da una perdita di contenimento di carburante di una vettura a benzina.

Si assume, come visto in § 3.2.2 e Tabella 3.9, che la capienza del serbatoio  $V_0$  sia pari a 70 l e che il rilascio avvenga in un tempo  $t$  pari a 10 s (per simulare una rottura catastrofica del serbatoio, condizione assunta come peggiore e rappresentativa del caso più conservativo in caso di violenta collisione). Il diametro iniziale  $D_0$  è stato assunto pari a zero e crescente con l'evoluzione dello scenario. La molecola presa a riferimento come rappresentativa è ottano  $C_8H_{18}$ . I dati in *input* sono riportati in Tabella 3.18. Oltre a questi, sono riportati anche dei parametri sperimentali, come  $k$ , il coefficiente di estinzione della fiamma, misurato in  $m^{-1}$  e  $\beta$ , un fattore correttivo dello stesso, che saranno utili per il calcolo del *burning rate*  $W_b$ .

**Tabella 3.18:** Parametri per la creazione del modello di Pool Fire

Parametro	Valore
$V_0$ (m <sup>3</sup> )	0.07
$t$ (s)	10
$D_0$ (m)	0
$g$ (m <sup>2</sup> /s)	9.81
$W_\infty$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0.055
$k \times \beta$ (m <sup>-1</sup> )	2.1

La reazione di combustione assunta è la seguente, con l'azoto partecipante come inerte:



Il diametro della pozza è stato calcolato a partire dall'Equazione seguente ed è risultato pari a circa 4 m:

$$\frac{D}{2} = \sqrt{\sqrt{\frac{8gV_0}{\pi}} + \frac{D_0^2}{4}} \quad (4.3)$$

Da [19] è stata ottenuta l'Equazione (4.4) per stimare la velocità di bruciamento  $W_b = 0.0549$  kg/m<sup>2</sup>s ovvero:

$$W_b = W_\infty(1 - e^{-k\beta D}) \quad (4.4)$$

Per alcune limitazioni nel modellare forme circolari insite in Pyrosim, si è deciso di ricondurre la pozza cilindrica ad una quadrata con lato equivalente di 3.62 m.

I vari dati sono riassunti in Tabella 3.19.

**Tabella 3.19:** Parametri di input del modello di Pool Fire

<b>Parametro in input</b>	<b>Simbolo</b>	<b>Valore</b>
Sostanza	$C_8H_{18}$	Ottano
<i>Burning rate</i>	$W_b$	0.0549 kg/(m <sup>2</sup> s)
Lato della pozza	$L$	3.625 m
Densità del liquido	$\rho$	742.9 kg/m <sup>3</sup>
Densità del vapore	$\rho_{vap}$	4.28 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura di ebollizione	$T_{eb}$	35° C
Temperatura di fusione	$T_f$	-90° C

# Capitolo 4

## Definizione degli scenari di incendio

Combinando gli scenari di carattere geometrico-strutturale con le caratteristiche chimico-fisiche del focolare di incendio si ottiene una matrice del tipo riportato in Tabella 4.1.

**Tabella 4.1:** Riassunto dei 13 scenari analizzati, ottenuti dalla combinazione tra conformazione della galleria e tipologia di evento iniziatore.

	<b>Campo aperto</b>	<b>Galleria rettilinea piana</b>	<b>Galleria rettilinea inclinata</b>	<b>Galleria piana con doppia curva</b>
<b>Automobile elettrica</b>	Scenario A.1 Paragrafo 4.3.1	Scenario B.1 Paragrafo 4.4.1	Scenario C.1 Paragrafo 4.5.1	Scenario D.1 Paragrafo 4.6.1
<b>Automobile tradizionale</b>	Scenario A.2 Paragrafo 4.3.2	Scenario B.2 Paragrafo 4.4.2	Scenario C.2 Paragrafo 4.5.2	Scenario D.2 Paragrafo 4.6.2
<b>Pool Fire</b>	Scenario A.3	Scenario B.3	/	/
<b>Automobile tradizionale con effetto domino</b>	/	Scenario B.4 Paragrafo 4.4.3	Scenario C.4 Paragrafo 4.5.3	Scenario D.4 Paragrafo 4.6.3

Alcuni tra gli scenari sono ritenuti meno significativi e dunque si è scelto di escludere i casi di automobile tradizionale con effetto domino in campo aperto. Per effetto domino si intende l'innesco successivo di più automobili, come sarà meglio descritto nei paragrafi successivi. In ogni caso, tale scenario se ha luogo in campo aperto non fornisce utili indicazioni per la gestione antincendio, diversamente dal caso in galleria.

Ciascuna simulazione ha previsto il monitoraggio dei parametri già discussi e, per agevolare la comprensione, è riportata in Appendice A al presente documento una rappresentazione grafica della loro collocazione nella geometria.

## 4.1: Meshing del modello

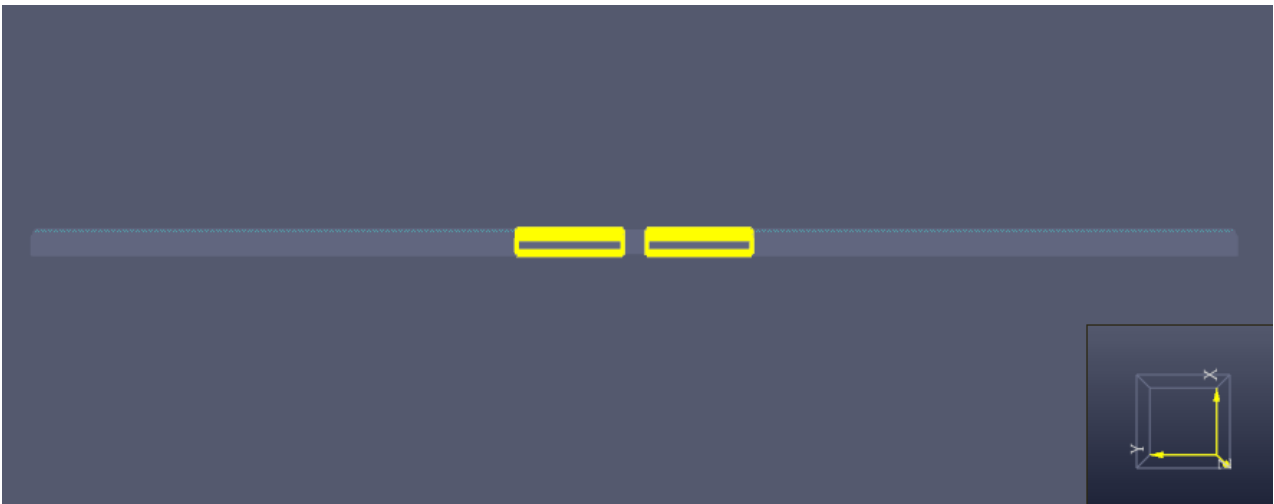
I ragionamenti geometrici discussi nel Capitolo 1 hanno portato a realizzare tre modelli geometrici di galleria, a cui se ne aggiunge uno in campo aperto, per consentire un termine di paragone comune a tutti gli scenari. Ciascun contesto è stato implementato come discusso di seguito.

### 4.1.1: Modello di galleria rettilinea

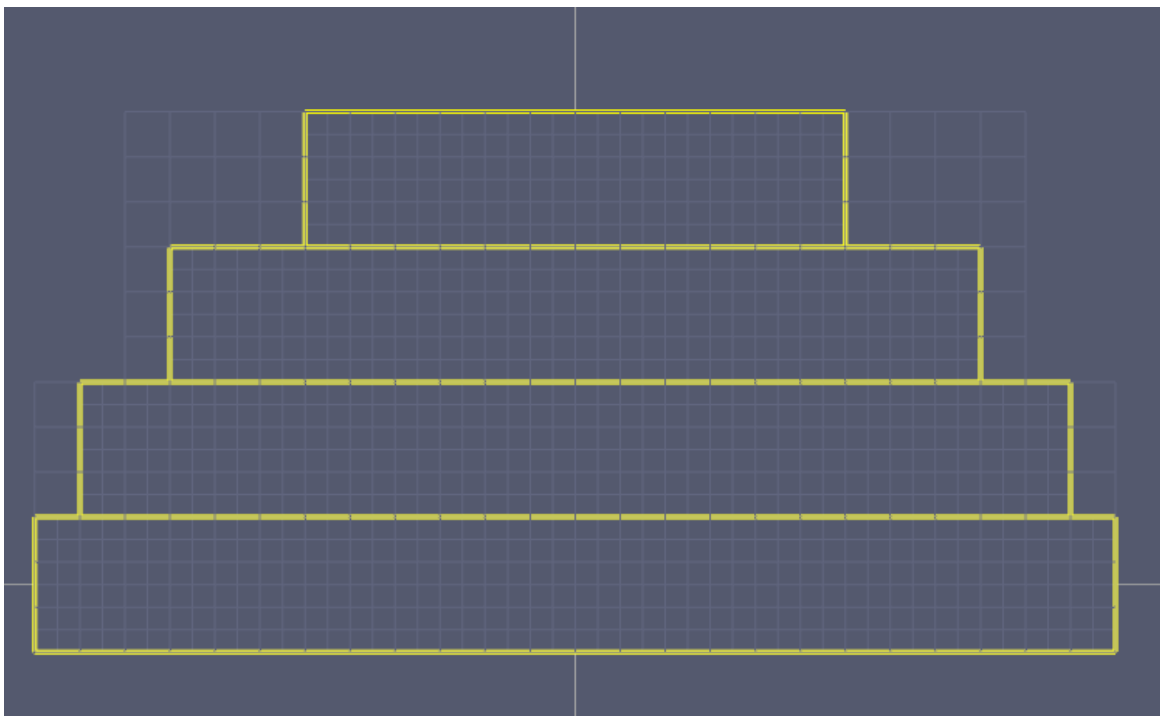
Per questo modello si è scelto di impiegare tre dimensioni caratteristiche della *mesh*: 0.4 m, 0.8 m e 1.6 m. la griglia più fitta è stata selezionata per la zona che va da 490 a 510 metri dall'ingresso della galleria, per consentire una buona accuratezza di stima in prossimità delle automobili. Al contrario, nel dominio da 400 a 490 metri e, specularmente, da 510 a 600 metri è stata utilizzata una dimensione caratteristica di 0.8 m, per ottimizzare il numero di elementi e rendere il calcolo più agevole in un dominio comunque di minor interesse rispetto al centro della galleria. Per le stesse motivazioni, nella zona tra l'imbocco e 400 m e tra 600 m e l'uscita dalla galleria, la *mesh* è stata ulteriormente ridotta in numerosità usando elementi da 1.6 m. In totale, il modello prevede circa 115000 elementi suddivisi come da Tabella 4.2 e Figura 4.1 e 4.2.

**Tabella 4.2:** Dettaglio del numero di elementi di *mesh* utilizzato nel modello.

Posizione	Larghezza caratteristica	Numero di elementi
Da $y = 490$ m a $y = 510$ m	0.4 m	42960
Da $y = 400$ m a $y = 490$ m	0.8 m	22932
Da $y = 510$ m a $y = 600$ m	0.8 m	22932
Da $y = 0$ m a $y = 400$ m	1.6 m	13530
Da $y = 600$ m a $y = 1000$ m	1.6 m	13530



**Figura 4.1:** Vista della mesh da PyroSim sul piano YZ



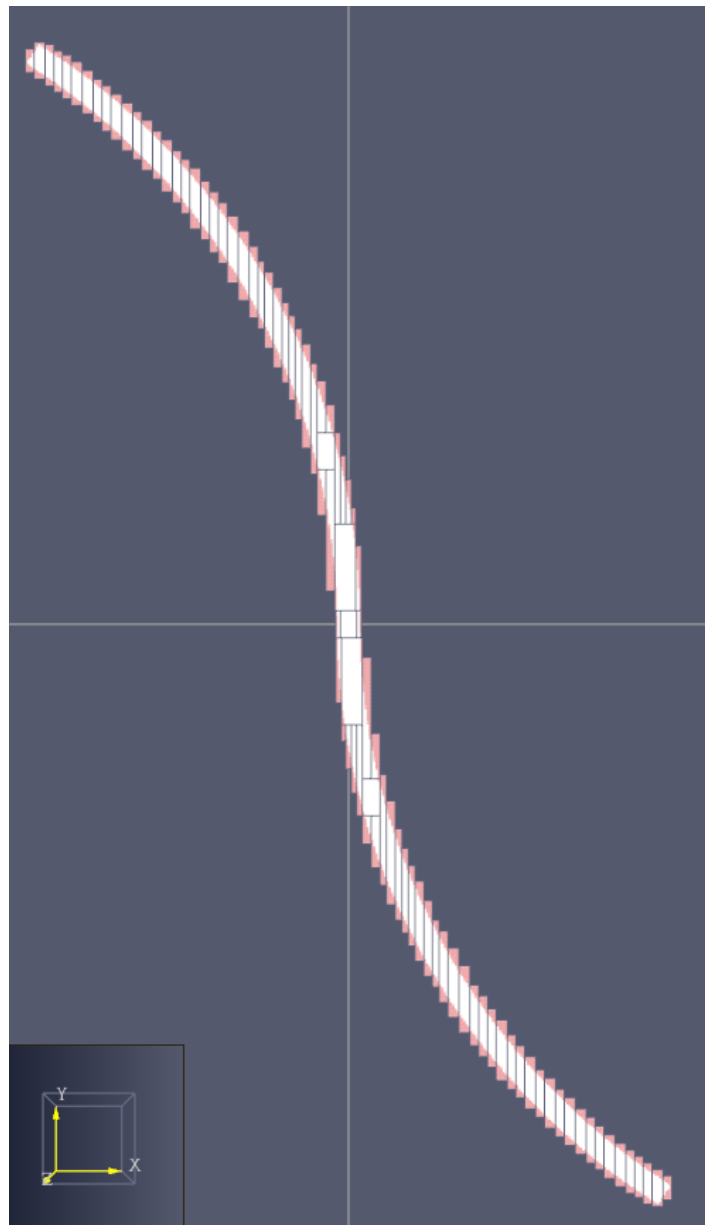
**Figura 4.2:** Vista della mesh da PyroSim sul piano XZ

#### 4.1.2: Modello di galleria inclinata

Per la versione inclinata della galleria si è adottato lo stesso sistema di *meshing*. Tuttavia, il modello è stato implementato inclinando il vettore accelerazione di gravità dell'angolo desiderato e nel caso in esame con tangente pari a 0.015, ottenendo il vettore  $\vec{g} = (9.80; -0.14)$ .

### 4.1.3: Modello di galleria curva

Il modello di galleria in curva è il più complesso per quanto riguarda l'implementazione e la gestione della *mesh*. Il software, infatti, risolve facilmente problemi su assi cartesiani ma la sua architettura rende più complessa e meno efficiente la soluzione di problemi curvi. A tal riguardo è stato necessario affinare ulteriormente la *mesh* per evitare problematiche di allineamento e instabilità numerica. Il punto di partenza adottato è il medesimo utilizzato per generare la *mesh* per la galleria rettilinea e inclinata, utilizzando le già citate lunghezze caratteristiche degli elementi della griglia. Successivamente, la griglia è stata divisa in domini più piccoli ed implementati secondo la direzione dell'asse x come da Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Vista della mesh da PyroSim sul piano XY

## 4.2: Parametri di riferimento

È importante, in prima battuta, fissare dei parametri a cui ci si possa riferire per determinare una condizione di sicurezza degli occupanti; questi valori sono quelli proposti nel capitolo M.3 del Codice di Prevenzione Incendi [21]. I primi parametri in esame sono riferiti al caso di “esposizione zero”, un approccio molto conservativo e a favore di sicurezza. A tal riguardo, la densità di affollamento è assunta essere bassa anche dato il contesto analizzato e con un tempo di coda nullo.

**Tabella 4.2:** Parametri di salvaguardia della vita umana in ambienti non aperti, tratti dal Codice di Prevenzione Incendi.

Parametro	Valore per gli occupanti	Valore per i soccorritori
Altezza minima dello strato di aria indisturbata dai fumi	2 m	1.5 m
Temperatura dei fumi caldi per garantire un irraggiamento < 2.5kW/m <sup>2</sup>	200° C	250° C
Velocità di deflusso degli occupanti	0.71 m/s	/
Lunghezza da percorrere	512 m	/
Tempo di movimento e RSET	720 s	/
FED limite	0.1	/
Visibilità	10 m	/

I parametri, inoltre, sono calcolati ritenendo l’uscita dai portali come l’unico modo per portare gli occupanti in luogo sicuro, per mettersi nelle peggiori condizioni possibili, e che il tempo richiesto agli occupanti per rivelare l’incendio sia trascurabile rispetto a quello di movimento, per non dover inoltrarsi in considerazioni altamente sito-specifiche. Di conseguenza, *RSET* coincide con il tempo di movimento e la condizione da verificare per la sicurezza degli occupanti è *ASET* > *RSET* per ciascun scenario.

Il tempo di movimento è stato ottenuto considerando 512 m come lunghezza di esodo, la distanza tra le automobili della seconda fila ed il portale più distante, e moltiplicando questa lunghezza per la velocità di deflusso degli occupanti suggerita dal Codice di Prevenzione Incendi nel capitolo M.3. Per gli scenari in campo aperto non sono state effettuate valutazioni sull’esodo, in quanto l’unica finalità per questa categoria è di fornire una *baseline* per confrontare i parametri termici del fuoco.

Di conseguenza, i parametri raccolti per tutti gli scenari saranno i seguenti:

- curva HRR, come da paragrafo 4.2.1;
- temperatura, come da paragrafo 4.2.2;

- visibilità, come da paragrafo 4.2.3;
- *Fractional Effective Dose* (FED), come da paragrafo 4.2.4.

Ciascuno di questi parametri viene valutato con riferimento a punti selezionati o a piani nella geometria 3D.

#### 4.2.1: Curva HRR

Il primo parametro che verrà considerato nell'analisi degli scenari è l'andamento della curva HRR, per poter controllare la corretta impostazione del modello; la curva è ricavata direttamente dall'output fornito da software.

#### 4.2.2: Temperatura

Per garantire l'esodo degli occupanti è necessario che il valore della temperatura rimanga al di sotto dei 200° C nelle porzioni di galleria ancora frequentate dagli occupanti in sede di evacuazione [23]. A tal fine sono stati implementati piani di controllo ad altezza  $z = 1.8$  m e  $x = 0$ , monitorando la condizione più critica per la distribuzione della temperatura. Inoltre, sono stati previsti altri piani di controllo a varie distanze dal centro della galleria, rispettivamente a 10 m, 100 m, sia anteriormente che posteriormente all'incendio, e in corrispondenza portali della galleria, come meglio riassunto nell'appendice A.

#### 4.2.3: Visibilità

Per valutare l'evoluzione della visibilità durante lo sviluppo dell'incendio si è impiegato un piano posto ad altezza pari a  $z = 1.8$  m dalla sede stradale, pari alla posizione delle alte vie respiratorie di un occupante a statura media. Inoltre, per avere dei dati puntuali in posizioni ritenute d'interesse, sono stati inclusi anche cinque sensori per la visibilità, il primo posto ad un metro a destra dell'automobile sorgente, e altre due coppie a 10 m e 100 m rispettivamente a monte e a valle del focolare. In aggiunta, in alcuni casi notevoli viene anche riportato l'andamento dello strato dei fumi lungo la direzione longitudinale della galleria, rendendo possibili alcune valutazioni preliminari sulla stabilità dell'interfaccia. Il valore limite di visibilità sufficiente per una sicura evacuazione è ritenuto essere di 10 m [23].

#### 4.2.4: FED

La *Fractional Effective Dose* (o *FED*) è tra i più utilizzati metodi per valutare l'incapacitamento nell'essere umano esposto ad effluenti tossici ed è di particolare interesse in quanto



tale metrica può includere l'esposizione a diverse sostanze. L'Equazione che permette il calcolo della  $FED_{tot}$  è riportata in Equazione (4.1) [24]:

$$FED_{tot} = (FED_{CO} + FED_{HCN} + FED_{NO_x} + FLD_{irr}) * HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (4.1)$$

Dove  $FED_{CO}$ ,  $FED_{HCN}$  e  $FED_{NO_x}$  sono la misura delle frazioni incapacitanti rispettivamente di monossido di carbonio, acido cianidrico e ossidi di azoto. Il software calcola questi valori attraverso formule simili a quella sotto riportata per il calcolo della FED associata a CO [24]:

$$FED_{CO} = \int_0^t 2.764 * 10^{-5} (C_{CO}(t))^{1.036} dt \quad (4.2)$$

Ovvero la  $FED$  è il risultato dell'integrazione nel tempo della concentrazione istantanea della sostanza (in ppm). La concentrazione di sostanze viene calcolate direttamente dal software una volta elaborata la dinamica dello scenario.

Il parametro  $FLD_{irr}$ , invece, è la *Fractional Lethal Dose* per i gas irritanti, tra i quali è anche presente l'acido fluoridrico emesso dal focolare di incendio, in accordo all'Equazione (4.3) [24]:

$$FLD_{irr} = \int_0^t \left( \frac{C_{HCl}(t)}{F_{FLD,HCl}} + \frac{C_{HBr}(t)}{F_{FLD,HBr}} + \frac{C_{HF}(t)}{F_{FLD,HF}} + \dots \right) dt \quad (4.3)$$

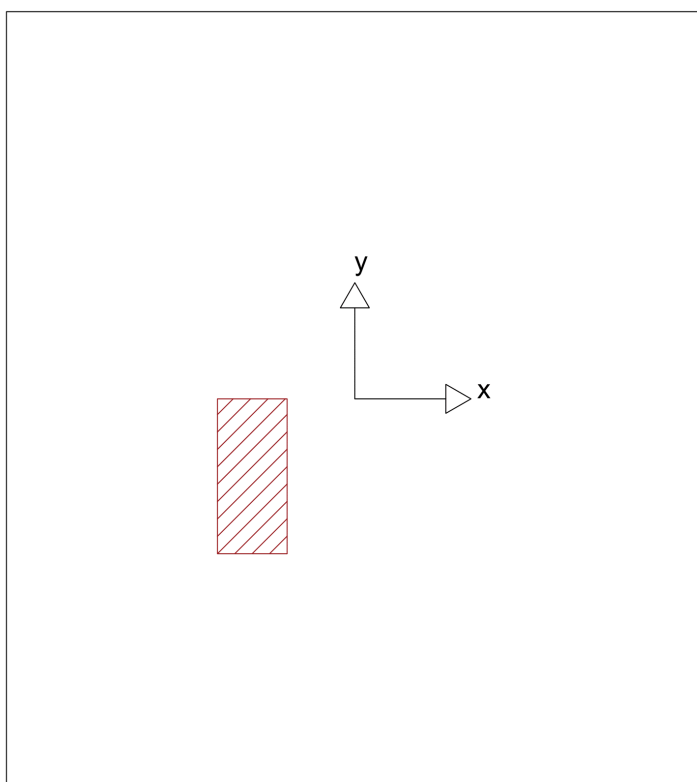
Anche in questo caso, in modo simile a quanto già visto per la  $FED$ ,  $FLD_{irr}$  è funzione della concentrazione della sostanza, divisa per la quantità massima tollerabile. Nel modello, essendo presente solamente HF, l'unica molecola per la quale viene considerata tale metrica è l'acido fluoridrico.

Gli ultimi due parametri dell'Equazione (4.1) ovvero  $HV_{CO_2}$  e  $FED_{O_2}$  corrispondono rispettivamente al parametro legato all'iperventilazione indotta dalla presenza di  $CO_2$  nell'aria, che costringe l'occupante ad inalare un volume maggiore per introdurre un sufficiente quantitativo di ossigeno nei polmoni e all'indice dell'incapacitamento causato dalla carenza di ossigeno e dalla conseguente asfissia [24].

Come riportato sopra, il valore assunto come limite per i valori di  $FED_{tot}$  è pari a 0.1 [23] per gli occupanti, mentre non ha un limite per i soccorritori (come riportato nella Tabella M.3-2 del Codice di Prevenzione Incendi [23]), in quanto si presuppone che siano dotati di autorespiratori che consentono la respirazione indipendentemente dalle condizioni ambientali.

### 4.3: Scenario in campo aperto

Per valutare la bontà delle reazioni impostate e delle curve HRR, oltre che per fornire un punto di paragone con gli scenari più complessi, si è deciso prendere in considerazione uno scenario di incendio in campo aperto per entrambe le tipologie di automobili e il caso di *Pool Fire*. In esso, l'autovettura è posta su una superficie chiusa rettangolare di dimensioni 20 m di lunghezza e 18 m di larghezza, con un'altezza della mesh pari a 10 m. Le superfici laterali e superiori sono considerate aperte, consentendo il passaggio di gas e calore. Queste dimensioni sono state scelte per consentire un paragone diretto con l'evoluzione dello scenario in galleria. L'automobile è stata posizionata con il suo baricentro geometrico ad una distanza di 2 m sull'asse y e 2.55 m sull'asse x, come riportato in Figura 4.4.



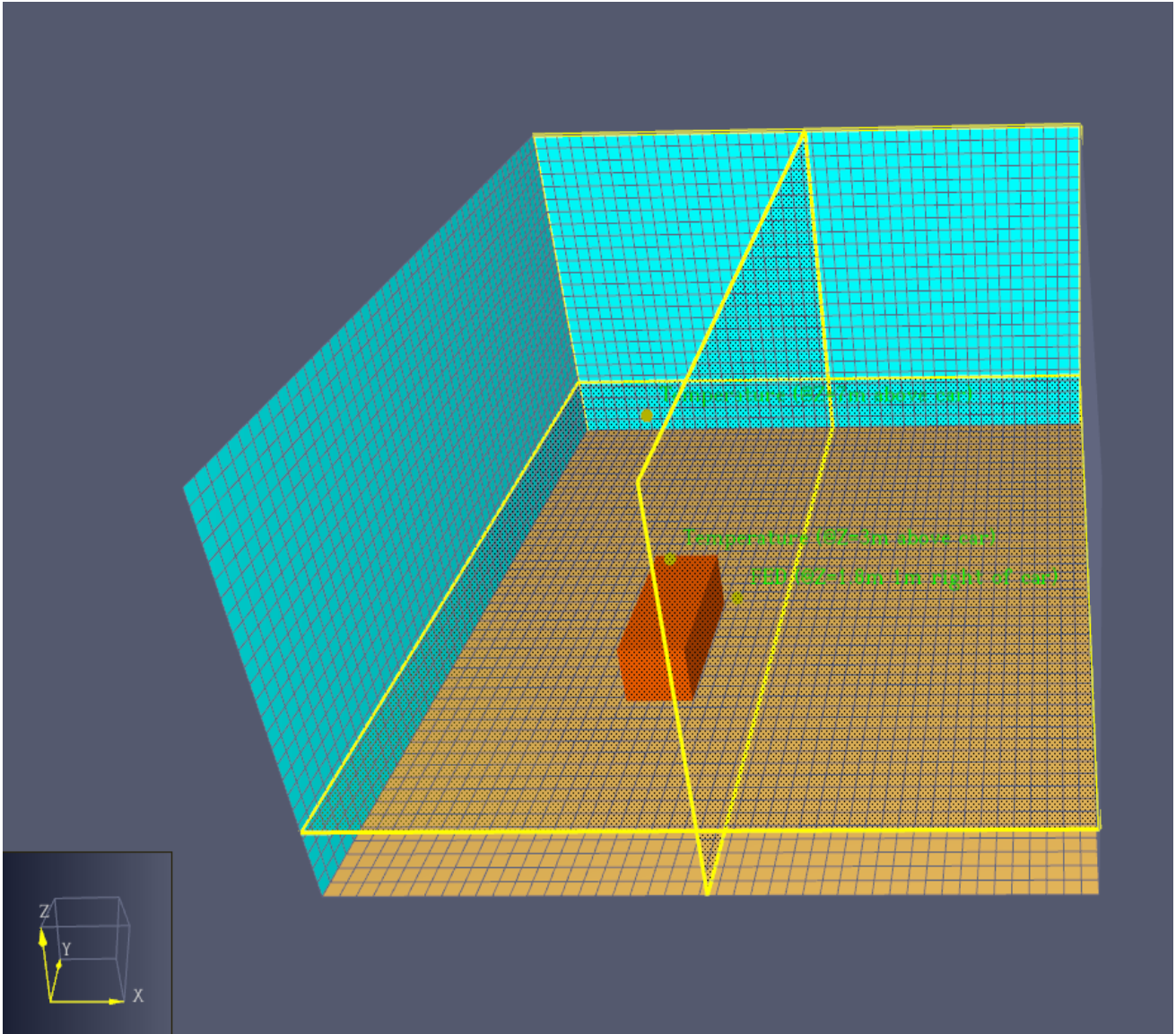
**Figura 4.4:** Schematizzazione geometrica degli scenari A.1 e A.2

Sono stati inoltre posizionati due punti di misurazione di temperatura, entrambi posti sopra all'auto in fiamme rispettivamente a 3 e 7 m. inoltre, è previsto un rivelatore di FED posto 1 m a lato dell'autovettura e ad una quota di 1.8 m coincidente, quest'ultimo, con un rivelatore della visibilità. Per finire, sono stati inseriti anche dei piani per la visualizzazione della temperatura e della visibilità a quota 1.8 m e un piano per la temperatura alla coordinata  $x = 0$  (Appendice A).

Questo scenario è stato analizzato sia per l'automobile elettrica (§ 4.3.1) che per l'automobile a combustione interna (§ 4.3.2). Inoltre, è stato preso in considerazione uno scenario aggiuntivo di *Pool Fire*, i cui risultati non sono stati riportati in quanto poco rilevanti ai fini della dissertazione.

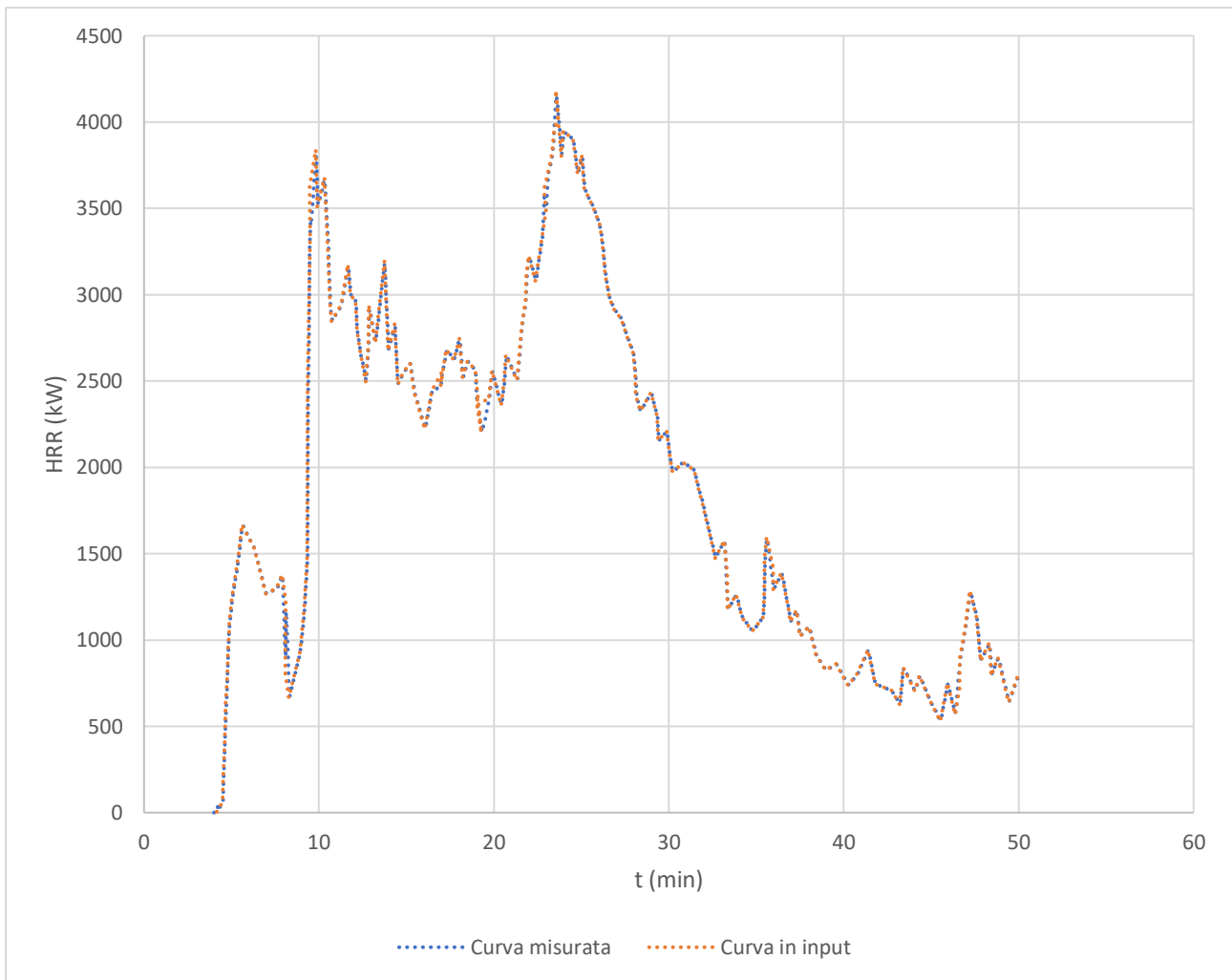
### 4.3.1: Automobile elettrica in campo aperto A.1

Questo scenario è stato ottenuto combinando la geometria descritta nel paragrafo 4.1 con le caratteristiche chimico-fisiche proprie del modello di automobile elettrica descritto nel paragrafo 4.6.2; il caso è meglio riassunto in Figura 4.5.

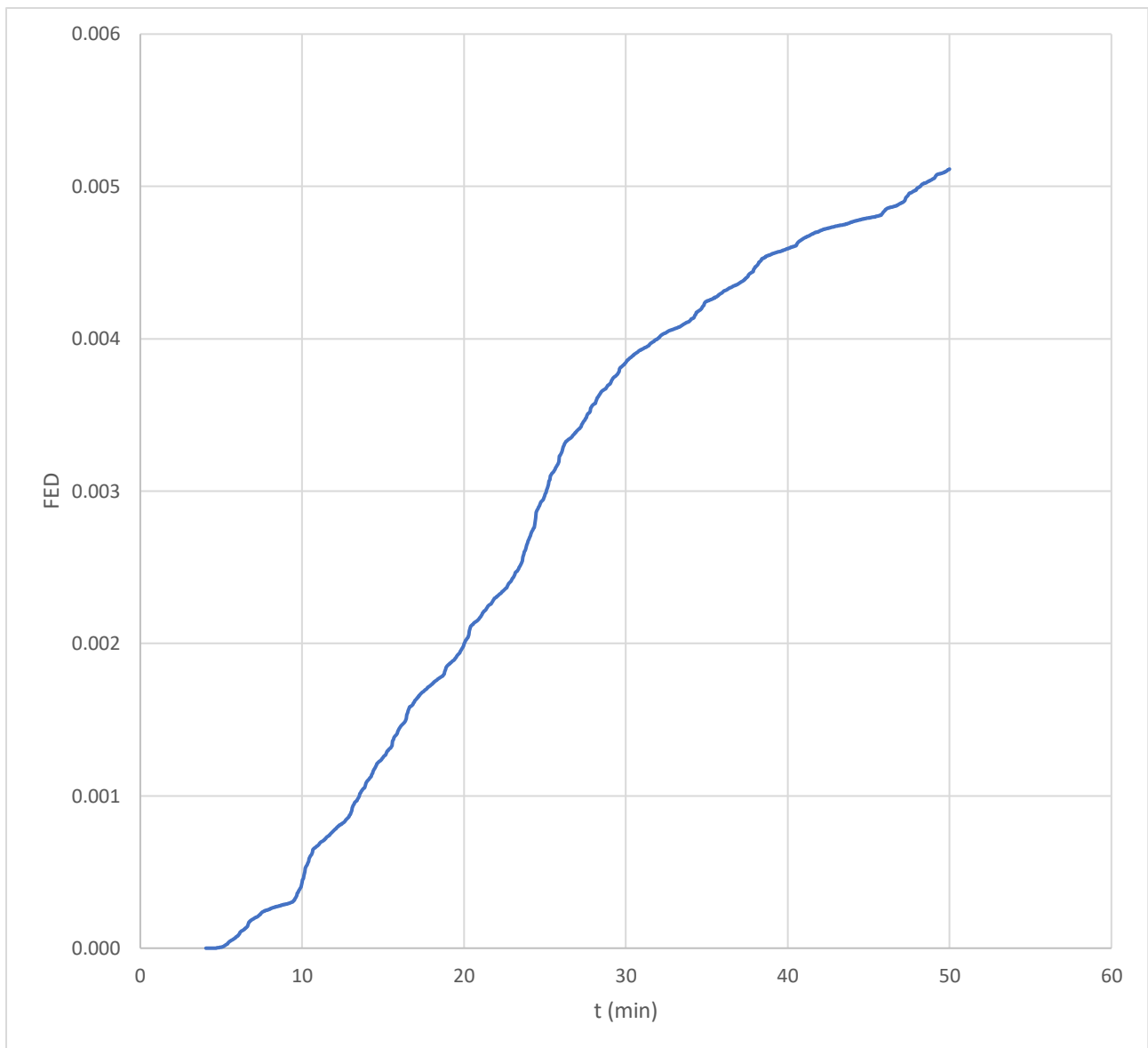


**Figura 4.5:** Rappresentazione dello scenario A.1

Questa simulazione ha avuto una durata pari a 50 minuti, con i risultati più significativi che sono stati riportati in Figura 4.6 per quanto riguarda la curva HRR, Figura 4.7 per la FED e Figure 4.8 e 4.9 per il campo termico. Infine, nelle Figure 4.10 e 4.11 è riportata la visibilità.

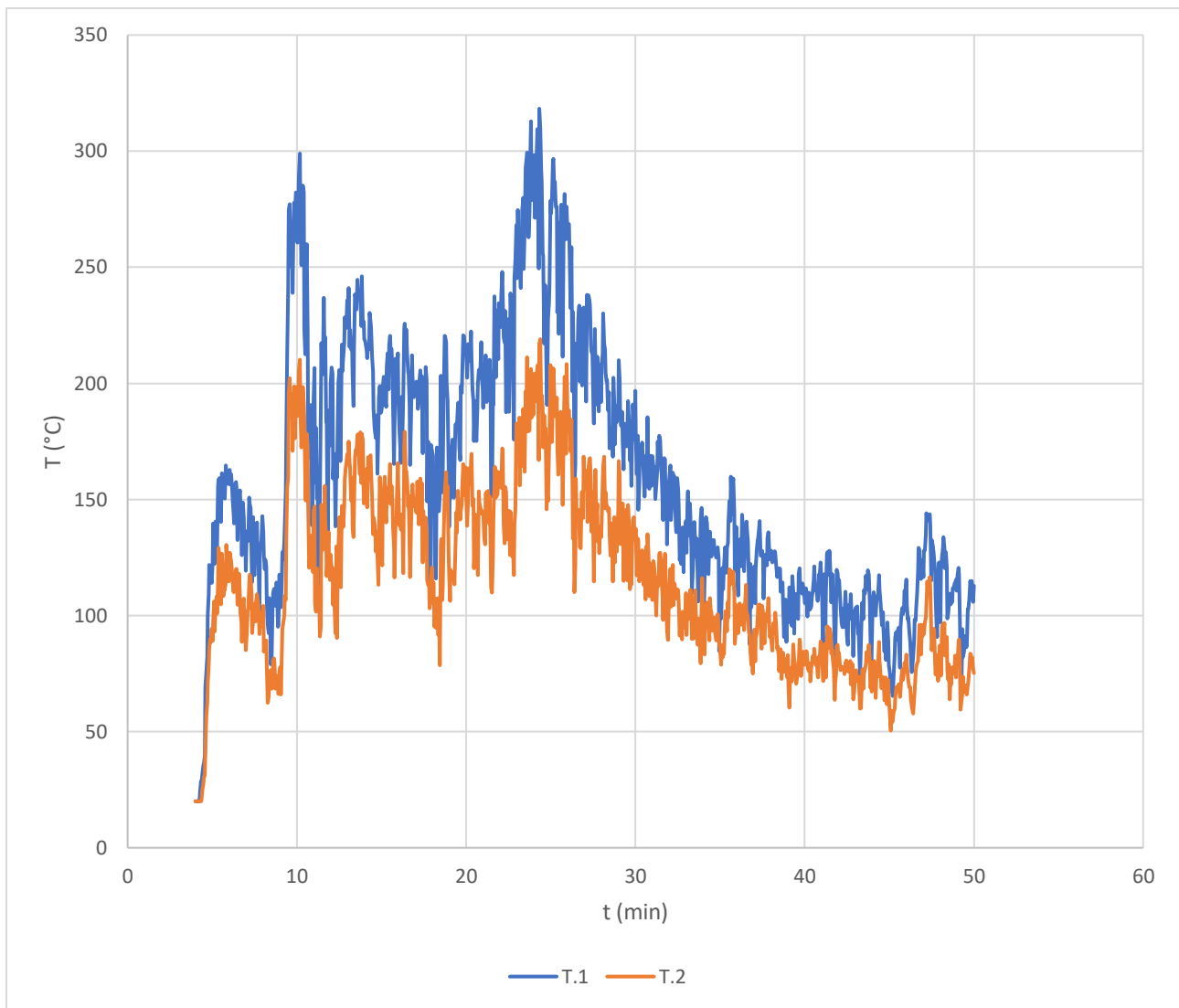


**Figura 4.6:** *Curva HRR dello scenario A.1.*



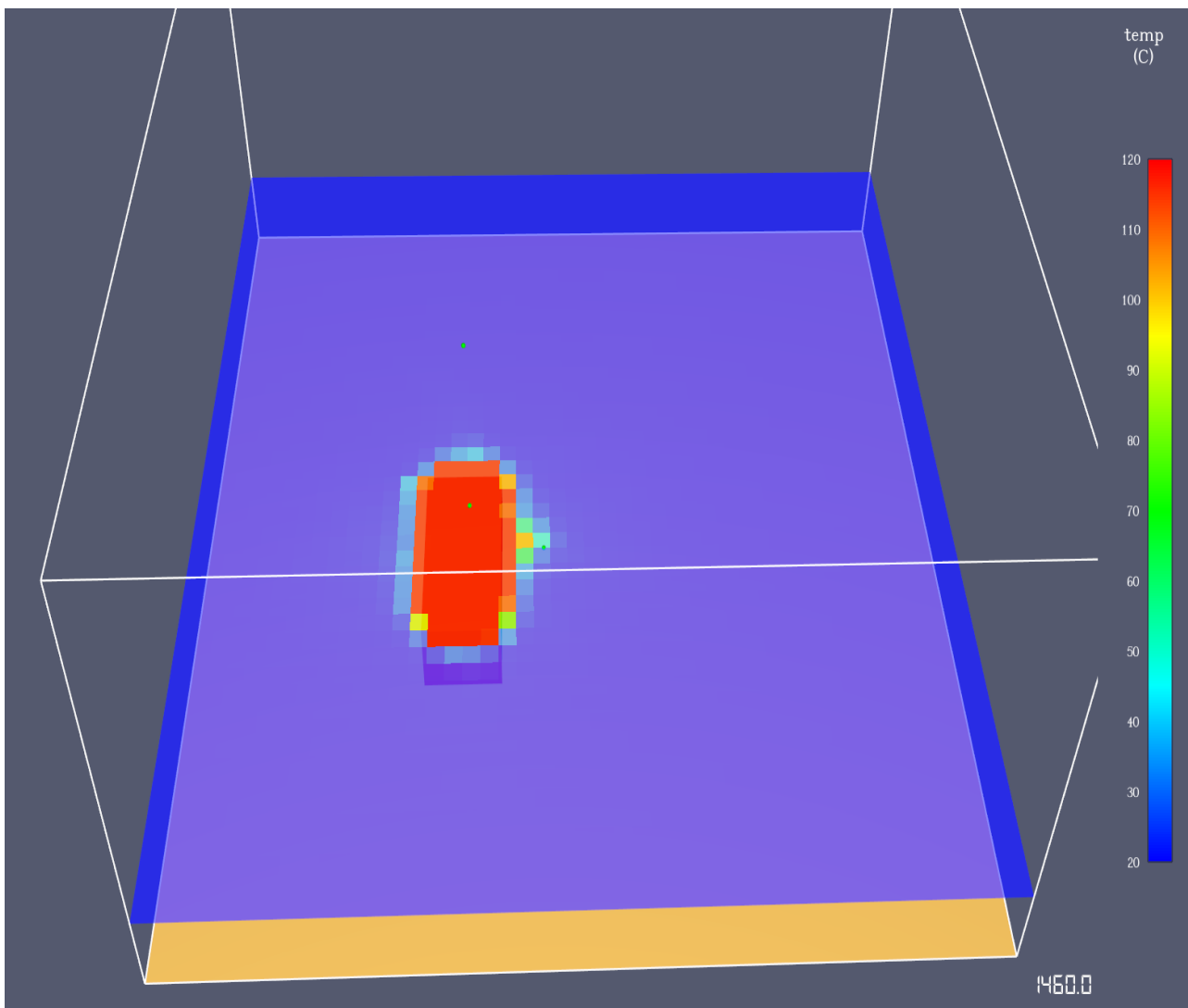
**Figura 4.7:** Andamento della *FED* - scenario *A.1*, sensore *F.1*.

L'analisi della FED misurata in corrispondenza di un bersaglio posto 1 m a lato dell'incendio rivela che il valore massimo ottenuto è pari a circa 0.0051, notevolmente al di sotto del limite proposto dal Codice di Prevenzione Incendi [23] e pari a 0.1. Questo è consistente con un incendio all'aperto di dimensioni relativamente piccole e che non dà un impatto rilevante sul bersaglio.



**Figura 4.8:** *Andamento della temperatura sopra all'automobile – scenario A.1, sensori T.1 e T.2.*

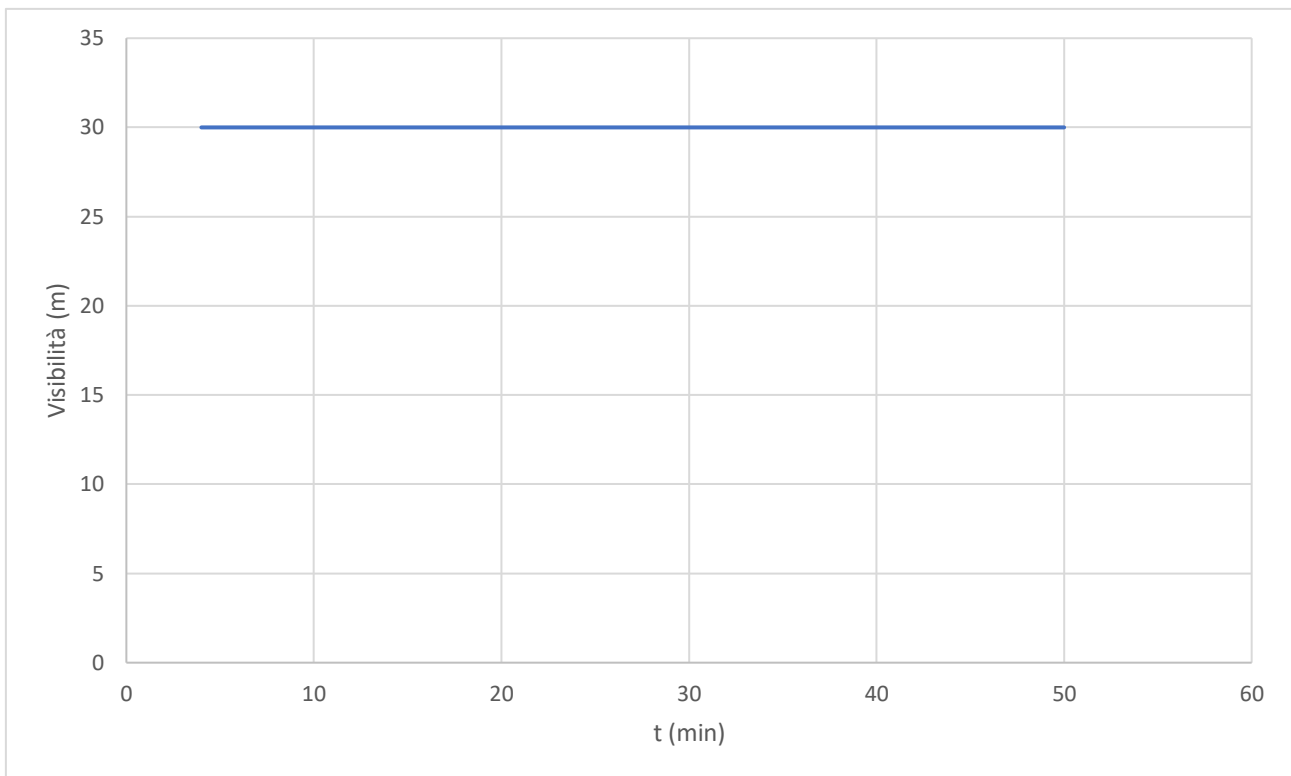
L'andamento nel tempo della temperatura al di sopra dell'automobile ha un profilo che deriva dalla curva HRR, con un primo picco a circa 10 min. Le temperatura massima ottenuta è pari a 318 °C per la sonda posta a 3 m di altezza (T.1) e a 219 °C per quella posta a 7 m (T.2).



**Figura 4.9:** *Temperatura allo sviluppo massimo dell'incendio – scenario A.1, piano a quota  $z=2$  m.*

Attraverso il piano orizzontale posto a quota  $z = 2$  m è possibile valutare la temperatura a cui si trova un occupante in una data posizione. Si può notare che la massima temperatura registrata a quest'altezza sia pari a  $120^{\circ}$  C, registrata solamente in prossimità dell'automobile.

Se confrontata con il livello di soglia previsto dal Codice, pari a  $200^{\circ}$  C, è possibile affermare che in questo caso la condizione di sicurezza sia verificata con ampio margine in tutti i punti all'esterno dell'automobile.



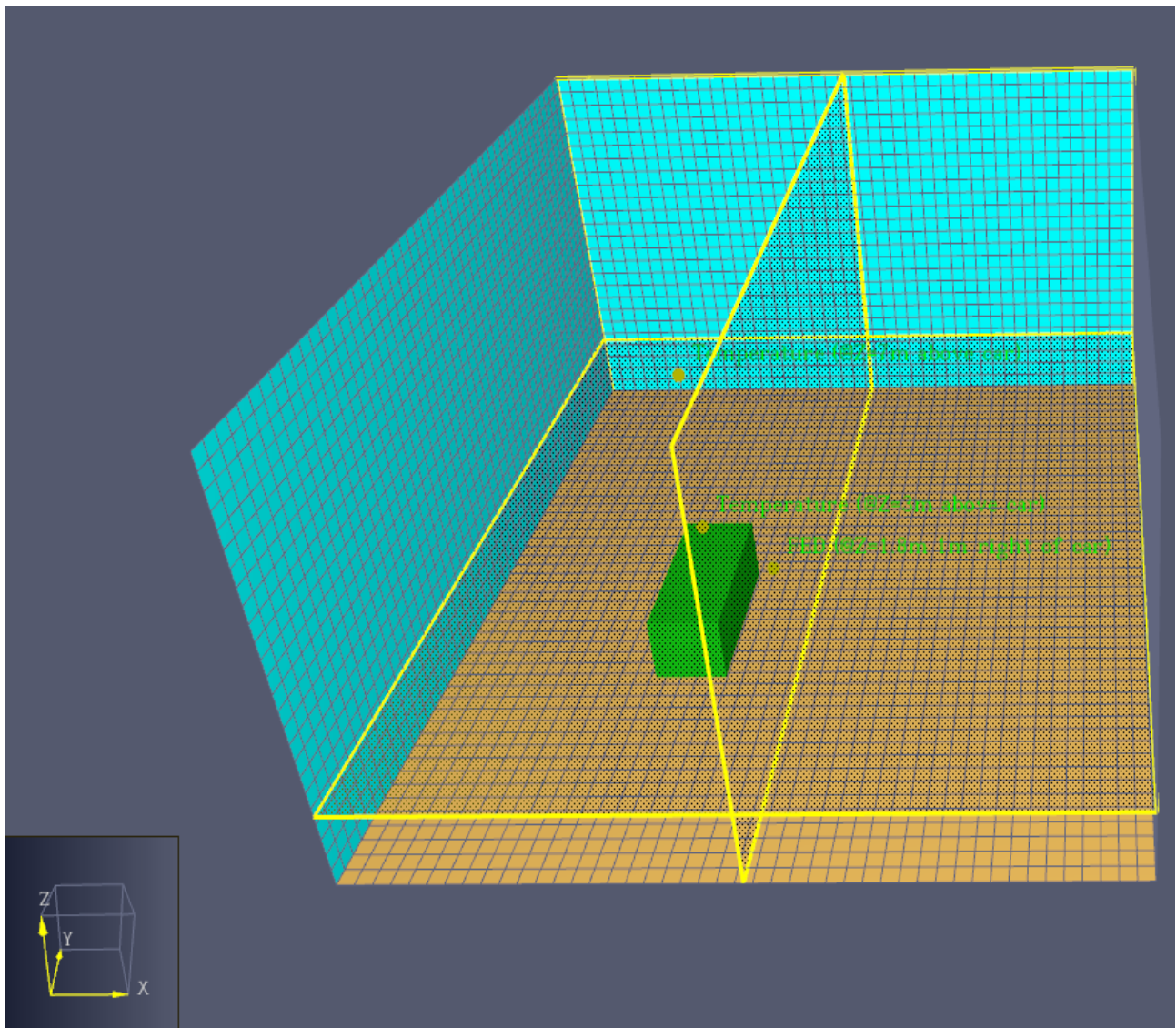
**Figura 4.10:** *Visibilità 1 m a lato dell'automobile – scenario A.1, sensore F.1*

I risultati derivanti dalla sonda di visibilità non risultano essere di particolare interesse, in quanto è buona e praticamente indisturbata, come ci si può aspettare da un incendio di modeste dimensioni e dove, essenzialmente, tutti gli effluenti vengono dispersi, mescolandosi con l'aria circostante.



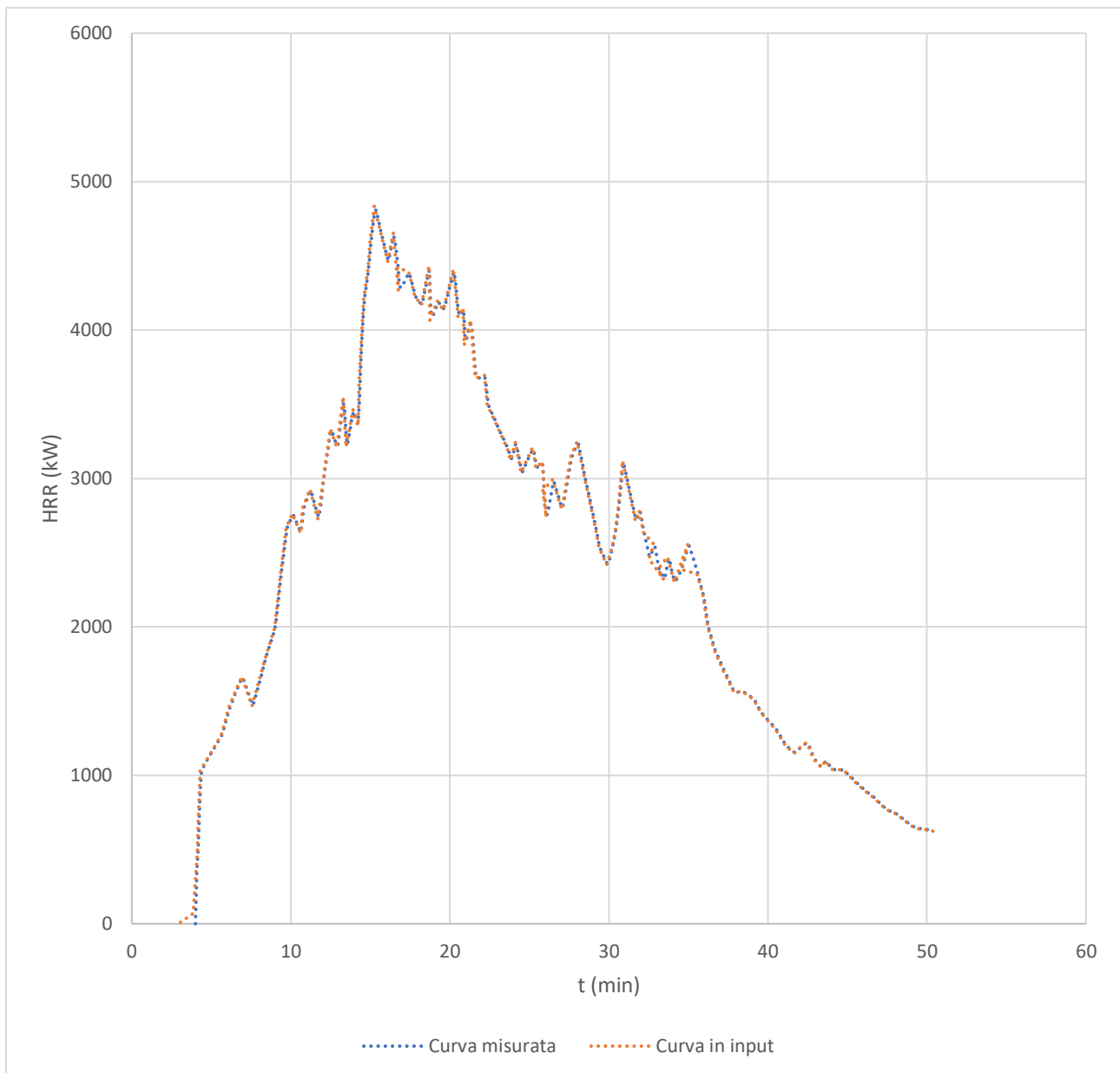
#### 4.3.2: Automobile tradizionale in campo aperto A.2

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta nel paragrafo 4.2 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale descritto nel paragrafo 3.6.2; la Figura 4.11 rappresenta graficamente lo scenario.



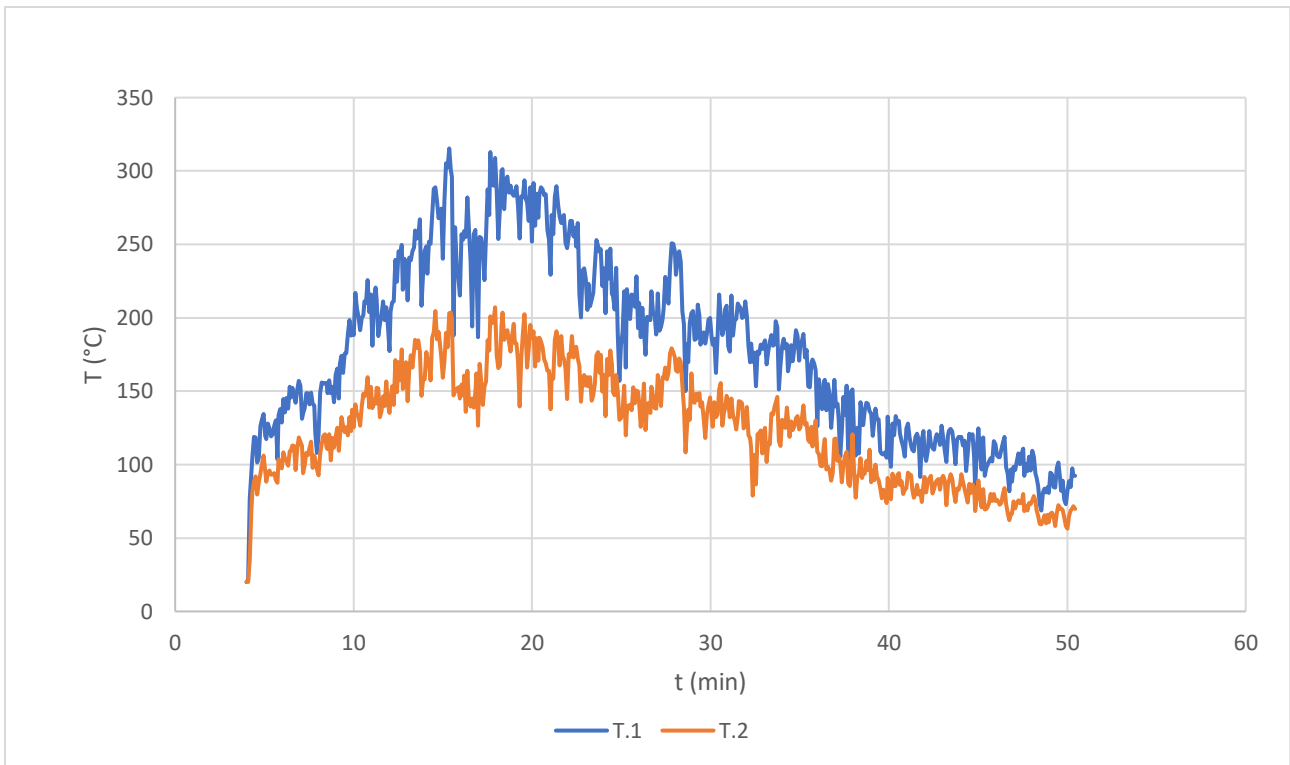
**Figura 4.11:** Rappresentazione dello scenario A.2 e del blocco corrispondente al modello dell'automobile.

Anche questo scenario ha avuto una durata di 50 minuti. I risultati sono riportati in Figura 4.12 per quanto riguarda l'HRR, Figura 4.13 per il campo termico e Figura 4.14 per la FED. La visibilità non presenta significativi cambiamenti rispetto allo scenario precedente ed è stata pertanto omessa.



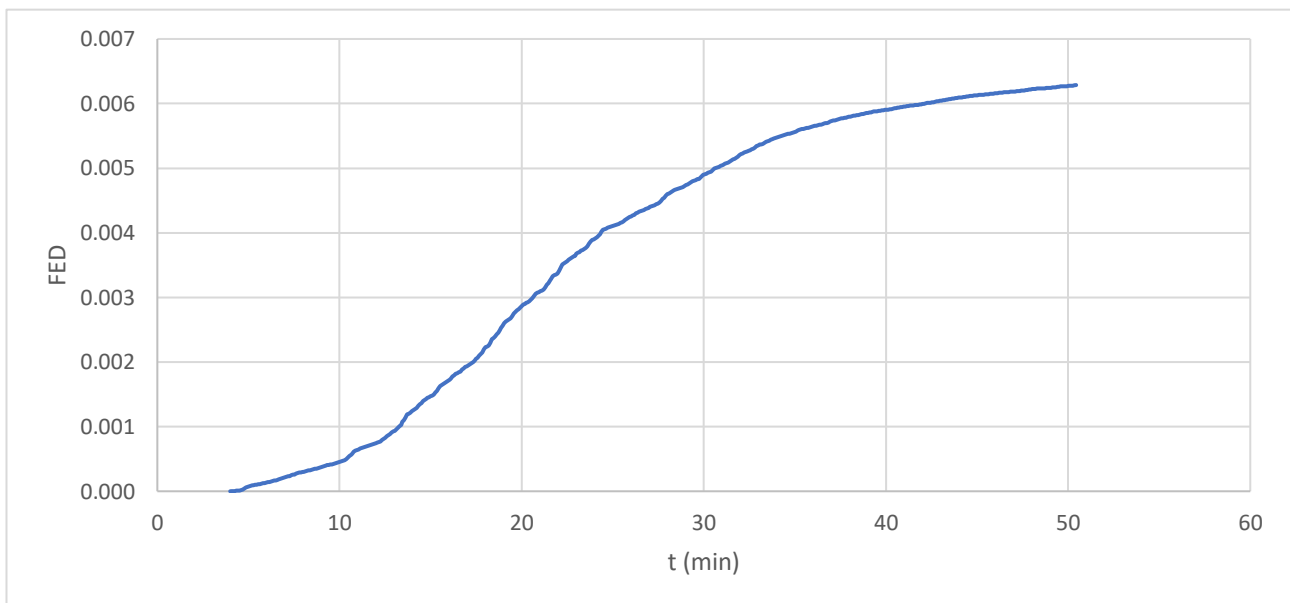
**Figura 4.12:** Confronto tra la curva HRR misurata e in input – scenario A.2.

Osservando la Figura 4.12 si nota la buona corrispondenza tra la curva fornita al *software* e quella simulata complessivamente da *PyroSim*, segnale di una buona impostazione del modello dal punto di vista termico.



**Figura 4.13:** *Andamento della temperatura sopra all'automobile – scenario A.2, sensori T.1 e T.2.*

Come nello scenario precedente, si nota che quello in analisi è di dimensioni contenute, con l'unica differenza visibile in una crescita più graduale della temperatura; i valori massimi misurati sono di circa 315 °C per la sonda T.1 e di 207 °C per la T.2, leggermente inferiori a quelle dello scenario A.1.



**Figura 4.14:** *Andamento della FED - scenario A.2, sensore F.1.*

Per quanto riguarda la FED (Figura 4.14), l'andamento rispecchia le previsioni, in quanto è meno disturbato di quello dell'auto elettrica; relativamente inaspettato è il valore massimo, pari a circa 0.0063, leggermente più alto rispetto allo scenario precedente, anche se ciò potrebbe essere semplicemente dovuto ad un diverso miscelamento dei prodotti con l'aria.

#### 4.4: Scenari in galleria rettilinea piana

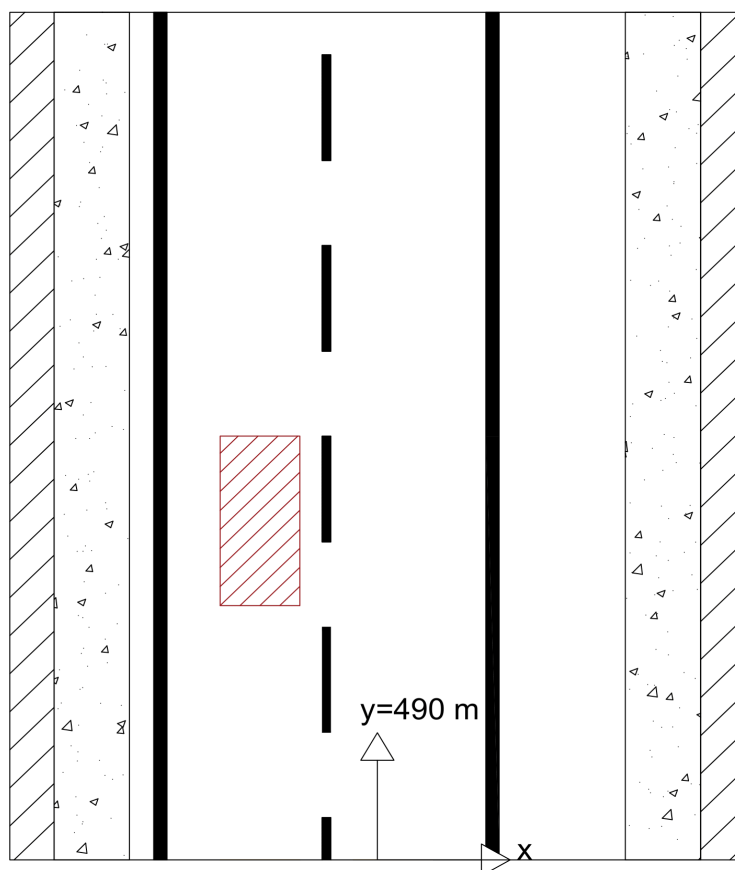
Il primo scenario di incendio in galleria preso in considerazione è quello di una galleria piana, utilizzando il modello geometrico presentato in § 1.5.1. L'origine degli assi è stata posta all'ingresso della galleria, con l'automobile di primo innesco posta con il suo baricentro in coordinate (498 m; -2,65 m), ovvero all'incirca al centro della corsia di sorpasso.

Per lo scenario di effetto domino sono state aggiunte altre tre automobili, con tempo di accensione ritardato di 12 minuti per le automobili immediatamente a destra e dietro a quella di primo innesco e di 24 minuti per quella più distante (Figura 4.26). Tali tempistiche sono conformi a [21].

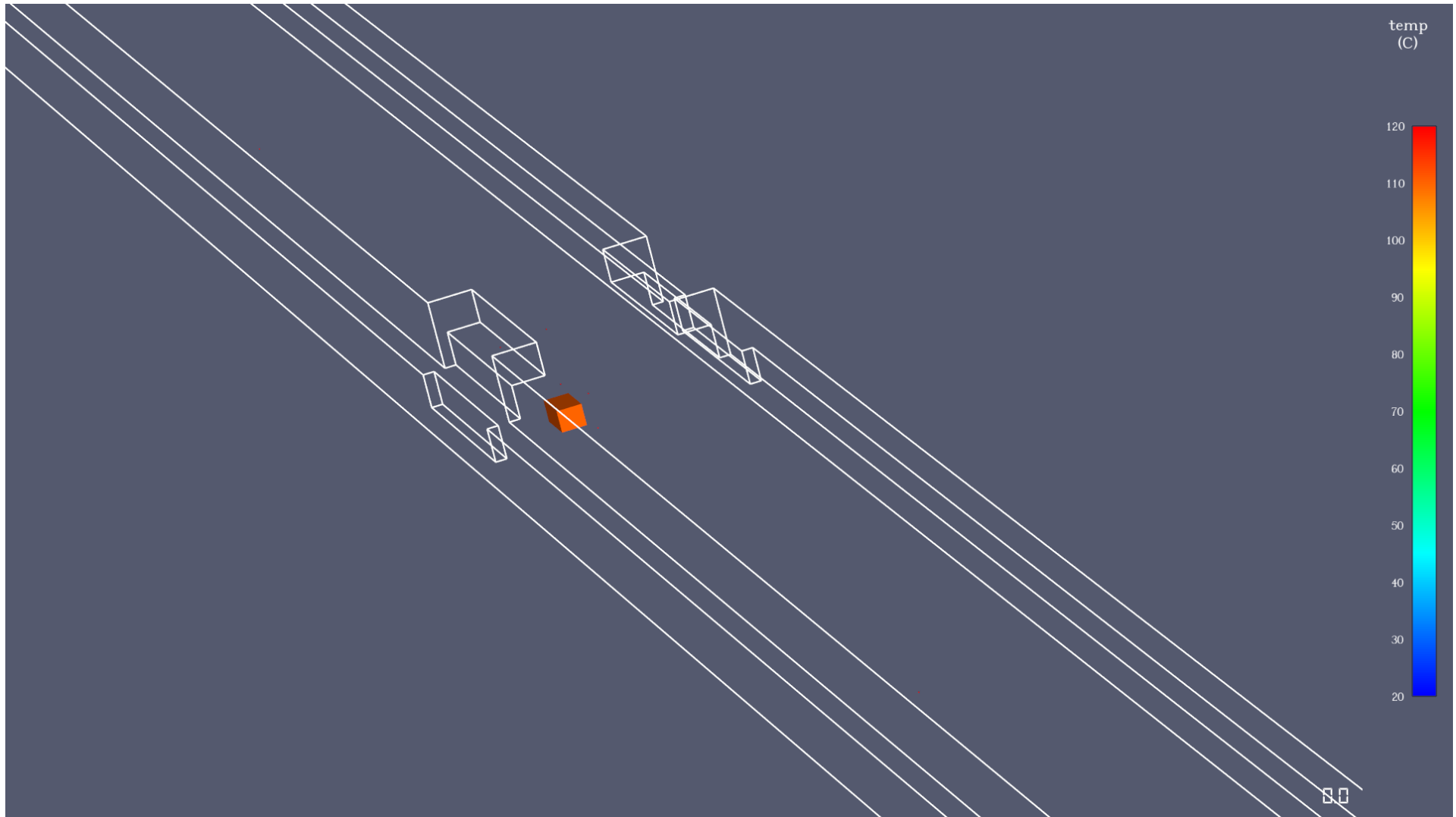
Le automobili a destra sono posizionate circa al centro della prima corsia, distanti 1,2 m dal lato delle auto nella corsia di sorpasso; la coppia posteriore ha il paraurti distanziato di 2 m da quello delle vetture antistanti. La configurazione geometrica è rappresentata per ciascuno scenario nelle Figure 4.16, 4.23, 4.26 e 4.27.

##### 4.4.1: Automobile elettrica in galleria rettilinea piana B.1

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta nel paragrafo 4.3 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile elettrica descritto nel paragrafo 3.6.2; le Figure 4.16 e 4.17 rappresentano graficamente lo scenario nella sua interezza.



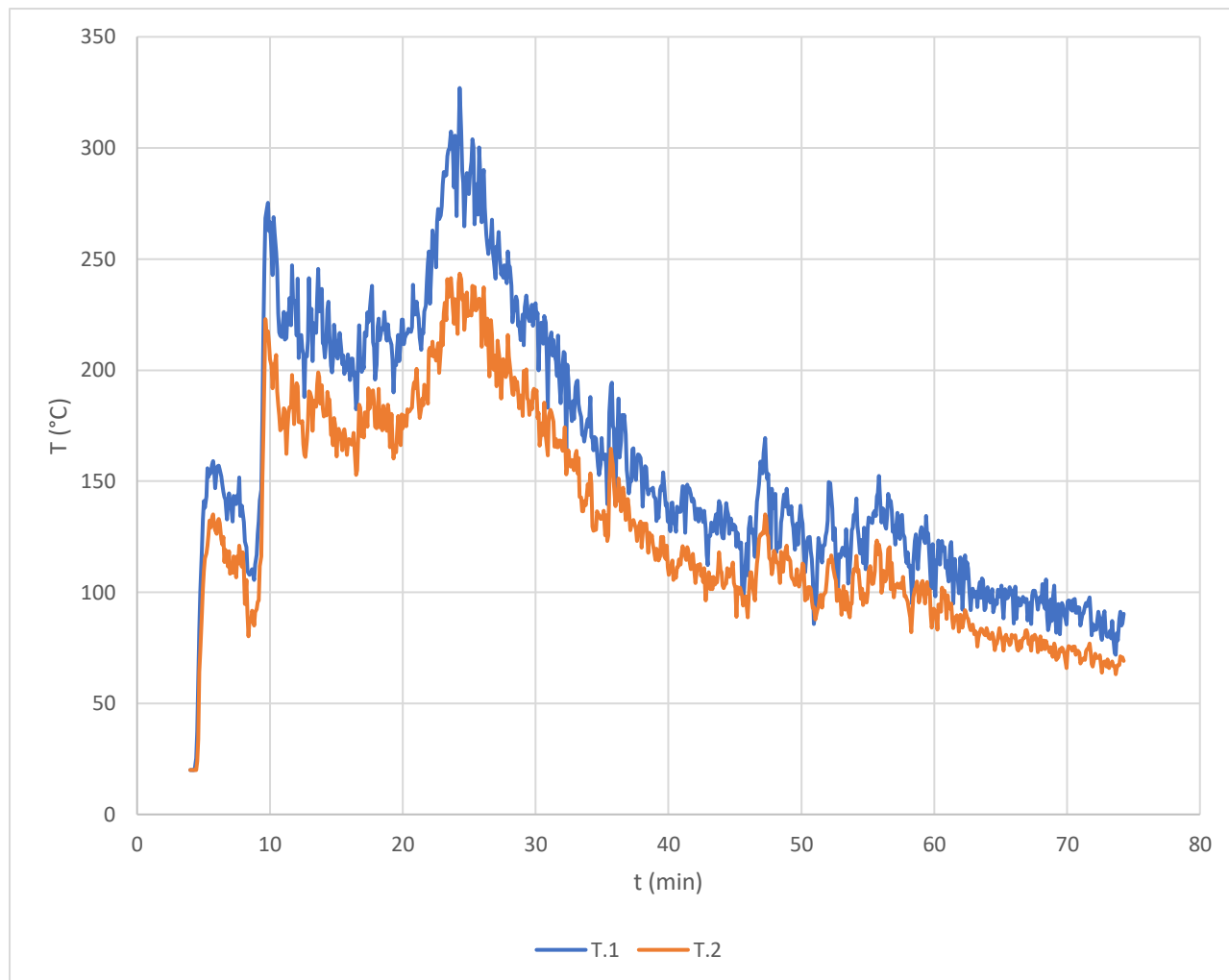
**Figura 4.16:** Schematizzazione geometrica dello scenario B.1.



**Figura 4.17:** *Rappresentazione dello scenario B.1*

Per fornire un punto di partenza più preciso per le successive considerazioni, questa simulazione ha un *runtime* esteso, pari a circa 75 min, consentendo di effettuare valutazioni preliminari anche sull'efficacia dell'intervento dei soccorritori e, in generale, sulle condizioni nella galleria negli istanti successivi al picco della curva HRR.

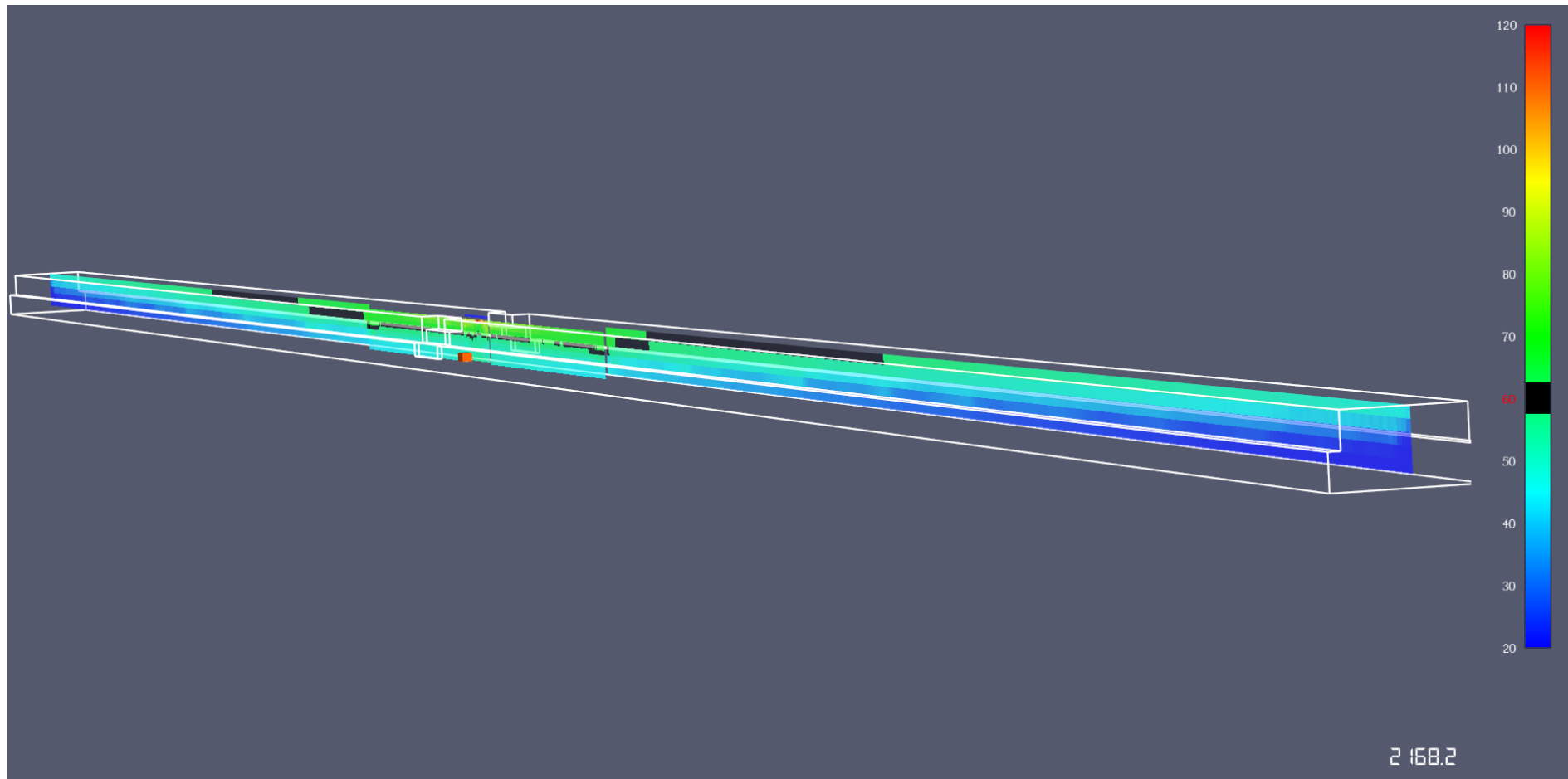
I risultati della simulazione sono stati riportati nella Figure 4.19 e 4.20 per il campo termico, Figura 4.21 per la FED e Figure 4.22-4.24 per quanto riguarda la visibilità.



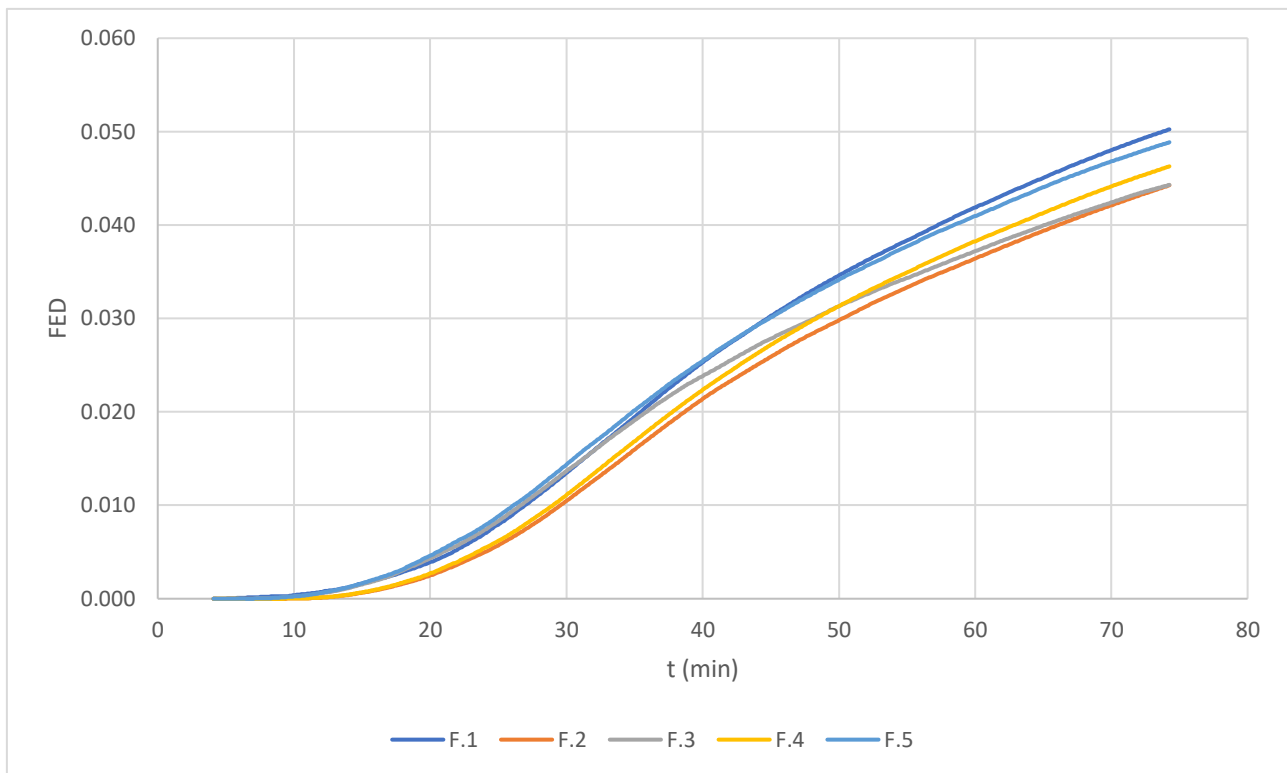
**Figura 4.18:** Andamento della temperatura sopra all'automobile – scenario B.1, sensori T.1 e T.2.

I valori di temperatura ottenuti sono del tutto comparabili con quelli del caso A.1, con picchi di circa 325 °C e 245 °C per le sonde T.1 e T.2. Tali valori sono quindi maggiori del caso in campo aperto e ciò è motivato dalle più stringenti caratteristiche del confinamento dei fumi.

Attraverso le Figure 4.18 e 4.19 si evince che le temperature nella galleria rimangono all'interno del range di tollerabilità per l'essere umano (valore massimo accettabile: 200 °C) e sono compatibili con la presenza degli occupanti anche nei periodi successivi al picco della curva HRR.



**Figura 4.19:** *Andamento della temperatura lungo la galleria rispetto al piano  $x = 0$ , scenario B.1.*



**Figura 4.20:** *Andamento della FED nei punti di misura – scenario B.1, sensori F.1-F.5.*

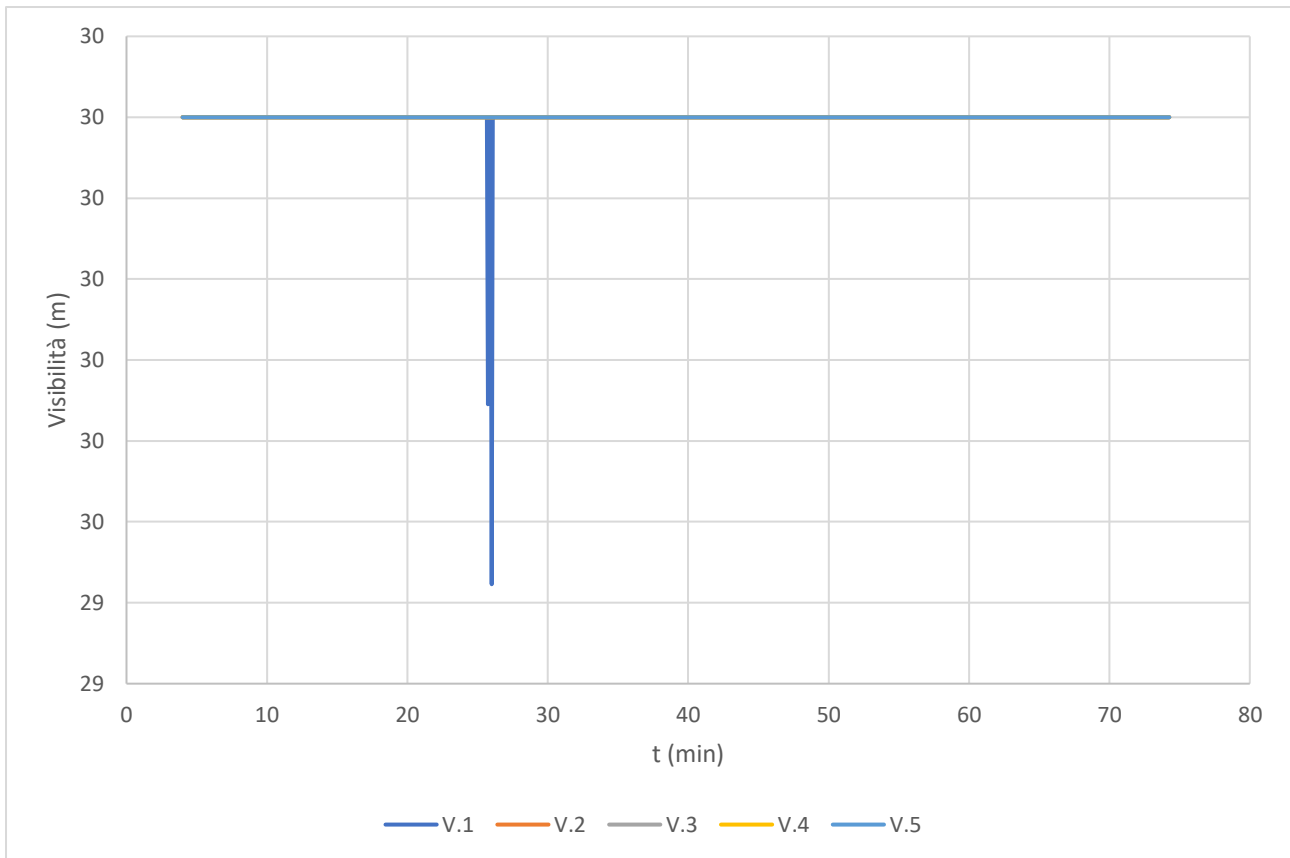
La Figura 4.20 rispecchia l’andamento già visto nel caso di campo aperto A.1, anche se è interessante notare come l’esposizione massima risulti però circa dieci volte superiore, con valore massimo pari a circa 0.050. Ciò è interpretabile in funzione della diversa geometria, che rallenta la dispersione dei prodotti della combustione nella galleria.

Per quanto riguarda la distribuzione di FED lungo la galleria, si vede che il punto più vicino all’automobile presenta il valore massimo, come atteso. Tuttavia, a 10 m viene rilevata una FED inferiore rispetto a quella rilevata alla posizione 100 m a valle dell’origine dell’incendio, per quasi tutta la durata dello scenario.

Molto probabilmente ciò è dovuto ad un progressivo raffreddamento della coltre fumosa che, conseguentemente, perde parte della spinta di galleggiamento. Ciononostante, visti i valori ridotti sia di FED che della temperatura e visibilità, si può affermare che questo miscelamento non vada ad interessare l’intera altezza della sezione e non impedisca l’evacuazione degli occupanti.

Un ultimo aspetto interessante che proviene dalla Figura 4.20 è l’andamento anomalo del sensore F3, posto 100 m a monte focolare (se si segue il senso di marcia), che, inizialmente è simile a quello posto a 100 m a valle dell’incendio, salvo poi abbassarsi e avvicinarsi ai valori di quelli posti a 10 m. Probabilmente questa differenza nell’andamento è indice di una preferenzialità del flusso dei fumi verso la parte concorde con il senso di marcia. Ciò può essere frutto della turbolenza che induce una piccola ma significativa differenza tra le condizioni delle due porzioni della galleria.



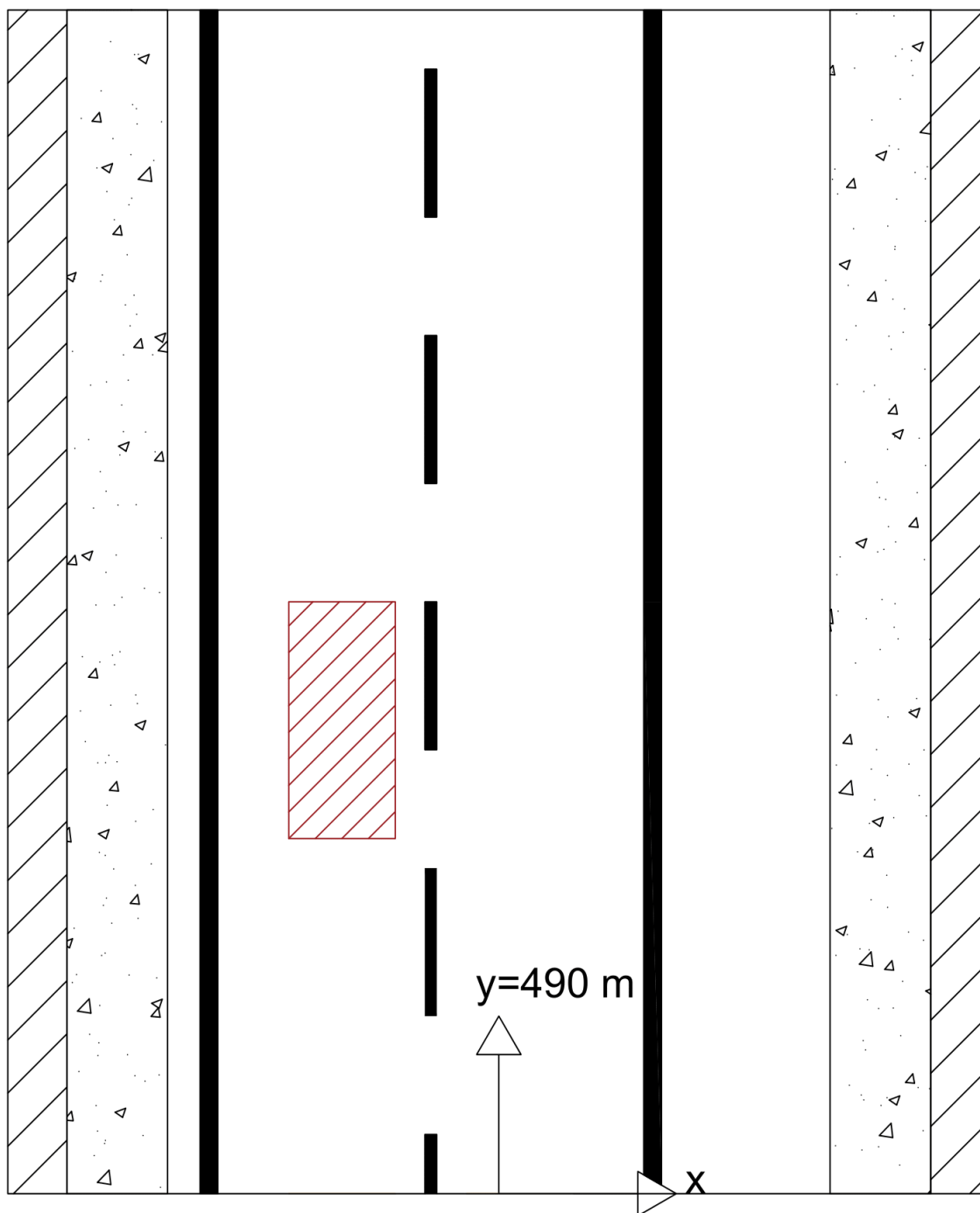


**Figura 4.21:** *Andamento della visibilità nella galleria – scenario B.1, sensori V.1 - V.5.*

Per la visibilità si nota che ad una quota di 2 m la soglia di sicurezza è garantita per tutta la durata dell'incendio, anche se si può notare un leggero disturbo (con visibilità pari a 29.4 m) dopo circa 25 minuti (1900 s). Questo comportamento, relativamente inatteso, è coerente con gli studi di letteratura [20], che identificano una lunghezza compresa tra 400 e 600 m come il limite per la presenza di fumi a quota bassa nel caso di ventilazione naturale.

#### 4.4.2: Automobile tradizionale in galleria rettilinea piana B.2

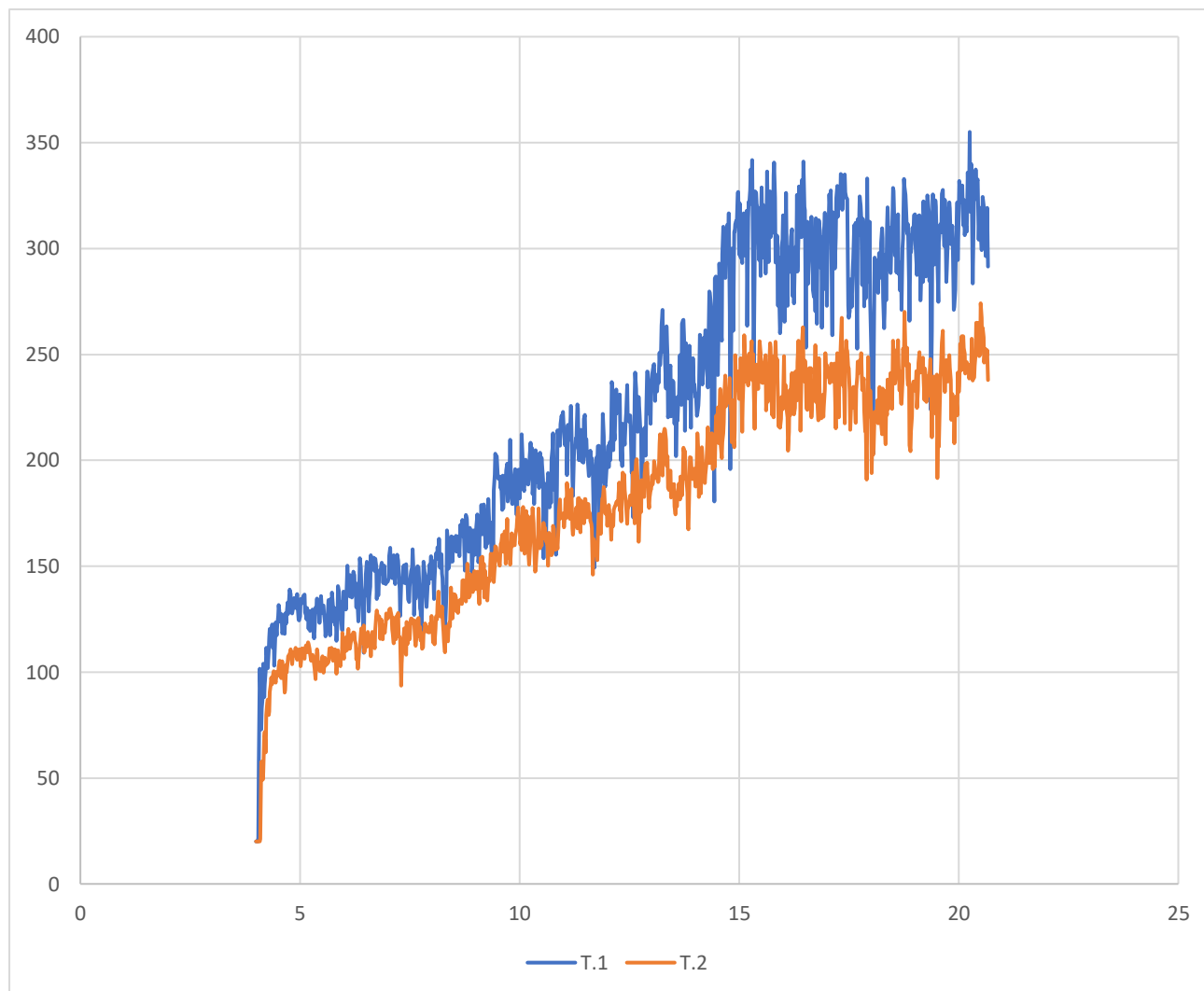
Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta nel paragrafo 4.3 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale descritto nel paragrafo 3.6.2; la Figura 4.22 rappresenta graficamente lo scenario nella sua interezza.



**Figura 4.22:** Schematizzazione geometrica dello scenario B.2.

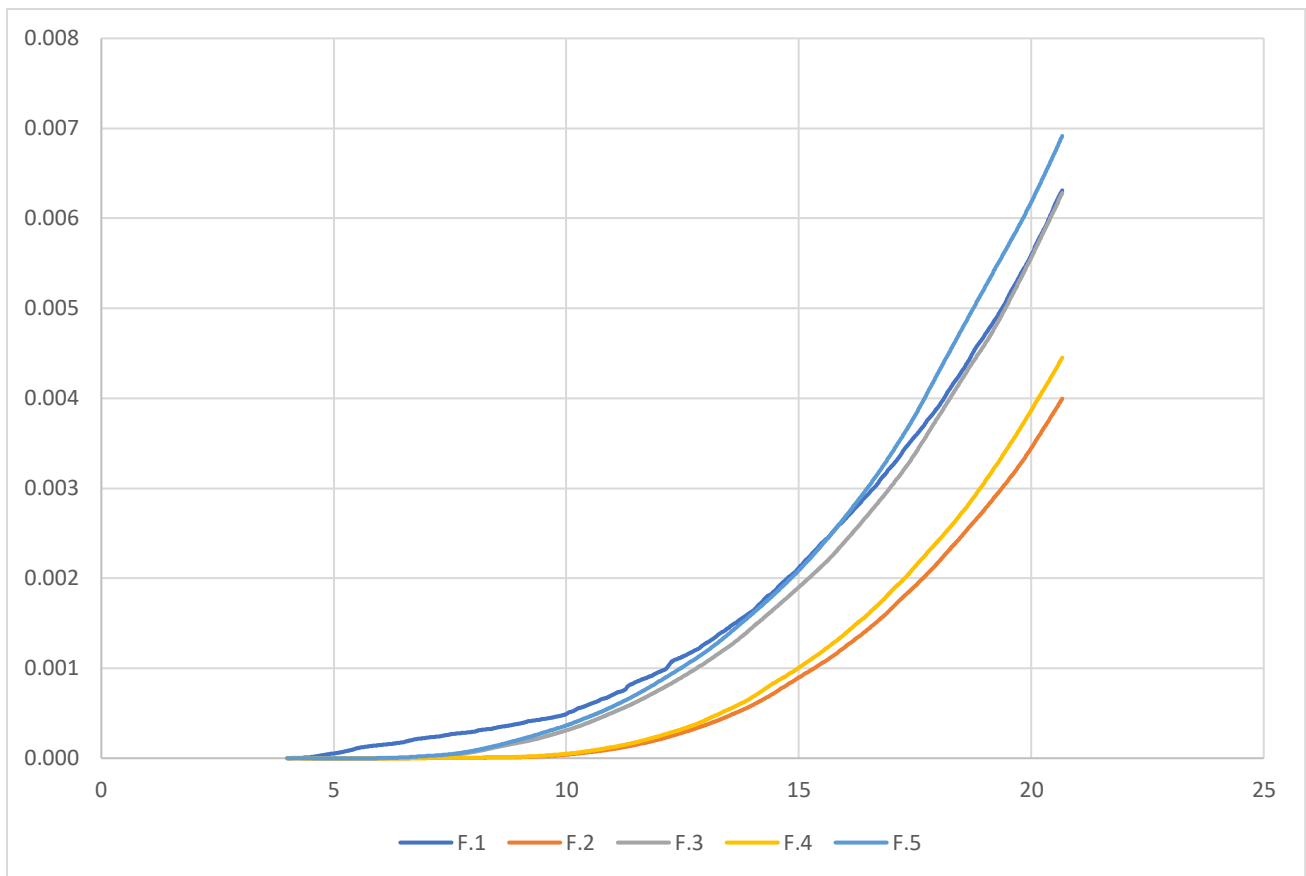
Questa simulazione ha avuto una durata di circa 20 minuti, per ridurre lo sforzo di calcolo complessivo, ma consentendo di effettuare valutazioni sulla gravità dello scenario almeno fino al picco della curva HRR e al completamento dell'esodo.

I risultati della simulazione sono stati riportati nella Figura 4.24 per il campo termico, Figura 4.25 per la FED. La visibilità risulta essenzialmente indisturbata per tutta la lunghezza della galleria e, pertanto, è stata omessa.



**Figura 4.23:** *Andamento della temperatura sopra all'automobile – scenario B.2, sensori T.1, T.2.*

Le temperature misurate sono coerenti con gli scenari già esaminati, con massimi di 355° C per la sonda T.1, 40 °C superiore rispetto a quella misurata nello scenario in campo aperto B.2 e di 28 °C superiore rispetto allo scenario con l'automobile elettrica B.1. La prima differenza è giustificabile in modo simile a quanto già visto in § 4.3.1.1, quindi è dovuta alla diversa dinamica di smaltimento dei fumi caldi all'interno della galleria. La causa della seconda, invece, va ricercata nella maggiore potenza emessa dall'automobile dotata di motore a combustione interna rispetto a quella elettrica (4860 vs. 4220 kW).



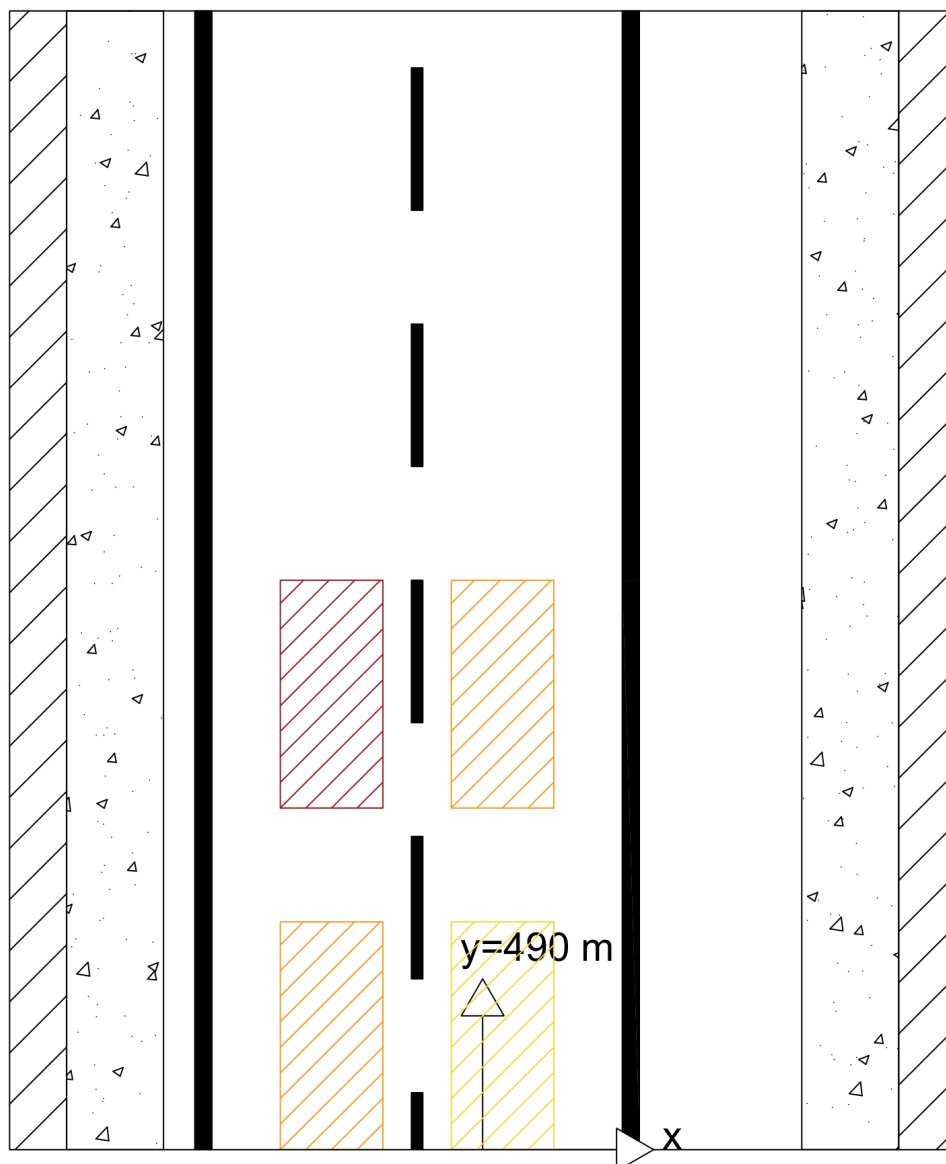
**Figura 4.24:** *Andamento della FED nei punti di misura – scenario B.2, sensori F.1 - F.5.*

I valori della FED sono comparabili con quelli ottenuti nello scenario B.1, replicando i valori più alti per i punti a 100 m rispetto a quelli a 10 m e indicando una preferenzialità per l’efflusso verso la porzione concorde con il senso di marcia della galleria. Il valore di picco raggiunto è di 0.0069 al termine della simulazione, mentre nel caso dello scenario B.1 il valore corrispondente si assesta su 0.0053. Di conseguenza, si può affermare che per l’automobile a combustione interna la FED inalata da un bersaglio, a parità di posizione considerata, è più alta e dovuta in gran parte alla maggiore potenza del focolare, che accompagna una maggiore emissione di effluenti. In entrambi i casi, però, la FED non supera il valore di soglia critico, consentendo l’evacuazione sicura degli occupanti.

#### 4.4.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria rettilinea

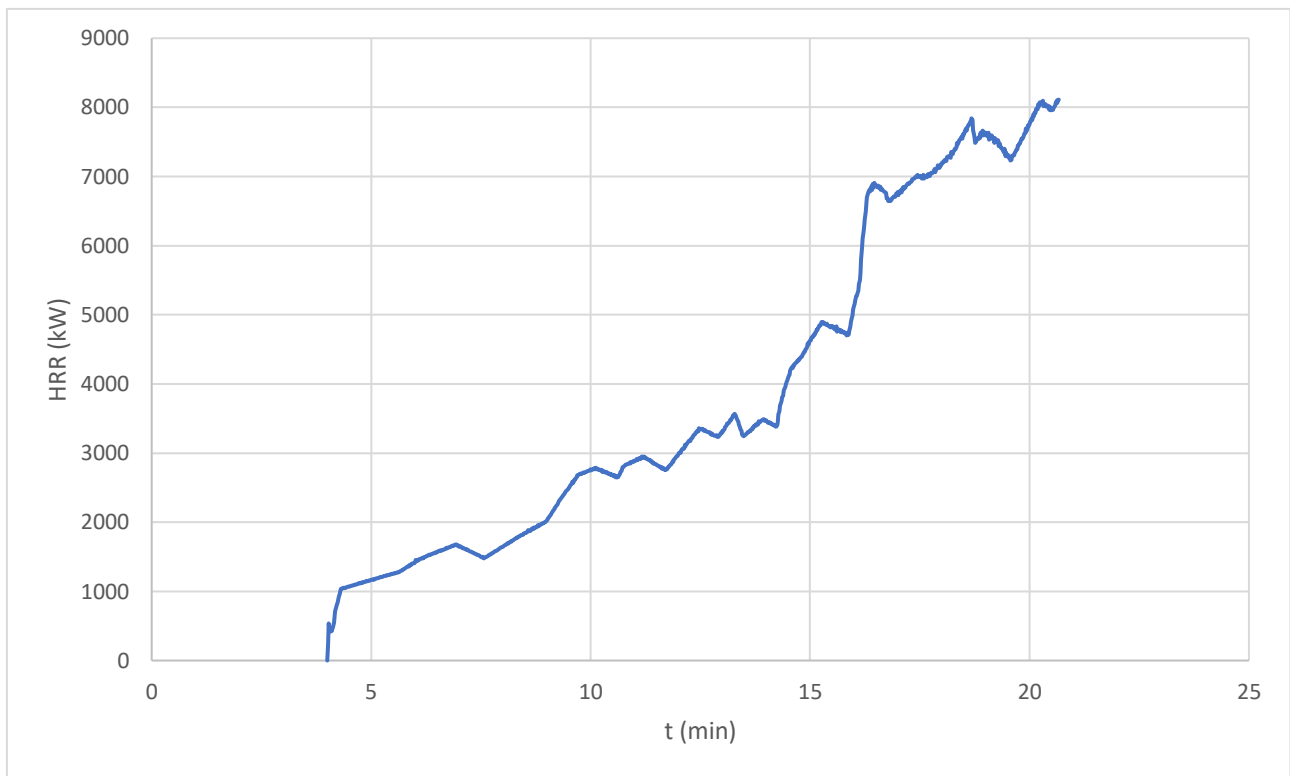
##### piana B.4

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria a quattro auto descritta nel paragrafo 4.3 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale descritto nel paragrafo 3.6.2. In Figura 4.25 è rappresentato lo scenario, che ha avuto una durata di circa 20 minuti. In sostanza, viene simulato uno scenario che interessi quattro automobili ad alimentazione tradizionale.



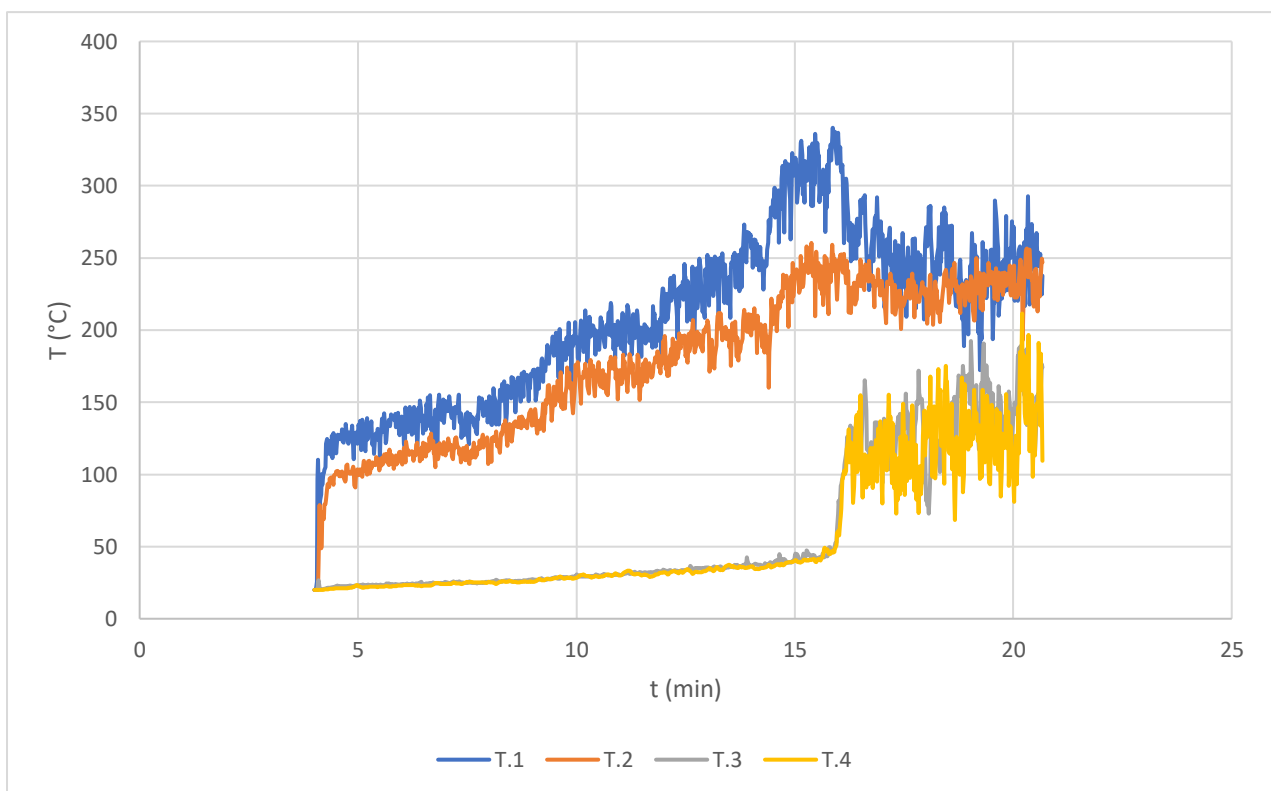
**Figura 4.25:** Schematizzazione geometrica dello scenario B.4.

Questo scenario è il più interessante tra quelli considerati nella presente sezione, in quanto la quantità di prodotti emessi è molto superiore e induce criticità per quanto riguarda la tenibilità dell'ambiente. I risultati della simulazione sono stati riportati in Figura 4.26 per l'HRR, Figura 4.27 per il campo termico, Figura 4.28 per la FED e Figure 4.29 - 4.31 per la visibilità.



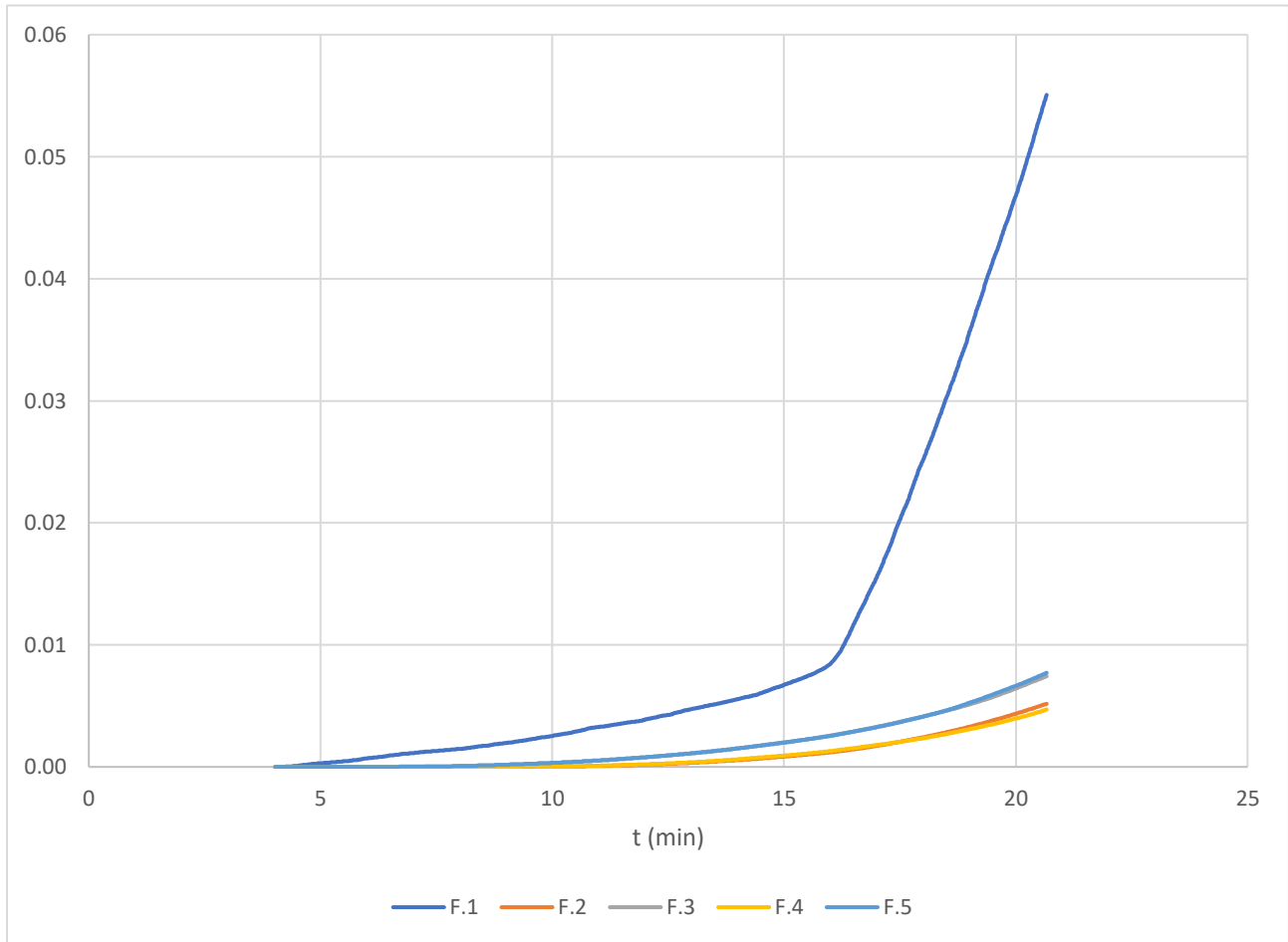
**Figura 4.26:** *Curva HRR misurata – scenario B.4.*

Questa curva HRR risulta più gravosa delle precedenti, in quanto le automobili che partecipano alla combustione sono quattro e ciò si riflette in una maggiore temperatura nei punti monitorati, come si può evincere dalla Figura 4.30.



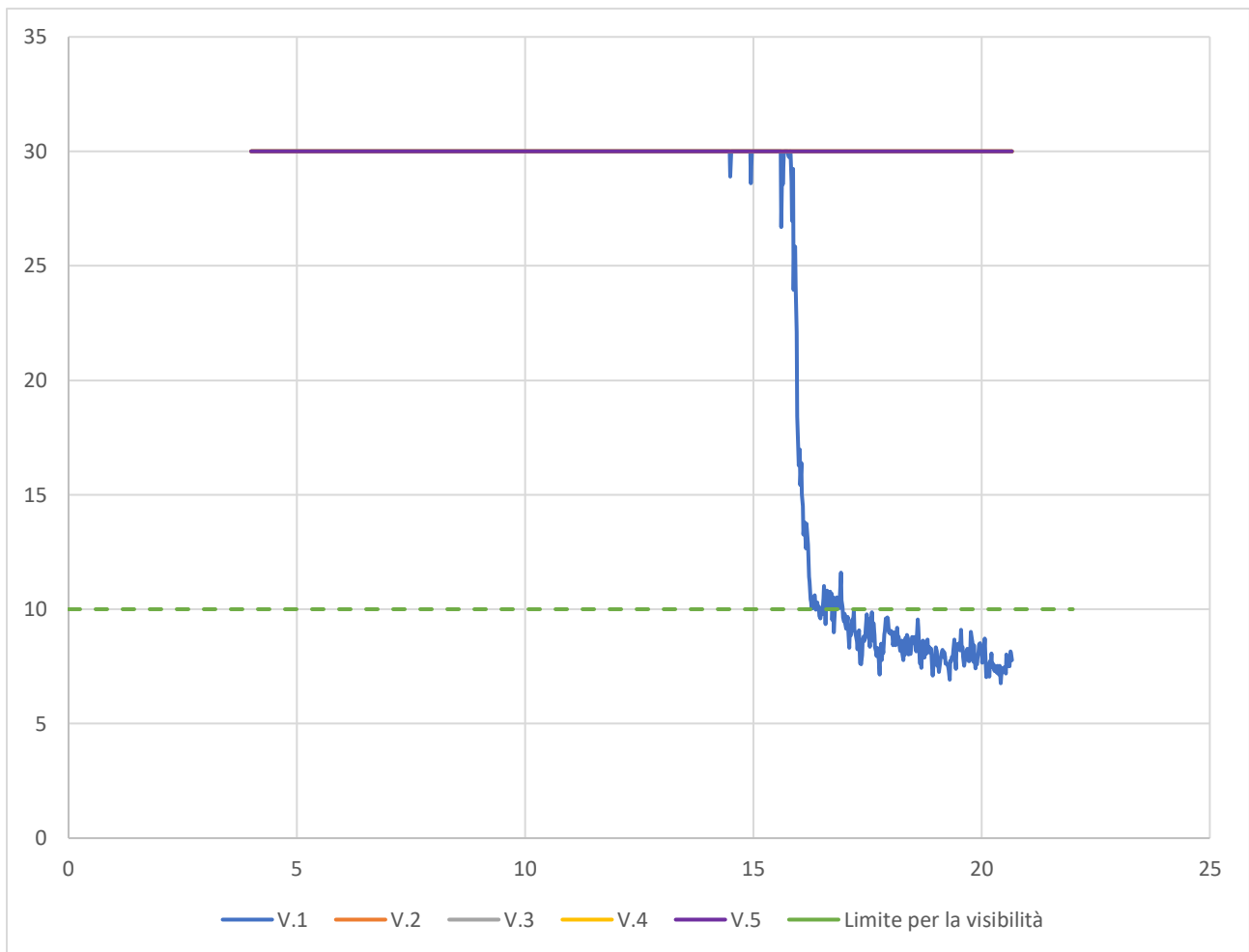
**Figura 4.27:** *Andamento della temperatura – scenario B.4, sensori T.1 - T.4.*

Anche la FED aumenta in modo decisamente marcato quando le due automobili cominciano a bruciare, come rappresentato in Figura 4.32 con il valore massimo ottenuto al termine dei 20 minuti di simulazione pari a circa 0.055, misurato dal sensore posto tra le due automobili. Tale valore è comunque superiore rispetto allo scenario B.1 e segnala che l'entità dell'incendio è un parametro particolarmente critico nell'evoluzione dello scenario, specialmente se si esamina la rapida crescita della FED nel tempo.



**Figura 4.28:** *Andamento della FED nei punti di misura – scenario B.4, sensori F.1 - F.5.*

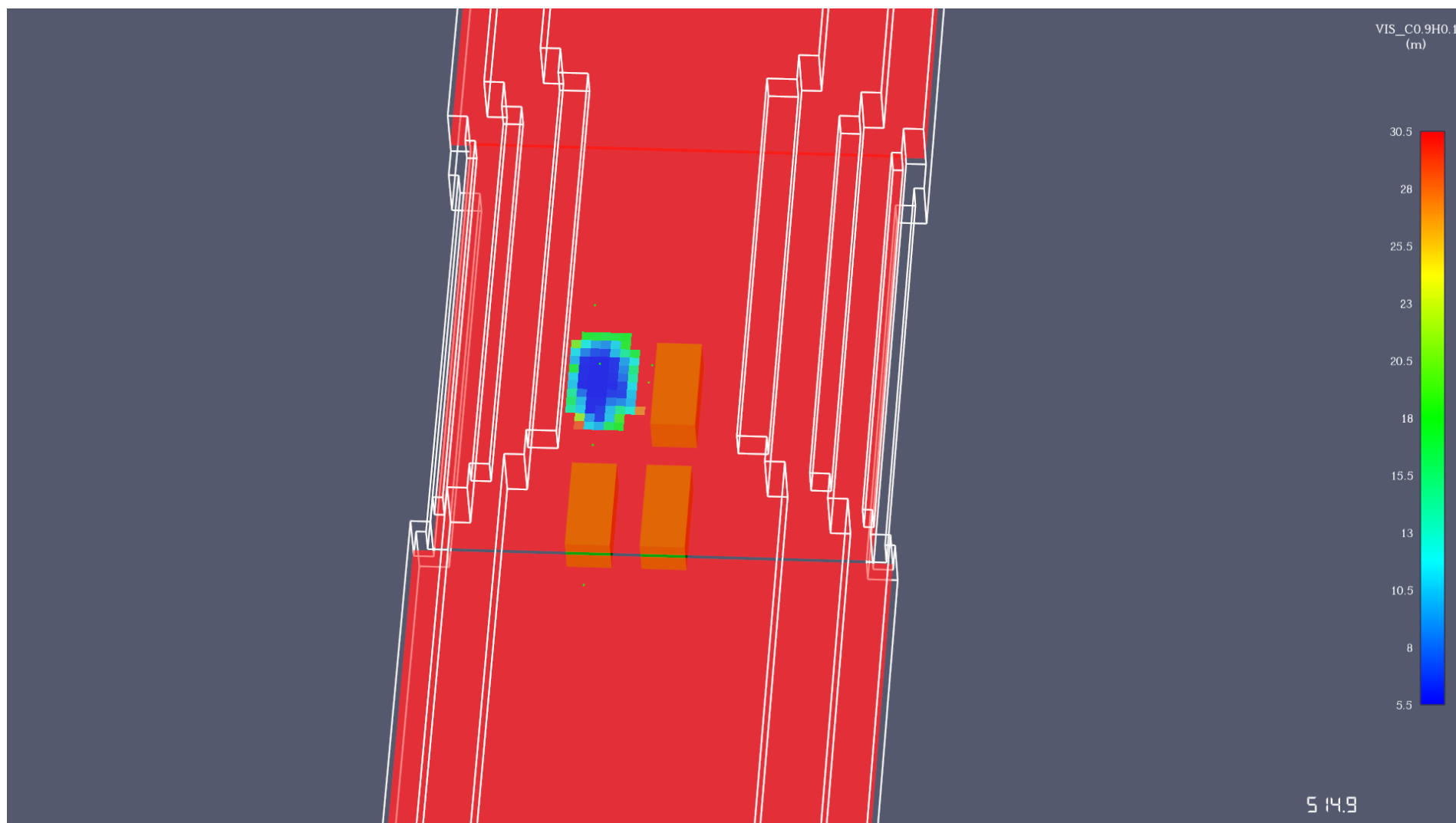
Ciononostante, il valore ottenuto rientra ancora nel limite di 0.1 fissato per la FED, segnale che l'evacuazione degli occupanti può compiersi con basso rischio.



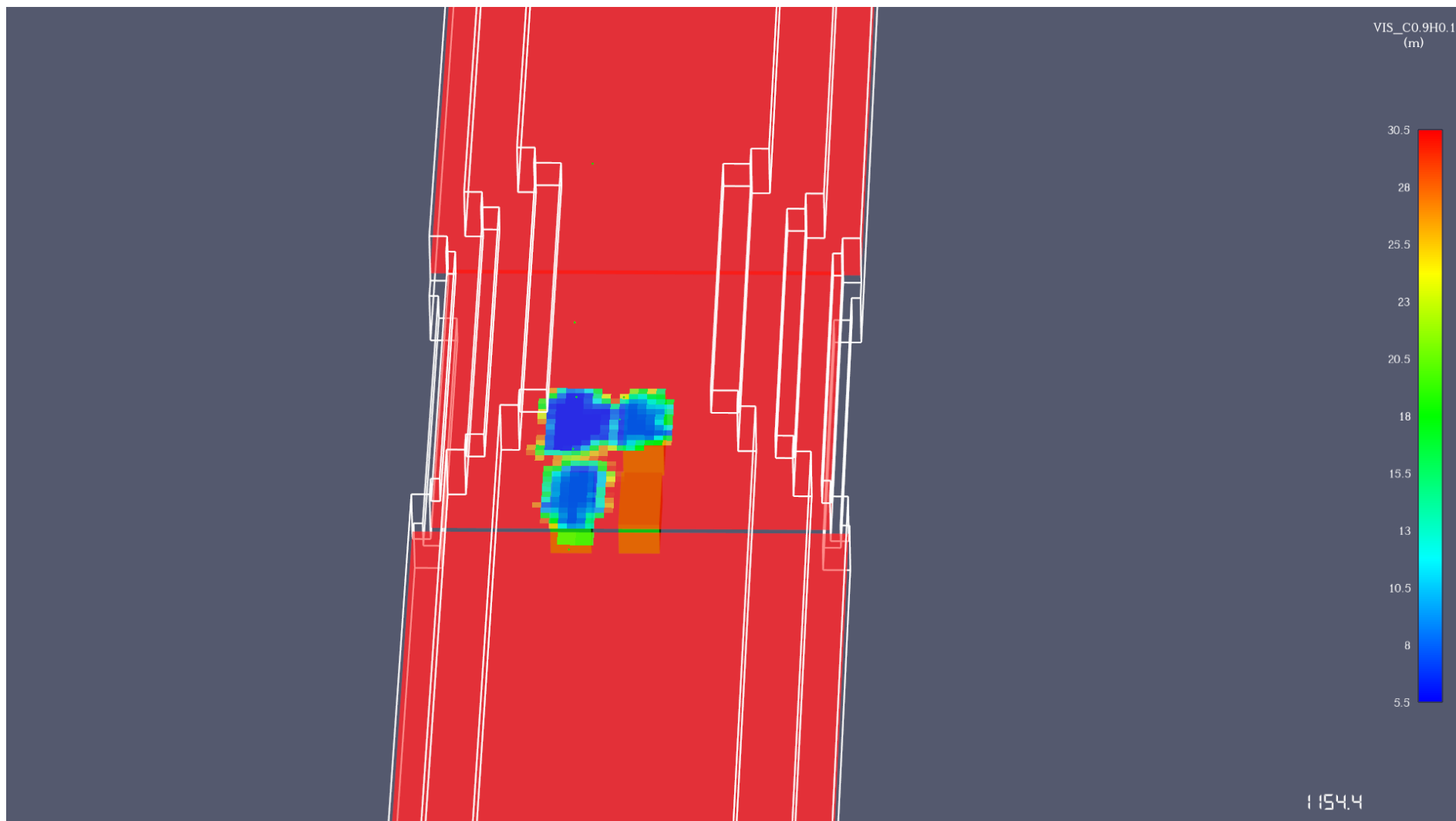
**Figura 4.29:** *Andamento della visibilità nella galleria – scenario B.4, sensori V.1 - V.5.*

Le Figure 4.29 - 4.31 fanno capire in quale zona vi sia la diminuzione della visibilità, che avviene tra le due automobili in posizione più avanzata. Sebbene l'estensione di questa zona sia limitata, questa intensa diminuzione può causare difficoltà nell'operatività dei soccorritori, specialmente se in quei momenti dovessero avvicinarsi per cominciare le operazioni di controllo e spegnimento dell'incendio.





**Figura 4.30:** *Andamento della visibilità lungo la galleria a  $z=2$  m in un contesto di visibilità indisturbata – scenario B.4.*



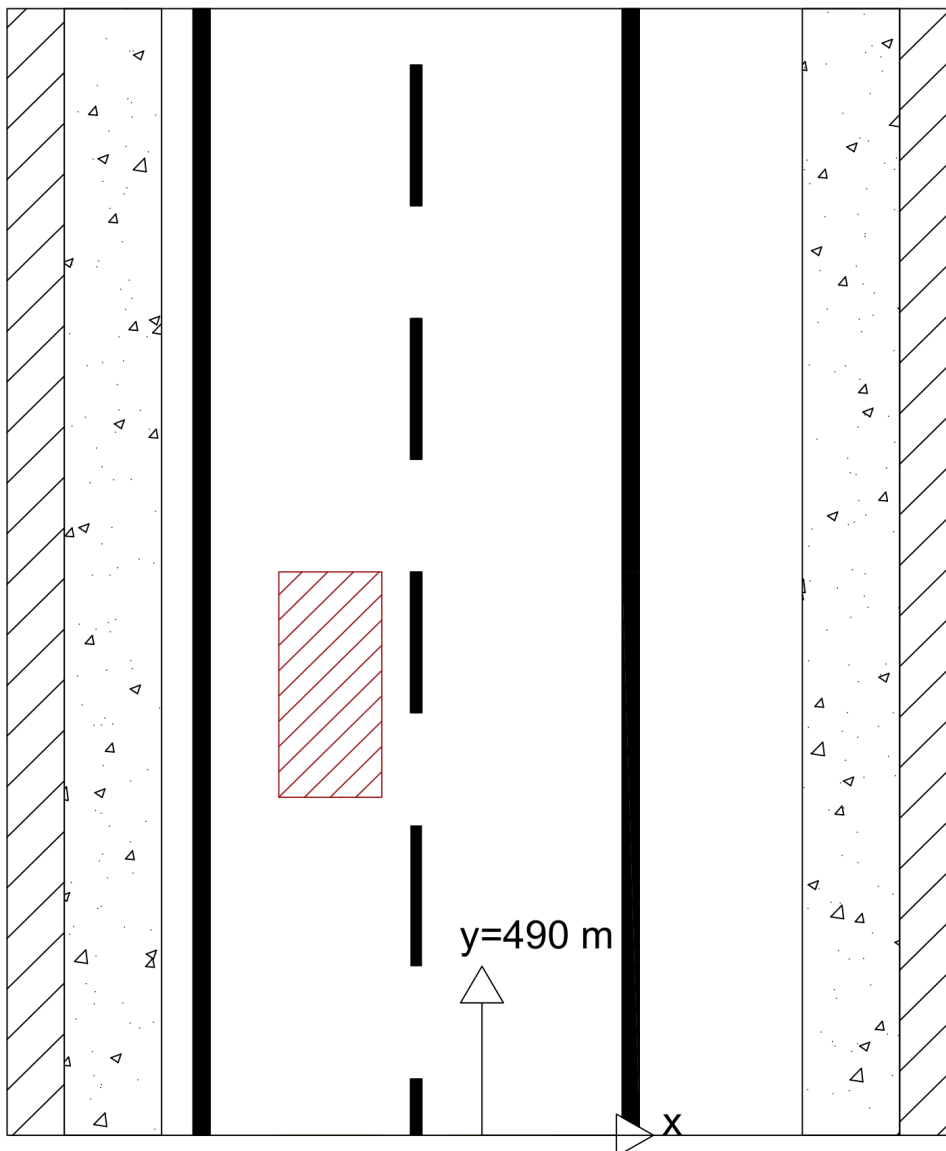
**Figura 4.31:** *Andamento della visibilità lungo la galleria a  $z=2$  m nel momento di minima visibilità – scenario B.4.*

## 4.5: Scenari in galleria rettilinea inclinata

Il secondo scenario di incendio in galleria preso in considerazione è quello di una galleria inclinata, utilizzando il modello geometrico presentato in § 1.5.2. Lo scenario è stato ottenuto inclinando il vettore accelerazione gravitazionale pari all'1.5%. Nelle Figure 4.32, 4.36 e 4.44 sono state comunque riportate le condizioni iniziali.

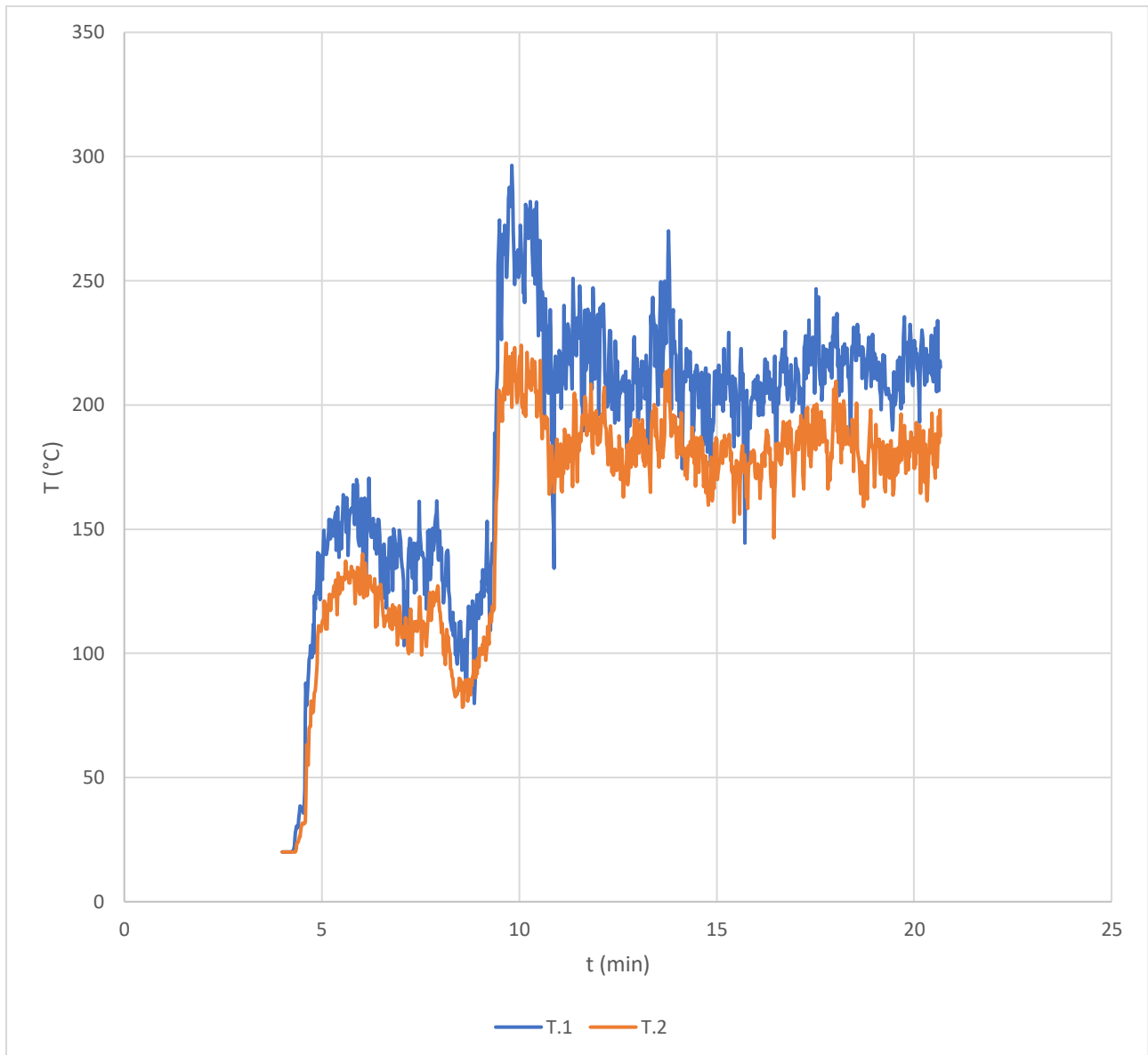
### 4.5.1: Automobile elettrica in galleria rettilinea inclinata C.1

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta in § 4.4 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile elettrica descritto in § 3.6.2. In Figura 4.32 è data la rappresentazione grafica dello scenario, che è analizzato per una durata di 20 minuti.

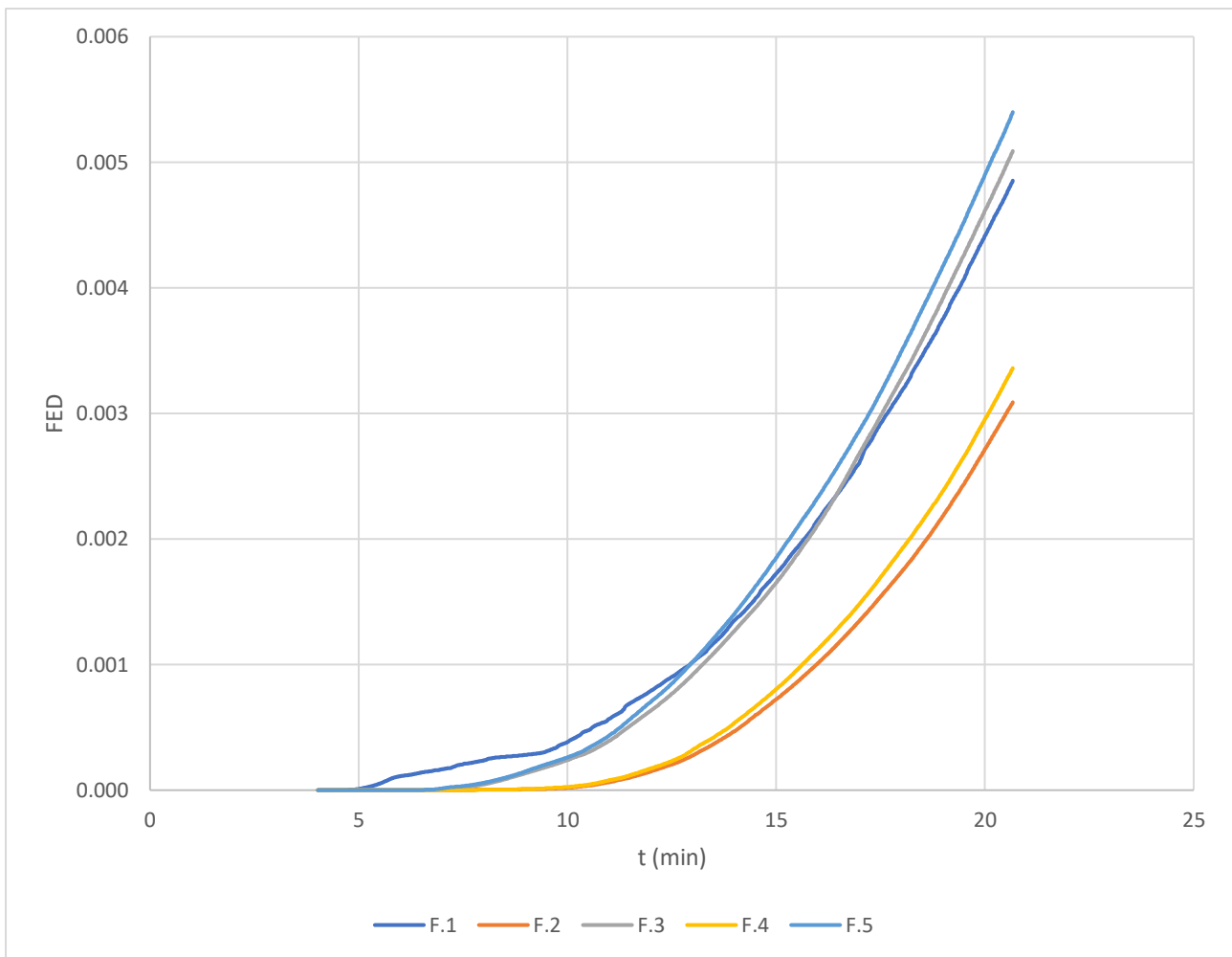


**Figura 4.32:** Schematizzazione geometrica dello scenario C.1.

Dalla Figura 4.33 emerge che anche la temperatura sopra all'automobile ha un andamento simile agli altri casi di auto elettrica già visti, anche se il valore massimo è inferiore rispetto alla galleria rettilinea, probabilmente perché la geometria determina una direzione preferenziale per lo smaltimento dei fumi caldi, che tendono ad andare verso l'alto per galleggiamento, determinando una sorta di "effetto camino".



**Figura 4.33:** Andamento della temperatura nei punti monitorati – scenario C.1, sensori T.1, T.2.



**Figura 4.34:** *Andamento della FED – scenario C.1, sensori F.1 - F.5.*

Una prima differenza si nota con riferimento alla FED, dove le curve poste ad una quota più alta hanno una FED corrispondente maggiore. Questo suggerisce che i fumi, essendo più caldi dell'aria, si dirigano maggiormente verso il portale d'uscita, piuttosto di quello in entrata. Ciononostante, la differenza non è così marcata da indicare un rischio maggiore per un occupante che dovesse scegliere la direzione verso il portale a quota superiore.

#### 4.5.2: Automobile tradizionale in galleria rettilinea inclinata C.2

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta in § 4.4 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale riportate in § 3.6.2. In Figura 4.35 viene riassunto graficamente lo scenario, che è analizzato per una durata di circa 85 minuti.

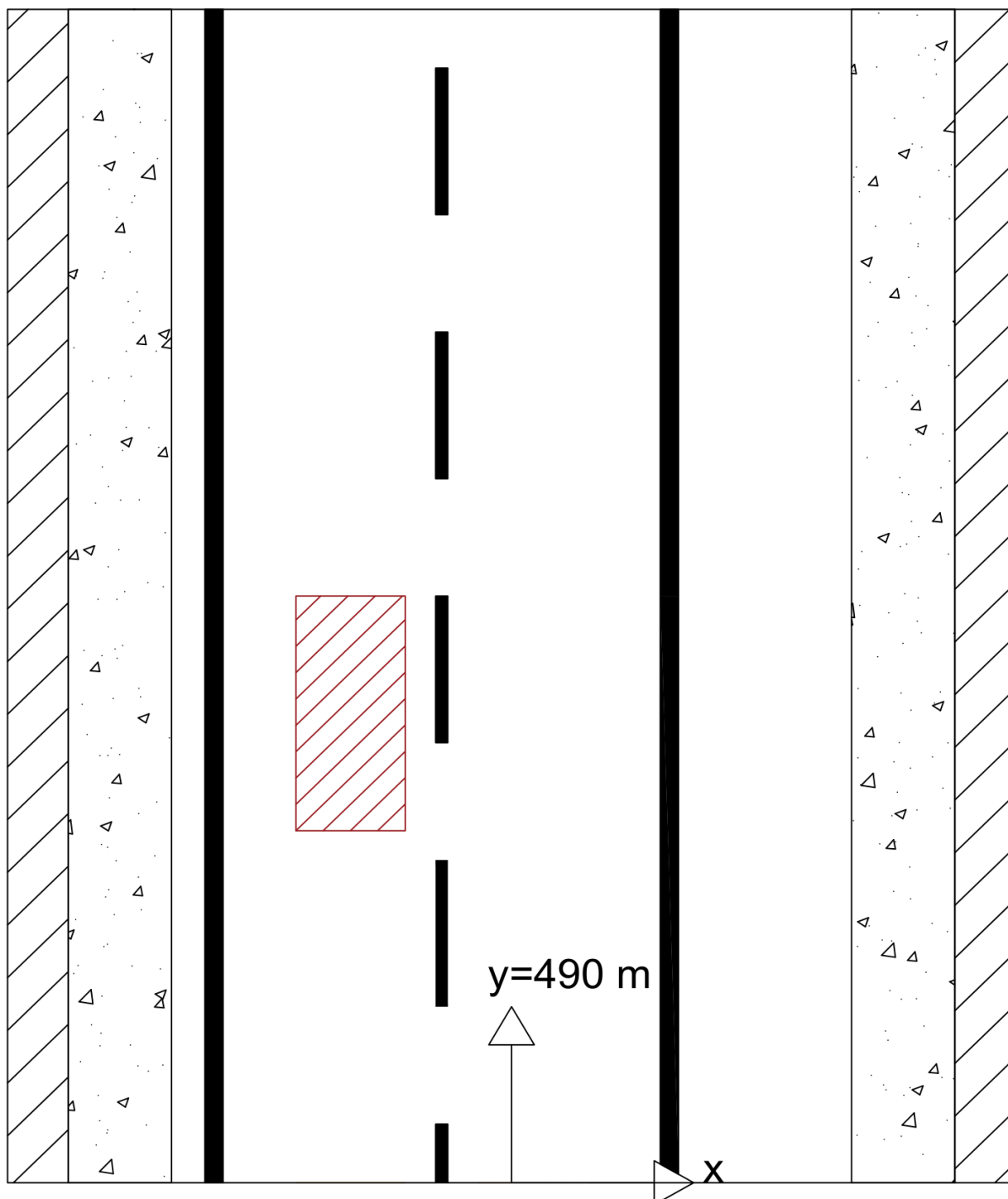
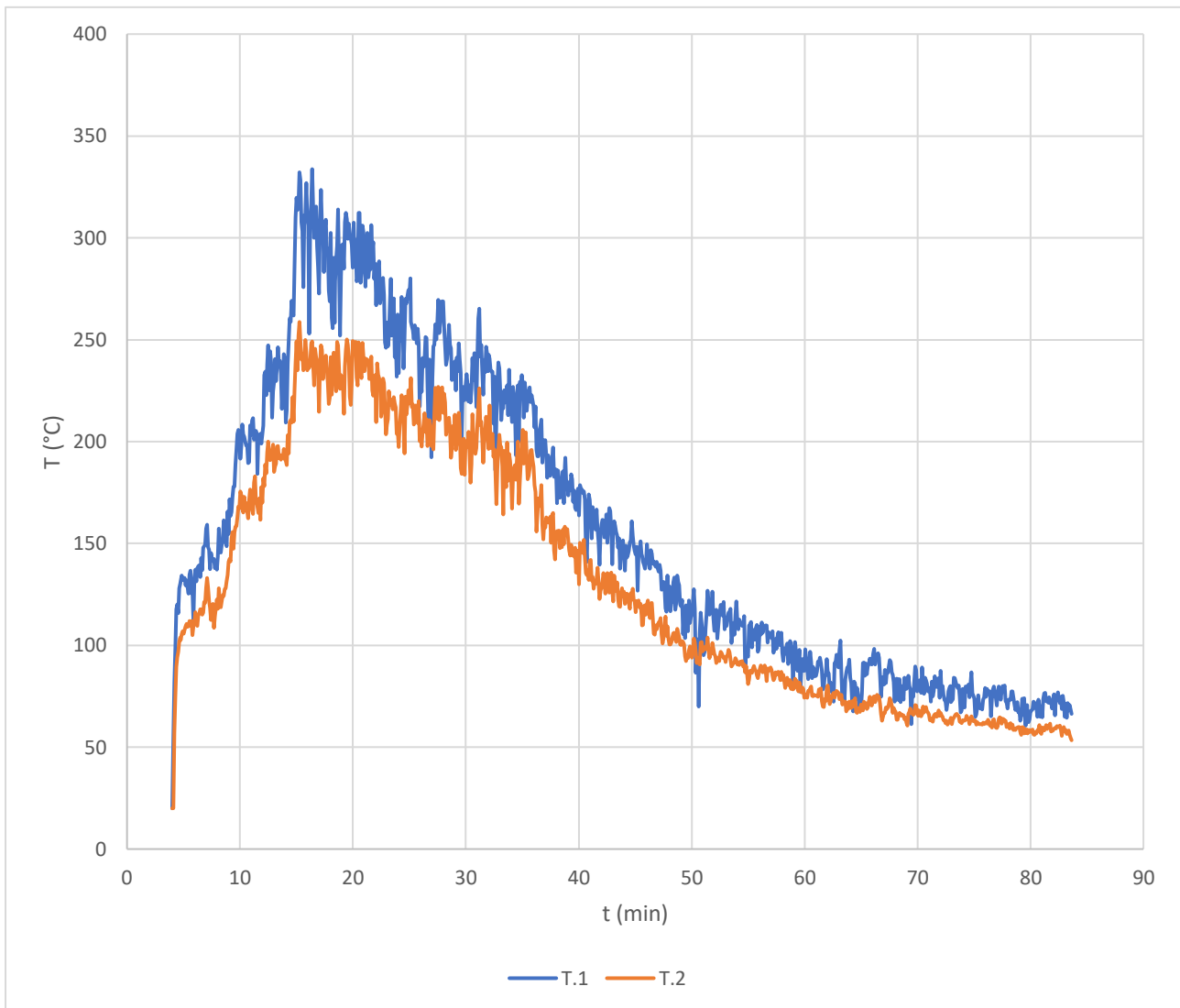


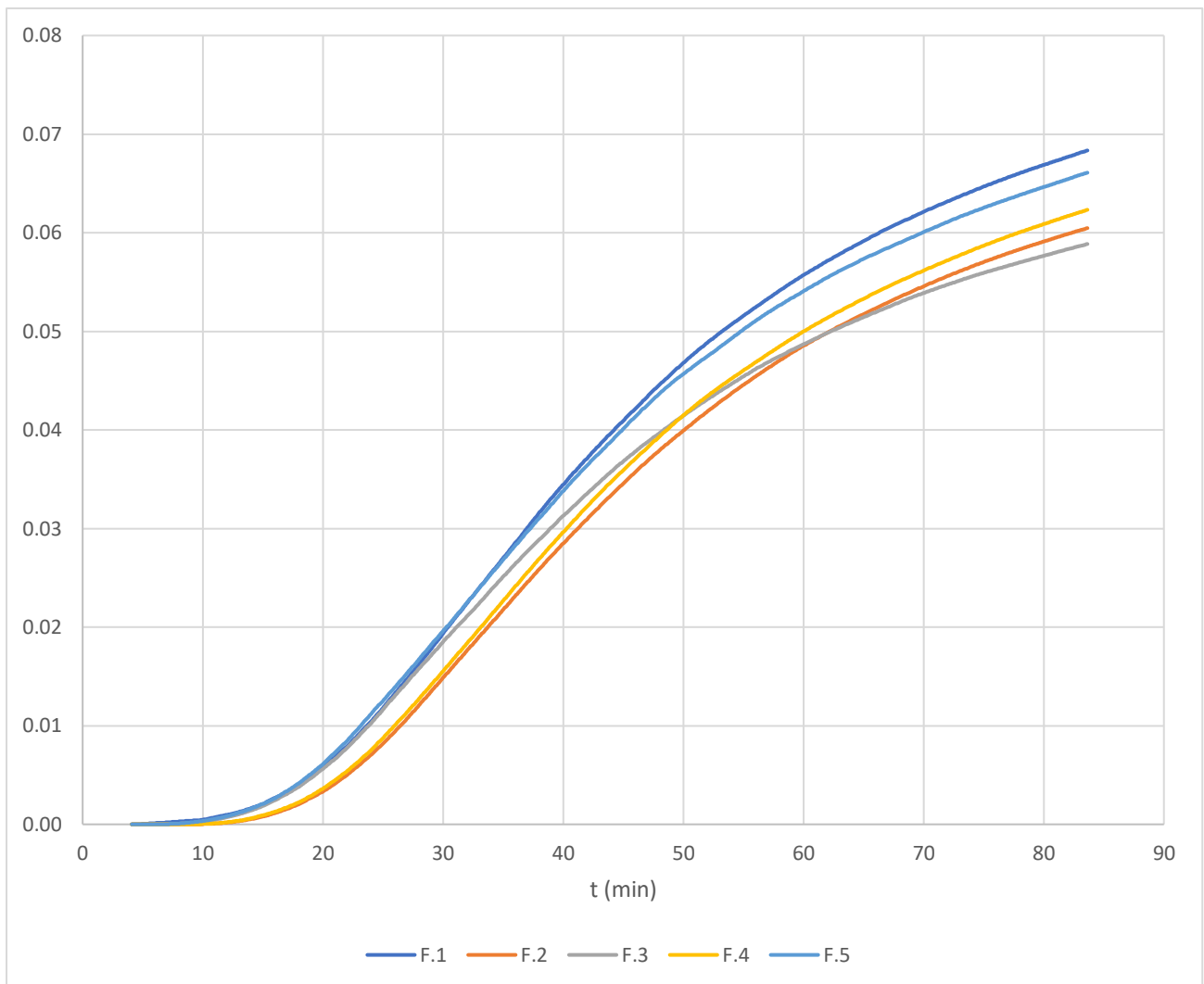
Figura 4.35: Schematizzazione geometrica dello scenario C.2.

I risultati della simulazione sono stati riportati nella Figura 4.36 per il campo termico, nella Figura 4.37 per la FED e nella Figura 4.38 per la visibilità.



**Figura 4.36:** *Andamento della temperatura nei punti monitorati – scenario C.2, sensori T.1, T.2.*

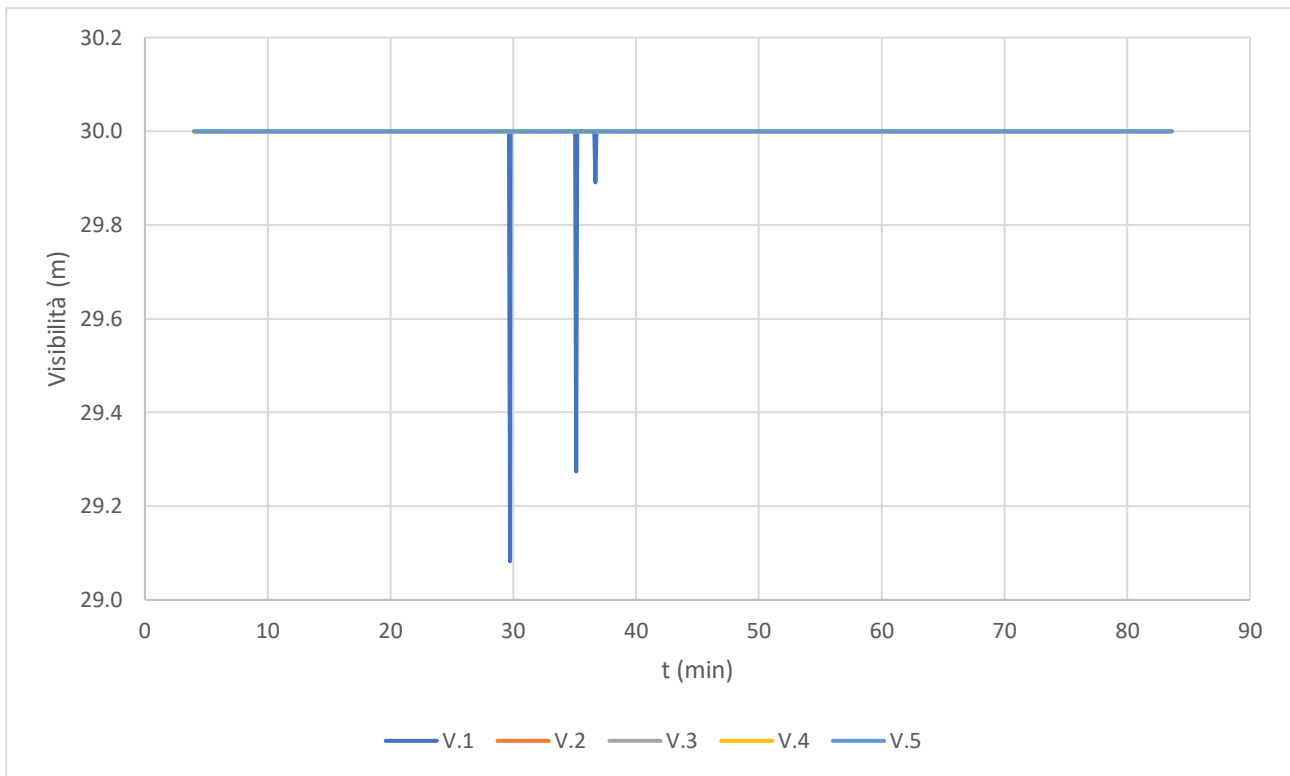
I dati misurati di temperatura indicano un aumento progressivo della temperatura e, come già visto per lo scenario C.1, registrano una temperatura massima inferiore rispetto all'omologo scenario nella galleria rettilinea (333 °C contro 355 °C dello scenario B.2), rafforzando l'ipotesi della presenza dell'effetto camino.



**Figura 4.37:** *Andamento della FED nei punti di misura – scenario C.2, sensori F.1 - F.5.*

La FED riportata in Figura 4.37 indica come i valori raggiunti dall'automobile tradizionale nel corso del presente scenario sono maggiori di quelli riportati nel caso di un incendio di automobile elettrica (0.0066 contro 0.0055 dello scenario C.1). Inoltre, la distribuzione nello spazio è più uniforme, con una differenza minore tra gli andamenti dei sensori posti ad una distanza di 10 m e quelli posti a 100 m. La differenza tra la FED misurata tra i bersagli F.3 e F.3, posti ad una quota più alta, e i bersagli F.4 e F.5, aventi quota più bassa, è più grande di quella registrata della galleria rettilinea, specialmente dopo un periodo medio-lungo.





**Figura 4.38:** *Andamento della visibilità – scenario C.2, sensori V.1 - V.5.*

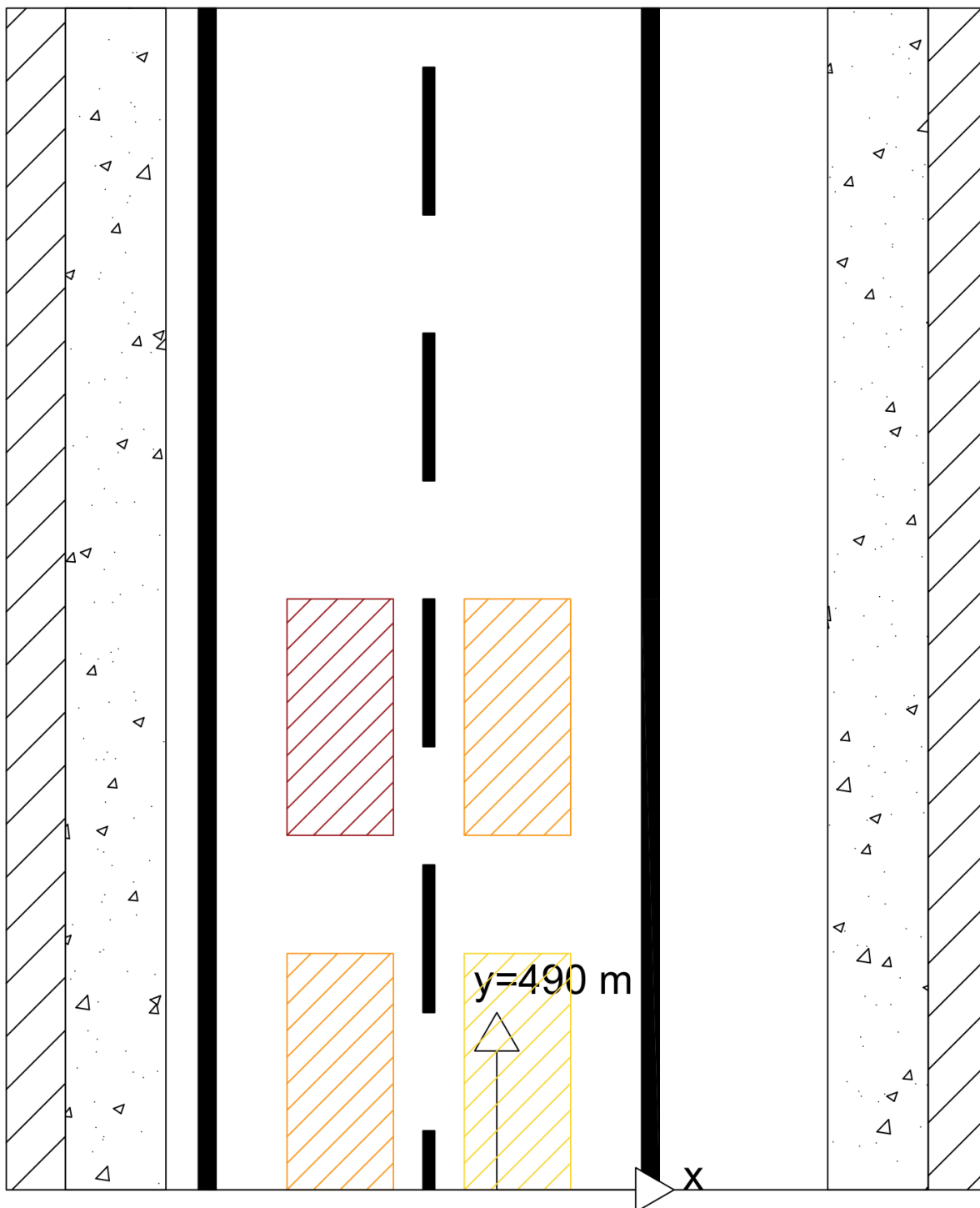
La visibilità si conferma essere buona in tutto il campo misurato, con variazioni poco rilevanti (comunque inferiori ad 1 m) in prossimità dell'automobile quando l'incendio è completamente sviluppato.

### 4.5.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria rettilinea

#### inclinata C.4

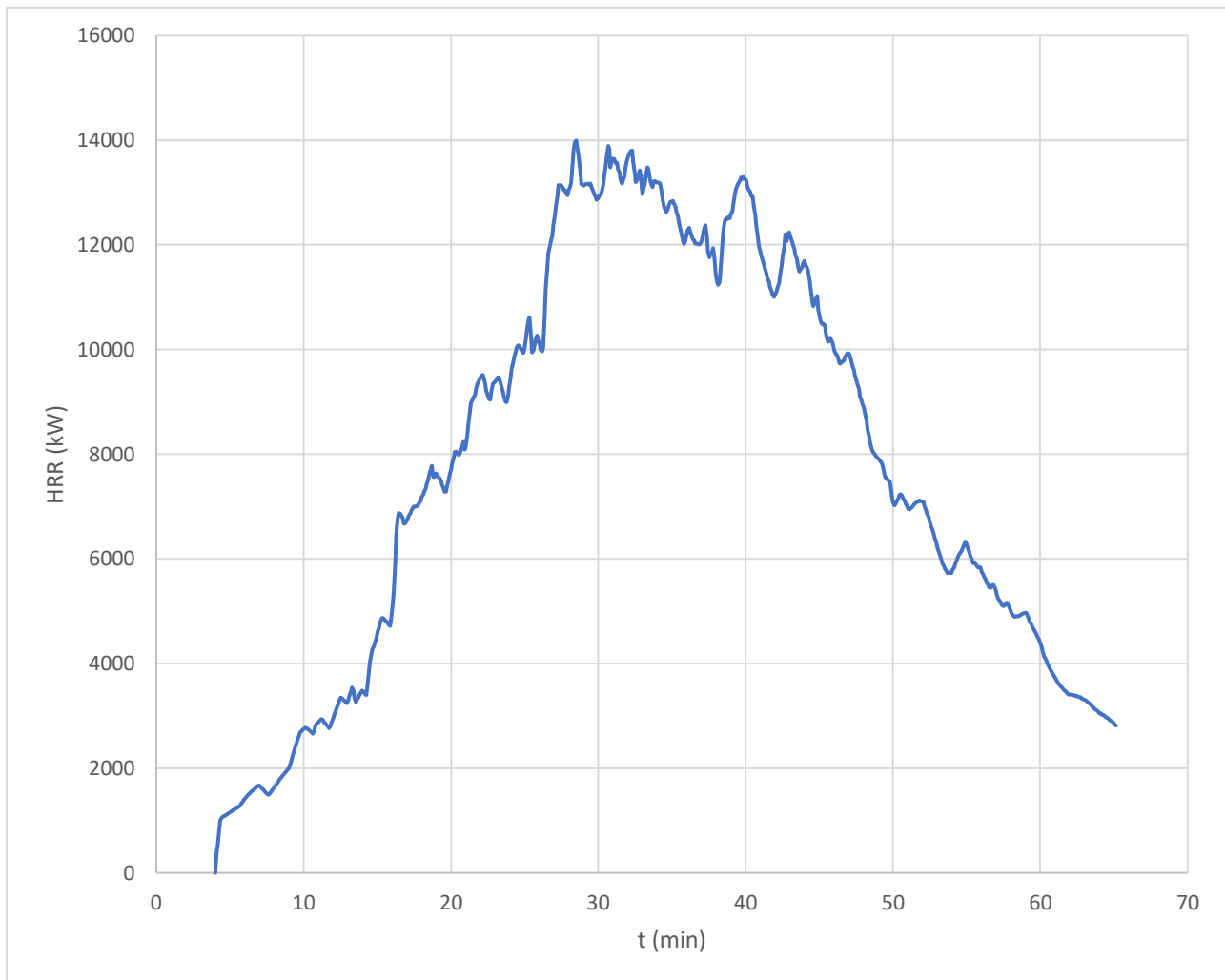
Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria a quattro auto descritta in § 4.3 e 4.4 con le caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale riportate in § 3.6.2.

Figura 4.39 riassume graficamente lo scenario, avente durata pari a 65 minuti.



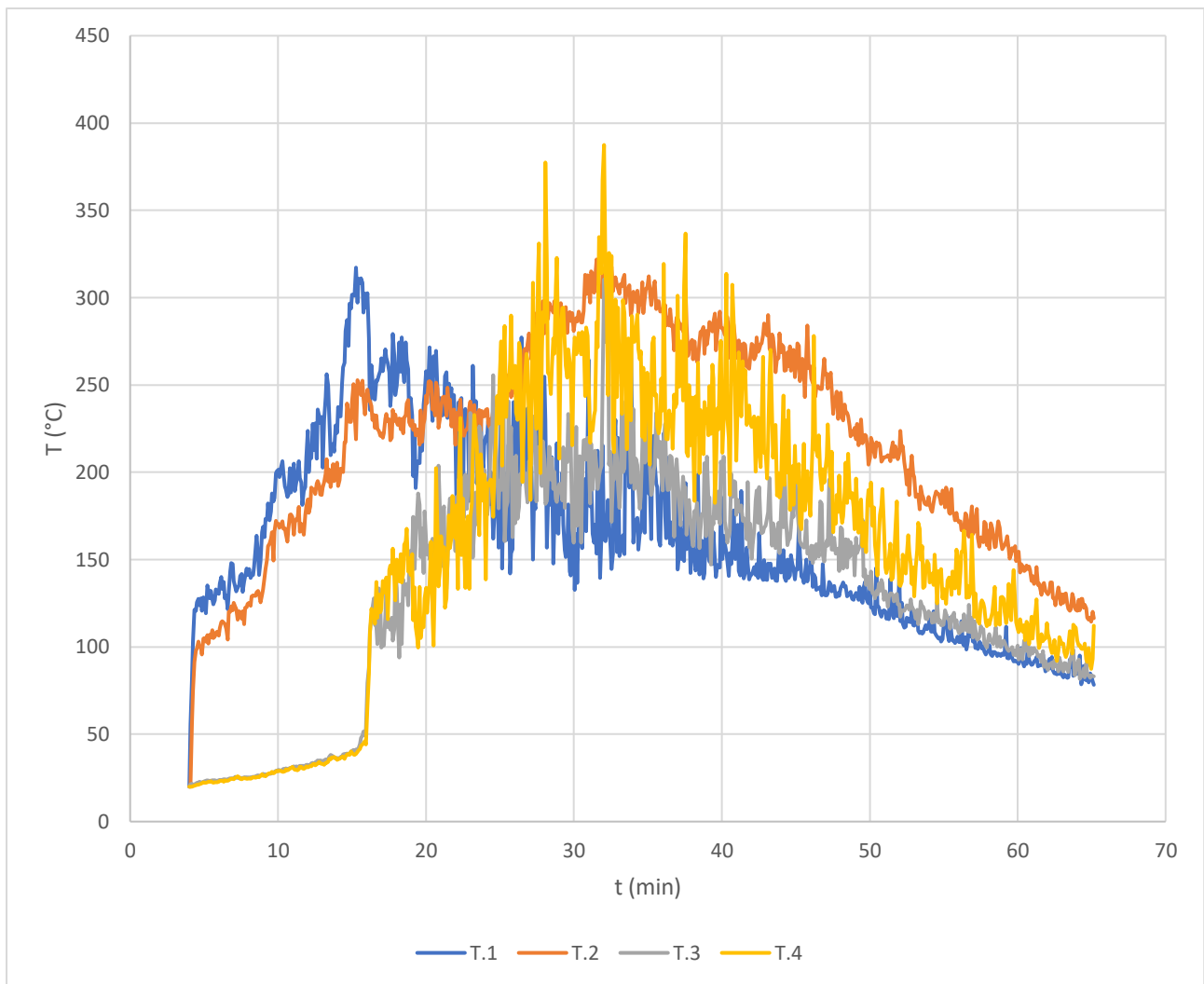
**Figura 4.39:** Schematizzazione geometrica dello scenario C.4.

I risultati della simulazione sono stati riportati nella Figura 4.40 per l'HRR, nella Figura 4.41 per il campo termico, nella Figura 4.42 per la FED e nella Figura 4.43 per la visibilità.



**Figura 4.40:** *Curva HRR misurata – scenario C.4.*

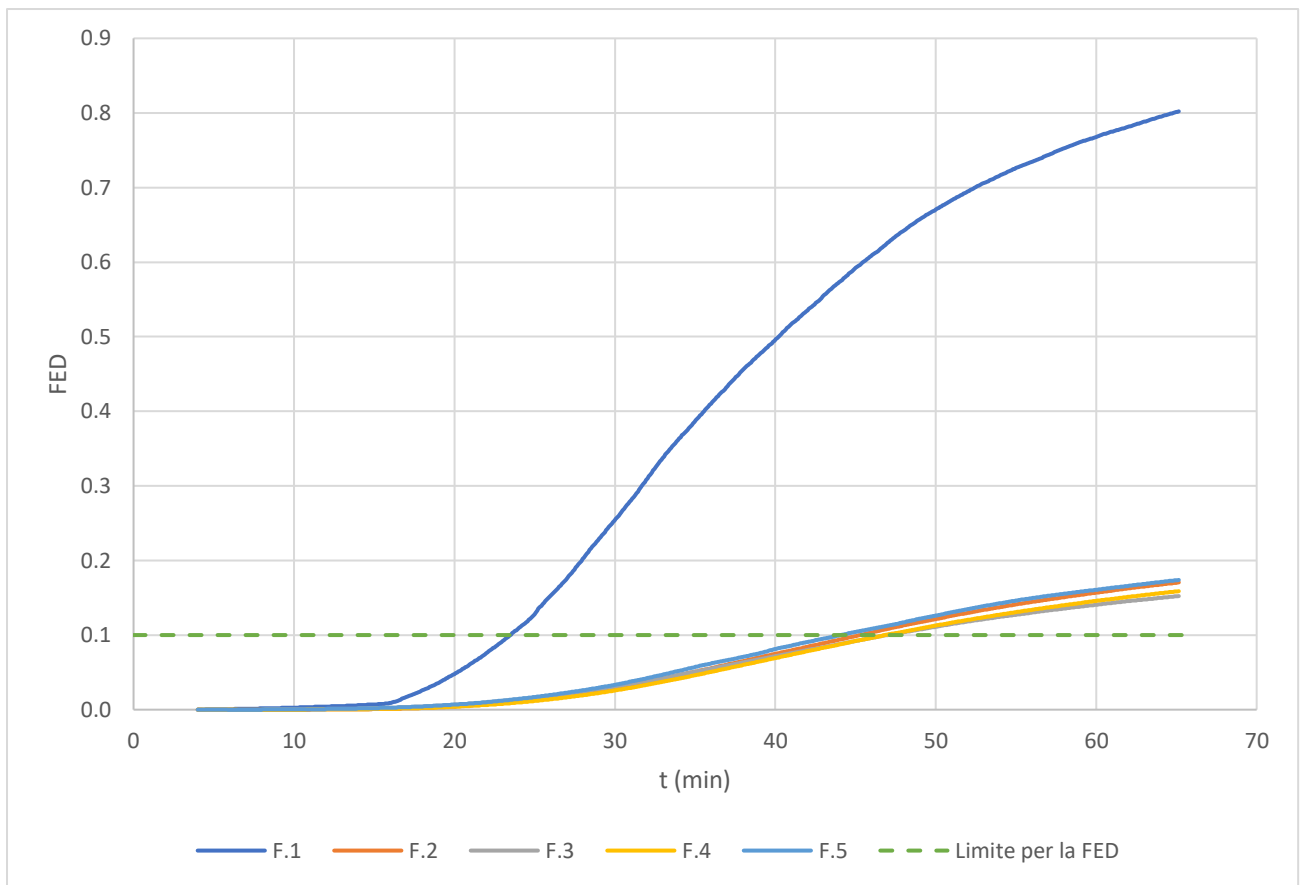
La curva HRR tiene in maniera cumulata di tutte e quattro le auto incendiate e, pertanto, ha un valore di picco considerevole, pari a circa 14 MW dopo circa 28 minuti. La durata della simulazione consente di effettuare valutazioni valide anche per la sicurezza dei soccorritori.



**Figura 4.41:** *Andamento della temperatura – scenario C.4, sensori T.1 - T.4.*

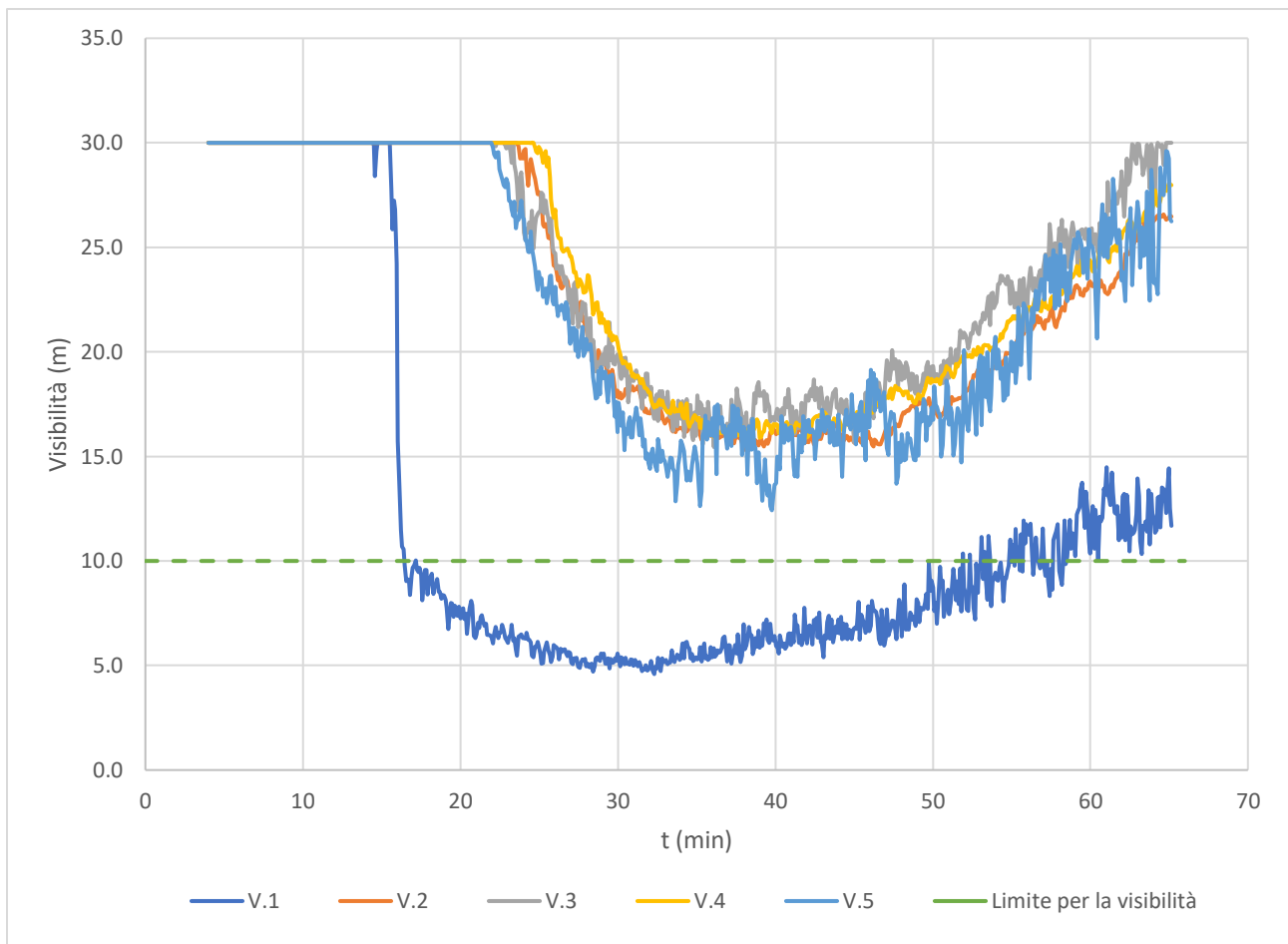
La temperatura, pur mantenendo inizialmente un andamento simile a quelli dell'automobile singola, quando avviene l'innesco delle successive subisce una variazione rilevante. Il valore massimo si attesta su circa 385 °C, misurato dal sensore posto tra le automobili in corsia di sorpasso. Inoltre, a quota 7 m la temperatura monitorata è nettamente superiore dei casi precedentemente discussi.

Inoltre, la temperatura presenta un andamento molto più irregolare dopo l'accensione delle altre automobili, a suggerire una notevole turbolenza in conseguenza all'incendio già presente. Questo scenario, quindi, rispetto ai precedenti presenta due differenze sostanziali: valori massimi e andamento della temperatura più gravosi e uno spostamento del punto più critico di incendio indicativamente al centro delle auto interessate dall'incendio.



**Figura 4.42:** *Andamento della FED – scenario C.4, sensori F.1 - F.5.*

In questo caso la FED assume valori molto alti e inaccettabili per la permanenza della persona sul posto dopo i primi 25 min. Perciò, i soccorritori dovranno prestare cautela ed essere sicuramente forniti di bombole anche per le più semplici operazioni in prossimità dell'incendio. Ciononostante, l'esodo non dovrebbe essere reso più difficoltoso per l'incapacitamento, in quanto, per gli altri punti di misura, il valore soglia di 0.1 viene superato dopo circa 40 min, quindi in un tempo molto superiore a quello teoricamente richiesto per l'evacuazione.



**Figura 4.43:** *Andamento della visibilità nella galleria – scenario C.4.*

Come era già stato suggerito dal comportamento della temperatura, la visibilità assume valori critici, specialmente in prossimità delle automobili, dove è inferiore a 5 m per un lungo periodo (anche se successivo all'evacuazione). Dopo circa 23 min, quindi approssimativamente in corrispondenza del picco della curva HRR, si verifica una marcata diminuzione della visibilità anche a 100 m dall'incendio seguita, dopo pochi minuti, da un calo della visibilità per i sensori posti a 10 m.

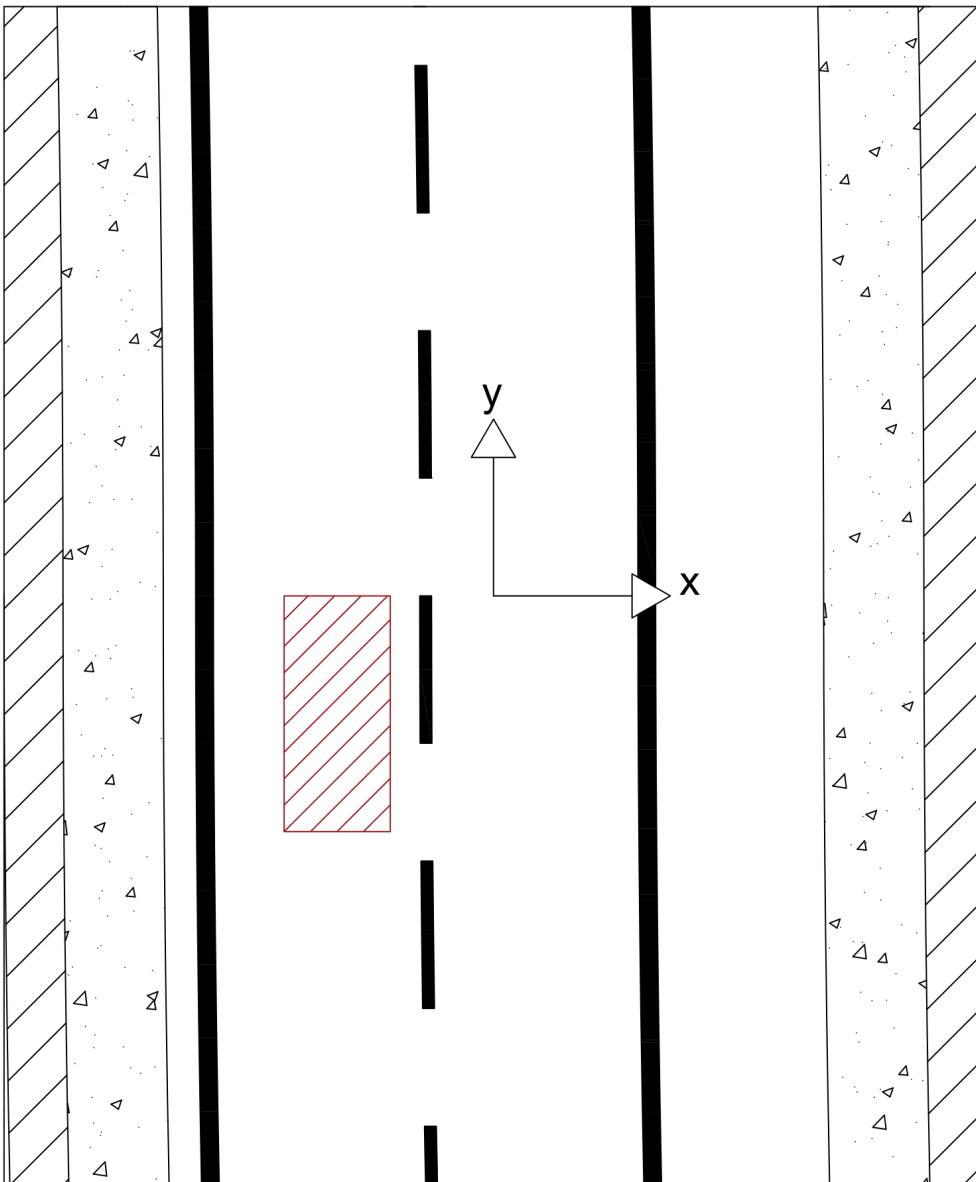
Ancora una volta, il sensore più critico tra quelli posti a 100 m di distanza è quello localizzato ad una quota superiore. Perciò, in queste condizioni l'intervento dei soccorritori dovrebbe avvenire idealmente dal lato posto alla quota più bassa, per garantire loro le migliori condizioni di visibilità.

## 4.6: Scenari in galleria piana con doppia curva

L'ultimo scenario di incendio preso in considerazione è quello di una galleria con una doppia curva di raggio 500 m, utilizzando il modello geometrico presentato in § 1.5.3. La zona in prossimità dell'origine degli incendi è stata riepilogata caso per caso nelle Figure 4.44, 4.48 e 4.52.

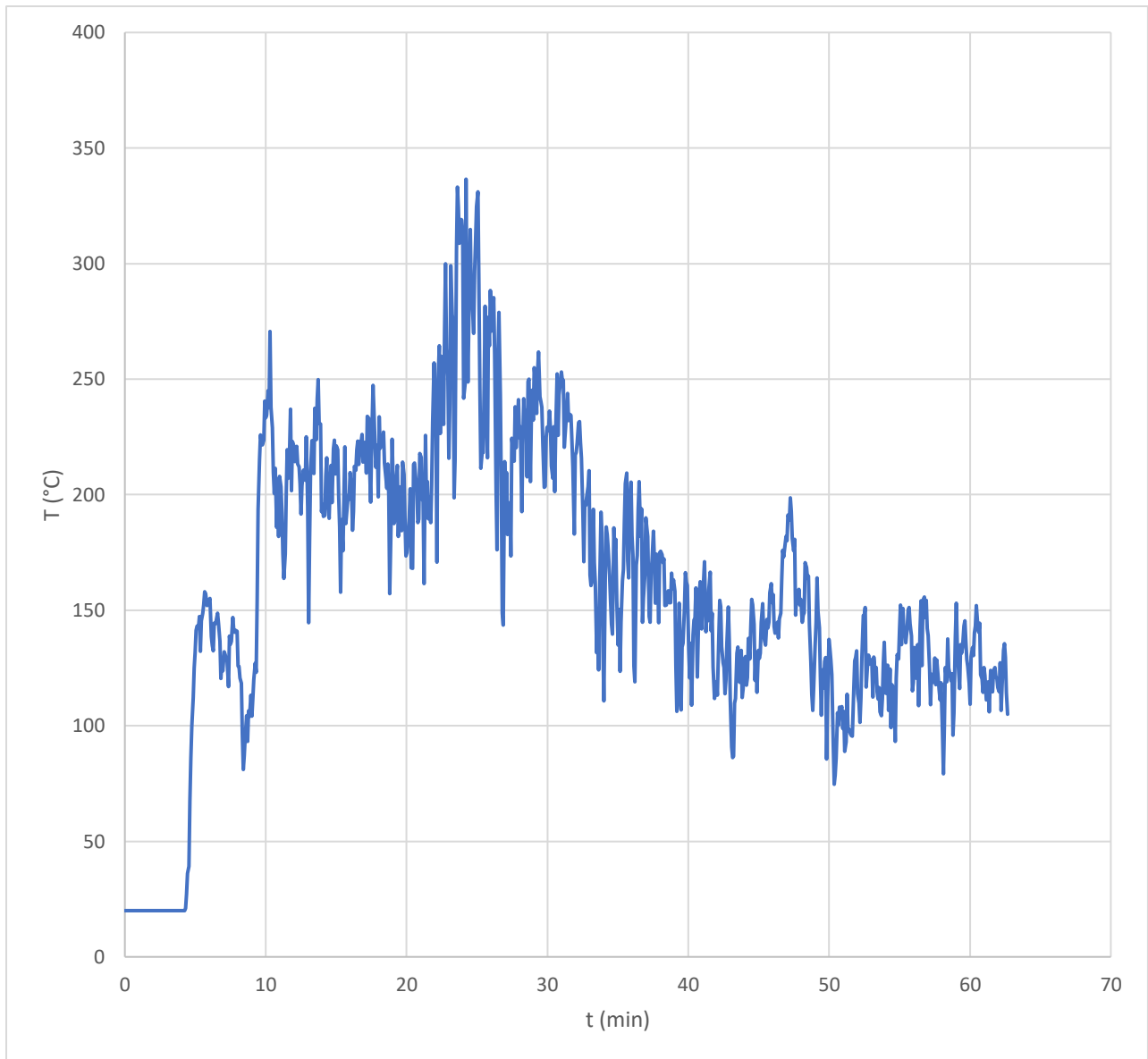
### 4.6.1: Automobile elettrica in galleria piana con doppia curva D.1

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta in § 4.5 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile elettrica descritto in § 3.6.2. La Figura 4.44 riassume graficamente lo scenario, che è analizzato per una durata di 60 min.



**Figura 4.44:** Schematizzazione geometrica dello scenario D.1.

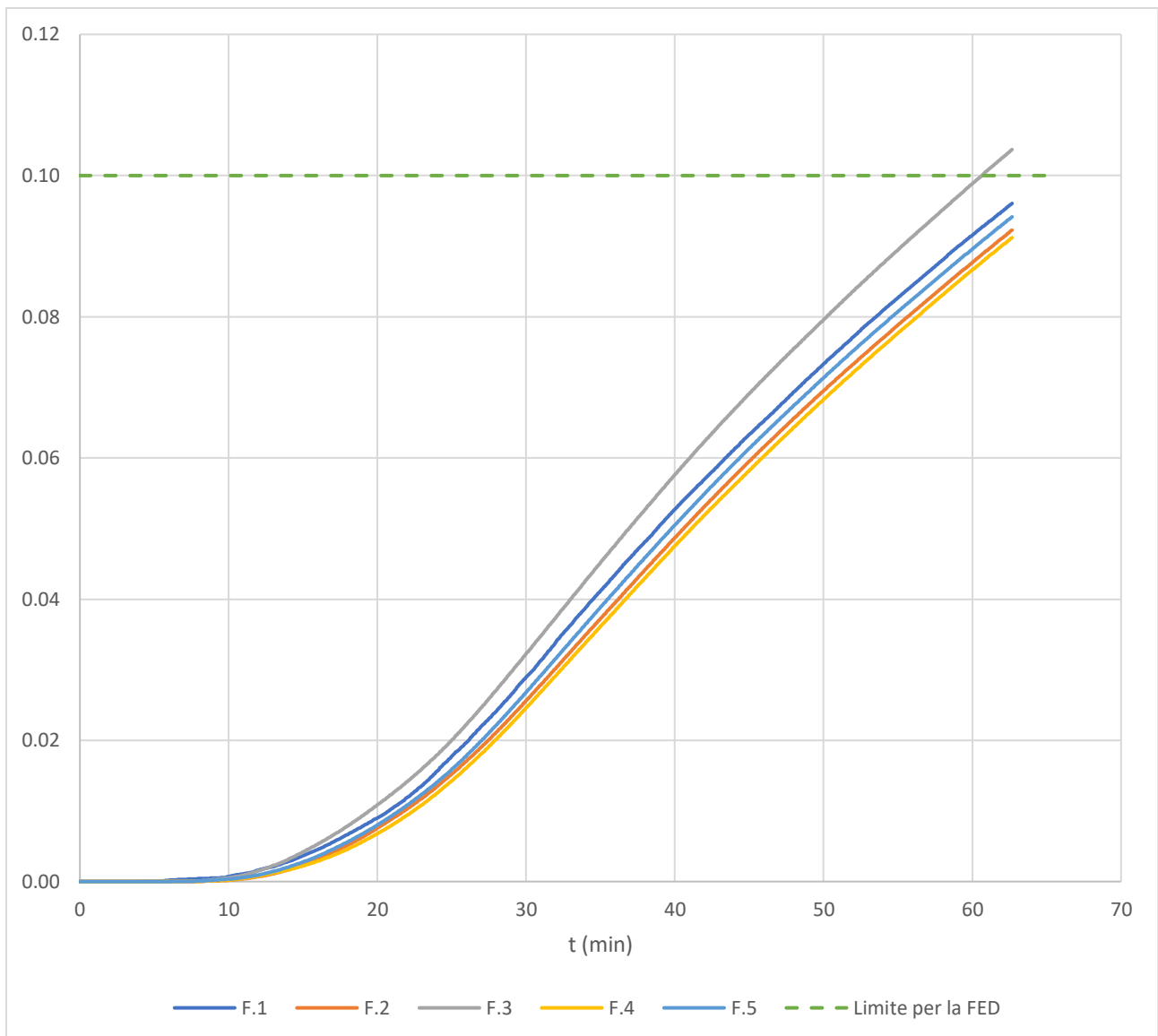
I risultati della simulazione sono stati riportati in Figura 4.45 per il campo termico, nella Figura 4.46 per la FED e Figura 4.47 per quanto concerne la visibilità.



**Figura 4.45:** *Andamento della temperatura – scenario D.1, sensore T.1.*

La temperatura massima registrata in questo scenario è superiore rispetto agli altri scenari con automobile elettrica (336 °C). Ciò è dovuto in prima battuta ad una ridotta efficacia nello smaltimento dei fumi e all'assenza di un percorso preferenziale per il flusso dei prodotti, come avveniva nel caso della galleria inclinata. Ciò indirizza verso una criticità maggiore.

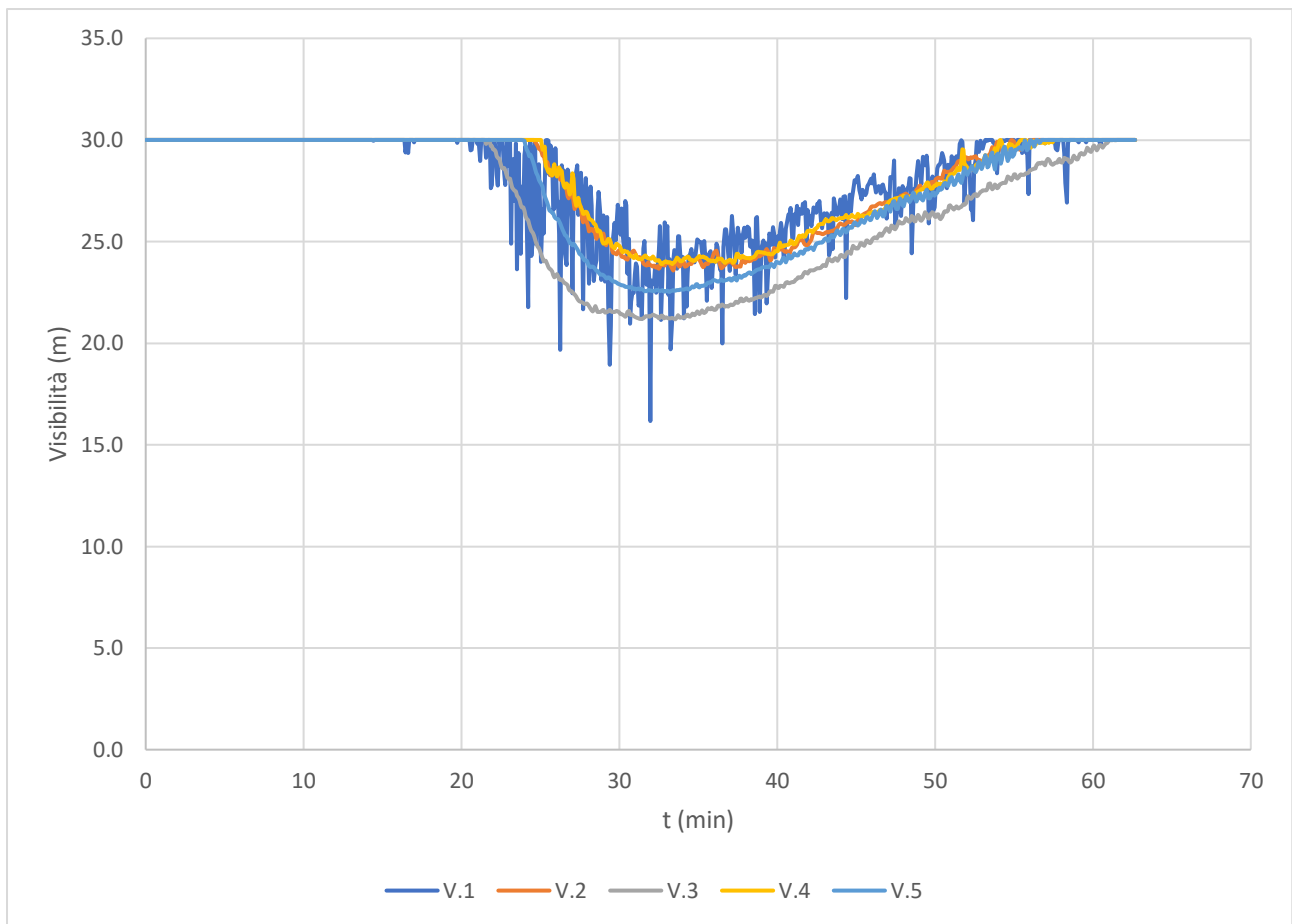




**Figura 4.46:** *Andamento della FED – scenario D.1, sensori F.1 - F.5.*

L'andamento della FED segnala anch'esso un comportamento più critico dei prodotti della combustione, registrando un valore di 0.012 dopo 20 min, il più alto tra gli scenari che coinvolgono un'automobile elettrica.

In questo caso il sensore che riporta l'andamento più gravoso è quello denominato F.5, posto 100 m a monte dell'automobile, un'anomalia rispetto al caso di galleria piana, in cui quello 100 m a valle dell'incendio F.3 tendeva a diventare il peggiore tra i due.



**Figura 4.47:** *Andamento della visibilità nella galleria – scenario D.1, sensori V.1 - V.5.*

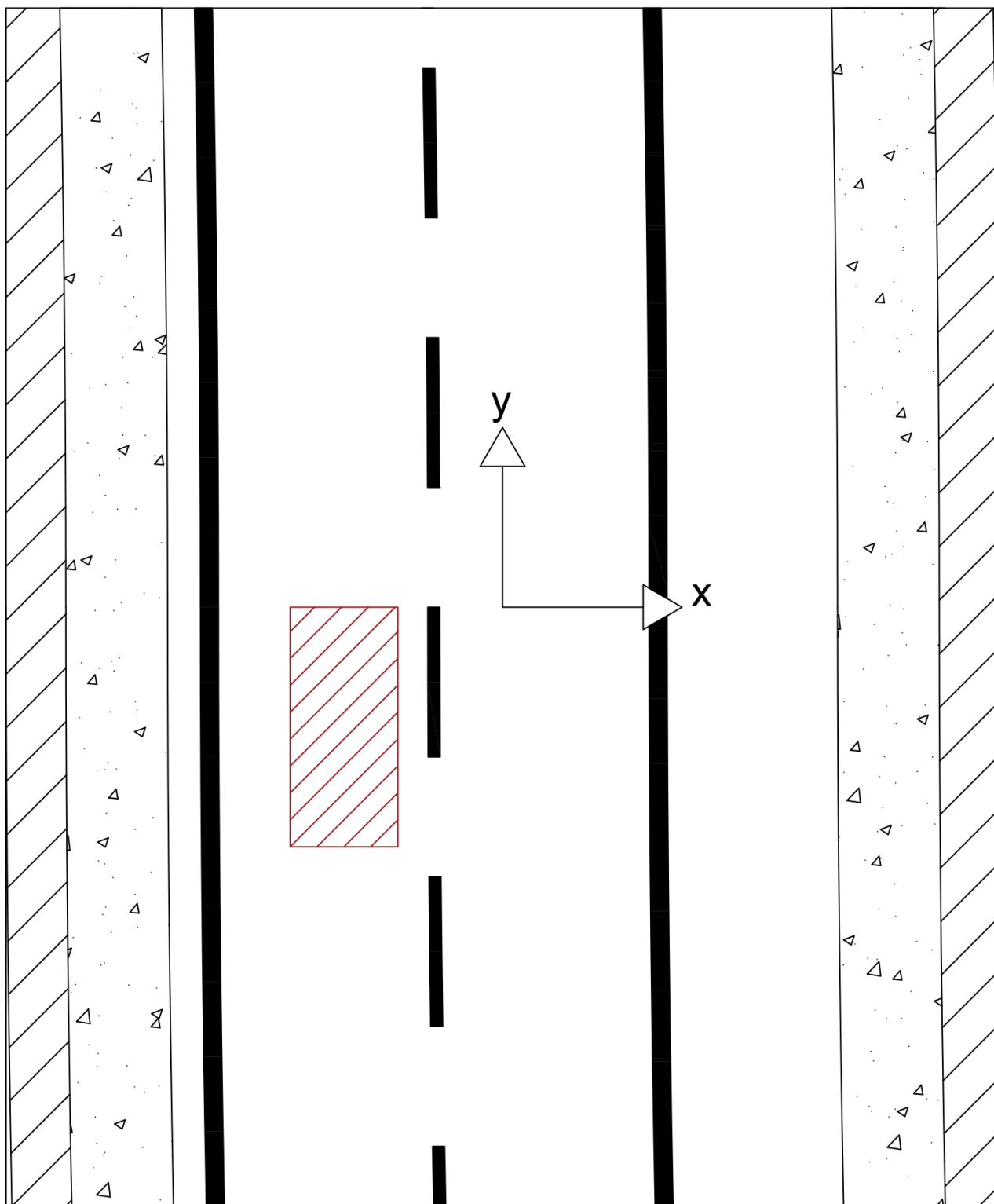
Osservando la Figura 4.47, si può notare come si verifichi una diminuzione della visibilità, causata dall'abbassamento dello strato di fumi successivo al picco della curva HRR.

Questo può rendere difficoltose le operazioni dei soccorritori, anche se l'evacuazione non dovrebbe risultare compromessa, in quanto la diminuzione sotto al valore soglia di 10 m si verifica solo in prossimità dell'automobile.

Come si verifica anche per la visibilità, il sensore V.3, posto 100 m a monte dell'incendio registra valori peggiori di quello V.5, posto invece 100 m a valle. Questo è l'unico caso visto finora in cui si verifica un'apprezzabile diminuzione della visibilità durante lo scenario, rafforzando l'ipotesi che questo scenario sia più critico degli altri già discussi.

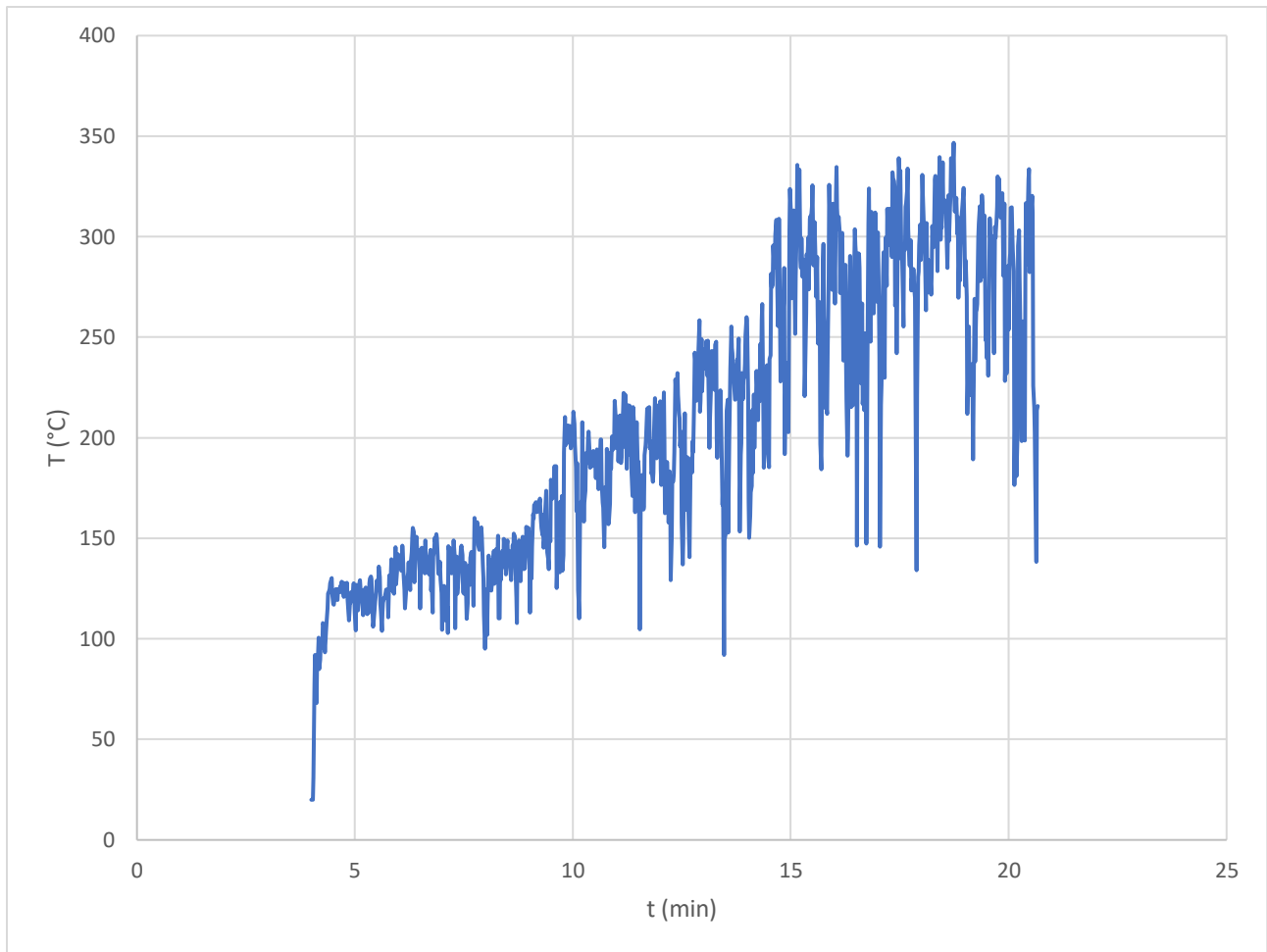
#### 4.6.2: Automobile tradizionale in galleria piana con doppia curva D.2

Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria descritta in § 4.5 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale descritto in § 3.6.2. Figura 4.48 riassume graficamente lo scenario, che è analizzato per una durata di 20 min.



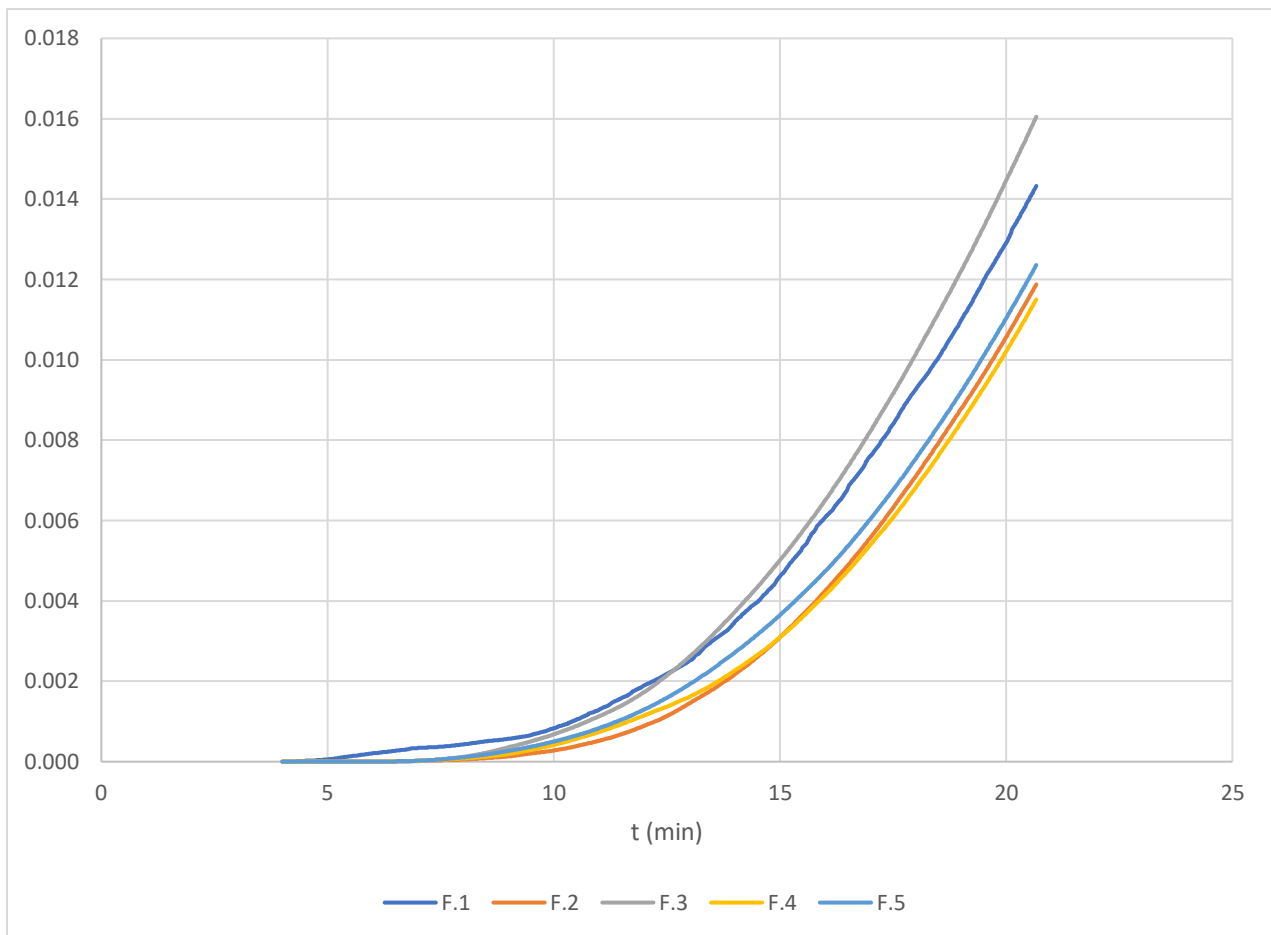
**Figura 4.48:** Schematizzazione geometrica dello scenario D.2.

I risultati di questa simulazione sono stati riportati in Figura 4.49 per il campo termico, Figura 4.50 per la FED e Figura 4.51 per la visibilità.



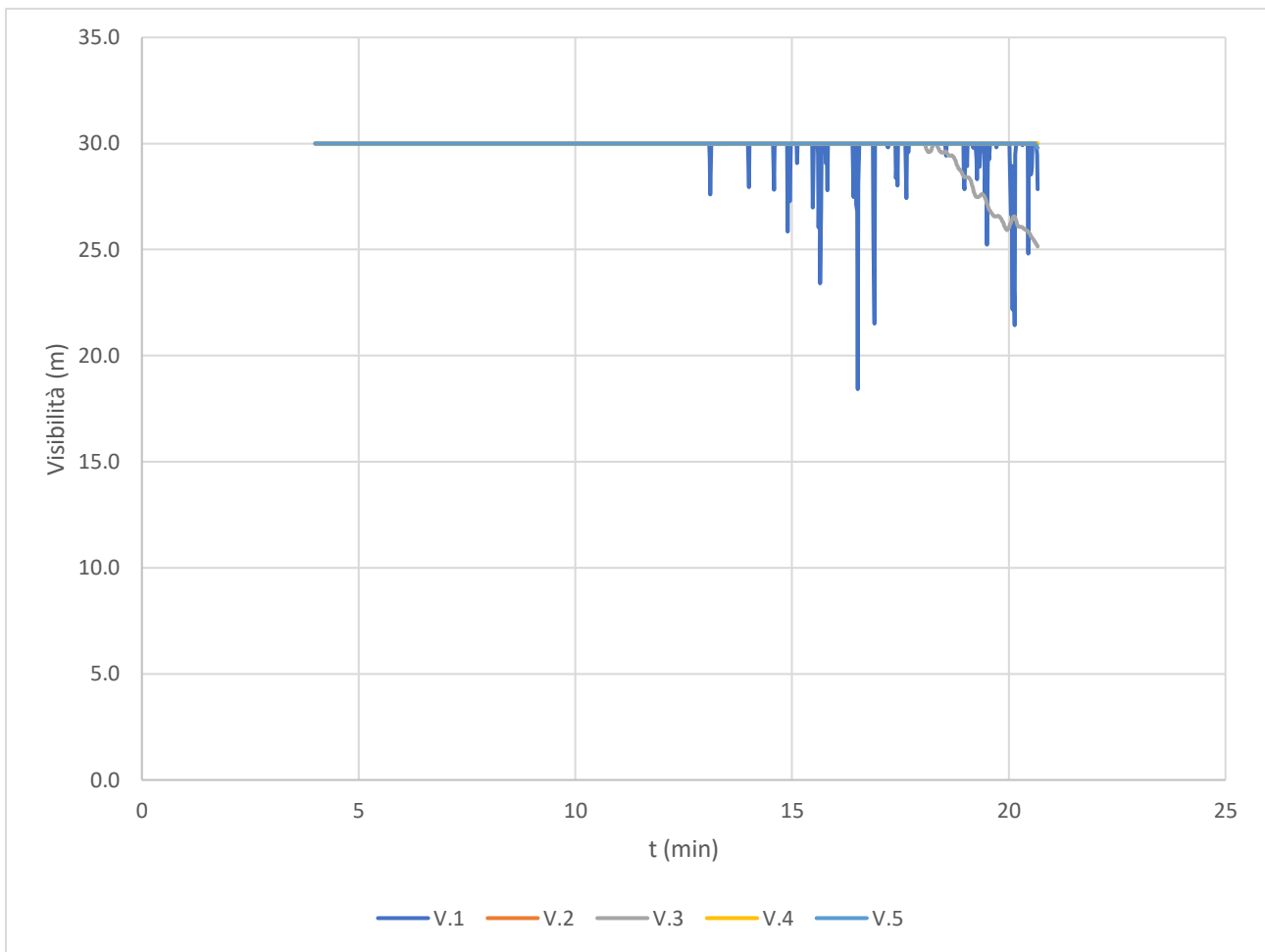
**Figura 4.49:** *Andamento della temperatura nei punti monitorati – scenario D.2, Sensore T.1.*

Il valore massimo ottenuto dalla temperatura, diversamente dallo scenario precedente, si attesta a valori inferiori, a circa 348 °C. Ciononostante, questo è probabilmente dovuto ad una maggiore turbolenza in prossimità dell'incendio, come testimoniato dall'andamento più irregolare.



**Figura 4.50:** *Andamento della FED – scenario D.2, sensori F.1 - F.5.*

Anche in questo caso si registra l’anomalia descritta allo scenario precedente del punto F.3, posto 100 m dopo l’incendio e, a parità di tempo, si registrano valori superiori a quelli degli omologhi casi rettilinei e inclinati.



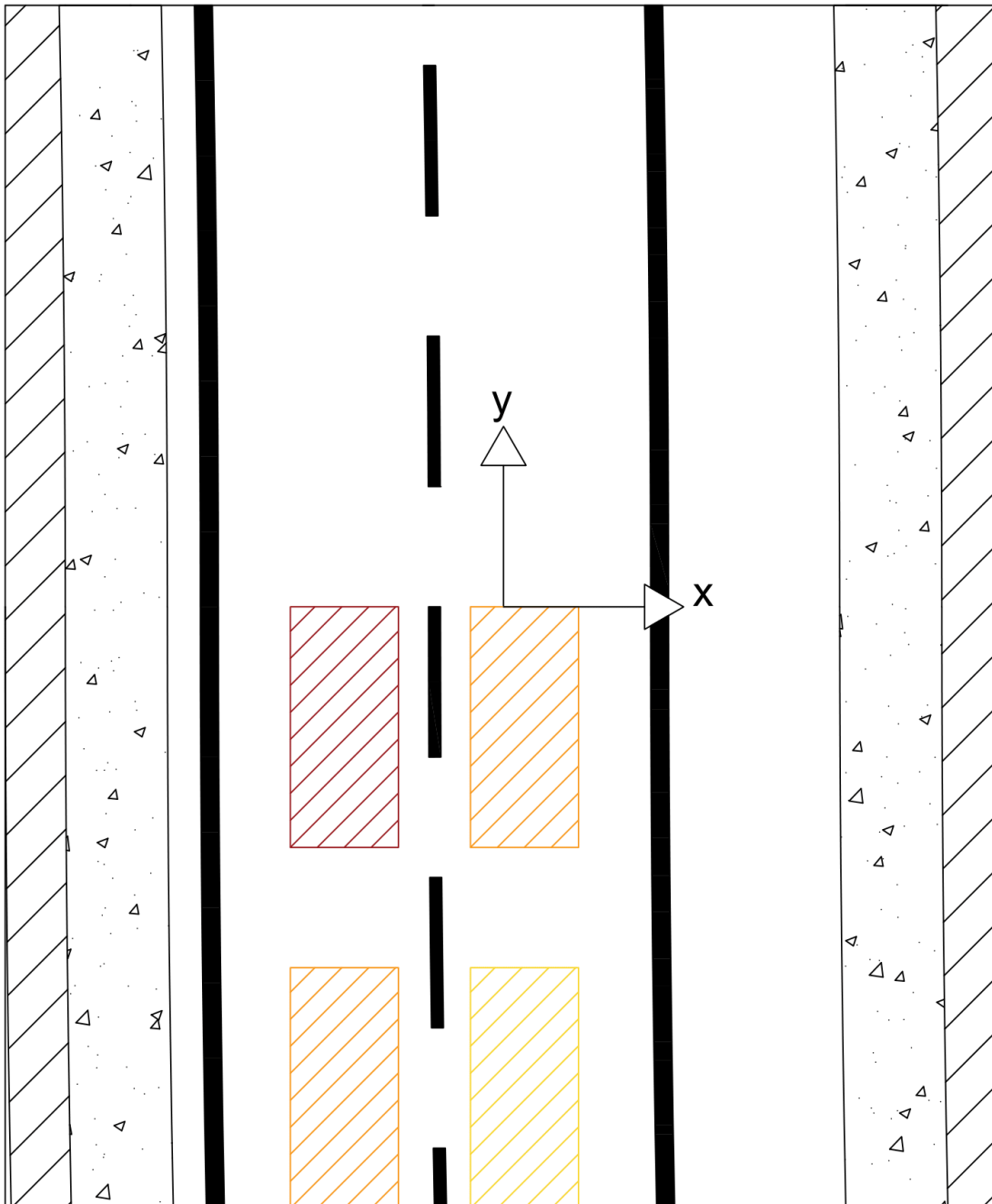
**Figura 4.51:** *Andamento della visibilità nella galleria – scenario D.2, sensori V.1 - V.5.*

La visibilità tende a diminuire con l'evoluzione dello scenario anche se si mantiene a valori di sicurezza per l'intera durata della simulazione. Rispetto allo scenario D.1, si vede che la diminuzione avviene anticipatamente, probabilmente a causa del maggior quantitativo di sostanze emesse dalla combustione che risulta più intensa rispetto al caso del veicolo elettrico.

#### 4.6.3: Effetto domino di quattro automobili tradizionali in galleria piana con doppia curva D.4

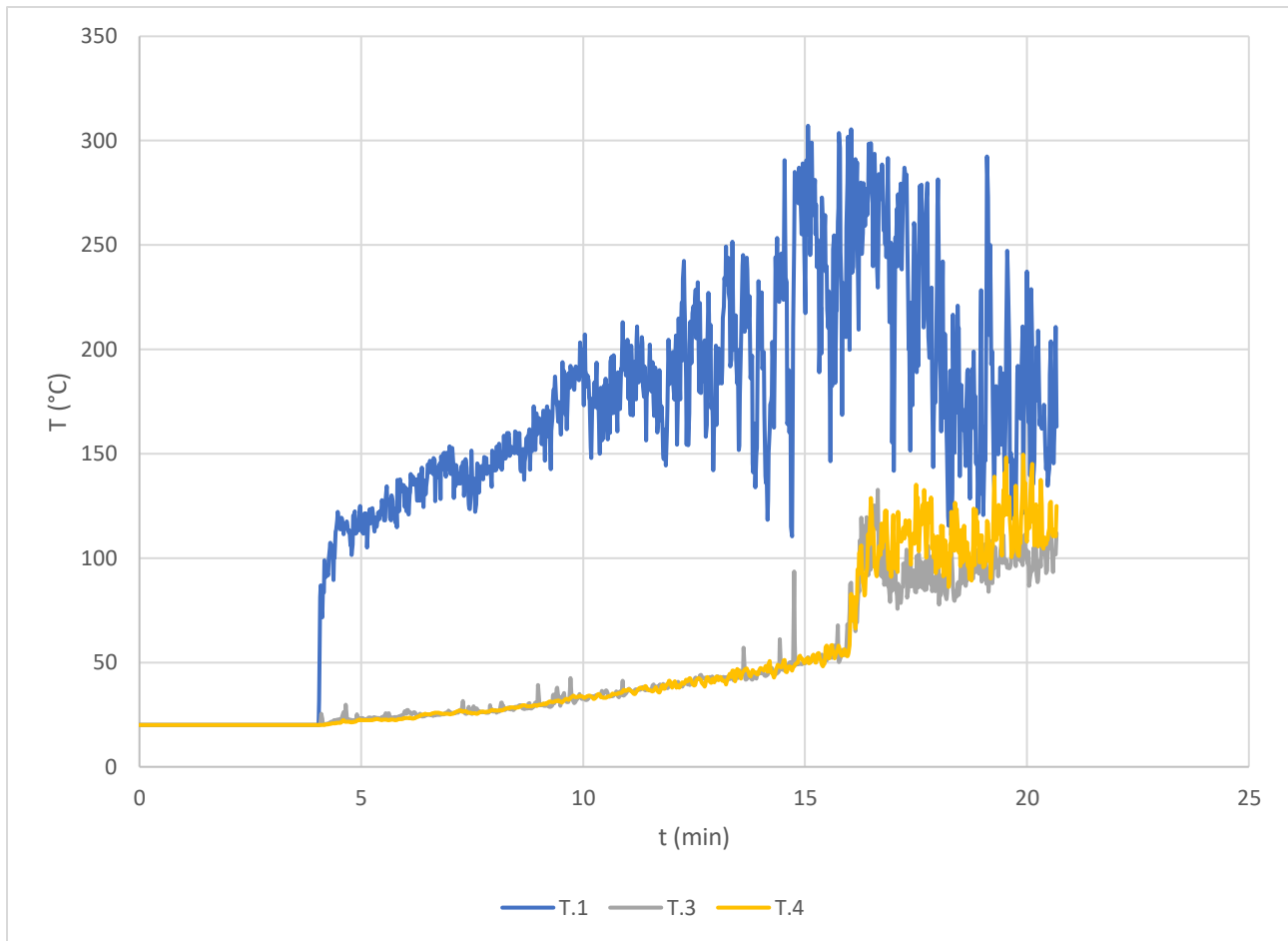
Questo scenario è stato ottenuto dalla combinazione della geometria a quattro macchine descritta in § 3.5 e delle caratteristiche chimico-fisiche del modello di automobile tradizionale discusse in § 2.6.2. Figura 4.52 riassume graficamente lo scenario, che è analizzato per una durata di 20 min.

Questo scenario è il più critico tra quelli analizzati, in quanto è combinazione di una geometria poco favorevole alla dispersione dei fumi e di un focolare di incendio più severo.



**Figura 4.52:** Schematizzazione geometrica dello scenario D.4.

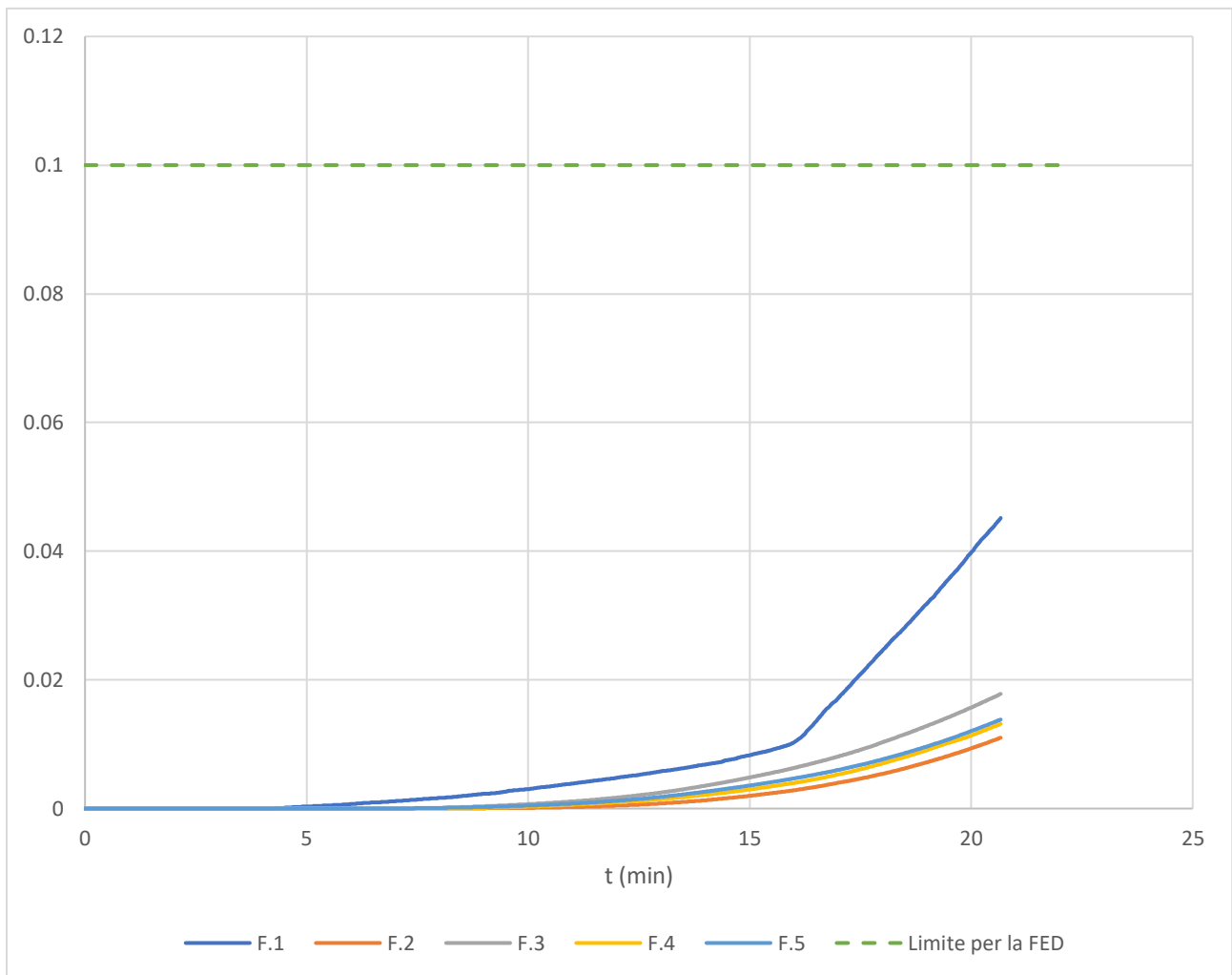
I risultati di questa simulazione sono stati riportati in Figura 4.53 per il campo termico, Figura 4.54 per la FED e Figura 4.55 per la visibilità.



**Figura 4.53:** *Andamento della temperatura – scenario D.4, sensori T.1, T.3, T.4.*

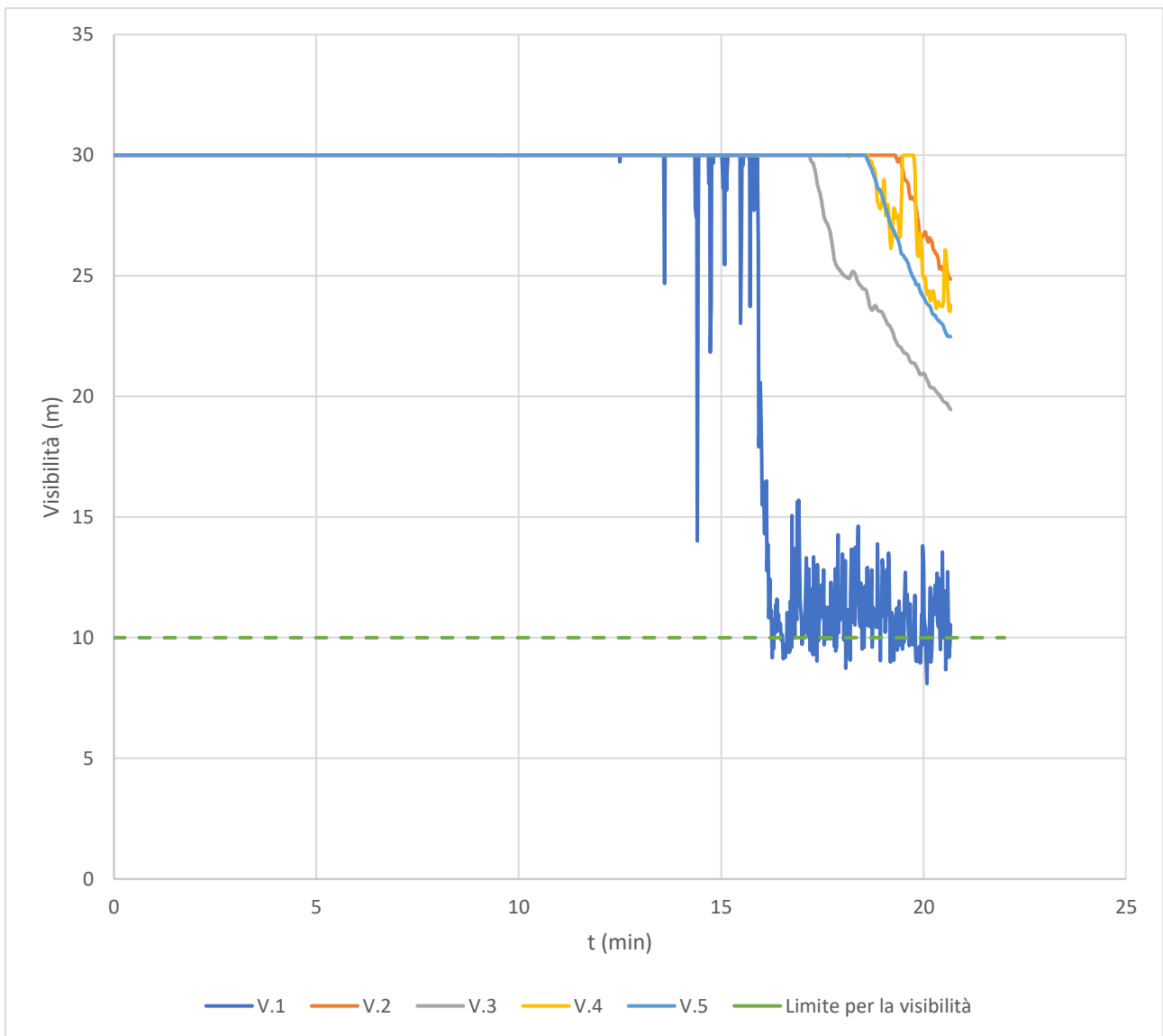
La curva della temperatura presenta un andamento ancora più irregolare rispetto agli altri casi di galleria in curva, specialmente dopo l'accensione della sequenza di automobili, probabilmente a causa della turbolenza aggiuntiva indotta, in quanto l'innesco delle altre due automobili fornisce ulteriore calore e rende l'andamento ancora più disturbato e, di conseguenza, si può ipotizzare un calo significativo dell'altezza dei fumi.





**Figura 4.54:** *Andamento della FED – scenario D.4, sensori F.1 - F.5.*

L'andamento della FED è simile a quanto già visto per il caso inclinato con quattro auto coinvolte nell'incendio (scenario C.4), anche se dopo 20 min il valore massimo registrato dal sensore F.1 nello scenario D.4 è pari a 0.45, mentre lo stesso sensore nel caso C.4 misurava al massimo un valore di 0.57. Questo è ascrivibile, principalmente, all'effetto camino che favorisce un accumulo di effluenti in prossimità delle automobili.



**Figura 4.55:** *Andamento della FED – scenario D.4, sensori V.1 - V.5.*

La visibilità conferma l'ipotesi di turbolenza e mescolamento già formulata e, a differenza della FED, è ben più grave del caso C.4, in quanto la diminuzione nelle zone più distanti avviene prima (a circa 17 min). Come in tutti i casi in analisi, ciò non dovrebbe interferire con l'evacuazione ma sicuramente renderà più difficile l'intervento dei soccorritori.

## 4.7: Considerazioni sui risultati

Come si è esaminato, l'elemento che aggrava le conseguenze in modo più marcato è la presenza di più automobili che partecipano alla combustione, che influisce in maniera negativa su tutti i parametri e con l'effetto maggiore.

Le configurazioni geometriche, pur non influenzando sensibilmente i parametri di FED e di visibilità, possono avere un ruolo determinante nella dispersione dei fumi. Infatti, nella galleria inclinata, la dose assorbita era maggiore in alcuni tratti, mentre la presenza di una conformazione curva ha comportato una dispersione dei fumi particolare con conseguente aggravio delle condizioni globali.

Allungare i tempi delle simulazioni sarebbe stato interessante ma di limitata utilità per le valutazioni obbiettivo di questo lavoro, in quanto in tutti i casi presi in esame l'evacuazione degli occupanti si sarebbe potuta portare a termine con un buon margine di tempo disponibile (le prime criticità per la visibilità in prossimità delle automobili si registrano dopo circa 12 minuti, tempo sufficiente perché gli occupanti arrivino a 50 m dall'uscita, dove le condizioni sono quasi indisturbate).

Ciononostante, se vi fossero delle persone bloccate nelle prime file di automobili, ad esempio in conseguenza ad un tamponamento iniziale, il loro soccorso sarebbe estremamente difficile per la ridotta visibilità in prossimità dell'incendio, addirittura inferiore a 5 m in alcuni scenari.

L'intervento dei soccorritori è possibile in tutti i casi esaminati anche se notevolmente più difficoltoso in quelli più severi ovvero nella galleria con doppia curva. In questa, i fumi tendono a condensare più facilmente e comunque hanno la tendenza a dare stratificazione in modo più critico rispetto agli altri casi. Naturalmente, è necessario procedere con studi più dettagliati per tracciare in modo più accurato la dinamica dei fumi.

In aggiunta, si nota che le temperature raggiunte dai sensori a quota  $z = 7$  m (la massima è pari a circa  $274^{\circ}$  C nello scenario B.2) non suggeriscono una criticità dal punto di vista strutturale per questo tipo di scenari, anche se maggiori intensità dell'incendio rispetto a quelle esaminate, ad esempio un trattore stradale trasportante un carico infiammabile, potrebbero causare significativi problemi per la tenuta del *lining* dell'intradosso, se non addirittura della struttura in toto. Questo aspetto potrà essere oggetto di successivi approfondimenti.

Come ultimo aspetto da affrontare c'è la lunghezza dei tempi di calcolo degli scenari. Nonostante fossero tutti casi con numero di elementi contenuto (circa 150000), il tempo di simulazione è stato lungo per ciascuno di loro, andando da un minimo di 8 ore di elaborazione ad un massimo di 32 con un processore a quattro core sfruttati al massimo delle loro potenzialità.

Questa lunghezza ha comportato una certa difficoltà nel perfezionare la selezione dei parametri oggetto di analisi, in quanto anche l'uso di modelli a scala ridotta non è particolarmente

utile per ottenere un'idea preliminare del miscelamento dei fumi e l'impiego di modelli ancora più grossolani sarebbe troppo poco accurato. Inoltre, nel caso della galleria curva, si sono verificati dei casi di instabilità numerica correlati all'errore massimo della pressione in aree prossime alle transizioni tra le varie griglie richiedendo un lavoro di affinamento ulteriore.

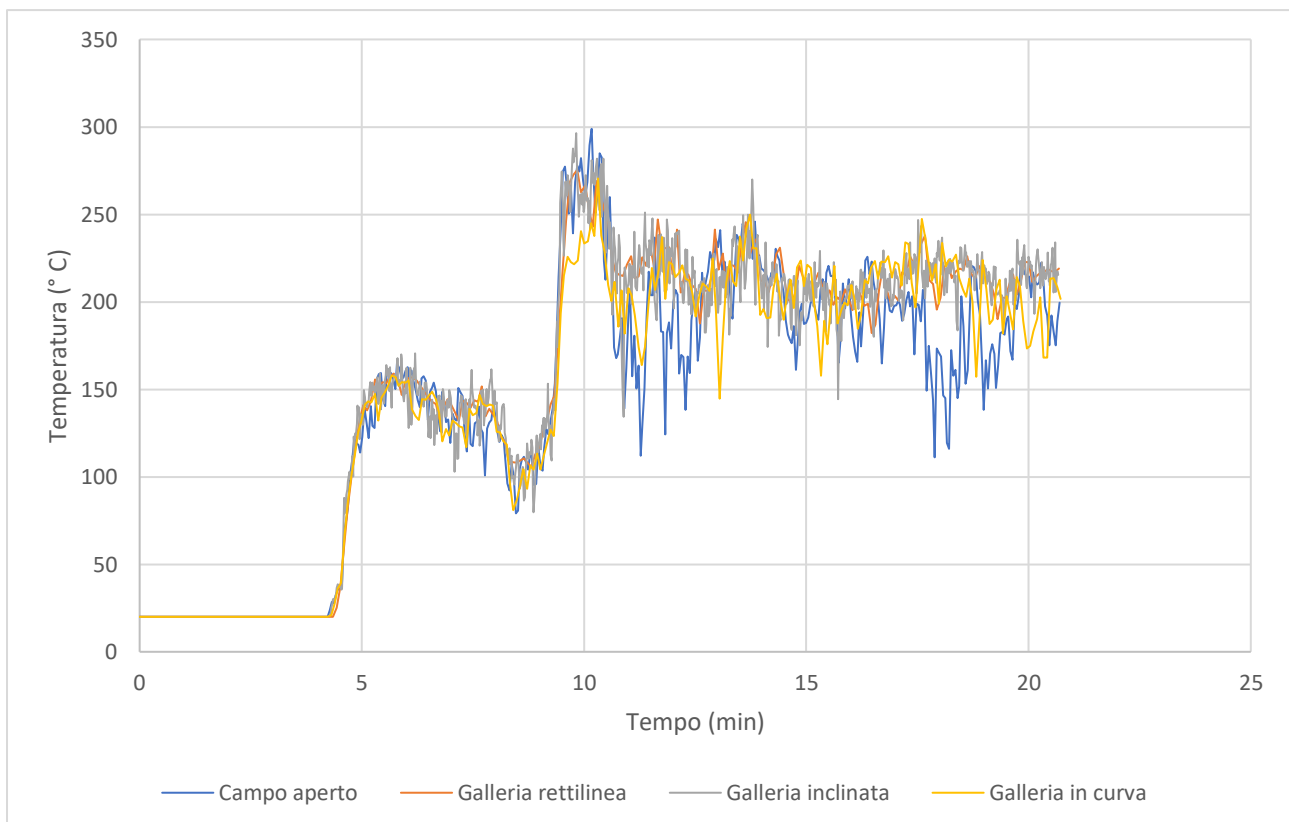
# Capitolo 5

## Analisi comparata dei risultati

Per riassumere ulteriormente i risultati ottenuti e per consentire un paragone più immediato tra i vari scenari, si è scelto di effettuare una discussione di confronto diretto tra i parametri già descritti nel capitolo precedente (temperatura, FED e visibilità). Inoltre, si è scelto di inserire un'analisi ulteriore sull'andamento dello strato dei fumi nei vari contesti geometrici studiati.

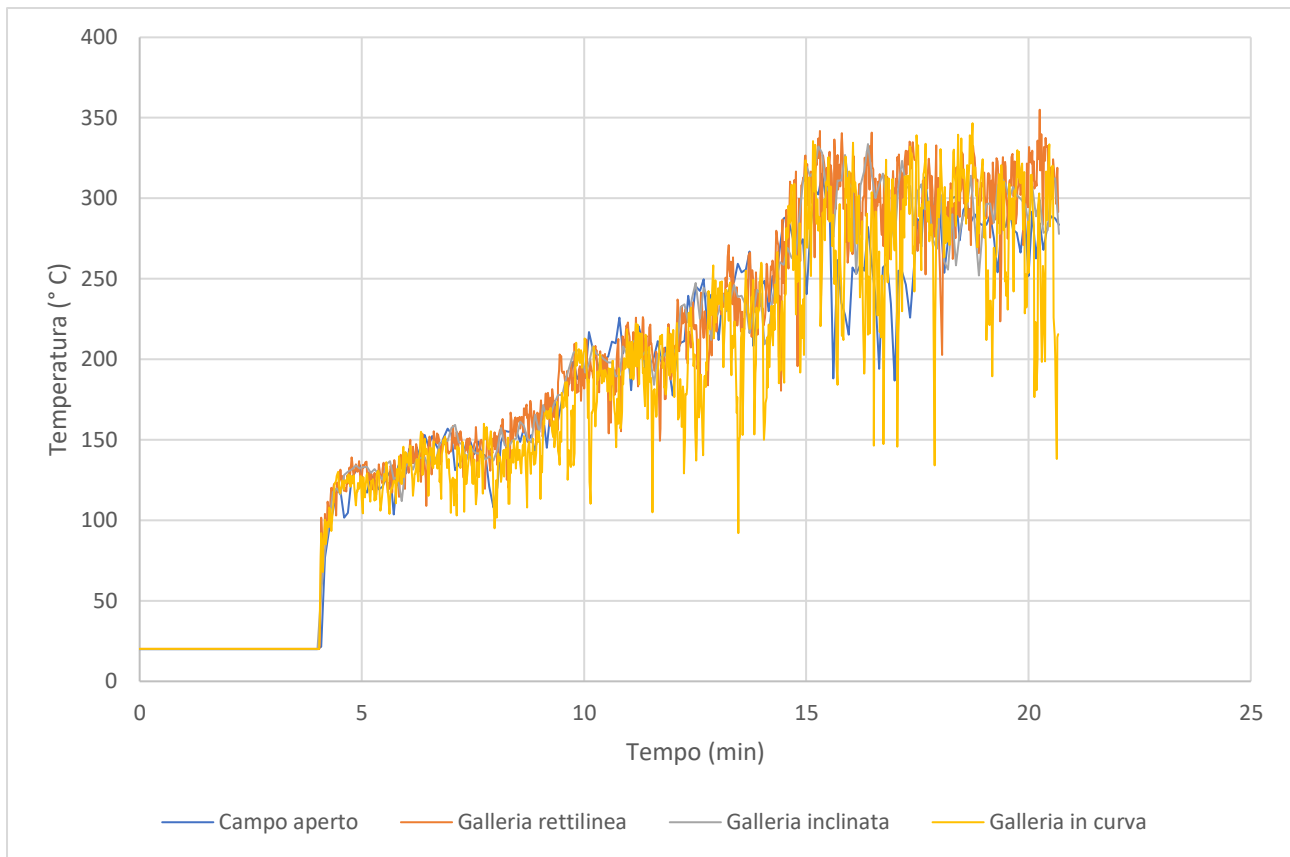
### 5.1: Temperatura

La prima grandezza esaminata è la temperatura, utilizzando i dati del sensore posto a 3 m sopra al baricentro dell'automobile. Fissato un focolare, sono rappresentati i dati simulati. Dalla Figura 5.1 emerge che gli scenari sono sovrapponibili in termini di temperatura. Variazioni sono rilevate dopo 10 min, quando viene raggiunta la potenza massima del focolare. Oltre, lo scenario con origine in campo aperto assume valori inferiori agli altri. Inoltre, quello in galleria curva presenta valori inferiori rispetto ai casi di galleria rettilinea e inclinata.



**Figura 5.1:** Temperatura del focolare di incendio di un veicolo elettrico, scenari A.1, B.1, C.1, D.1.

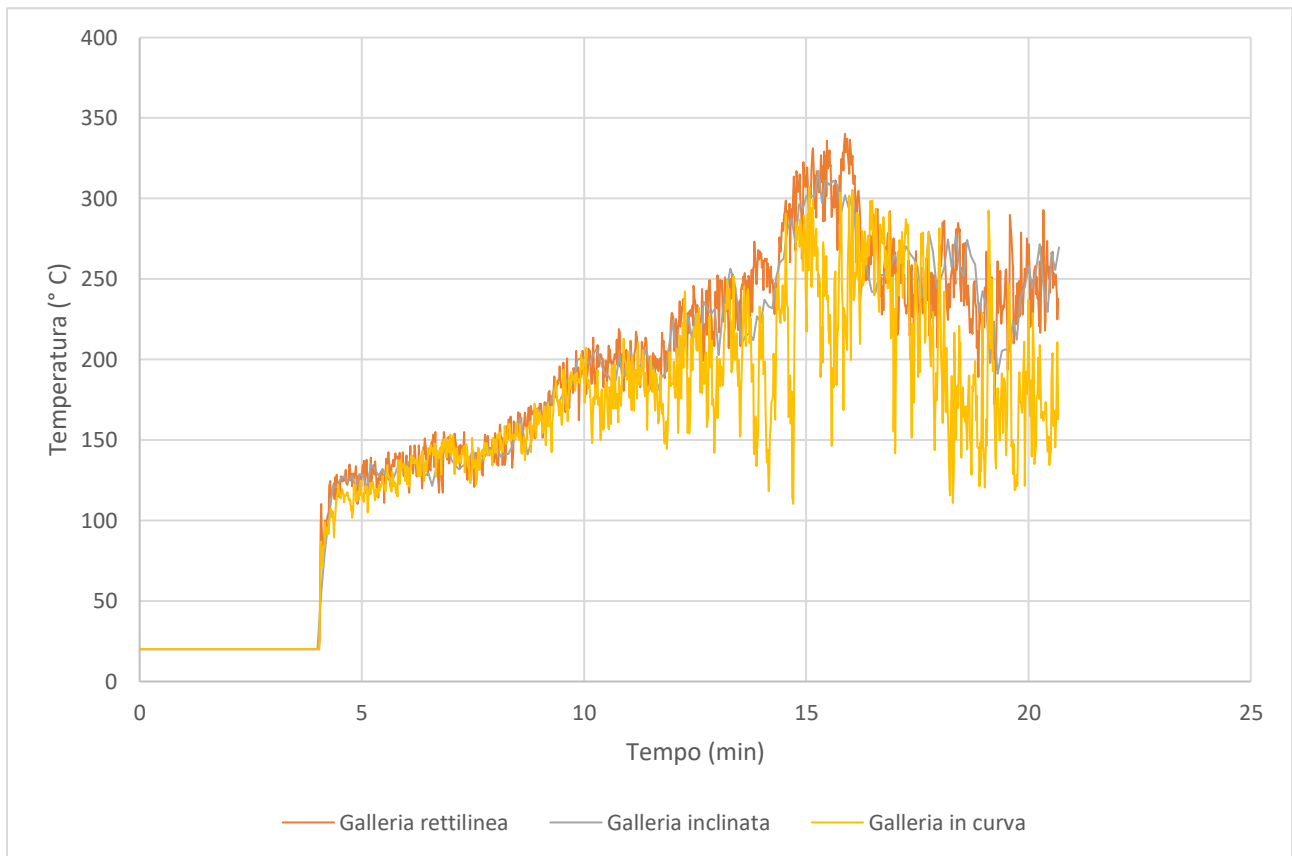
Lo scenario più severo tra quelli investigati è rappresentato dalla galleria inclinata.



**Figura 5.2:** *Temperatura del focolare di incendio di un veicolo tradizionale, scenari A.2, B.2, C.2, D.2.*

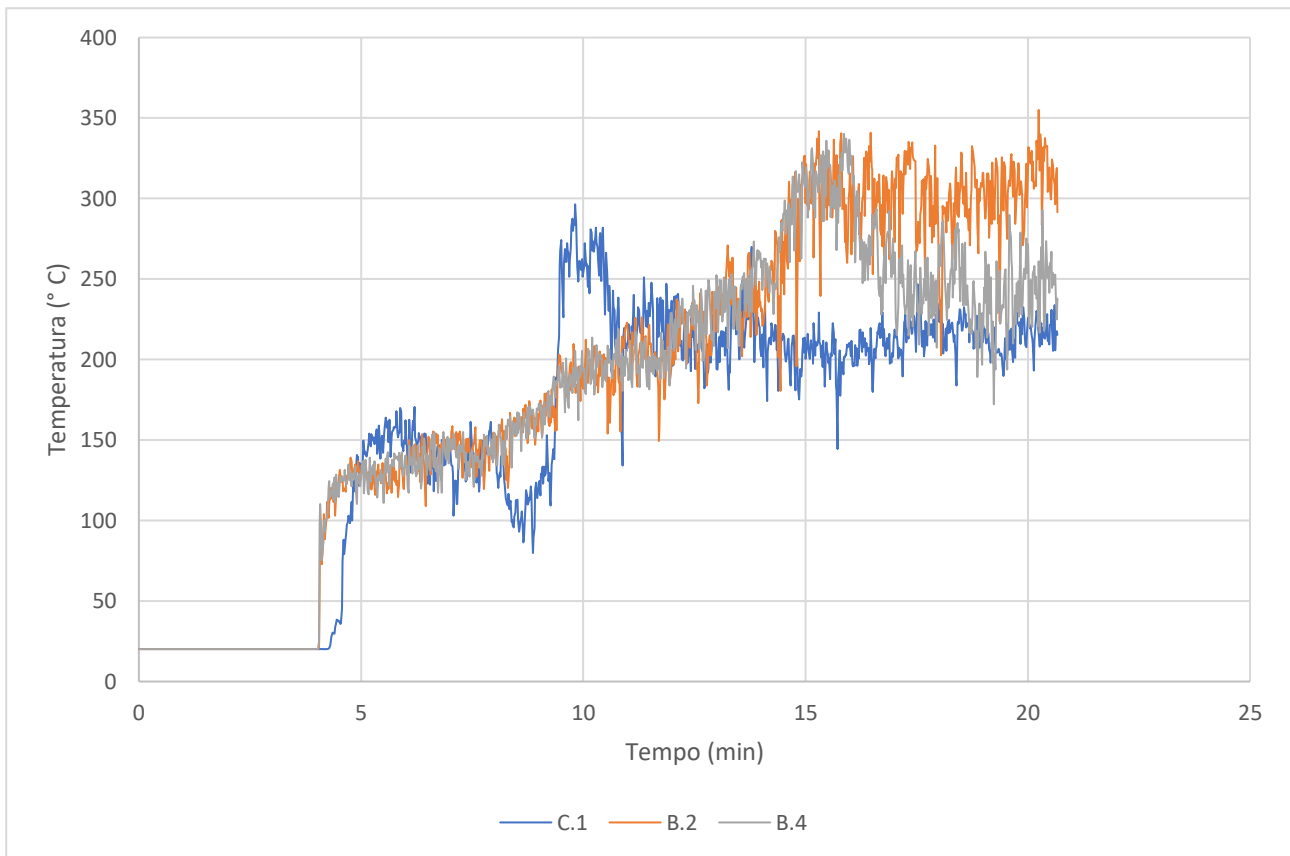
Anche nel caso di veicolo ad alimentazione tradizionale l'andamento generale è comune a tutti gli scenari geometrici, sempre con l'eccezione del caso in campo aperto che assume un'intensità inferiore. Il caso in curva continua a presentare un andamento più irregolare, motivato, come già descritto nel Capitolo precedente, dalla turbolenza più alta presente nei pressi dell'incendio in questa tipologia geometrica.

Il caso complessivamente più gravoso, questa volta, è rappresentato dalla galleria rettilinea, in quanto la temperatura in quella inclinata subisce una leggera flessione nella fase finale, probabilmente dovuto alla maggiore efficienza di questo nello smaltire i fumi e il calore tramite l'effetto camino.



**Figura 5.3:** *Temperatura del focolare di incendio di quattro veicoli tradizionali, scenari B.4, C.4, D.4.*

L'andamento generale del focolare che interessa quattro veicoli è analogo nelle diverse configurazioni analizzate. In particolare, nel caso della galleria rettilinea questo risulta peggiore dal punto di vista termico.

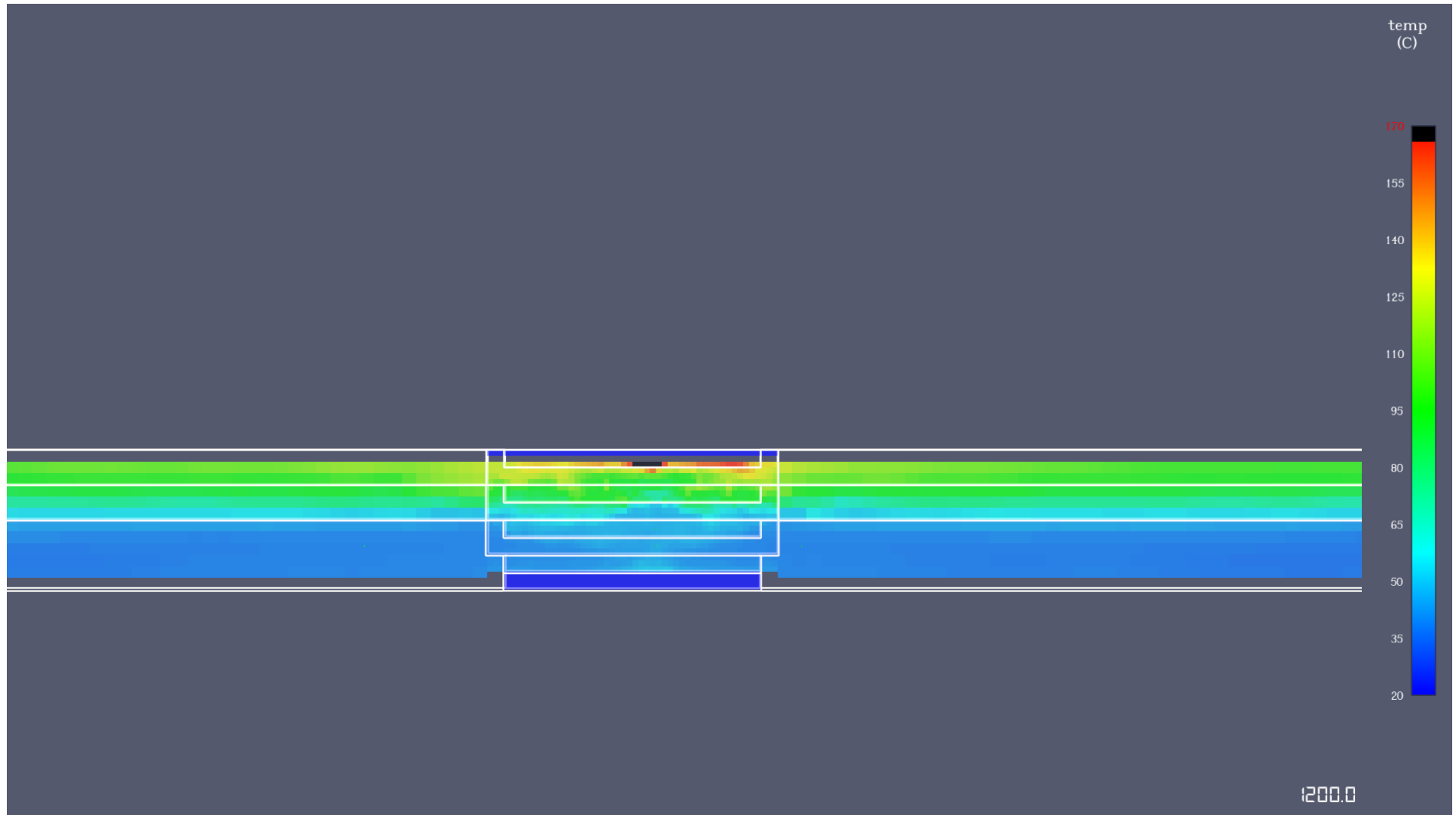


**Figura 5.4:** *Analisi comparata tra i diversi profili di temperatura negli scenari più severi ovvero C.1, B.2 e B.4.*

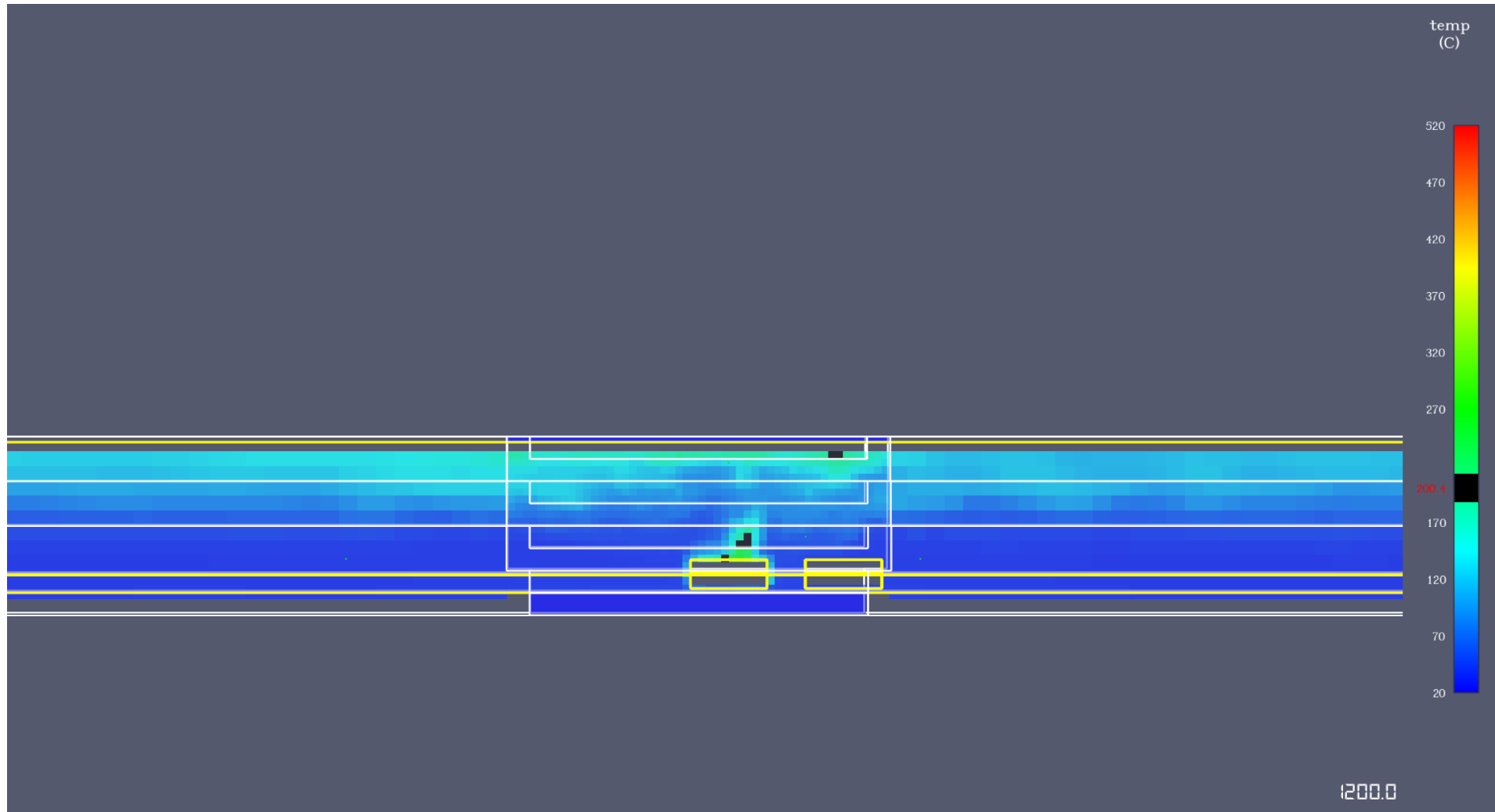
L'andamento peggiore per la temperatura nel punto considerato è quello del caso di veicolo tradizionale in galleria inclinata B.2. Essa assume valori più critici anche dello scenario domino con quattro auto. Ciò avviene verosimilmente per l'azione di disturbo che l'accensione delle altre automobili esercita nel punto immediatamente sopra al focolare di primo innesco. Inoltre, facendo anche riferimento a quanto esplicitato nei paragrafi del Capitolo 4, pur essendo puntualmente più gravoso lo scenario B.2, la criticità termica è estesa su una superficie maggiore.

Seguono alcune Figure che dimostrano quanto discusso riguardo agli scenari B.2 e B.4.





**Figura 5.5:** *Temperatura nel centro della galleria al termine del caso B.2, piano  $x=0$ .*

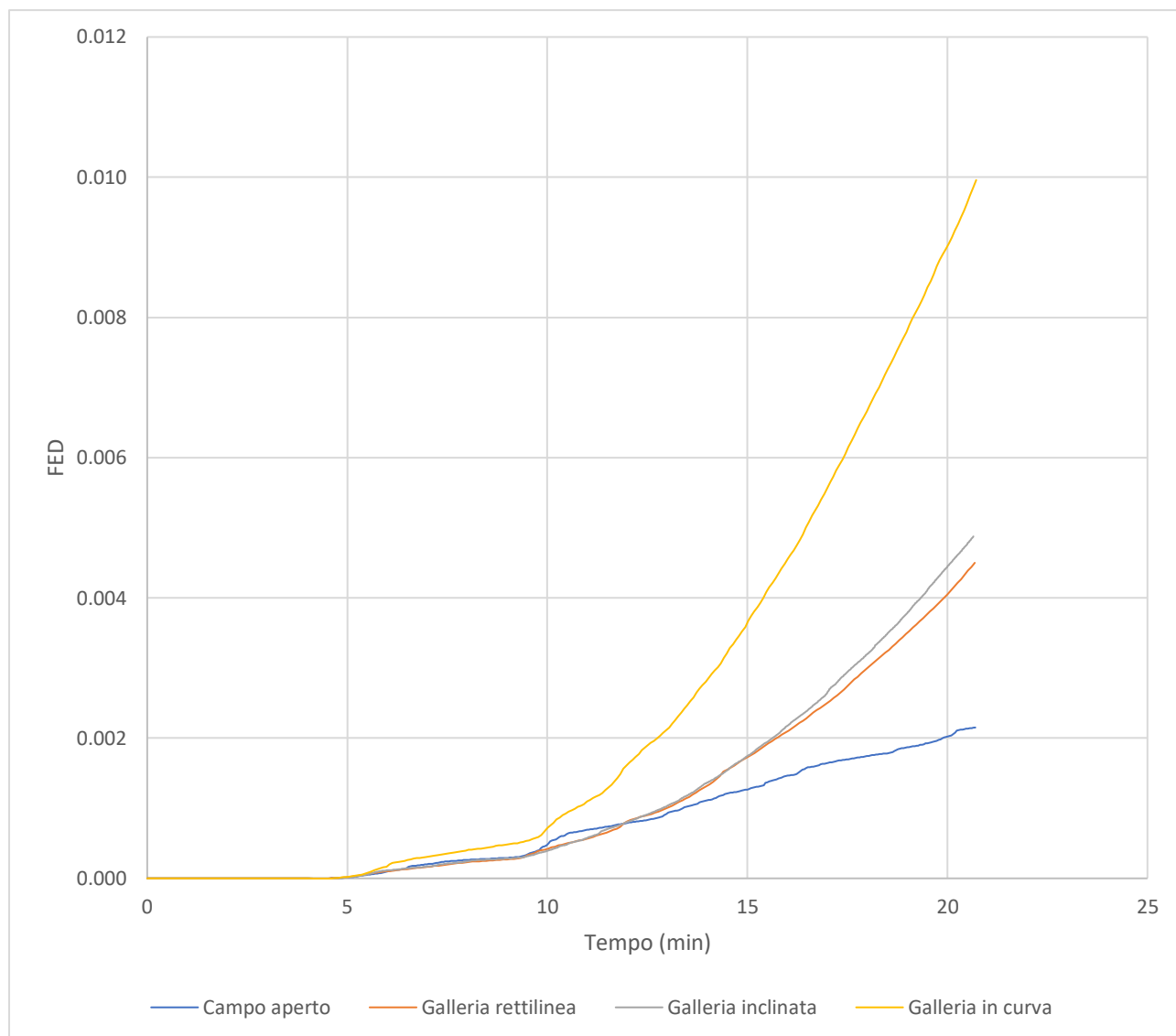


**Figura 5.6:** *Temperatura nel centro della galleria al termine del caso B.4, piano  $x=0$ .*

Nella Figura 5.6 soprastante la temperatura ha una scala diversa rispetto alla precedente, come si può leggere alla destra delle Figure; si nota come siano presenti punti a temperatura superiore di  $30^{\circ}\text{C}$  rispetto a quella della Figura 5.5, facendo riferimento allo *slider* nero, settato a  $170^{\circ}\text{C}$  nella prima e a  $200^{\circ}\text{C}$  nella seconda.

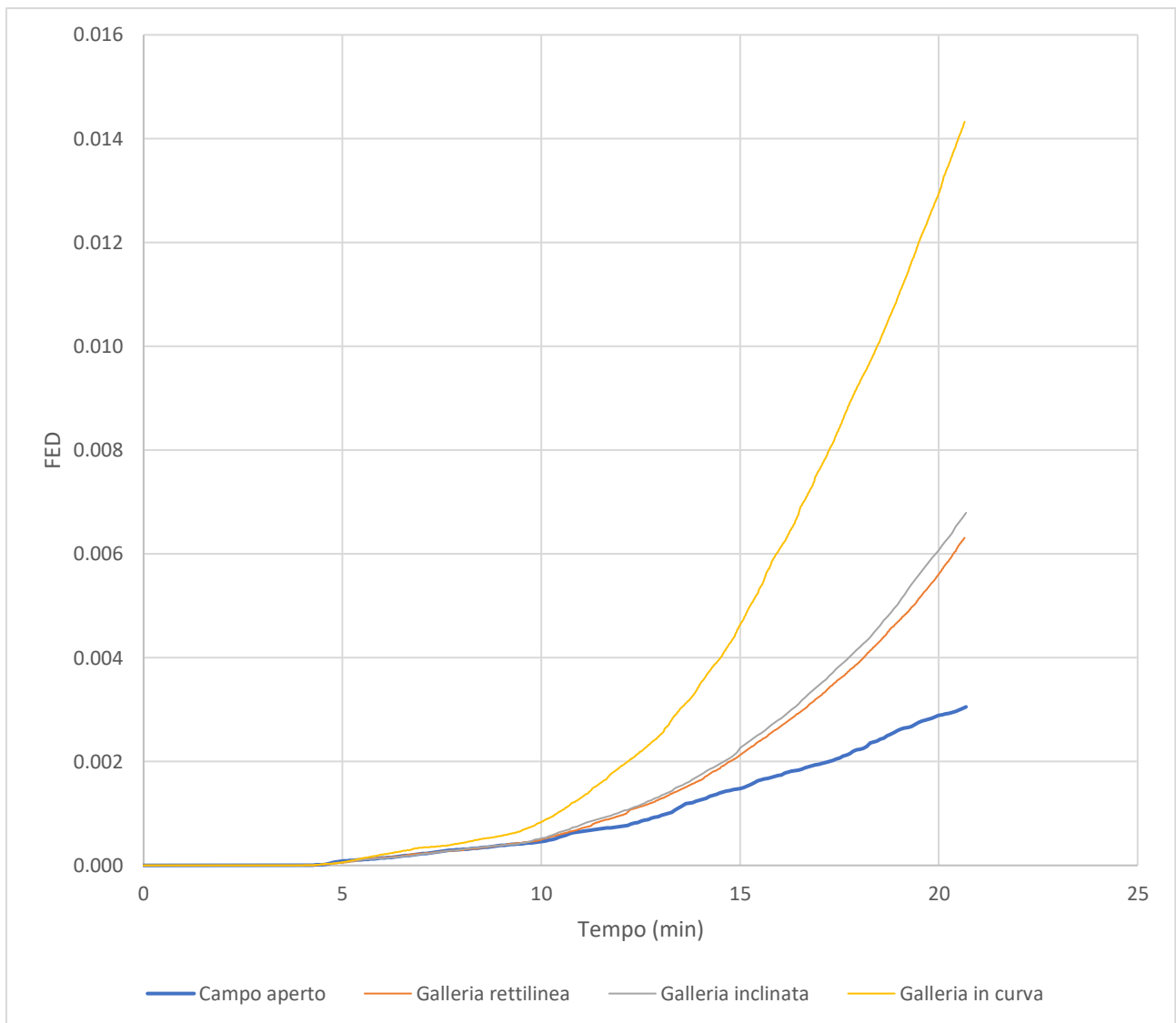
## 5.2: FED

La seconda grandezza considerata è la *Fractional Effective Dose*, utilizzando i dati del sensore posto a quota 2 m e localizzato a lato dell'automobile di primo innesco. Come nel caso precedente, verranno presentati assieme i dati relativi alla stessa tipologia di focolare, seguiti dall'analisi comparata di quelli più severi.



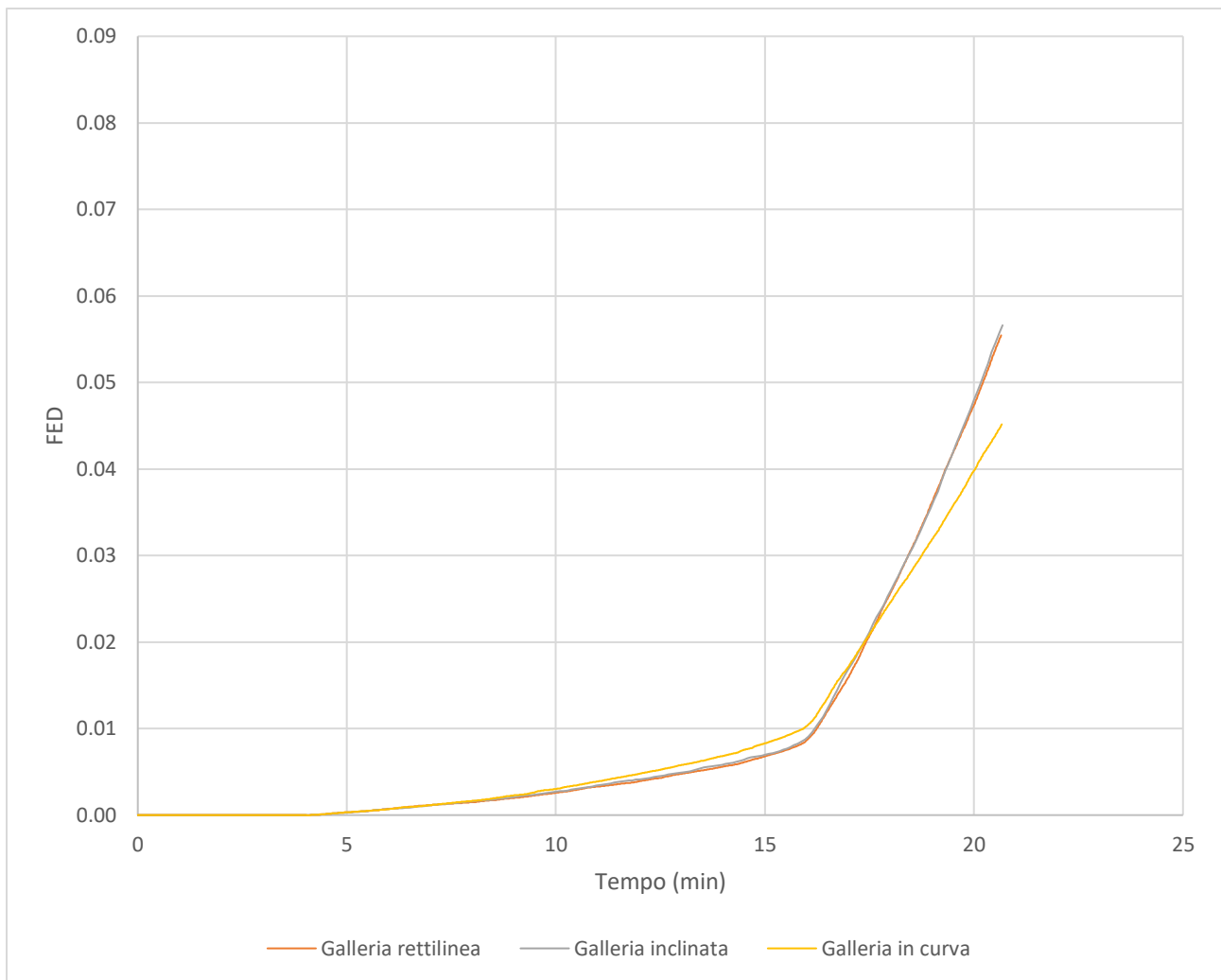
**Figura 5.7:** FED per focolare di incendio di un veicolo elettrico, scenari A.1, B.1, C.1, D.1.

Dalla Figura 5.7 emerge che lo scenario di gran lunga peggiore è quello della galleria in curva, con il valore massimo raggiunto dopo circa 20 min e doppio rispetto a quello della galleria inclinata. L'andamento nella galleria a configurazione rettilinea si avvicina a quello del caso inclinato, pur mantenendosi a valori inferiori.



**Figura 5.8:** FED per focolare di incendio di un veicolo tradizionale, scenari A.2, B.2, C.2, D.2.

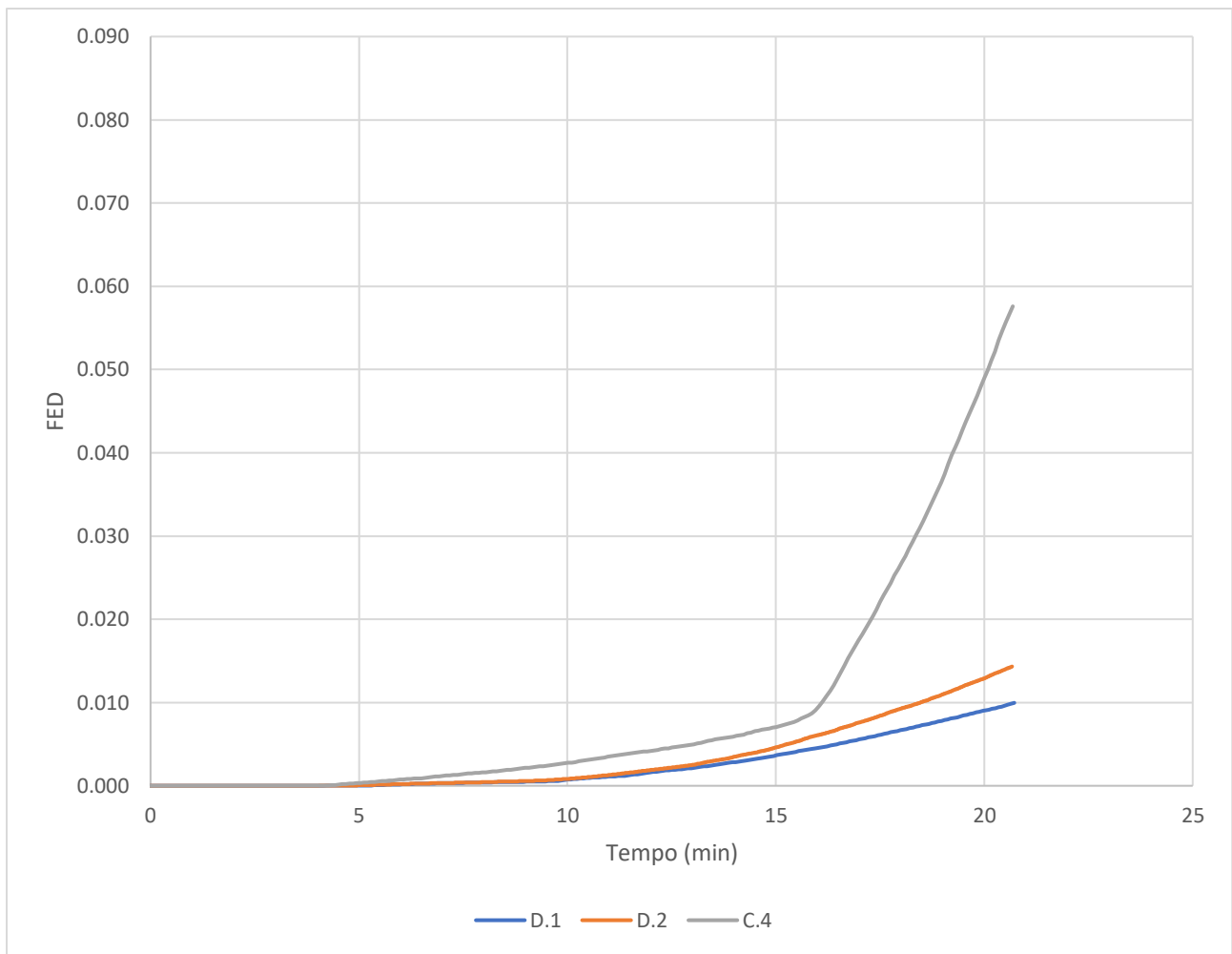
L'andamento per i focolari che coinvolgono un veicolo tradizionale è del tutto simile a quello già visto per i veicoli elettrici. Nella galleria curva, lo scenario risulta più gravoso. I valori rilevati, comunque, sono più severi data la maggiore severità del focolare di incendio.



**Figura 5.9:** FED per focolare di incendio con quattro veicoli tradizionali, scenari B.4, C.4, D.4.

L'andamento in funzione delle geometrie nel caso di incendio di quattro veicoli tradizionali è differente rispetto agli altri casi di incendio esaminati, in quanto la galleria inclinata e rettilinea assumono i valori più alti dopo l'innesco delle seconde automobili, anche se in una prima fase la galleria con curva presenta una FED superiore; questo andamento è segnale di una diversa efficacia nel convogliare i fumi lontano dall'incendio nel caso della galleria curva.

Il caso più gravoso nel punto considerato è quello rappresentato dalla galleria inclinata.

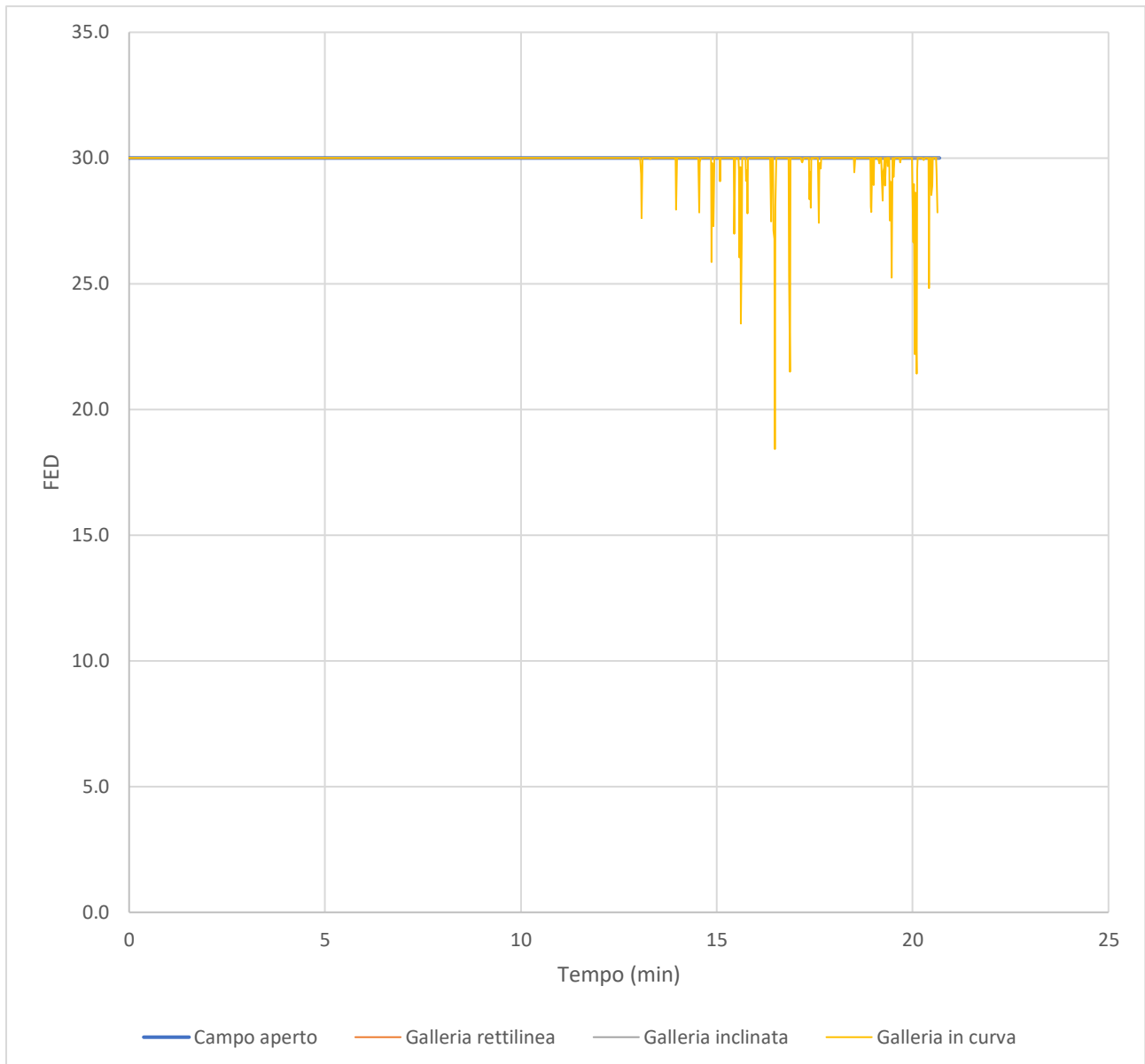


**Figura 5.10:** *Analisi comparata in termini di FED degli scenari più gravosi, casi D.1, D.2, C.4.*

Come già analizzato nel capitolo 4, gli scenari di gran lunga peggiori sono quelli che coinvolgono una serie di quattro auto ad alimentazione tradizionale, con valori di FED a 20 min di quasi cinque volte superiori rispetto alle altre tipologie di focolare. Ciò è consistente con la quantità notevolmente più alta di prodotti emessi in sede di combustione.

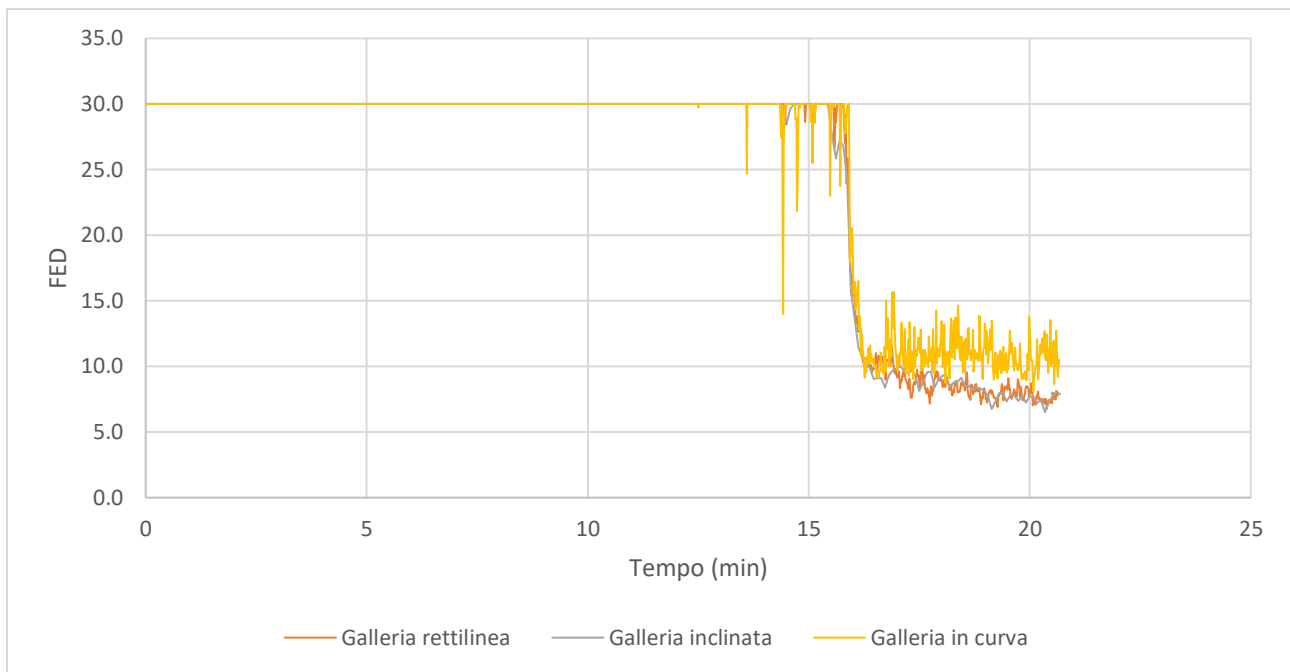
### 5.3: Visibilità

L'ultima grandezza considerata è la visibilità, utilizzando i dati del sensore a quota 2 m, localizzato a lato dell'automobile che rappresenta il focolare di primo innesco. Diversamente dai casi precedenti, la visibilità risulta essere buona per gli incendi nel caso di automobile elettrica e tradizionale.



**Figura 5.11:** *Andamento della visibilità negli scenari D.1 e D.2*

Come accennato sopra, vi sono alcuni disturbi nella visibilità, più evidenti nel caso dell'automobile tradizionale, probabilmente in quanto l'incendio produce fumi in modo più intenso e concentrato. In ogni caso, tali valori non scendono mai sotto alla soglia di criticità per l'evacuazione.



**Figura 5.12:** *Andamento della visibilità negli scenari B.4, C.4 e D.4*

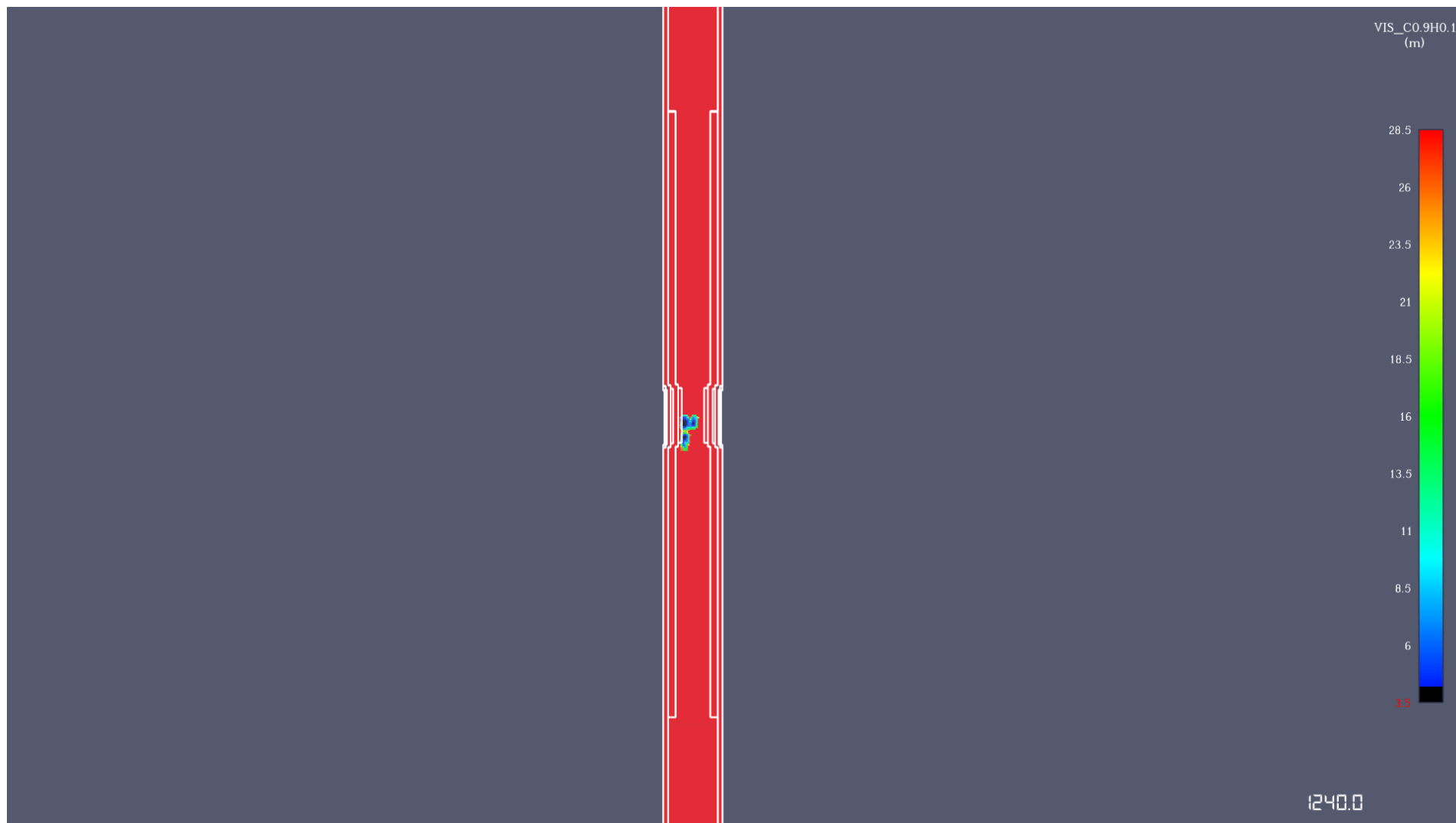
La Figura 5.12 evidenzia come nel caso di incendio con quattro auto coinvolte si riscontrino le condizioni più critiche, con instabilità pronunciate nel caso della galleria in curva, che presenta valori inizialmente più severi per poi assestarsi su valori superiori rispetto alle altre configurazioni. Per quanto riguarda questi punti la visibilità peggiore si riscontra, in misura simile, nella galleria rettilinea e in quella inclinata. Se si vanno ad analizzare le condizioni complessive nella galleria, però, emerge che lo scenario peggiore è rappresentato dalla galleria in curva (Figure 5.13 - 5.14), dove risulta evidente la maggiore criticità legata alla visibilità per gli occupanti.

Per quanto concerne il tempo disponibile per l'esodo ASET, esso è determinato dal precoce degrado delle condizioni di visibilità, in quanto gli altri parametri di prestazione subiscono un aggravio in tempi successivi. Di conseguenza, si può, conservativamente, far coincidere ASET con l'insorgenza di condizioni di visibilità inferiore ai 10 m, che si verifica dopo circa 13 min dall'innescio dell'incendio nelle peggiori condizioni (scenari a 4 automobili) e negli altri tipi di scenari in tempi notevolmente più lunghi. Quindi sicuramente l'evacuazione; si considera quindi come ASET minimo 13 minuti, in modo abbastanza conservativo, in quanto nelle porzioni ancora occupate della galleria le condizioni di visibilità sono ancora buone. In Tabella 5.1 sono riportati gli istanti in cui la visibilità diventa inaccettabile per gli scenari considerati.

**Tabella 5.1:**

Scenario	ASET	RSET
D.4	12 min e 15 s	12 min
C.4	12 min e 23 s	12 min
B.4	12 min e 27 s	12 min





**Figura 5.13:** *Mapa di visibilità nello scenario C.4 al termine della simulazione, a quota 2 m.*

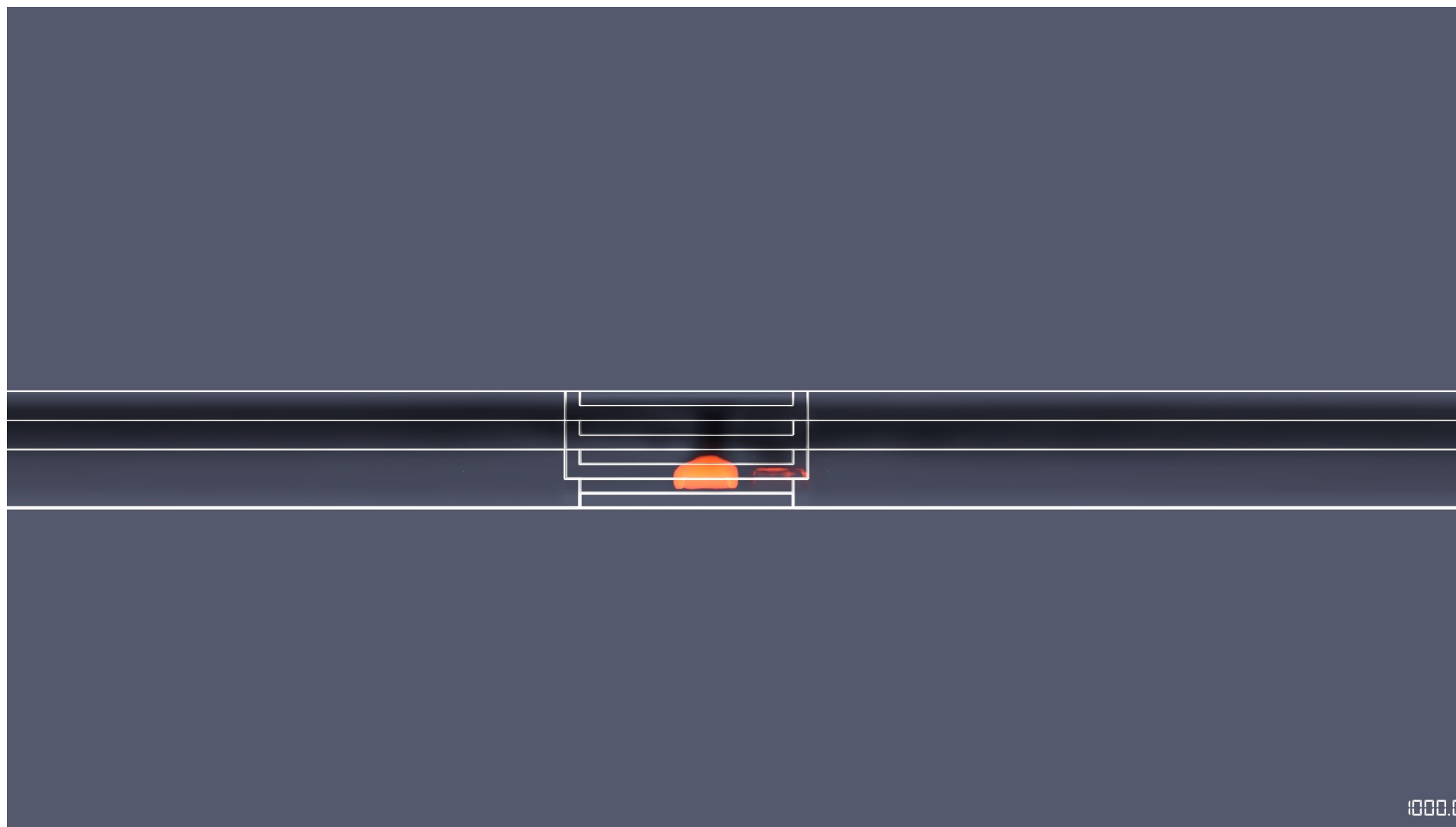


**Figura 5.14:** *Andamento della visibilità nello scenario D.4 al termine della simulazione, a quota 2 m.*

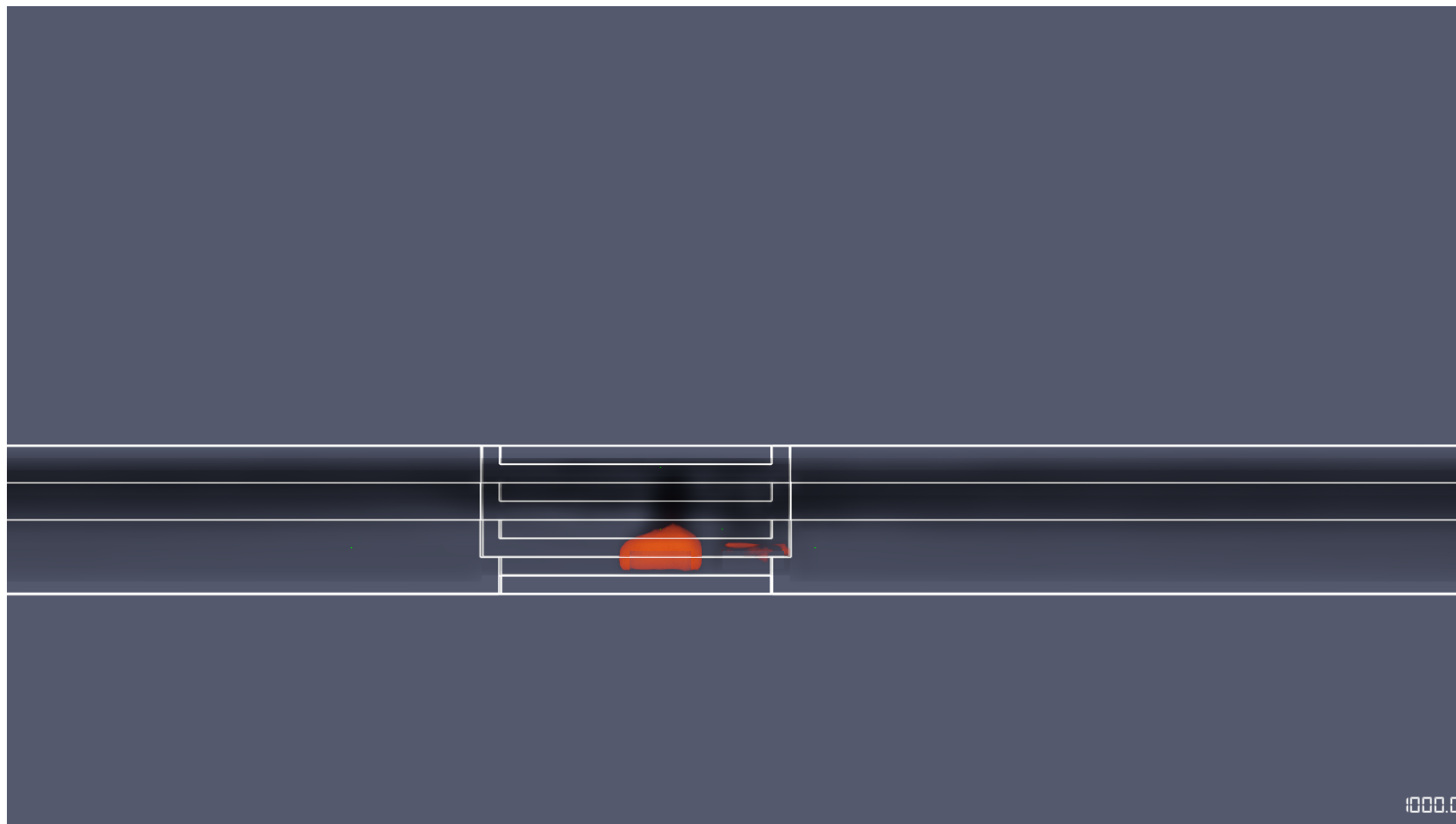
#### **5.4: Andamento dello strato di fumi**

Nelle Figure 5.15 - 5.17 viene riportato l'andamento complessivo dello strato di fumi nei casi B.4, C.4 e D.4 ad un tempo corrispondente a 1000 s.

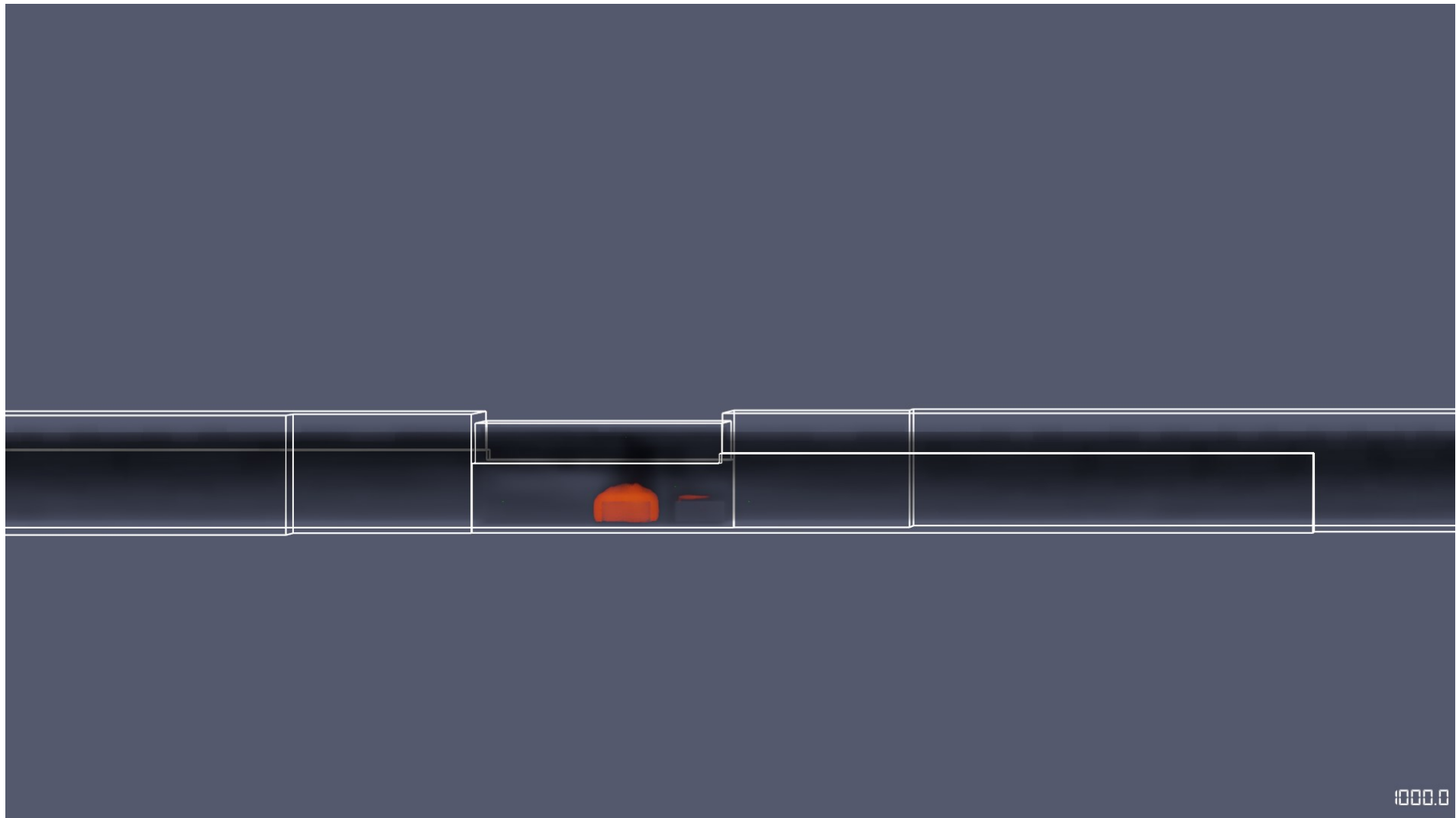
Da queste è evidente che la condizione di galleria in curva è di gran lunga la peggiore tra quelle considerate. Si può notare, inoltre, come i fumi nel caso C.4 preferiscano andare verso la destra della Figura 5.16, ovvero in salita, formando una coltre più spessa nella zona più alta della galleria.



**Figura 5.15:** *Andamento dello strato di fumi nello scenario B.4 al tempo  $t=1000$  s.*



**Figura 5.16:** *Andamento dello strato di fumi nello scenario C.4 al tempo  $t=1000$  s.*

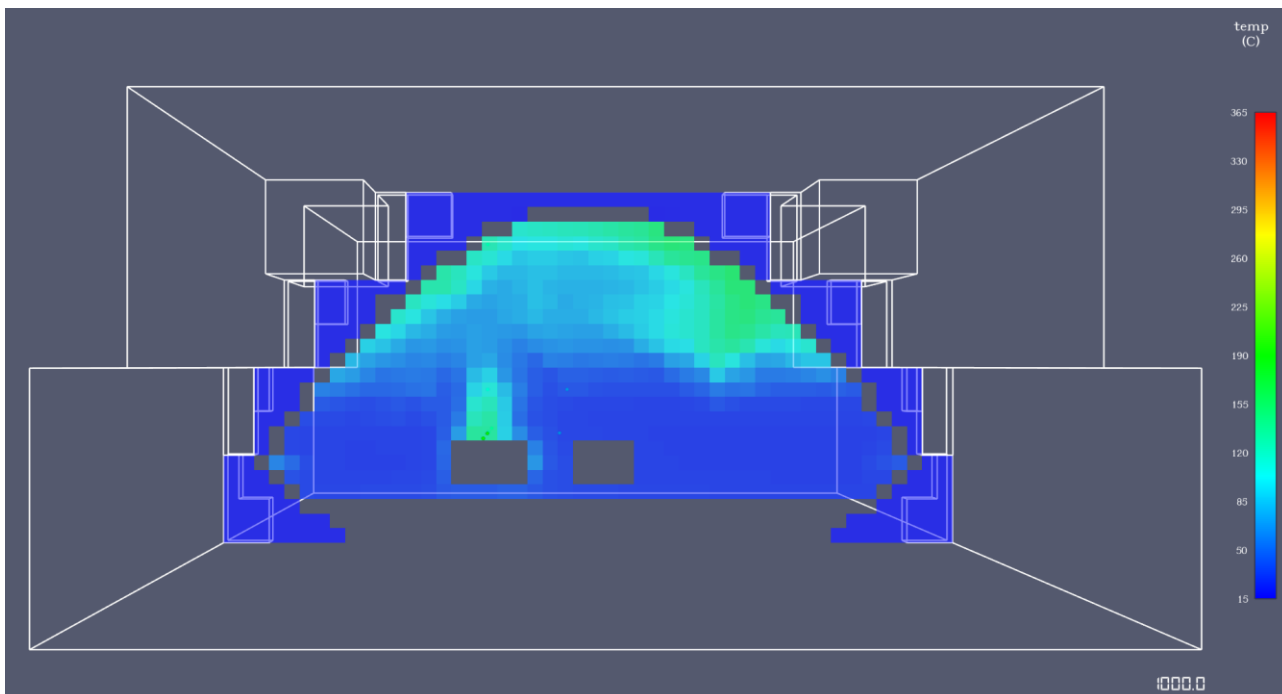


**Figura 5.17:** *Andamento dello strato di fumi nello scenario D.4 al tempo  $t=1000$  s.*

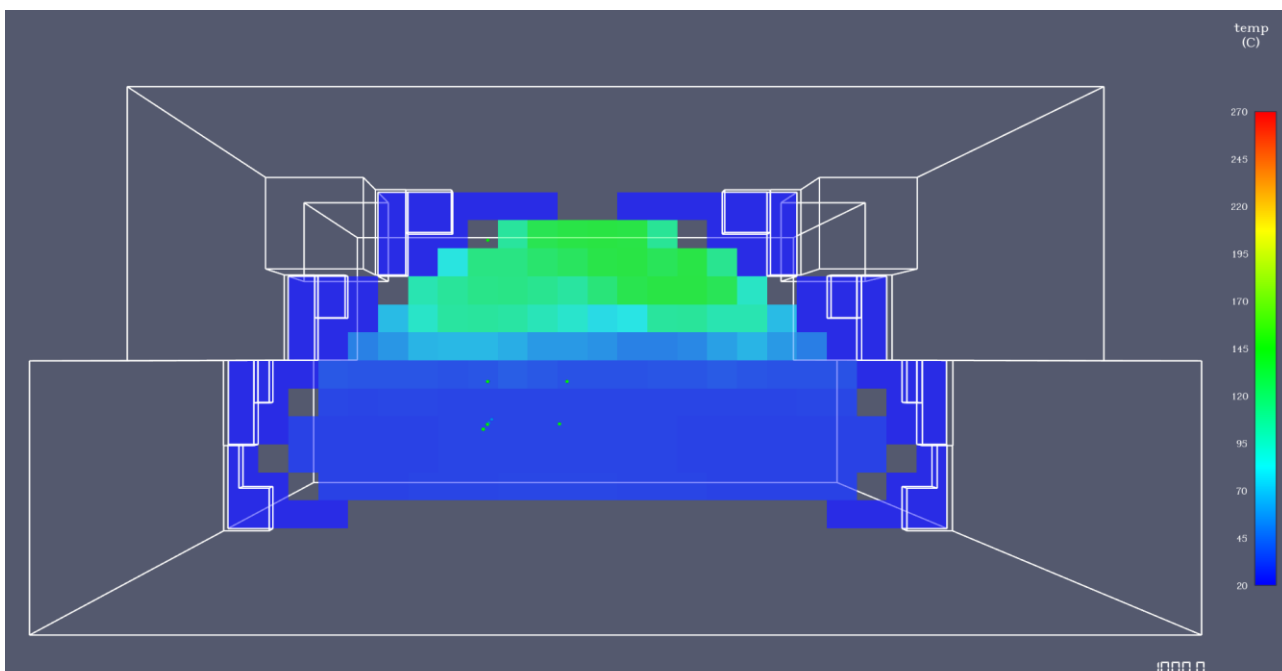
Si è scelto di effettuare un ulteriore approfondimento sul caso di galleria inclinata C.4, in quanto presenta l'andamento dello strato di fumi più interessante tra gli scenari presi in considerazione.

A tale fine, si riporta nelle Figure 5.18 e 5.19 la temperatura a 10 m di distanza dall'origine dell'incendio e, nelle Figure 5.20 e 5.21, la temperatura ai portali di entrata e uscita; tutte le figure sono tratte al tempo  $t = 1000$  s.

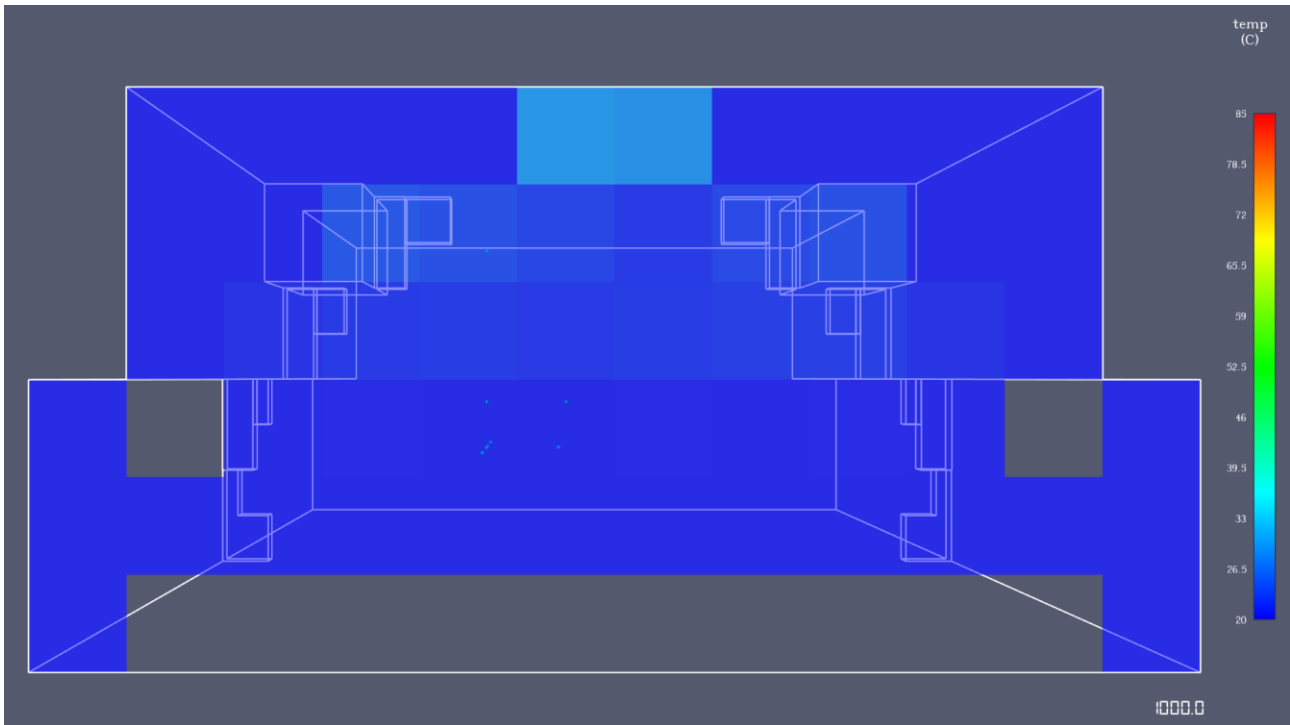
Non si è potuto riportare direttamente la visibilità in quanto non era stata impostato un piano di sezione per tale variabile nel modello originario; la temperatura è comunque correlata alla visibilità.



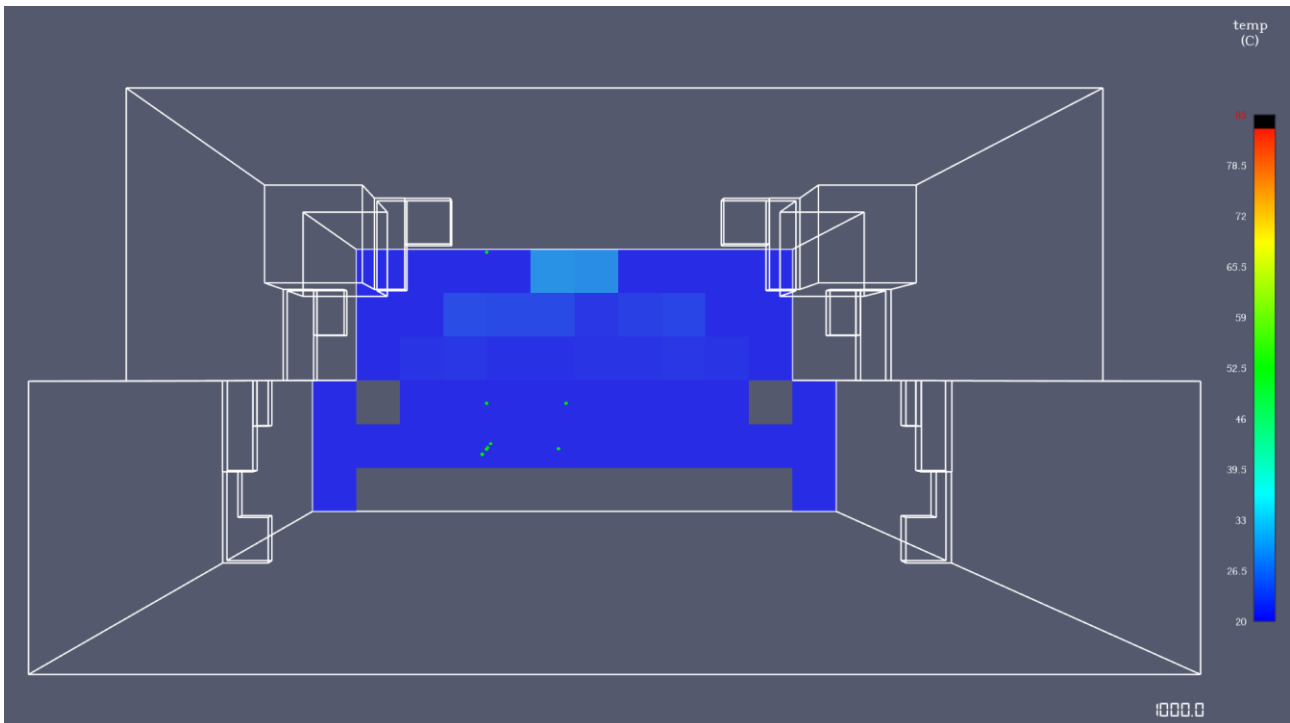
**Figura 5.18:** Andamento della temperatura nello scenario C.4 al tempo  $t=1000$  s, piano  $y=490$  m



**Figura 5.19:** Andamento della temperatura nello scenario C.4 al tempo  $t=1000$  s, piano  $y=510$  m



**Figura 5.20:** *Andamento della temperatura nello scenario C.4 al tempo  $t=1000$  s, piano  $y=0$  m, portale di entrata.*



**Figura 5.21:** *Andamento della temperatura nello scenario C.4 al tempo  $t=1000$  s, piano  $y=1000$  m, portale di uscita.*

Da queste Figure (18-21) si può vedere come le temperature più alte rimangono confinate nella zona sommitale della galleria al tempo  $t = 1000$  s; il comportamento generale è simile tra le sezioni poste ad una stessa distanza dal centro dell'incendio.



# Conclusioni

Il tema del presente lavoro è stato approfondire le problematiche relative all'incendio nelle gallerie autostradali, caratterizzandone la probabilità di accadimento e la gravità ad esso associata; come evidenziato nel Capitolo 2, si tratta di un fenomeno che è presente sul territorio italiano con una frequenza rilevante.

Gli obiettivi sono stati quindi articolati secondo due linee principali: la prima è consistita nel fornire un'indicazione qualitativa delle frequenze incidentali e degli incidenti stradali che siano evoluti in incendi all'interno di una galleria; la seconda invece ha riguardato la determinazione di alcuni scenari-tipo, sia dal punto di vista geometrico che chimico-fisico, e nell'analisi delle conseguenze ad essi associati.

Le metodologie adoperate per lo studio della prima linea sono state la ricerca di studi di letteratura in materia, dove è stata riscontrata una certa carenza di dati, specialmente per quanto riguarda il l'ambito italiano; per ampliare la panoramica fornita è stato necessario accedere al Database degli interventi del Corpo Nazionale dei Vigli del Fuoco.

Per quanto riguarda l'analisi delle conseguenze si è seguito un approccio di *Fire Safety Engineering*, determinando in prima battuta quali variabili possano influire sulla sicurezza degli occupanti e entro quali valori questi debbano rimanere; per ottenere dei risultati si sono simulati gli scenari attraverso l'uso di *PyroSim* e *FDS*.

Nel corso di questo lavoro sono quindi stati esaminati 13 scenari in totale, con tre in campo aperto, quattro per la galleria rettilinea e ancora tre per le altre tipologie di galleria, ovvero inclinata e con curva, con incendi di automobili tradizionali, elettriche, effetti domino di più automobili e *Pool Fire*.

Secondo i risultati ottenuti, l'evacuazione si sarebbe potuta portare a termine in tutti gli scenari considerati, anche se alcuni scenari presentano delle caratteristiche più critiche, come quelli geometrici in curva e quelli con più automobili che partecipano alla combustione, con l'ASET minimo conservativamente valutato in 13 minuti per le condizioni più critiche con quattro automobili che partecipano alla combustione, mentre per gli altri scenari il tempo disponibile per l'evacuazione è superiore a 20 minuti; ciononostante, se vi fossero delle persone bloccate nelle prime file di automobili, ad esempio in conseguenza ad un tamponamento iniziale, il loro soccorso sarebbe estremamente difficile in tutti gli scenari.

L'elemento che influisce maggiormente sulle condizioni all'interno della galleria è quindi il carico di incendio amplificato da più automobili incendiate; la geometria determina d'altro canto ulteriori criticità, specialmente nello scenario di galleria in curva e in quello di galleria inclinata.

L'intervento dei soccorritori è possibile in tutti i casi esaminati anche se notevolmente più difficoltoso in quelli nella galleria con doppia curva, ritenuti i più critici in quanto i fumi tendono a condensare più facilmente, anche se a rigore la gravità di questi scenari andrebbe controllata con una *mesh* più fitta, in quanto c'è la possibilità che la discretizzazione della superficie abbia influito in modo particolarmente negativo sulla qualità della simulazione; la presenza di automobili elettriche aumenta il tempo di spegnimento dell'incendio e, di conseguenza l'esposizione ai prodotti della combustione a cui sono soggetti i soccorritori. In aggiunta, si nota che le temperature raggiunte dai sensori a quota più alta, al massimo pari a circa 274° C, non suggeriscono una criticità dal punto di vista strutturale per questo tipo di scenari, anche se per affermarlo con maggiore certezza servirebbe un approfondimento ulteriore sulla struttura.

Come ultimo aspetto da affrontare c'è la lunghezza dei tempi di calcolo degli scenari: nonostante fossero tutti casi con numero di elementi contenuto, il tempo di simulazione è stato lungo per ciascuno di loro, andando da un minimo di 8 ore di elaborazione ad un massimo di 32 con un processore a quattro core sfruttati tutti al massimo delle loro potenzialità.

Questa lunghezza ha comportato una certa difficoltà nel perfezionare la selezione dei parametri oggetto di analisi, in quanto anche l'uso di modelli a scala ridotta non è utile per ottenere un'idea preliminare del miscelamento dei fumi e l'impiego di modelli ancora più grossolani sarebbe troppo impreciso.

Ulteriori approfondimenti di ricerca potrebbero essere:

l'allungamento dei tempi delle simulazioni (durate tutte almeno 20 minuti), che è sicuramente interessante per espandere le valutazioni, ma è di limitata utilità per la salvaguardia degli occupanti, in quanto, come già richiamato in precedenza, in tutti i casi presi in esame l'evacuazione si sarebbe potuta portare a termine con un buon margine di tempo disponibile;

l'impiego della ventilazione, non valutato dal presente lavoro, potrebbe ritardare il raggiungimento di condizioni critiche per gli occupanti, ed è assolutamente necessaria nel caso in cui vi fosse una conformazione geometrica sfavorevole, come quella in curva studiata o con casi di galleria più lunga; l'impiego di diverse tipologie di veicolo, come gli autocarri per trasporto merci e i trattori stradali con relativo rimorchio, che con un maggiore carico d'incendio possono mandare in crisi l'infrastruttura con maggiore facilità; inoltre, di interesse è anche il ruolo svolto dalla lunghezza della galleria e dalla collocazione dell'incendio;

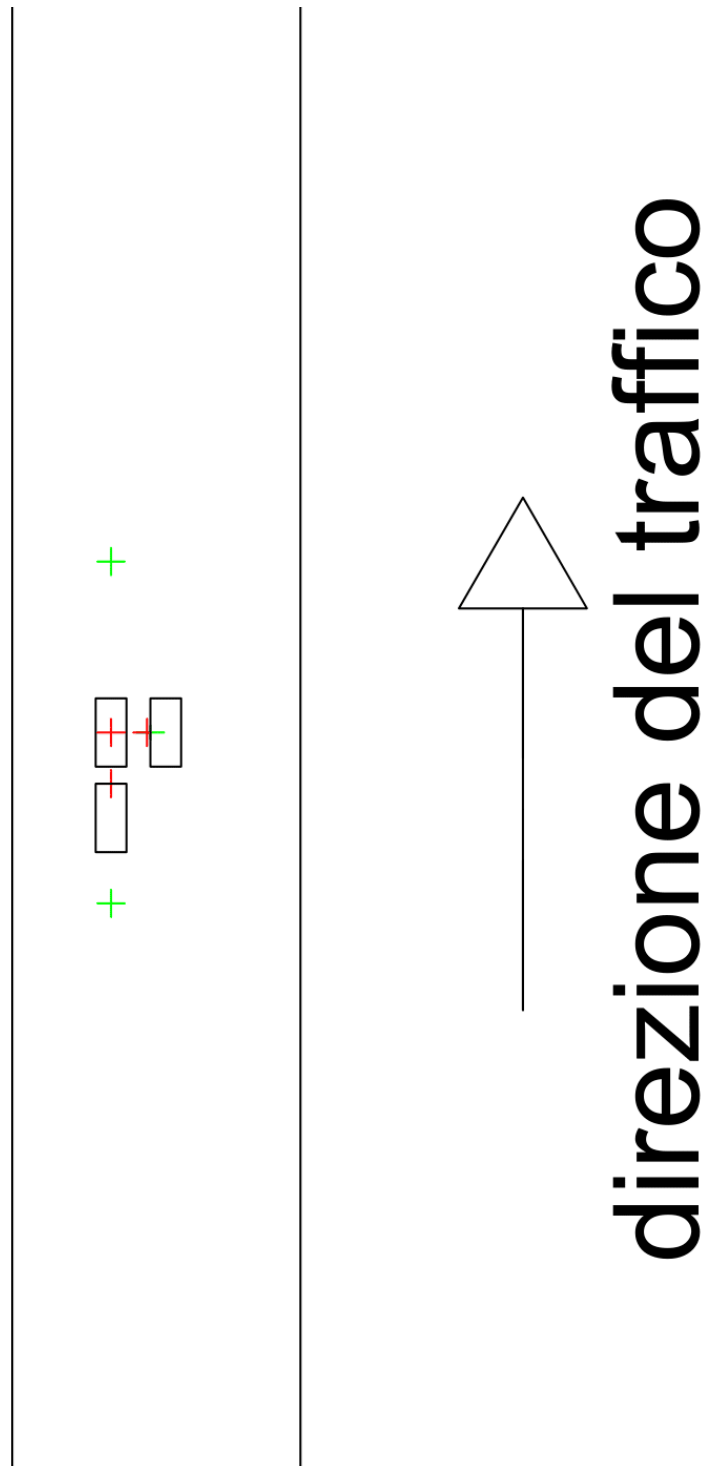
per dare una prospettiva più completa sulla gravità degli scenari considerati, inoltre, si potrebbe sviluppare una metodologia di *scoring* e, successivamente, di *ranking* dei casi di incendio considerati, sulla base dei parametri utili per determinare la salvaguardia della vita umana, per riuscire a sistematizzare la valutazione degli scenari secondo una metrica solida e precisa.

# Riferimenti bibliografici

- [1] G. Tesoriere, *Strade ferrovie aeroporti*, quarta edizione, 1984.
- [2] Decreto Ministeriale 5-11-2001: Norme funzionali e geometriche per la costruzione di strade.
- [3] Li, W. Chow, *Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems*
- [4] Direzione Centrale Progettazione ANAS spa, *Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente*, 2009
- [5] Shy Bassan, *Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels*
- [6] Regolamento (UE) N. 1303/2014 della Commissione Europea
- [7] Database ACI Open Parco Veicoli  
<https://opv.aci.it/WEBDMCircolante/>
- [8] Guida ad Open Parco Veicoli  
<https://opv.aci.it/WEBDMCircolante/noteOPV.html>
- [9] Scheda di sicurezza benzina, di Q8 Quaser srl.
- [10] Scheda di sicurezza gasolio, di Q8 Quaser srl.
- [11] Scheda di sicurezza Gas di Petrolio Liquefatto, di Q8 Quaser srl.
- [12] Scheda di sicurezza gas metano, di Repsol Italia spa.
- [13] Fredrik Larsson, Petra Andersson, Per Blomqvist, Anders Loren e Bengt-Erik Mellander, *Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests*.
- [14] Lazarenko, Loik, Shtain e Riegert, *Research of Fire Hazards of Cells in Electric Car Batteries*.
- [15] Scheda di sicurezza acido fluoridrico, Carl Roth GmbH.
- [16] Shimaa Al-Quradaghi, Quipeng P. Zheng e Ali Elkamel, *Generalized Framework for the Design of Eco-Industrial Parks: Case Study of End-of-Life Vehicles*.
- [17] A. Lönnermark e P. Blomqvist, *Emissions from an automobile fire*.
- [18] Lecocq, Bertana, Truchot e Marlair, *Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle*

- [19] Zabetakis and Burgess, *Research on hazards associated with production and handling of liquid hydrogen*
- [20] *Permanent International Association of Road Congress (PIARC), "Fire and smoke control in road tunnels", ventilation for fire and smoke control, Capitolo V, Agosto 1999*
- [21] DM 3 agosto 2015, Codice di Prevenzione Incendi
- [22] INAIL, incidenti in gallerie stradali, 2019, disponibile su <https://www.inail.it/cs/internet/comunicazione/pubblicazioni/catalogo-generale/pubbl-incidenti-in-gallerie-stradali.html> (ultimo accesso Dicembre 2022).
- [23] PyroSim User Manual
- [24] FDS User Manual
- [25] Database degli interventi dei Vigili del Fuoco
- [26] <https://www.tunnelmb.net/it-IT/statistiche-del-traffico>

# Appendice A: mappa dei sensori impiegati



**Figura A.1:** *Mappa delle posizioni dei sensori.*

In rosso sono segnalati i sensori della temperatura e in verde quelli per la visibilità e la FED. Oltre a questi sono presenti altri due sensori per visibilità e FED, posizionati a 100 m di distanza dall'origine dell'incendio.

Nella Tabella seguente (A.1) vengono riportare le tipologie dei sensori e le loro coordinate in un sistema Oxyz fissato sul centro dell'imbocco della galleria, a livello della pavimentazione stradale.

**Tabella A.1:** *Localizzazione dei diversi sensori utilizzati nel presente lavoro.*

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Coordinata x</b>	<b>Coordinata y</b>	<b>Coordinata z</b>
T.1	Temperatura	-2.65 m	498.0 m	3.0 m
T.2	Temperatura	-2.65 m	498.0 m	7.0 m
T.3	Temperatura	-0.55 m	498.0 m	3.0 m
T.4	Temperatura	-2.65 m	494.0 m	3.0 m
V.1	Visibilità	-0.75 m	498.0 m	1.8 m
V.2	Visibilità	-2.65 m	488.0 m	1.8 m
V.3	Visibilità	-2.65 m	398.0 m	1.8 m
V.4	Visibilità	-2.65 m	508.0 m	1.8 m
V.5	Visibilità	-2.65 m	598.0 m	1.8 m
F.1	FED	-2.65 m	498.0 m	1.8 m
F.2	FED	-2.65 m	488.0 m	1.8 m
F.3	FED	-2.65 m	398.0 m	1.8 m
F.4	FED	-2.65 m	508.0 m	1.8 m
F.5	FED	-2.65 m	598.0 m	1.8 m

# Appendice B: esempio di implementazione del modello in FDS

## B.1: Esempi della modellazione degli ostacoli e della mesh

### *B.1.1: Esempio della modellazione degli ostacoli*

La galleria viene modellata da *Pyrosim* importando un modello 3d generato da un programma di *Computer-Aided Design* come *AutoCAD*; il modello tridimensionale è generato tramite estrusione lungo la traiettoria desiderata della sezione precedentemente descritta.

*Pyrosim* poi procede automaticamente a suddividere il modello creato in una serie di entità denominate ostacoli, di forma corrispondente ad un parallelepipedo e con le coordinate corrispondenti alla cella della mesh che meglio approssima la posizione della galleria; queste informazioni sono poi trasmesse ad FDS tramite un file di testo.

Viene riportato sotto un esempio, relativo alla galleria con doppia curva.

```
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.8,-8.4,-1.6,10.0,0.6,1.4, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.8,-8.4,-2.4,-1.6,1.0,1.4, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,2.0,10.0,0.2,0.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,-4.8,-1.2,0.6,1.0, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,-10.0,-8.8,0.6,1.4, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,-8.8,-4.8,0.6,1.8, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,-4.8,6.0,1.4,1.8, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='3dSol1', XB=-8.4,-8.0,6.0,9.2,1.4,2.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='ADIABATIC'/
```

In cui la prima parte indica il comando che FDS deve avviare, in questo caso la creazione di un ostacolo tramite `OBST ID`, che assegna un nome all'ostacolo creato, ovvero `3dSol1`; i valori seguenti determinano l'estensione dell'oggetto in un sistema di coordinate  $Oxyz$ , in particolare immettendo i valori massimi e minimi in  $x$ ,  $y$ , e  $z$ .

In seguito, vengono determinate le caratteristiche cromatiche dell'oggetto e le caratteristiche fisiche della superficie, rispettivamente con i comandi `COLOR` e `SURF_ID`.

### B.1.2: Esempio della modellazione della mesh

La *mesh*, come già accennato nei capitoli precedenti, viene determinata dall'utente di *Pyrosim* che ne detta la dimensione assoluta, quella del singolo elemento e, dipendentemente da questi due primi parametri, il numero di elementi; sono possibili una serie di operazioni per migliorare la qualità della *mesh*, come l'unione di più *meshes* in una unica e la divisione in più *meshes*, sia attraverso il taglio con un piano che mediante una semplice distribuzione degli elementi originali.

Viene in seguito riportato un esempio delle diverse *meshes* impiegate nel modello di galleria rettilinea e inclinata.

```
&MESH ID='Mesh01-02-01', IJK=44,3,6, XB=-8.8,8.8,489.6,490.8,1.2,3.6/  
&MESH ID='Mesh01-02-02', IJK=48,3,6, XB=-9.6,9.6,508.4,509.6,-1.2,1.2/  
&MESH ID='Mesh01-02-01', IJK=24,3,6, XB=-4.8,4.8,489.6,490.8,6.0,8.4/  
&MESH ID='Mesh01-01-01', IJK=36,3,6, XB=-7.2,7.2,489.6,490.8,3.6,6.0/  
&MESH ID='Mesh01-02-02', IJK=36,3,6, XB=-7.2,7.2,508.4,509.6,3.6,6.0/  
&MESH ID='Mesh02-02-02', IJK=24,3,6, XB=-4.8,4.8,508.4,509.6,6.0,8.4/  
&MESH ID='Mesh02-02-02', IJK=44,3,6, XB=-8.8,8.8,508.4,509.6,1.2,3.6/  
&MESH ID='Mesh01-01', IJK=48,3,6, XB=-9.6,9.6,489.6,490.8,-1.2,1.2/
```

Dove la prima parte indica il comando di creazione di una *mesh* tramite `MESH ID`, che assegna un nome alla *mesh* creata, come `Mesh01-02-01`, `Mesh01-02-02`, etc.; i valori seguenti, con il comando `IJK`, determinano il numero di elementi negli assi *x*, *y* e *z* e `XB` detta l'estensione dell'oggetto in un sistema di coordinate *Oxyz*, in particolare immettendo i valori massimi e minimi in *x*, *y*, e *z*.



## B.2: Esempi della modellazione dei focolari

### B.2.1: Esempio della modellazione dell'automobile elettrica

L'incendio dell'automobile elettrica viene modellato da *Pyrosim* tramite la definizione delle caratteristiche delle superfici sulle quali avviene, supportato dalla reazione chimica che ne sta alla base.

Le informazioni in input vengono trasmesse a FDS sempre tramite un file di testo; la potenza istantanea dell'incendio viene determinata facendo riferimento alla potenza massima per unità di area e alla frazione F che in un dato istante la curva assume.

Viene riportato sotto un esempio, comune a tutti gli scenari geometrici con auto elettrica (X.1).

```
&SURF ID='Electric car fire, HRR+HF emission',
      RGB=255,102,0,
      ADIABATIC=.TRUE.,
      MASS_FLUX=1.1E-4,
      SPEC_ID='HYDROGEN FLUORIDE',
      RAMP_MF='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_MF',
      HRRPUA=166.162033,
      RAMP_Q='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_Q'/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=249.2862, F=1.142148E-3/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=269.8626, F=0.014269/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=271.3326, F=0.039271/
...
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=822.252, F=0.0/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=826.284, F=0.478/
&RAMP ID='Electric car fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=829.464, F=0.828/
```

Il primo comando utilizzato è `SURF ID`, che definisce il nome della superficie; questo è seguito da `RGB`, che ne determina il colore, dalle caratteristiche fisiche, come il passaggio del calore, il flusso massivo `MASS_FLUX` delle specie `SPEC_ID` considerate, nei casi esaminati il solo HF, il cui comportamento nel tempo è dettato da `RAMP_MF` tramite il proprio fattore F, il flusso massimo per unità di superficie `HRRPUA`, il cui andamento temporale è anch'esso governato da un fattore F e dal `RAMP_Q`.

Le righe successive definiscono la crescita dei due parametri principali, il calore emesso e la massa emessa, tramite il comando `RAMP ID`, seguito dal nome e dal tipo di comportamento desiderato, `RAMP_Q` e `RAMP_MF`, con poi la coppia dei valori di tempo e fattori F.

## B.2.2: Esempio della modellazione dell'automobile tradizionale

L'incendio dell'automobile tradizionale è caratterizzato da *Pyrosim* tramite la definizione delle caratteristiche delle superfici sulle quali avviene, supportato dalla reazione chimica che ne sta alla base.

Le informazioni in input sono trasmesse a FDS sempre attraverso il file di testo; la potenza istantanea dell'incendio viene determinata facendo riferimento alla potenza massima per unità di area e alla frazione F che in un certo istante la curva assume.

Viene riportato sotto un esempio, comune a tutti gli scenari geometrici con auto tradizionale (X.2).

```
&SURF ID='ICE fire, HRR+HF emission',
      RGB=26,204,26,
      TMP_FRONT=0.0,
      MASS_FLUX=1.55023E-4,
      SPEC_ID='HYDROGEN FLUORIDE',
      RAMP_MF='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_MF',
      HRRPUA=191.99722,
      RAMP_Q='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_Q'/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=183.114, F=1.972657E-3/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=232.0992, F=0.014106/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_Q', T=239.8338, F=0.063572/
...
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=591.174, F=0.0/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=610.29, F=1.0/
&RAMP ID='ICE fire, HRR+HF emission_RAMP_MF', T=632.592, F=0.581449/
```

Le cui caratteristiche sono le stesse di quelle descritte nel paragrafo precedente.

Giunto (forse) alla fine di questo lavoro e di questo mio percorso universitario, desidero rivolgere un grato pensiero a tutte le persone che mi hanno accompagnato in questi anni, chi da vicino e chi da lontano, ma non in modo meno prezioso e rassicurante.

Vorrei cominciare dal ringraziare chi mi segue da più tempo, i miei genitori, che, specialmente in questi mesi impegnativi, mi sono stati vicini e mi hanno aiutato andando *above and beyond* a quanto potessi aspettarmi; in tal senso, un grazie speciale va alla mia correttrice di bozze.

Un'altra menzione se la merita anche il mio buon fratello, che, pur avendo l'innegabile difetto di star diventando un po' troppo architetto, è stato capace di regalarmi confronti importanti durante i passaggi verso le varie stazioni verso Milano.

Non posso anche dimenticare tutti i parenti, vicini e lontani, che hanno sempre reso la famiglia una roccia su cui potessi appoggiarmi e hanno fornito stimoli incessanti per farmi crescere.

Dal cuore un grazie va anche a chi è cresciuto assieme a me, compagni di scuola e di liceo, che, anche se ci siamo persi di vista (per motivi di cui sono innegabilmente colpevole), hanno aiutato a creare la persona che sono oggi e che sarò domani; grazie Matteo, grazie Alessandro.

Ringrazio anche tutte le persone che ho avuto il piacere di conoscere in Collegio, in particolare i compagni di piano con cui ho condiviso una gran quantità di momenti tremendamente divertenti e spesso disastrosi, tante preparazioni di lauree, tante partite a Bang, tanta vita in generale; grazie Giovanni, grazie Manuel, grazie Francesco.

Grazie anche a chi in questi anni ha condiviso il percorso di animatore, con tanto impegno e tante fatiche, specialmente per credere che esista un modo diverso di vedere il mondo, anche se spesso e volentieri l'impegno che ci mettiamo non è completamente ripagato; ciononostante, resto fermamente convinto che il gioco valga la candela, grazie per farmi ritrovare il nord nei momenti difficili.

Rivolgo un grazie anche a chi ho incontrato per poco tempo, ma il cui contributo silenzioso e distante ha avuto un ruolo fondamentale nel formare la persona che sono oggi.

Infine, un pensiero va anche a chi oggi non è qui per festeggiare assieme a tutti noi, ma ha sempre creduto in me e nelle mie capacità; non spero di non dimenticare mai gli insegnamenti che ho tratto dal tempo passato assieme.

*“Tho' much is taken, much abides; and tho'  
We are not now that strength which in old days  
Moved earth and heaven, that which we are, we are;  
One equal temper of heroic hearts,  
Made weak by time and fate, but strong in will  
To strive, to seek, to find, and not to yield.”*

Ulysses, by lord Alfred Tennyson