



**Politecnico  
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

**IL RISCHIO INCENDIO  
DI VEICOLI ELETTRICI  
IN AMBIENTE CONFINATO:  
ANALISI E APPROCCI DI FSE**

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Vancetti

Correlatore:

Ing. Filippo Così

Ing. Emiliano Cereda

Candidato:

Giovanni Pizzato

Marzo 2026

*A quel bambino che non parlava.  
A chi ha camminato al mio fianco  
A tutto ciò che deve ancora iniziare*

## ABSTRACT (ITALIANO)

La transizione verso la mobilità elettrica sta modificando in modo significativo il profilo di rischio incendio delle autorimesse, principalmente a causa delle peculiarità associate alle batterie agli ioni di litio e al fenomeno del *Thermal Runaway*. Tali eventi presentano dinamiche complesse, elevate potenze termiche e difficoltà di estinzione, che richiedono un'attenta valutazione ingegneristica.

L'attuale quadro normativo nazionale, pur in evoluzione, risulta ancora in parte fondato su scenari tradizionali. In tale contesto, il presente lavoro analizza il potenziale dell'approccio prestazionale di Fire Safety Engineering (FSE) come strumento per la valutazione quantitativa del rischio e per lo sviluppo di soluzioni progettuali personalizzate.

## ABSTRACT (ENGLISH)

### **FIRE RISK OF ELECTRIC VEHICLES IN CONFINED ENVIRONMENTS: FSE ANALYSIS AND APPROACHES**

The transition to electric mobility is significantly changing the fire risk profile of indoor parking facilities, mainly due to the specific hazards associated with lithium-ion batteries and to thermal runaway phenomenon. These events have complex dynamics, high thermal power and pose significant extinguishing challenges that demand rigorous engineering assessment.

The current national regulatory framework, although evolving, is still partly based on traditional scenarios. In this context, this paper analyses the potential of the Fire Safety Engineering (FSE) performance-based approach as a tool for quantitative risk assessment and the development of customised design solutions.

## Indice

ABSTRACT (ITALIANO).....	II
ABSTRACT (ENGLISH) .....	III
SIGLE E ABBREVIAZIONI .....	1
INTRODUZIONE.....	2
CAPITOLO 1 I VEICOLI ELETTRICI.....	5
1.1 Veicoli elettrici: storia ed evoluzione .....	5
1.1.1 Storia della mobilità elettrica .....	5
1.1.2 Le tipologie di propulsione .....	7
1.1.3 Il mercato in crescita .....	9
1.2 La tecnologia di accumulo .....	17
1.2.1 Fondamenti dell'architettura delle batterie al litio .....	17
1.2.2 Le principali chimiche per gli accumulatori .....	20
1.3 Analisi del rischio incendio .....	24
1.3.1 Modalità di guasto degli accumulatori .....	24
1.3.2 Il Thermal Runaway (TR).....	27
1.3.3 Scenari di incendio .....	30
1.3.4 Prodotti della combustione.....	31
1.3.5 Rischio esplosione.....	34
1.4 Mitigazione del rischio incendio e inquadramento normativo .....	35
1.4.1 Estinzione.....	35
1.4.2 Contesto normativo internazionale .....	38
1.4.3 Quadro normativo italiano verso la nuova RTV 6.....	40
1.4.4 Caratterizzazione del focolaio.....	42
1.4.5 Misure di prevenzione e protezione .....	46
CAPITOLO 2 GUIDA ALL'APPROCCIO PRESTAZIONALE COME RISPOSTA AI NUOVI RISCHI E PRESCRIZIONI .....	50
2.1 Inquadramento e contesto normativo.....	50
2.2 La progettazione antincendio prestazionale.....	52
2.3 Definizione del progetto .....	53
2.3.1 Caratteristiche architettoniche.....	53
2.3.2 Caratteristiche impiantistiche.....	54

2.3.3	Aspetti gestionali.....	55
2.3.4	Caratteristiche degli occupanti.....	56
2.4	Definizione degli obiettivi .....	59
2.4.1	Modelli e relative soglie di prestazione .....	60
2.5	Identificazione degli scenari .....	66
2.6	Descrizione quantitativa .....	67
2.6.1	Modellazione.....	67
2.6.2	Focolare.....	69
2.6.3	Definizione della reazione di combustione .....	71
2.6.4	Propagazione .....	76
2.6.5	Effetto degli scenari di protezione attiva .....	78
2.6.6	Punti di acquisizione .....	79
2.6.7	Esodo.....	81
2.7	Analisi dei risultati.....	83
2.8	Relazione tecnica .....	85
CAPITOLO 3 FSE APPLICATA: SVILUPPO, VALIDAZIONE E ANALISI .....		86
3.1	Validazione della reazione.....	88
3.1.1	Validazione della produzione di HF .....	88
3.2	Scenario esemplificativo.....	92
3.2.1	Impostazione dello scenario .....	92
3.2.2	Acquisizione dati.....	94
3.2.3	Valutazione dei risultati .....	96
3.2.4	Valutazione del distanziamento delle auto.....	108
CONCLUSIONI.....		120
RIFERIMENTI.....		123

## Indice delle figure

Figura 1.1: Percentuale di veicoli elettrici immatricolati dal 2016 al 2024 (fonte Eurostat [6]).....	10
Figura 1.2: Numero e percentuale di veicoli elettrici venduti nel mondo (fonte IEA [8]) .....	12
Figura 1.3: Numero e percentuale di veicoli elettrici circolanti nel mondo (fonte IEA [8]).....	12
Figura 1.4: Numero e percentuale di veicoli elettrici venduti in Italia (fonte IEA [8]).....	13
Figura 1.5: Numero e percentuale di veicoli elettrici circolanti in Italia (fonte IEA [8]) .....	13
Figura 1.6: Flusso di produzione dei componenti e delle auto elettriche (fonte [8]) .....	16
Figura 1.7: Modelli di batterie al Litio utilizzate .....	18
Figura 1.8: Grafico radar di confronto tra le prestazioni di diverse chimiche di batterie.....	22
Figura 1.9: Il Thermal Runaway (TR) .....	28
Figura 1.10: Finestra di sicurezza e zona di TR delle batterie al Litio.....	29
Figura 1.11: Triangolo del fuoco in presenza di TR [27].....	29
Figura 1.12: Grafico delle curve RHR di automobili a combustione interna.....	44
Figura 1.13: Grafico delle curve RHR di automobili elettriche .....	45
Figura 2.1: Diagramma di flusso delle fasi per la progettazione antincendio prestazionale .....	52
Figura 2.2: Tolleranza termica per uomini a riposo, pelle nuda e basso movimento dell'aria [49].....	63
Figura 2.3: Tolleranza al calore convettivo per individui con pelle esposta e completamente vestite..	64
Figura 2.4: Curva RHR SUVEREN.....	70
Figura 2.5: Esempio di slice della temperatura nel piano verticale.....	80
Figura 2.6: Esempio di slice della temperatura nel piano orizzontale a 1,8 m.....	80
Figura 2.7: ASET e RSET .....	82
Figura 2.8: Processo decisionale per la verifica dei risultati.....	84
Figura 3.1: Simulazione in FDS, geometria generale realistica.....	89
Figura 3.2: Simulazione FDS, geometria discretizzata .....	89
Figura 3.3: Slice della produzione di HF a 200 .....	90
Figura 3.4: Slice della produzione di HF a 400 s.....	90
Figura 3.5: Slice della produzione di HF a 600 .....	90
Figura 3.6: Slice della produzione di HF a 800 .....	90
Figura 3.7: Confronto fra la concentrazione di HF prodotta nel test reale e nella simulazione .....	90
Figura 3.8: Rappresentazione del setup della simulazione in oggetto .....	93
Figura 3.9: Curva RHR utilizzata come spiegato nel paragrafo 2.6.2.....	93
Figura 3.10: Planimetria e prospetto della simulazione con la posizione dei sensori .....	95
Figura 3.11: Grafico del modello del calore (temperatura) da 0 a 400s.....	97
Figura 3.12: Grafico del modello del calore (temperatura) da 0 a 2700s.....	97
Figura 3.13: Slice della temperatura a 100 s.....	98
Figura 3.14: Slice della temperatura a 200 s.....	98
Figura 3.15: Slice della temperatura a 300 s.....	98
Figura 3.16: Slice della temperatura a 500 s.....	98

Figura 3.17: Grafico del modello del calore (irraggiamento) da 0 a 2700s .....	99
Figura 3.18: Grafico del modello del calore (irraggiamento) da 0 a 400s .....	100
Figura 3.19: Grafico del modello di oscuramento della visibilità da 0 a 2700s .....	101
Figura 3.20: Grafico del modello di oscuramento della visibilità da 0 a 400s .....	101
Figura 3.21: Slice visibilità a 100s.....	102
Figura 3.22: Slice visibilità a 200s.....	102
Figura 3.23: Slice visibilità a 300s.....	102
Figura 3.24: Slice visibilità a 500s.....	102
Figura 3.25: Grafico del modello dei gas tossici da 0 a 2700s.....	103
Figura 3.26:Grafico del modello dei gas tossici da 0 a 400s.....	103
Figura 3.27: Grafico del modello dei gas irritanti da 0 a 2700s .....	104
Figura 3.28: Grafico del modello dei gas irritanti da 0 a 400s.....	105
Figura 3.29: Grafico della produzione di HF da 0 a 2700 s .....	106
Figura 3.30: Grafico della produzione di HF da 0 a 400 s .....	106
Figura 3.31: Configurazione della prova di propagazione .....	110
Figura 3.32: Configurazione nel software.....	110
Figura 3.33: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 40 cm a sinistra dall'innesco .....	111
Figura 3.34: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 40 cm a destra dall'innesco .....	111
Figura 3.35: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 60 cm a sinistra dall'innesco .....	112
Figura 3.36: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 60 cm a destra dall'innesco .....	113
Figura 3.37: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 80 cm a sinistra dall'innesco .....	114
Figura 3.38: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 80 cm a destra dall'innesco .....	114
Figura 3.39: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 120 cm a sinistra dall'innesco .....	115
Figura 3.40: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 120 cm a destra dall'innesco.....	116
Figura 3.41: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 150 cm a sinistra dall'innesco .....	117
Figura 3.42: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 150 cm a destra dall'innesco.....	117

## Indice delle tabelle

Tabella 1: Caratteristiche delle batterie a seconda della chimica (fonti [13] [14] [15] [16] [17]).....	21
Tabella 2: Modellazione degli occupanti .....	58
Tabella 3: soglie di prestazione.....	60
Tabella 4: Valori di definizione del focolare .....	71
Tabella 5: Parametri di input focolare.....	74
Tabella 6: Valori per la definizione della funzione curva di crescita.....	76

## SIGLE E ABBREVIAZIONI

ASET	Available Safe Escape Time (Tempo disponibile per l'esodo sicuro)
BESS	Battery Energy Storage Systems (Sistemi di accumulo energetico a batteria)
BEV	Battery Electric Vehicle (Veicolo Elettrico a Batteria)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Fluidodinamica Computazionale)
EV	Electric Vehicle (Veicolo Elettrico)
FDS	Fire Dynamics Simulator
FSE	Fire Safety Engineering (Ingegneria della sicurezza antincendio)
GSA	Gestione della Sicurezza Antincendio
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veicolo Ibrido)
RHR/RHR	Heat Release Rate (Tasso di rilascio termico)
ICE	Internal Combustion Engine (Motore a combustione interna)
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (Veicolo a Motore a Combustione Interna)
LIB	Lithium-Ion Batteries (Batterie agli ioni di litio)
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle (Ibrido leggero)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veicolo Ibrido Plug-in)
RSET	Required Safe Escape Time (Tempo richiesto per l'esodo sicuro)
RTV	Regola Tecnica Verticale
SEI	Solid Electrolyte Interface (Strato di interfaccia dell'elettrolita solido)
TR	Thermal Runaway

## INTRODUZIONE

La progressiva decarbonizzazione del settore dei trasporti, spinta dalle direttive europee del pacchetto "Fit for 55", sta determinando una rapida trasformazione del parco veicolare circolante, con una diffusione esponenziale dei Veicoli Elettrici (EV). Sebbene questa transizione sia cruciale per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale e di neutralità climatica, essa introduce sfide inedite e complesse nel campo della sicurezza antincendio, in particolare all'interno delle autorimesse chiuse.

Il cuore tecnologico della mobilità elettrica, ovvero la batteria agli ioni di litio, presenta dinamiche di incendio peculiari governate dal fenomeno del *Thermal Runaway*. Tali eventi si distinguono radicalmente dagli incendi tradizionali per un rapido rilascio di energia, elevate difficoltà di estinzione, rischio concreto di riaccensione e, fattore ancor più critico, per l'emissione di gas altamente tossici — tra cui l'acido fluoridrico (HF) — che differiscono sostanzialmente dai prodotti della combustione generati dai veicoli a motore endotermico.

L'attuale quadro normativo italiano, rappresentato dal Codice di Prevenzione Incendi e dalla Regola Tecnica Verticale V.6, pur essendo in costante aggiornamento, si fonda storicamente su scenari derivanti da veicoli a combustione interna (ICEV) rivelandosi strutturalmente inadeguato a gestire la variabilità e l'intensità di questi nuovi focolari. Le recenti ipotesi di aggiornamento normativo mirano a mitigare il rischio attraverso l'imposizione di rigidi distanziamenti geometrici, suggerendo ad esempio l'interposizione di una distanza libera di 1,5 metri ogni sei stalli. Sebbene le simulazioni condotte in questo elaborato abbiano confermato l'efficacia di tale distanza nell'inibire la propagazione dell'incendio, permangono forti perplessità concettuali. L'accettazione implicita di un potenziale coinvolgimento simultaneo di ben 6 veicoli rappresenta, in un ambiente confinato, un livello di rischio residuo ancora troppo elevato. Inoltre, questi vincoli si scontrano con evidenti limiti logistici, riducendo drasticamente la capacità ricettiva delle

strutture. In un futuro prossimo, dominato da un parco circolante a forte trazione elettrica, la segregazione spaziale diverrà una soluzione tecnicamente inattuabile e ingegneristicamente insostenibile. È dunque necessario un cambio di paradigma che permetta di gestire la sicurezza in condizioni di piena promiscuità tra le diverse motorizzazioni, superando la logica della separazione fisica.

In tale contesto, il presente elaborato si inserisce con l'obiettivo di analizzare il rischio specifico derivante dai veicoli elettrici (BEV) e di fornire ai progettisti una metodologia operativa fondata sull'approccio prestazionale della *Fire Safety Engineering* (FSE). Si intende dimostrare come l'utilizzo di strumenti avanzati di calcolo consenta di governare questo "nuovo rischio", elaborando soluzioni progettuali flessibili che garantiscano la tutela incondizionata della vita umana senza penalizzare la fruibilità delle infrastrutture.

Attraverso simulazioni fluidodinamiche computazionali (CFD) realizzate con il software *Fire Dynamics Simulator* (FDS), sono stati analizzati scenari di incendio cautelativi, adottando curve di rilascio termico sperimentali derivate dal progetto di ricerca SUVEREN, con picchi di potenza fino a 7 MW.

Un elemento distintivo e innovativo dello studio è rappresentato dalla definizione manuale della cinetica di reazione, basata sulla formula bruta del combustibile specifico per i veicoli elettrici. Questo approccio ha consentito di tracciare con precisione la dispersione di specie tossiche critiche, quali l'acido fluoridrico (HF) e l'acido cloridrico (HCl), spesso trascurate nelle modellazioni semplificate. L'analisi prestazionale ha permesso conseguentemente di verificare le condizioni di tenibilità<sup>1</sup> per gli occupanti mediante il calcolo puntuale della *Fractional Effective Dose* (FED), della *Fractional Effective Concentration* (FEC), della visibilità e della temperatura nell'ambiente confinato.

Lo studio evidenzia come l'approccio prestazionale offra una maggiore flessibilità progettuale rispetto a quello prescrittivo, pur richiedendo un'attenta gestione delle incertezze modellistiche e una rigorosa validazione degli input. I risultati ottenuti confermano l'importanza di integrare l'analisi numerica con dati sperimentali e valutazioni critiche, al fine di garantire soluzioni affidabili, verificabili e sicure.

---

<sup>1</sup> La tenibilità (o *tenability*) nell'antincendio, in particolare nella *Fire Safety Engineering*, indica il mantenimento di condizioni ambientali sicure e non incapacitanti per gli occupanti durante un incendio.

L'elaborato è strutturato come segue:

- Nel Capitolo 1 viene analizzata la tecnologia dei veicoli elettrici e delle batterie, studiando le modalità di guasto, le curve di Rilascio Termico (RHR) e la tossicità dei fumi, al fine di definire scenari di incendio di progetto realistici.
- Nel Capitolo 2 viene presentata la metodologia operativa FSE, illustrando i criteri per la definizione degli obiettivi di sicurezza e l'utilizzo dei codici di calcolo per la verifica della salvaguardia della vita umana.
- Nel Capitolo 3 viene applicata la metodologia analizzando i risultati delle simulazioni CFD, valutando anche la possibile propagazione e verificando la produzione di acido fluoridrico.

In definitiva, unendo il rigore della modellazione avanzata all'analisi critica dei dati sperimentali, questa tesi si propone di tracciare una via metodologica solida per la progettazione antincendio del futuro: un approccio in cui la sicurezza non sia più vittima della rigidità normativa, ma diventi il risultato di scelte ingegneristiche consapevoli, flessibili e orientate alla massima tutela della vita umana.

# Capitolo 1

## I VEICOLI ELETTRICI

### 1.1 Veicoli elettrici: storia ed evoluzione

#### *1.1.1 Storia della mobilità elettrica*

La mobilità elettrica rappresenta oggi un pilastro fondamentale delle strategie di decarbonizzazione del settore dei trasporti e un elemento chiave per la sostenibilità ambientale. Tuttavia, la tecnologia di propulsione elettrica non è affatto una novità, bensì una soluzione emersa parallelamente ai motori a combustione interna (ICE) fin dalla fine del XIX secolo.

Sebbene i primi esperimenti con veicoli elettrici rudimentali risalgano agli anni '30 dell'Ottocento, l'adozione pratica è strettamente legata all'invenzione di una batteria ricaricabile. La svolta si ebbe nel 1881 con l'introduzione delle batterie al piombo-acido, sviluppate dagli ingegneri francesi Gaston Planté e Camille Alphonse Faure. Questa innovazione permise la realizzazione dei primi veicoli elettrici commercialmente validi.

Agli inizi del Novecento, il mercato automobilistico presentava un equilibrio notevole tra i veicoli elettrici (EV) e quelli a benzina. Gli EV si distinguevano per diverse caratteristiche vantaggiose, specialmente in ambito urbano: semplicità di utilizzo grazie all'assenza di cambio manuale e avviamento a manovella; silenziosità e ridotta manutenzione. Queste qualità rendevano i veicoli elettrici particolarmente apprezzati per la circolazione in città.

La progressiva supremazia dei motori ICE, alimentata da continue innovazioni tecniche (tra cui l'avviamento elettrico e il miglioramento delle infrastrutture di

rifornimento) e dal basso costo del petrolio, portò alla graduale interruzione della produzione di veicoli elettrici di massa verso la fine degli anni '30.

L'interesse per la propulsione elettrica conobbe una prima, seppur breve, rinascita negli anni '70, in risposta alle crisi petrolifere che evidenziarono la vulnerabilità della dipendenza dai combustibili fossili. Nonostante gli sforzi delle principali case automobilistiche, la tecnologia dell'epoca non era in grado di offrire una soluzione competitiva in particolare per il pessimo rapporto peso/ densità energetica. Un esempio italiano di questa fase fu la Fiat Panda Elettra (1990), equipaggiata con batterie al piombo che ne compromettevano significativamente le prestazioni e la capacità di carico.

Un primo tentativo di superare i limiti del piombo fu l'adozione delle batterie al nichel-metallo idruro (NiMH). Sebbene offrissero una migliore densità energetica, soffrivano del cosiddetto "effetto memoria", un fenomeno che causa una progressiva e non lineare diminuzione della capacità massima utile se le ricariche non avvengono a batteria quasi completamente scarica.

Questa tecnologia ha permesso all'inizio degli anni 2000 lo sviluppo delle prime auto ibride come la prima generazione di Toyota Prius che ha fondato le basi per tutti i veicoli ibridi successivi. Questo veicolo combinava un motore a benzina da 58 CV e uno elettrico da 40 CV portando a consumi inferiori a 4 litri per 100 km.

Le tecnologie si sono evolute notevolmente portando all'attuale e definitiva ripresa della mobilità elettrica soprattutto grazie a due fattori principali: le pressanti tematiche climatiche (mitigazione dei cambiamenti climatici, riduzione delle emissioni inquinanti locali) e, soprattutto, il decisivo salto tecnologico nelle soluzioni di accumulo. La tecnologia che ha reso i veicoli elettrici un'alternativa concreta ai motori ICE è quella delle batterie agli ioni di litio (Li-ion).

Il successo delle batterie Li-ion si basa su proprietà intrinseche superiori rispetto alle generazioni precedenti: elevata densità energetica con un basso peso specifico, lunga vita ciclica e assenza di effetto memoria.

Questo sviluppo è cruciale non solo per la propulsione veicolare, ma anche per l'integrazione di sistemi di accumulo (Storage Systems) nella rete elettrica. [1] [2]

### *1.1.2 Le tipologie di propulsione*

L'analisi delle soluzioni di propulsione veicolare contemporanee rivela un panorama tecnologico complesso, che si estende oltre la mera dicotomia tra motori a combustione interna (ICEV) ed elettrici puri (BEV). Una terza e fondamentale macro-famiglia è rappresentata dai veicoli ibridi (HEV), i quali integrano due o più fonti energetiche primarie per massimizzare l'efficienza operativa e mitigarne gli impatti ambientali.

#### *Veicoli a Combustione Interna (ICEV)*

Nonostante la crescente pressione normativa per la decarbonizzazione, i veicoli a combustione interna (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEV) mantengono la quota di mercato predominante nel parco circolante globale. Questi veicoli impiegano un motore endotermico che sfrutta l'energia termica generata dall'ossidazione (combustione) di un combustibile (tipicamente benzina, gasolio o GPL) all'interno di camere chiuse (i cilindri). Il funzionamento si basa su un ciclo termodinamico (come il Ciclo Otto per la benzina o il Ciclo Diesel per il gasolio) che converte l'espansione ad alta pressione dei gas combusti in un movimento alternato del pistone. Tale movimento, attraverso il sistema biella-manovella, viene infine convertito in moto rotatorio sull'albero motore, fornendo la coppia motrice al sistema di trasmissione.

#### *Veicoli Elettrici a Batteria (BEV)*

All'estremo opposto del panorama tecnologico si collocano i Veicoli Elettrici a Batteria (Battery Electric Vehicles, BEV). Questi veicoli utilizzano esclusivamente l'energia elettrica per la trazione, eliminando completamente le emissioni dirette (Zero Emission Vehicle, ZEV).

L'energia necessaria è stoccata in un pacco batterie agli ioni di litio ad alta tensione. Queste batterie alimentano uno o più motori elettrici (a magneti permanenti o a induzione) che forniscono direttamente la trazione alle ruote. La capacità energetica di questi accumulatori varia significativamente in funzione del segmento e della destinazione d'uso: si attesta generalmente tra i 30 kWh per i modelli citycar fino a superare i 110 kWh per i modelli di alta gamma o di grandi dimensioni, influenzando direttamente l'autonomia massima del veicolo.

I veicoli ibridi rappresentano un collegamento tra le due architetture principali e sono classificati in base al livello di ibridazione e all'architettura di funzionamento.

### *Mild Hybrid (MHEV)*

Conosciuti anche come ibridi leggeri, i MHEV combinano un motore a combustione interna con un piccolo generatore/ motorino di avviamento integrato. Questo sistema elettrico non è in grado di fornire trazione in modo indipendente, ma agisce come supporto di coppia in fase di accelerazione e gestisce il recupero dell'energia cinetica in decelerazione. Migliora l'efficienza termica del motore a combustione, riducendo lievemente i consumi e le emissioni inquinanti. Non richiedono alcuna ricarica esterna.

### *Full Hybrid (HEV)*

Gli HEV combinano il motore termico con un modulo elettrico più potente, dotato di batterie di capacità superiore rispetto ai MHEV. La loro architettura, spesso basata su un Power Split Device (configurazione serie-parallelo), consente la trazione in modalità completamente elettrica per brevi distanze e a basse velocità. La ricarica delle batterie avviene esclusivamente a bordo tramite il motore termico e il recupero dell'energia cinetica (frenata rigenerativa).

### *Plug-in Hybrid (PHEV)*

I PHEV costituiscono un'evoluzione degli HEV, distinguendosi per la dotazione di un pacco batterie di capacità significativa (maggiore degli HEV) e per la possibilità di ricarica da una fonte di energia esterna (*plug-in*). Questa caratteristica conferisce loro una rilevante autonomia in modalità ZEV, che solitamente varia tra i 40 e gli 80 km. Tale autonomia permette all'utente di percorrere la maggior parte dei tragitti quotidiani in elettrico, rendendo le prestazioni operative più assimilabili a quelle di un BEV per l'uso urbano.

Si aggiunge a queste tipologie di ibrido, che sono principalmente ibridi in parallelo (ovvero i due motori lavorano insieme o alternati ma entrambi direttamente sulla trasmissione), l'ibrido in serie.

L'ibrido in serie non deve essere collegato alla rete elettrica ma la ricarica avviene a bordo grazie al motore termico, il quale non è collegato alla trasmissione ma ricarica solo le batterie che attraverso il motore elettrico forniscono trazione alle ruote. In altri termini il motore a combustione funziona solo come generatore di corrente con un rendimento ottimale.

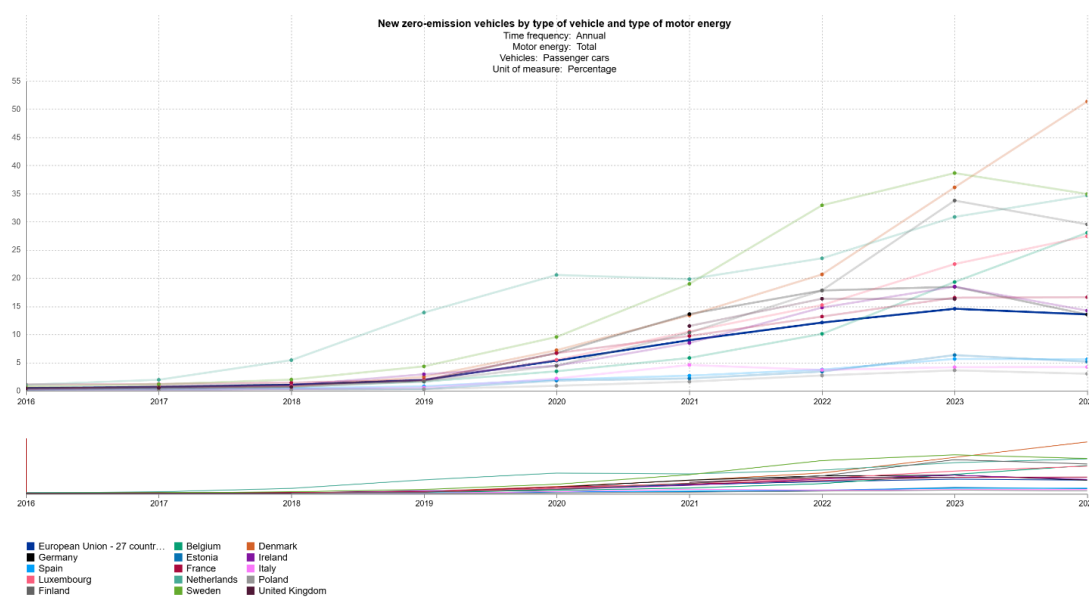
È presente sul mercato anche la possibilità di ricaricare la batteria di una ibrida in serie con la rete elettrica, in questo caso si parla di veicolo con range extender (REEV) ovvero un veicolo elettrico con estensore di autonomia in cui è appunto presente un generatore ausiliario per estendere l'autonomia nel caso in cui si esaurisca la carica della batteria [3].

Infine, nella classificazione dei veicoli a trazione elettrica, si includono i veicoli a celle a combustibile (Fuel Cell Vehicle, FCV). Questi veicoli generano l'energia elettrica necessaria alla propulsione a bordo tramite una cella a combustibile a idrogeno (Hydrogen Fuel Cell). In un FCV, l'idrogeno è immagazzinato in un serbatoio ad alta pressione e reagisce nella cella per produrre elettricità, la quale alimenta il motore endotermico; l'energia esterna necessaria al funzionamento del veicolo è assicurata unicamente dal rifornimento di idrogeno.

### *1.1.3 Il mercato in crescita*

Il settore della mobilità sta attraversando una profonda trasformazione, orientata a ridurre le emissioni di gas serra adottando tecnologie più sostenibili. In questo scenario, la diffusione di veicoli elettrici (EV) rappresenta una delle principali strategie. [4]

A livello globale e, in particolare, nel contesto europeo, la crescita delle immatricolazioni di auto elettriche è esponenziale. In Nord Europa più di una nuova auto su due è ormai completamente elettrica (Norvegia 95%, Danimarca 65%). In Italia, sebbene la presenza di veicoli a sola trazione elettrica sia limitata (circa il 5% del mercato del 2024), il segmento delle auto ibride, che rappresenta circa il 45% delle nuove immatricolazioni, testimonia un'evoluzione del parco automobilistico verso l'elettrificazione [5]. In termini assoluti la Germania è di gran lunga il mercato più grande con oltre 500.000 nuovi veicoli elettrici nel 2023; seguono la Francia e i Paesi Bassi. L'Italia si posiziona più in basso in questa classifica, superata anche da mercati di paesi più piccoli come il Belgio e Svezia. [6]



New zero-emission vehicles by type of vehicle and type of motor energy (road\_eqr\_zev)  
 Source of data: Eurostat - Last updated date: 29/07/2025 23:00  
 Disclaimer This graph has been created automatically by ESTAT/EC software according to external user specifications for which ESTAT/EC is not responsible. Graph included.  
 General disclaimer of the EC website: [https://ec.europa.eu/info/legal-notice\\_en](https://ec.europa.eu/info/legal-notice_en)

eurostat

Figura 1.1: Percentuale di veicoli elettrici immatricolati dal 2016 al 2024 (fonte Eurostat [6])

Questa transizione è strettamente legata agli obiettivi ambientali fissati a livello europeo nel pacchetto “Fit for 55” che mira alla riduzione del 55% delle emissioni dei gas serra entro il 2030 e alla completa decarbonizzazione del settore dei trasporti entro il 2050. In tale prospettiva, la progressiva elettrificazione della mobilità rappresenta uno dei pilastri per il raggiungimento della neutralità climatica. Questi obiettivi sono figli dell’accordo di Parigi del 2015 in cui 194 Paesi e l’Unione Europea si impegnarono a combattere il cambiamento climatico a livello globale.

Questo accordo è stato proposto già nel giugno del 2022 ma il 27 maggio 2025 ha subito delle modifiche, aumentando gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> per il 2030 e fissando un nuovo obiettivo del 100% per il 2035 con una riduzione progressiva pari al 55% già nel 2030. Ciò significa che tutte le nuove auto o furgoni immessi sul mercato nell’UE a partire dal 2035 dovranno essere veicoli a emissioni zero.

La mobilità sostenibile nell’ambito delle politiche ambientali locali, nazionali e internazionali rappresenta uno degli argomenti più dibattuti volti a ridurre l’impatto ambientale derivante dalla mobilità delle persone e delle merci. In Italia una forte criticità deriva dal trasporto stradale che contribuisce alle emissioni totali di gas serra nella misura

del 23% (di cui il 60% circa attribuibile alle autovetture), alle emissioni di ossidi di azoto per circa il 50% e alle emissioni di particolato per circa il 13% [7].

In quest'ottica strategica, si implementano strumenti di incentivazione economica e si formalizzano intese collaborative con le istituzioni pubbliche, gli organismi di ricerca e i principali portatori di interesse (*stakeholder*) del settore. L'obiettivo primario di tali iniziative è promuovere l'adozione di misure concrete per la mitigazione delle emissioni inquinanti e climalteranti prodotte dal comparto dei trasporti, in coerenza con gli obiettivi programmatici stabiliti a livello nazionale e comunitario.

In sinergia con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) il Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) – *precedentemente Ministero dello Sviluppo Economico (MISE)* – e altre autorità competenti collaborano per la definizione, l'armonizzazione e l'implementazione delle strategie nazionali volte al raggiungimento di una mobilità sostenibile.

Anche se a livello europeo esiste una direzione comune e una strategia condivisa verso determinati obiettivi, le tempistiche di successo e di attuazione possono variare sensibilmente da Paese a Paese. Questo accade perché ogni Stato membro adotta politiche, strumenti e priorità differenti, influenzate dalle proprie condizioni economiche, sociali e istituzionali.

In Italia, ad esempio, il percorso risulta particolarmente lento e frammentato: gli incentivi vengono introdotti in modo disomogeneo e discontinuo, spesso con ritardi o modifiche improvvise che finiscono per rallentare l'intero processo di transizione e scoraggiare investimenti più strutturati e di lungo periodo.

Come mostrano i grafici sotto riportati è evidente la crescita dei veicoli elettrici anche se, guardando il parco macchine globale, risultano ancora limitati e l'Italia rispecchia la tendenza internazionale con una quota maggiore di ibrido e minore di *full electric*.

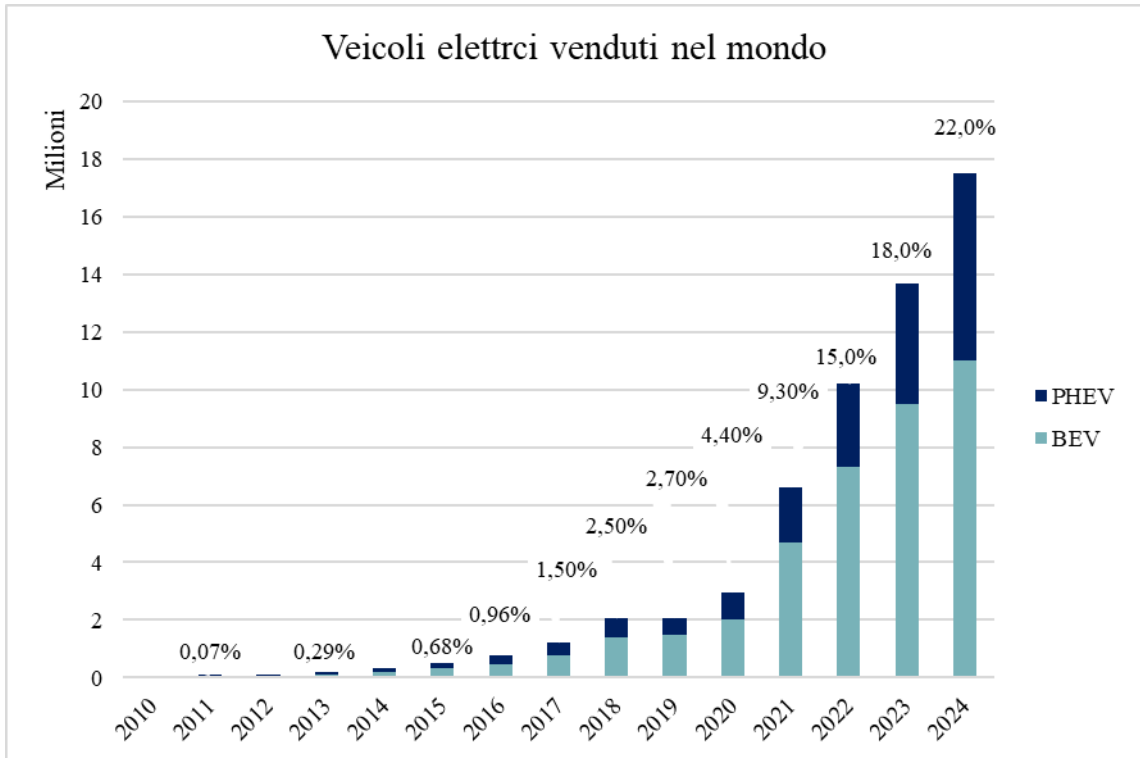


Figura 1.2: Numero e percentuale di veicoli elettrici venduti nel mondo (fonte IEA [8])

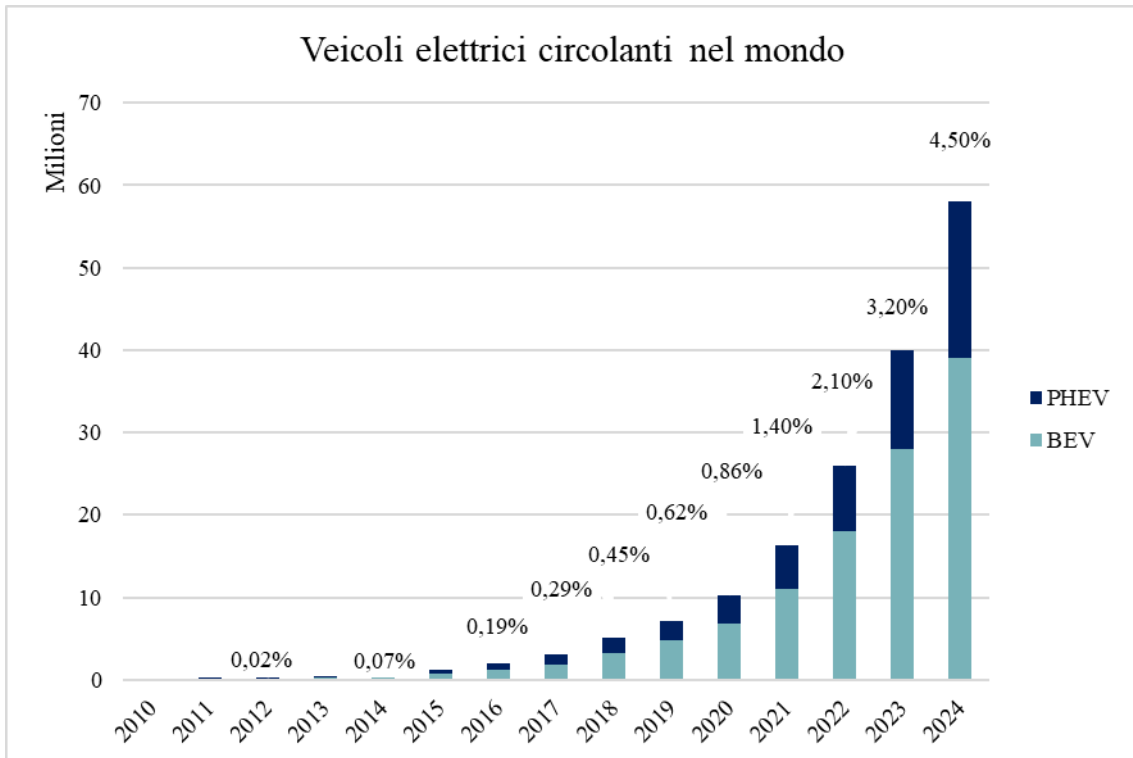


Figura 1.3: Numero e percentuale di veicoli elettrici circolanti nel mondo (fonte IEA [8])

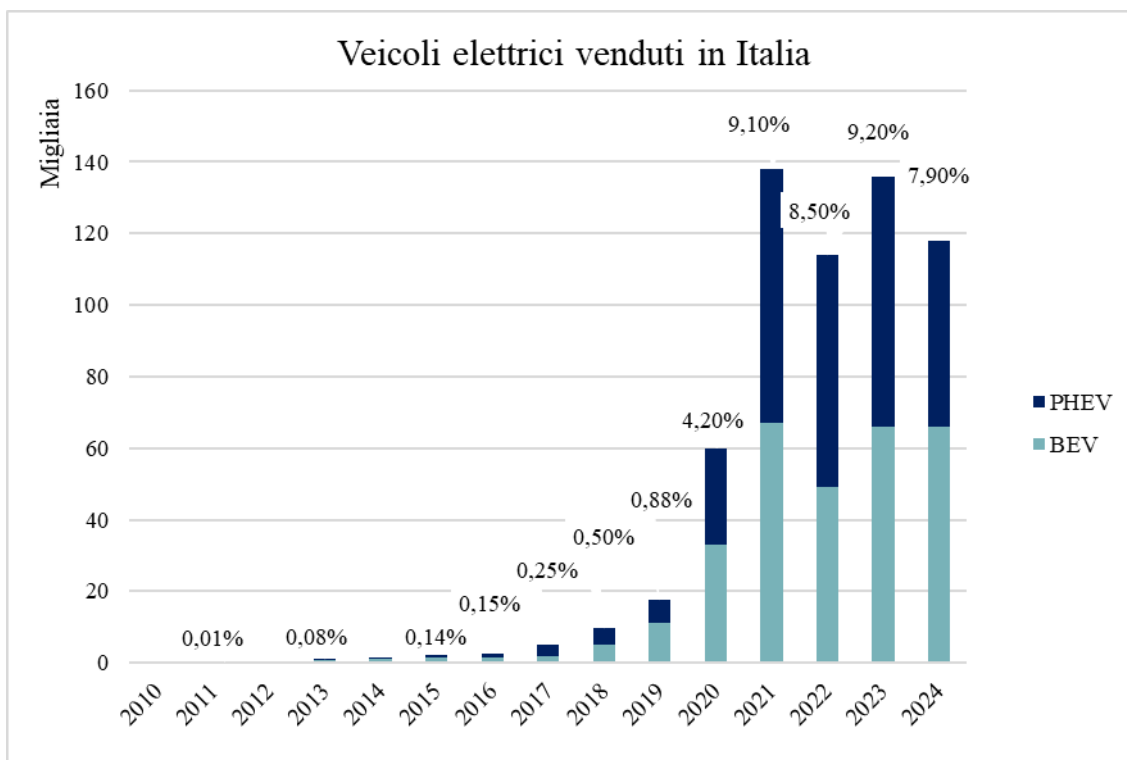


Figura 1.4: Numero e percentuale di veicoli elettrici venduti in Italia (fonte IEA [8])

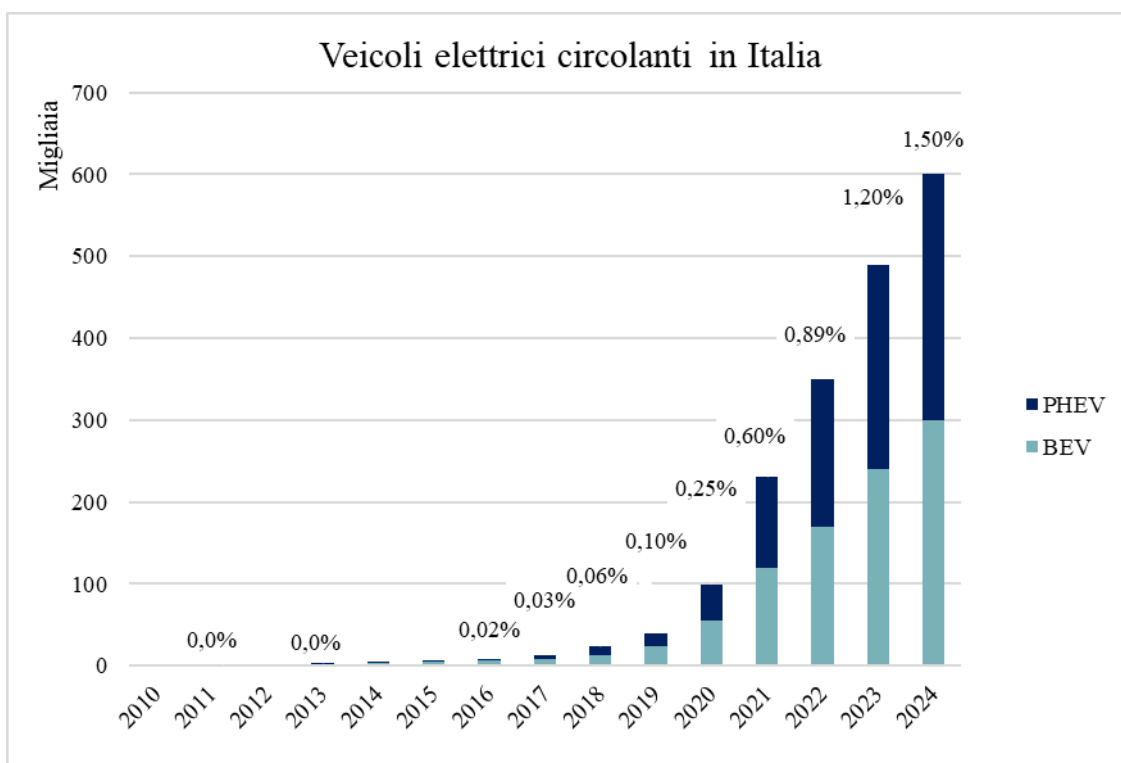


Figura 1.5: Numero e percentuale di veicoli elettrici circolanti in Italia (fonte IEA [8])

L'industria dell'*automotive* è stata sempre in continua evoluzione ma l'introduzione sul mercato di auto elettriche la sta modificando molto. La prima svolta è stato il lancio della Toyota Prius in Giappone nel 1997 e venduta in tutto il mondo come primo veicolo ibrido elettrico. Altra tappa importante è stata nel 2023 la fondazione di Tesla Motors nella Silicon Valley che, con il successo riportato, ha aperto la strada alla produzione di veicoli elettrici da parte di molte case automobilistiche che progressivamente, anno dopo anno, hanno iniziato a produrre sempre più auto elettriche grazie alla continua evoluzione tecnologica.

Ad oggi nelle classifiche delle vendite delle auto elettriche non troviamo ai primi posti case automobilistiche che producono anche elettrico (che stanno attraversando un momento di crisi che le costringe a fusioni e collaborazioni) ma principalmente produttori specializzati nella produzione di soli veicoli alimentati a energia elettrica, in particolare produttori cinesi che per primi hanno puntato su questa tecnologia.

La Cina sta conquistando il mercato globale per la produzione e vendita di auto elettriche con veicoli efficienti ed economici, passando da 4 milioni a 16 milioni di automobili vendute [9]. Infatti, la classifica mondiale, subito dopo Tesla, vede i gruppi BYD e Geely in veloce crescita. La *leadership* dei produttori cinesi non è casuale, ma il risultato di strategie industriali e politiche pianificate in anticipo rispetto al resto del mondo. Infatti, non potendo competere con i produttori di auto a combustione interna, Pechino ha scommesso sull'elettrico dove ha un vantaggio strategico difficilmente colmabile, ovvero avere l'intera filiera al suo interno, controllando più del 60% della raffinazione di litio e cobalto e l'80% di grafite. Molte aziende, come BYD, sono completamente integrate: controllano le materie prime, producono le batterie e i chip e assemblano l'auto finita, abbattendo i costi in maniera drastica. Gli aiuti statali e la concorrenza elevata hanno portato a una diminuzione netta, circa del 30%, nei prezzi dei metalli per batterie come litio e nichel.

Tale aspetto ha ampliato il divario tra i prezzi delle batterie in Cina e nel resto del mondo, aumentando il vantaggio competitivo dei produttori cinesi di veicoli elettrici e batterie. Il ritmo più rapido di riduzione dei costi delle batterie e di innovazione in Cina è stato reso possibile da una forte concorrenza che ha ridotto i margini di profitto per la maggior parte dei produttori (anche se non per tutti), aumentando al contempo l'efficienza

e i rendimenti produttivi, nonché l'accesso a una vasta forza lavoro qualificata e l'integrazione della catena di fornitura delle batterie.

La filiera dei veicoli elettrici e delle batterie diventa sempre più concentrata geograficamente man mano che si passa dalla produzione di automobili alla produzione di celle e componenti per batterie. Nel 2024, la Cina era responsabile dell'80% della produzione globale di celle per batterie, mentre la parte restante veniva prodotta negli Stati Uniti, nell'Unione Europea, in Corea e in Giappone. È importante sottolineare che anche la produzione di apparecchiature per la produzione di batterie agli ioni di litio è altamente concentrata, con Cina, Corea e Giappone leader di mercato. La Cina ha anche stabilito un quasi monopolio nella produzione di componenti per batterie, fornendo quasi l'85% dei materiali attivi per i catodi – inclusi i composti chimici NMC e LFP – e oltre il 90% della produzione di materiali attivi per gli anodi, prevalentemente grafite. Al di fuori della Cina, solo la Corea e il Giappone offrono una notevole capacità produttiva di componenti per i catodi. Anche la Corea produce anodi e si prevede che l'Indonesia avvierà la produzione portando una certa diversificazione al mercato. Ciononostante, la Cina è destinata a rimanere di gran lunga il maggiore produttore di batterie e dei loro componenti nel medio termine, sulla base dei progetti annunciati e dei vantaggi competitivi.

La capacità produttiva globale di batterie (celle) è cresciuta di quasi il 30% nel 2024, raggiungendo oltre 3 TWh, ovvero tre volte la domanda di veicoli elettrici e sistemi di accumulo di energia nello stesso anno. Circa l'85% della capacità produttiva globale si trova in Cina, con una variazione minima rispetto al 2023, e oltre il 75% è di proprietà di produttori cinesi. La capacità produttiva negli Stati Uniti è cresciuta di quasi il 50%, trainata dalle aziende coreane attratte dai crediti d'imposta, che hanno rappresentato quasi il 70% della crescita nel 2024. Ciò ha portato la capacità installata negli Stati Uniti a superare quella dell'Unione Europea, che tuttavia è aumentata del 10% nel 2024, nonostante la chiusura dell'impianto Northvolt in Svezia a seguito del fallimento. Nel 2024 sono stati aperti anche i primi impianti di batterie in India e Indonesia, per un totale rispettivamente di oltre 5 GWh/anno e 10 GWh/anno di capacità produttiva.

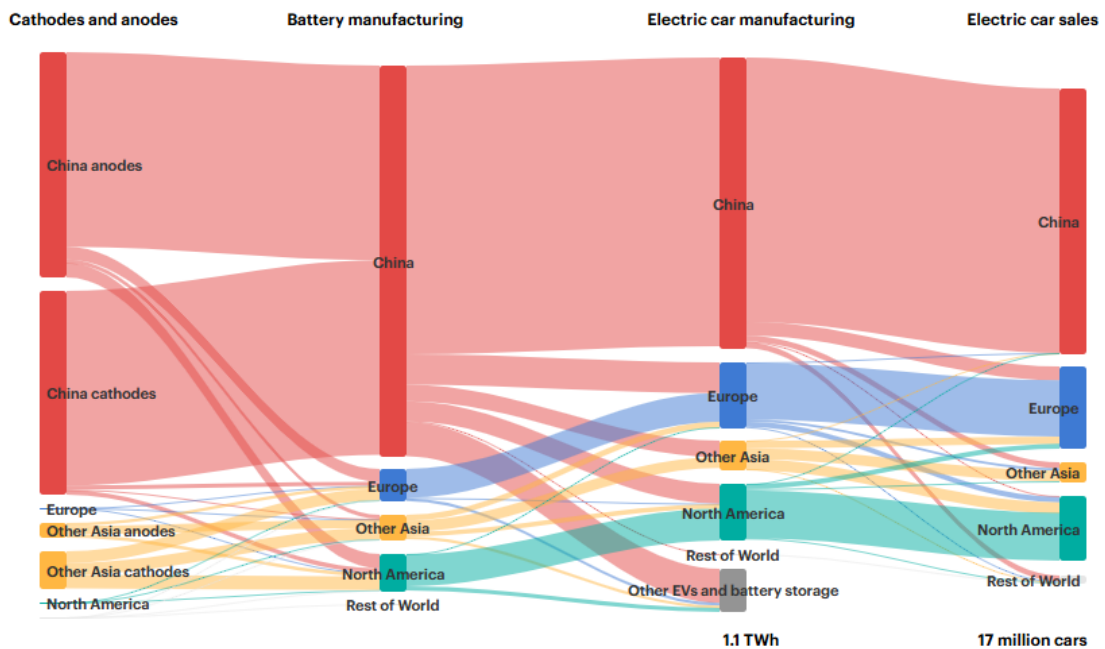
I produttori coreani sono rimasti i maggiori investitori nella capacità produttiva di batterie all'estero, rappresentando oltre 400 GWh a livello globale, rispetto ai 60 GWh dei produttori giapponesi e ai 30 GWh dei produttori cinesi. I produttori coreani, come

LG Energy Solution (con capacità in Polonia), Samsung e SKI (in Ungheria), continuano a essere la principale fonte di capacità nell'Unione Europea e la loro importanza è in crescita negli Stati Uniti. Se tutti i progetti annunciati fossero completati integralmente, la capacità produttiva dei produttori coreani al di fuori della Corea raggiungerebbe oltre 1,1 TWh entro il 2030, l'85% in più rispetto alla capacità produttiva estera annunciata dai produttori di batterie cinesi. [8]

Se si guarda tuttavia ai produttori di batteria in assoluto, i cinesi padroneggiano la classifica con CAL e BYD con oltre il 50% del mercato globale. [10]

Il dominio della Cina nel flusso globale di produzione di auto elettriche e batterie è riproposto anche in maniera grafica con un diagramma di Sankey tratto da IEA International Energy Agency ovvero l'autorità energetica mondiale (Figura 1.6).

Flussi globali di produzione e commercio di auto elettriche, batterie agli ioni di litio e componenti chiave, 2024



**Note**  
 EV = veicolo elettrico. Catodi e anodi si riferiscono ai materiali attivi del catodo e dell'anodo. I flussi sono normalizzati alla fase di produzione della batteria (cella), con i materiali attivi del catodo e dell'anodo normalizzati in modo che la loro somma sia rapportata al volume della cella della batteria. I numeri sotto i grafici si riferiscono alla domanda totale, non solo al volume scambiato. La versione più chiara dei flussi destinati alla produzione di batterie rappresenta gli anodi (materiali attivi dell'anodo). Le applicazioni delle batterie diverse dai veicoli elettrici e dallo stoccaggio delle batterie sono escluse dall'analisi. I veicoli elettrici e lo stoccaggio delle batterie sono esclusi dall'analisi.

Figura 1.6: Flusso di produzione dei componenti e delle auto elettriche (fonte [8])

## 1.2 La tecnologia di accumulo

### 1.2.1 Fondamenti dell'architettura delle batterie al litio

Come già evidenziato, la rapida diffusione dei veicoli elettrici è stata resa possibile dai progressi della tecnologia di accumulo energetico, in particolare delle batterie agli ioni di litio (Li-ion), che offrono densità energetica, lunga durata e buone prestazioni di ricarica. Tuttavia, queste stesse caratteristiche comportano l'introduzione di nuove sfide in termini di sicurezza, soprattutto in relazione al rischio di incendio, che presenta caratteristiche uniche spesso trascurate e non valutate correttamente.

Le batterie al litio vengono utilizzate da oltre tre decenni in molti settori e sono parte integrante della vita quotidiana di ognuno di noi. I vantaggi sono evidenti a tutti: maggiore libertà di movimento grazie all'assenza di cavi, disponibilità dell'energia a richiesta indipendentemente da dove e quando è stata prodotta, nessun gas di scarico, silenziosità, buon rapporto peso – energia ed un'erogazione istantanea al bisogno.

Una batteria è un dispositivo in grado di convertire energia chimica in elettrica tramite una Redox (reazione chimica di ossido-riduzione), trasferendo elettroni. Dal punto di vista dell'architettura, le batterie agli ioni di litio, o meglio, le celle che le compongono, sono formate da un anodo (elettrodo negativo), un catodo (elettrodo positivo), un separatore (un materiale solido che, come si intuisce dal nome, divide anodo e catodo) e un elettrolita (solitamente liquido, che consente il passaggio degli ioni di litio tra anodo e catodo e viceversa).

Le batterie si dividono in primarie e secondarie. Le primarie non sono ricaricabili e vengono chiamate anche pile. Le secondarie, dette anche accumulatori, sono ricaricabili, ovvero la reazione chimica al loro interno è reversibile.

Per lo sviluppo di batterie agli ioni di litio, John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino hanno vinto il Nobel per la Chimica nel 2019. L'Accademia reale svedese delle scienze (*Kungliga Vetenskapsakademien*) ha così motivato la scelta: *“Le batterie agli ioni di litio hanno rivoluzionato la nostra vita e sono utilizzate per tutto, dai telefoni cellulari ai laptop, ai veicoli elettrici. Attraverso il loro lavoro, i vincitori hanno gettato le basi per una società senza fili e senza combustibili fossili”*.

Il litio è il terzo elemento della Tavola Periodica degli Elementi e il primo dei metalli alcalini. È dunque un metallo altamente riducente che tende a cedere un elettrone per raggiungere la massima stabilità.

Le celle agli ioni di litio sono disponibili in forma cilindrica con tensione nominale media compresa tra 3,2 e 3,7 V e una capacità di 2-3 Ah. Sono inoltre in uso altri modelli come le celle a sacchetto e le celle prismatiche.



Figura 1.7: Modelli di batterie al Litio utilizzate

La forma cilindrica è quella più utilizzata grazie all'elevata stabilità dovuta alla loro forma che distribuisce gli sforzi dovuti a pressioni interne in maniera uniforme lungo la circonferenza ma presenta una bassa densità di impacchettamento; ciò, tuttavia, facilita il libero flusso dell'aria facilitandone il raffreddamento.

Le celle prismatiche sono comunemente utilizzate per le batterie di trazione automobilistiche. La loro forma le rende più facili da integrare in un pacco batterie. Le celle prismatiche tendono ad essere molto compatte, il che comporta sollecitazioni meccaniche relativamente elevate sul pacchetto prismatico. Le celle a sacchetto conservano il loro contenuto all'interno di un sacchetto flessibile in alluminio anziché in un contenitore rigido; la loro struttura morbida può anche rappresentare uno svantaggio, in quanto le rende vulnerabili ai danni meccanici esterni. La gestione della temperatura diventa più importante per questi ultimi tipi di celle, poiché è più difficile dissipare il calore. [11]

Le celle sono collegate in modo diverso tra di loro per formare moduli con intensità o potenza di corrente diverse.

A seconda delle caratteristiche della batteria possiamo avere una bassa capacità, fino a 100 Wh, utilizzate per i dispositivi portatili, una media capacità fino ad un peso di 12 kg, utilizzate per la micromobilità e un'alta capacità, per i veicoli elettrici e i BESS che arrivano fino a  $10^7$  Wh.

Le batterie litio-ioni rappresentano oggi una tecnologia consolidata; la ricerca continua però a sviluppare soluzioni innovative che superino i limiti attuali. Non essendoci al momento altre tecnologie altrettanto valide in grado di accumulare energia elettrica, gli studi si concentrano nel migliorare le batterie al litio attuali. Al momento gli studi più innovativi sono le batterie al litio allo stato solido e litio-aria.

Le batterie a stato solido (SSBs) rappresentano una svolta significativa nel campo dell'accumulo energetico, in particolare per quanto riguarda la sicurezza intrinseca. La loro architettura elimina l'utilizzo di elettroliti liquidi infiammabili, tradizionalmente impiegati nelle celle agli ioni di litio convenzionali (LIBs), affrontando in modo diretto la problematica del rischio di fuga termica (*thermal runaway*). Una caratteristica fondamentale delle SSBs è l'impiego di elettroliti ceramici o polimerici non infiammabili. Questi materiali agiscono come un *firewall* integrato, inibendo la propagazione del calore e la reattività chimica incontrollata.

I recenti test condotti su celle al litio-metallo (Li-metal) a stato solido, come quelle sviluppate da QuantumScape, hanno dimostrato una straordinaria stabilità termica. È stato osservato che queste celle non innescano una fuga termica anche se esposte a temperature estreme, come 300°C, limitandosi al solo rilascio controllato di gas. In netto contrasto, una cella agli ioni di litio con elettrolita liquido può manifestare un'accensione violenta (combustione) a una temperatura significativamente inferiore, tipicamente intorno ai 180°C.

Oltre all'inerzia dell'elettrolita, la ricerca si sta concentrando sullo sviluppo di meccanismi di sicurezza avanzati integrati nel separatore. Una delle innovazioni più promettenti è l'adozione di separatori auto-riparanti (*self-healing separators*). Questa tecnologia sfrutta l'incorporazione di microcapsule all'interno della matrice del separatore. In caso di rilevamento di un micro-cortocircuito (spesso causato dalla crescita di dendriti di litio), queste capsule rilasciano un agente sigillante, tipicamente una resina polimerica. Questo processo permette di sigillare automaticamente il punto di danneggiamento, prevenendo l'*escalation* del cortocircuito in un guasto catastrofico e

contribuendo in modo proattivo a prolungare la vita operativa della cella. Aziende leader nel settore, come CATL, stanno attivamente esplorando e implementando queste soluzioni per l'ottimizzazione della sicurezza. [12]

### *1.2.2 Le principali chimiche per gli accumulatori*

Sono presenti diverse tipologie di batterie al litio, in particolare variano i materiali per anodi e catodi:

**Fosfato di ferro e litio (LFP):** è uno dei composti più stabili e per questo una delle più utilizzate; ha inoltre un ciclo di vita superiore alla media. È utilizzato soprattutto per accumulatori di grandi dimensioni come BESS o auto elettriche con prestazioni elevate. Questa miscela è utilizzata dal gruppo BYD.

**Litio-nichel-manganese-ossido di cobalto (NMC):** considerate da molti seconde solo alle precedenti, le batterie con questo composto possiedono un'elevata densità energetica ma una vita utile minore. Sono utilizzate per veicoli elettrici e per la micromobilità e possono avere percentuali differenti dei singoli elementi, potendo quindi essere personalizzate dai produttori. Molti veicoli ibridi ed elettrici utilizzano questa tecnologia, tra cui Volkswagen Golf, Audi a3, Ford Focus, Fiat 500e.

**Titanato di litio (LTO):** a fronte di un costo maggiore delle altre tecnologie questo composto possiede ottimi livelli di stabilità termica e una vita molto lunga. Queste batterie si prestano per strumenti industriali o motori elettrici importanti.

**Ossido di litio e cobalto (LCO):** è un composto molto diffuso per i dispositivi elettronici portatili con un'elevata densità energetica ma un numero di cicli di carica molto minori e una stabilità termica scarsa. Questo tipo di batteria è utilizzata per il modello di Tesla Roadster e Daimler Smart Fortwo.

**Ossido di litio, nichel, cobalto e alluminio (NCA):** sostituisce alla NMC il manganese con l'alluminio ottenendo un'ottima stabilità chimica e una elevata energia specifica, contro però una scarsa stabilità termica e un costo elevato. Questa tecnologia è utilizzata per alcune auto elettriche di fascia alta come Mercedes-Benz classe B e Tesla model S.

**Ossido di litio e manganese (LMO):** utilizzata come le LCO per dispositivi elettronici è però molto più stabile termicamente ma ha sempre una vita utile limitata.

Vengono riportate in Tabella 1 le informazioni più importanti relative alle composizioni chimiche utilizzate per gli accumulatori agli ioni di litio prima in forma tabella e poi in forma grafica:

<b>Chimica</b>	<b>Elementi</b> Se non specificato catodo	<b>Tensione nominale</b> [V]	<b>Densità energetica</b>	<b>Costo</b>	<b>Temp. thermal runaway</b> [°C]	<b>Tipiche applicazioni</b>
LFP	Fosfato di ferro e litio $\text{LiFePO}_4$	3.2	media	Basso	270	BESS e auto elettriche
NMC	Litio-Nichel-Manganese-Ossido di Cobalto $\text{LiNiMnCoO}_2$	3.6	alta	Medio	210	Veicoli elettrici
LTO	Titanato di Litio (Anodo) $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	2.4	bassa	Molto alto	175 - 225	Treni, bus
LCO	Ossido di Litio e Cobalto $\text{LiCoO}_2$	3.6	alta	Medio alto	150	Dispositivi portatili come laptop e fotocamere
NCA	Ossido di Litio, Nichel, Cobalto e Alluminio $\text{LiNiCoAlO}_2$	3.6	Molto alta	Alto	150	Veicoli elettrici
LMO	Ossido di Litio e Manganese $\text{LiMn}_2\text{O}_4$	3.7	media	Medio	250	Utensili portatili. Veicoli ibridi e leggeri

Tabella 1: Caratteristiche delle batterie a seconda della chimica (fonti [13] [14] [15] [16] [17])

Il tasso C è una cifra molto importante in una batteria al litio. Secondo le specifiche, si tratta di un'unità di misura utilizzata per misurare la velocità di carica o scarica di una batteria, nota anche come moltiplicatore di carica/scarica. In altre parole, riflette il rapporto tra la velocità di carica e scarica di una batteria al litio e la sua capacità. La formula è: Rapporto C = Corrente di carica/scarica / Capacità nominale.

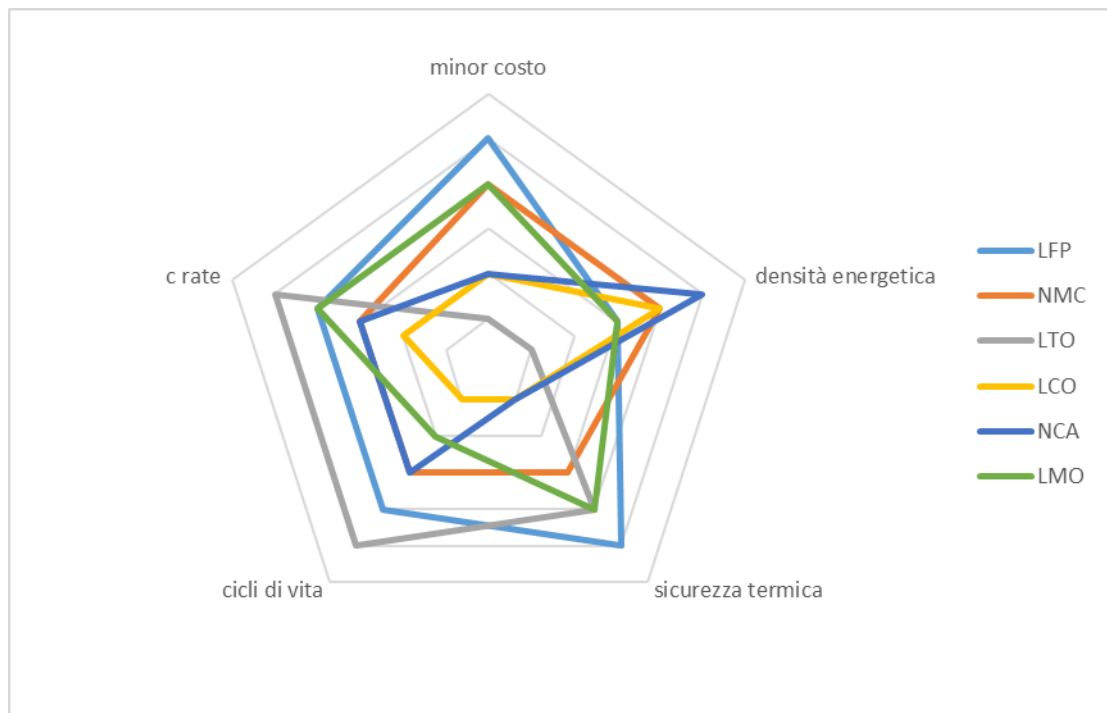


Figura 1.8: Grafico radar di confronto tra le prestazioni di diverse chimiche di batterie

Le diverse composizioni chimiche degli accumulatori agli ioni di litio analizzate (LFP, NMC, LTO, LCO, NCA e LMO) risultano attualmente tutte impiegate, seppur con differenti ambiti applicativi, nel settore della mobilità elettrica e nei sistemi di accumulo di energia. Ciascuna tecnologia presenta caratteristiche peculiari in termini di densità energetica, stabilità termica, comportamento in condizioni di abuso e durata del ciclo di vita, caratteristiche che influenzano in modo significativo la risposta dell'accumulatore in caso di evento incidentale, quali surriscaldamento, cortocircuito interno o innesco di fenomeni di *thermal runaway*.

È inoltre opportuno considerare che la tipologia e la quantità di gas rilasciati durante tali eventi, sia infiammabili sia tossici, variano sensibilmente in funzione della composizione chimica della batteria, incidendo in maniera rilevante sul livello di pericolosità complessivo e sulle strategie di mitigazione e gestione dell'emergenza da adottare.

Per tali ragioni, in un'ottica ingegneristica orientata alla progettazione della sicurezza, risulta necessario adottare un approccio cautelativo, facendo riferimento ai comportamenti più gravosi riscontrabili tra le diverse tipologie di accumulatori. Tale

impostazione consente di garantire adeguati livelli di protezione anche negli scenari più sfavorevoli, indipendentemente dalla tecnologia specifica installata.

## 1.3 Analisi del rischio incendio

### 1.3.1 Modalità di guasto degli accumulatori

I guasti delle batterie al litio di alta capacità, e quindi gli incendi che le coinvolgono, posso presentarsi nel corso di fasi diverse del loro ciclo di vita che può essere suddiviso come proposto dall'NFPA [18]:

- nella fase della produzione, ovvero negli stabilimenti lungo le linee di produzione e assemblaggio, nei laboratori durante i test e nelle celle di prova;
- nelle fasi di trasporto, sia via nave, aereo o terra e nei depositi temporanei di stoccaggio;
- nelle fasi di assemblaggio, ovvero nelle linee di montaggio di veicoli elettrici o durante la messa in opera di sistemi di accumulo;
- nelle fasi di esercizio, ovvero in tutti i luoghi in cui durante l'utilizzo possono trovarsi uno o più veicoli elettrici, come parcheggi e autorimesse, depositi di bus, stazioni di ricarica. In questa fase è possibile separare lo scenario di ricarica da quello di utilizzo;
- nella fase di fine vita, nei centri di trattamento riciclo o smaltimento.

Tutte le fasi presentano caratteristiche simili e peculiarità che le differenziano in quanto l'ambiente in cui si verificano può modificare notevolmente la propagazione e lo sviluppo dell'incendio. Inoltre, la ricerca del sistema di spegnimento o controllo non può esimersi dallo studio del contesto e non può essere generico. In questa tesi si affronterà in maniera specifica l'incendio di autovetture equipaggiate con batterie agli ioni di litio.

Diverse assicurazioni, tra cui la britannica RSA Insurance Group plc<sup>2</sup> [19] e GenRe<sup>3</sup> [20] hanno evidenziato un rischio emergente dovuto al maggiore utilizzo di veicoli elettrici soprattutto nell'autorimesse. Vi sono preoccupazioni circa il potenziale aumento

---

<sup>2</sup> RSA ha importanti attività nel Regno Unito, Irlanda, Scandinavia e Canada. Rsa è ora Intact Insurance e offre un'ampia gamma di prodotti assicurativi commerciali. Dalle assicurazioni per le piccole imprese a soluzioni personalizzate per le grandi aziende

<sup>3</sup> GenRe General Reinsurance Corporation è una multinazionale americana, fa parte del gruppo Berkshire Hathaway e ha ottenuto rating di solidità finanziaria elevati da tutte le principali agenzie di rating

della gravità e della durata degli incendi che interessano autoveicoli, essendo nel pacco batterie immagazzinata un'enorme quantità di energia che, se non controllata, come in caso di incendio, può rilevarsi molto pericolosa, contribuendo in modo significativo al focolare e rendendo difficile lo spegnimento. Entrambe le agenzie concludono però che non sono disponibili dati statistici sistematici a livello mondiale sulla probabilità del verificarsi dei fenomeni e sull'entità dei danni previsti nei parcheggi multipiano e nei garage. Pertanto, non è possibile quantificare in modo univoco l'impatto che hanno i veicoli moderni sulla frequenza o sull'intensità degli incendi nei parcheggi.

Anche AGCS<sup>4</sup> [21] segnala che rispetto alla tecnologia e ai processi di produzione consolidati dei veicoli convenzionali, i veicoli elettrici comportano una vasta gamma di rischi tecnici, ambientali e operativi, affermando che una volta innescati, gli incendi delle batterie possono essere molto intensi e difficili da estinguere, oltre a rilasciare livelli elevati di gas tossici, necessitano di più tempo per essere controllati e sono soggetti a riaccendersi. Inoltre, a causa della relativa rarità degli incendi di veicoli elettrici, i servizi di primo soccorso e di salvataggio hanno un'esperienza limitata nel gestire tali incidenti e mancano dati e informazioni attendibili su come affrontare un incendio di un veicolo elettrico. Si arriva pertanto alla conclusione che il passaggio ai veicoli elettrici avrà molte implicazioni per le assicurazioni e i sinistri e che le nuove applicazioni tecnologiche e i nuovi metodi di produzione metteranno alla prova la valutazione dei rischi da parte degli assicuratori.

A livello di accumulatore, poiché in passato si sono già verificati eventi accidentali, si sono individuate le modalità di guasto più comuni, raggruppate nelle pubblicazioni di Bubbico [22] e anche Dorsz [23] come segue:

- Difetti di fabbricazione: nelle fasi di produzioni e assemblaggio possono verificarsi difetti come l'utilizzo di materiali inadeguati o difettosi e danni a componenti;

---

<sup>4</sup> AGCS Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS) è una compagnia assicurativa leader a livello mondiale e un'unità operativa chiave del Gruppo Allianz. Forniscono consulenza sui rischi, soluzioni assicurative danni e trasferimento alternativo dei rischi per un'ampia gamma di rischi commerciali, aziendali e speciali in 10 linee di business dedicate. AGCS opera a livello mondiale con team propri in 33 Paesi; nel 2019, AGCS ha generato un totale di 9,1 miliardi di euro di premi lordi a livello globale.

- Abuso elettrico:
  - Cortocircuito interno: dovuti principalmente a impurità o danni al separatore, generano surriscaldamento locale e possibile fuga termica;
  - Sovraccarico: causato principalmente dall'applicazione di una tensione di ricarica superiore ai limiti consentiti. Sebbene l'elettronica della batteria integri appositi sistemi di protezione, un sovraccarico critico innesca un immediato runaway termico. È fondamentale notare che anche sovraccarichi lievi, se reiterati nel tempo, possono compromettere gravemente la sicurezza e la funzionalità del dispositivo.;
  - Correnti eccessive: correnti elevate, dovute ad esempio a cortocircuiti esterni, possono causare surriscaldamenti, spesso concentrati nei punti a più alta impedenza;
  - Scarica eccessiva: una scarica inferiore a 2 V può portare alla dissoluzione del collettore in rame che durante le ricariche successive può generare microcortocircuito;
- Abuso termico: le celle hanno un intervallo di temperatura specifico per il corretto funzionamento; temperature troppo elevate possono essere causate da fattori esterni o da un errato raffreddamento. Sopra i 100°C avviene la rottura dell'elettrolita con generazione di gas e accumulo di pressione. Una temperatura troppo bassa non è pericolosa ma compromette il normale utilizzo, diminuendo la capacità della batteria.
- Abuso meccanico: azioni esterne possono deformare o rompere il *case*; a seconda della gravità dei danni, le conseguenze possono variare dal malfunzionamento della cella (minore efficienza, numero di cicli ridotto, ecc.) alla perdita di elettrolita, al cortocircuito interno, al surriscaldamento della cella e infine alla fuga termica. Certi danni lievi possono aggravarsi con un certo ritardo.
- Invecchiamento: è riconosciuto un aumento dell'impedenza interna e il deterioramento delle prestazioni durante la vita della batteria, anche se molti effetti sono ancora in fase di studio.

Queste sono le principali cause di malfunzionamento della batteria che, quando si presentano, possono portare ad un effetto domino importante, difficile da fermare, il cui evento principale è il *thermal runaway*. La gravità delle conseguenze dipende da molti fattori, quali la quantità di energia immagazzinata ovvero la capacità e stato di carica dell'accumulatore

### 1.3.2 Il Thermal Runaway (TR)

La fuga termica delle batterie agli ioni di litio è il fenomeno delle reazioni a catena esotermiche all'interno della batteria. Queste reazioni solitamente causano un forte aumento della temperatura interna della batteria, causando la destabilizzazione e il degrado delle strutture interne, che può portare al guasto totale della batteria. Il Runaway può verificarsi a causa di varie forme di abuso meccanico, elettrico e termico. Tutte queste reazioni portano a un cortocircuito interno della batteria, quando il separatore tra l'anodo e il catodo collassa, si rompe o viene perforato. Ciò genera un'elevata quantità di calore, che a sua volta intensifica il grado di reazioni elettrochimiche, causando un'eccessiva generazione di calore. Questo ciclo continua, aumentando bruscamente la temperatura della batteria e rilasciando grandi quantità di gas infiammabili. Il rilascio di gas provoca un aumento della pressione interna della batteria con conseguente espansione dell'involucro esterno, causando potenziali esplosioni e incendi della batteria [24].

Questo processo è descrivibile in tre fasi [25]:

1. A circa 120°C si verifica la decomposizione dello strato di interfaccia dell'elettrolita solido (SEI);
2. A circa 140°C iniziano le reazioni esotermiche all'elettrodo positivo con lo sviluppo molto rapido di ossigeno;
3. Superati i 180°C l'elettrodo positivo si decompone e l'elettrolita si ossida. Le temperature aumentano anche di 100°C al minuto.

È quindi il limitato *range* di temperatura di funzionamento ottimale (20 – 40 °C) e quello di sicurezza (-30 – 55 °C) il principale svantaggio. Al di fuori di quest'ultimo intervallo si possono creare reazioni chimiche che provocano surriscaldamento causando poi un cortocircuito interno e la decomposizione dello strato di interfaccia (strato SEI) da cui si genera il *thermal runaway*.

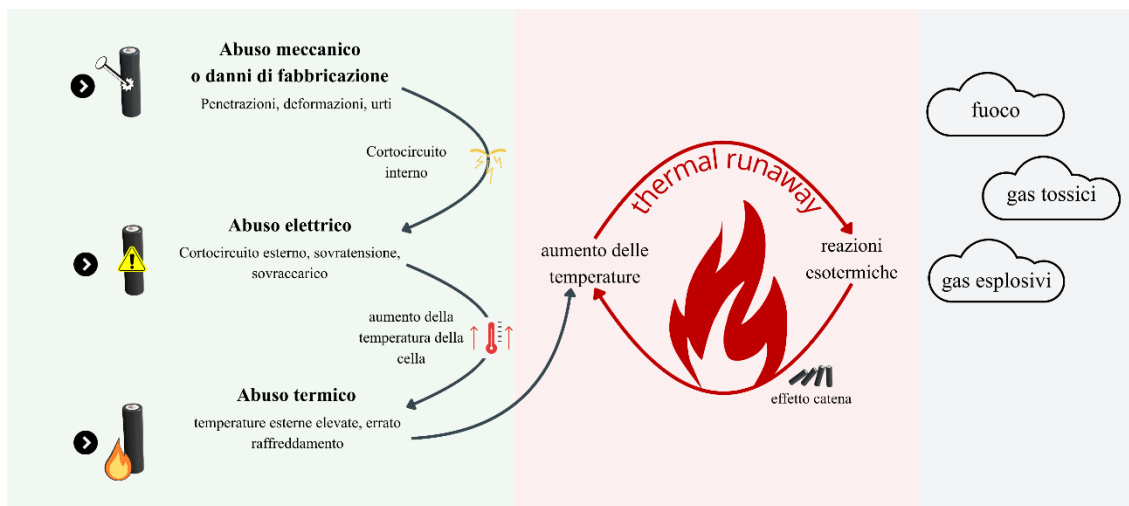


Figura 1.9: Il Thermal Runaway (TR)

In generale, le prestazioni delle celle Litio-ione dipendono sia dalla Temperatura (T) che della tensione operativa V, tanto da poter essere identificata una finestra operativa temperatura-tensione di corretto funzionamento, al di fuori del quale una cella può essere irreversibilmente danneggiata a causa di reazioni chimiche indesiderate.

Infatti, uno qualsiasi dei malfunzionamenti: abuso termico, elettrico o meccanico, porta al surriscaldamento a livello di cella che a sua volta porta ad un abuso termico e poi elettrico alle celle vicine, generando un effetto cascata importante, difficile da interrompere. [26]

Si può concludere che se per qualsiasi motivo vi è una produzione di calore maggiore di quello in grado di essere smaltito, si va incontro al *thermal runaway*, le cui possibili conseguenze possono essere: l'incendio, l'esplosione, il *venting* e il rigonfiamento della cella.

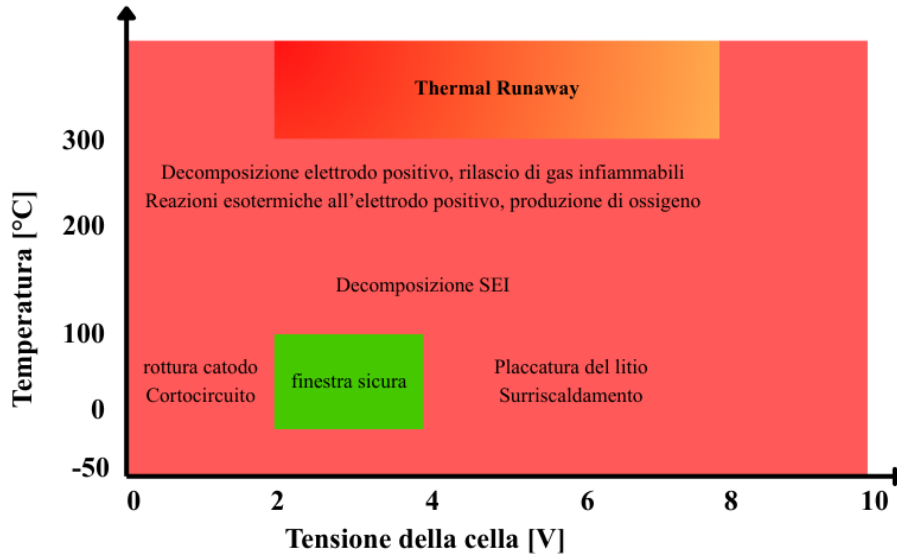


Figura 1.10: Finestra di sicurezza e zona di TR delle batterie al Litio

È approccio classico e fondamentale per comprendere e affrontare un incendio ricondursi al triangolo del fuoco, ovvero la visualizzazione dei tre elementi essenziali: comburente, combustibili e fonte di innesco. Nel caso di *thermal runaway* è opportuno evidenziare che il comburente, ossia l'ossigeno, proviene dalla decomposizione del catodo rilasciato come prodotto di reazione. Il combustibile (carbonio) è invece presente nell'anodo. L'innesco è costituito dalla presenza di una scintilla o dall'aumento di calore e può avvenire sia internamente alla cella che esternamente. È quindi evidente che, una volta innescato, l'incendio ha tutti gli elementi all'interno della batteria stessa per divampare.

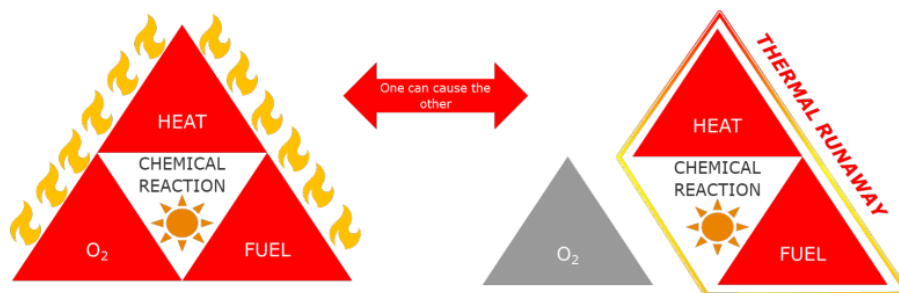


Figura 1.11: Triangolo del fuoco in presenza di TR [27]

È quindi di fondamentale importanza per arrestare, o meglio limitare l'incendio, un raffreddamento efficiente delle batterie, che è dimostrato possa essere ottenuto con buoni risultati con l'utilizzo di acqua [28].

La sicurezza dei veicoli elettrici (EV) e ibridi (HEV) poggia su standard internazionali rigorosi. Tra questi, la normativa ECE R100 rappresenta il pilastro fondamentale per l'omologazione delle batterie ad alta tensione in Europa e nei paesi aderenti all'UNECE. Nonostante la ECE R100 riduca drasticamente la probabilità che una batteria diventi la sorgente di un incendio (se correttamente mantenuta), rimane il rischio residuo che essa agisca come vettore di propagazione ad alta energia.

Come evidenziato da studi di settore (es. *Sun et al.* [29]), una volta innescato un evento di *Thermal Runaway* (TR), la gestione dell'incendio diventa estremamente complessa a causa della natura chimica delle celle agli ioni di litio.

### 1.3.3 Scenari di incendio

A seconda delle condizioni ambientali, il governo inglese ha definito i tipi di incendio che posso verificarsi [30]:

**incendio a combustione libera:** avviene l'accensione dei gas infiammabili da una fonte di innesco. La combustione è rapida ma non genera un'onda di pressione significativa.

**Incendio a getto (Jet Fire):** si verifica quando i gas sfiatano ad alta pressione dalla batteria e si incendiano immediatamente alla fonte di rilascio. Questo è spesso dovuto all'attivazione dei sistemi di sicurezza progettati per evitare sovrappressioni eccessive all'interno della cella. Il risultato è una fiamma direzionale.

**Deflagrazione:** questo scenario si verifica se i gas infiammabili si mescolano con l'aria in un rapporto ottimale (entro i limiti di infiammabilità) in un ambiente confinato o parzialmente confinato. Se la miscela viene innescata, il fronte di fiamma si propaga rapidamente attraverso la nuvola di gas a velocità subsonica (inferiore alla velocità del suono). Questa combustione rapida genera un'onda di pressione che può causare danni strutturali significativi, proiettare detriti e distruggere l'involucro.

**Detonazione:** è lo scenario più grave e distruttivo. In condizioni di confinamento elevato o se la fiamma accelera sufficientemente il fronte di combustione può raggiungere velocità supersoniche (superiori alla velocità del suono). Questo crea un'onda d'urto

estremamente potente che viaggia davanti alla fiamma, capace di causare danni catastrofici.

#### *1.3.4 Prodotti della combustione*

Durante un qualsiasi incendio si generano prodotti della combustione come gas, vapori e particolato che rappresentano una delle principali cause di morte in questi eventi; la NFPA<sup>5</sup> e il CTIF<sup>6</sup> infatti dichiarano che il 50-60% delle vittime degli incendi è causata per l'inalazione di fumo e gas tossici piuttosto che ustioni dirette.

È quindi evidente che gli effetti di un incendio abbiano effetti negativi sia sulla salute delle persone sia anche sull'ambiente. I molteplici fattori che possono variare le caratteristiche specifiche dell'incendio fanno sì che sia molto difficile conoscere la composizione dei prodotti generati durante la combustione.

L'innalzamento della temperatura è l'effetto evidente a tutti, provocando il rischio di ipertermia (colpo di calore). Il corpo umano infatti segue le leggi della termodinamica. In letteratura è possibile trovare diversi modelli matematici per descrivere la termoregolazione umana. Quello più avanzato e completo sembra essere quello di Fiala, molto sofisticato e che necessita di numerose variabili. Senza addentrarci nello specifico di questa metodologia, è importante ricordare che il corpo umano è un sistema omeotermico e quindi mantiene una temperatura interna costante tra i 36°C e i 38°C, arrivando a massimo 41°C durante sforzi intensi. La temperatura di 42°C rappresenta quindi un limite critico oltre la quale l'ipertermia diventa una condizione pericolosa per la salute.

Un altro elemento di avvelenamento durante un incendio è quello da monossido di carbonio CO che, legandosi all'emoglobina al posto dell'ossigeno, causa una riduzione di apporto di ossigeno ai tessuti.

Molte altre sostanze hanno azioni incapacitanti, rappresentando una condizione intermedia tra conseguenze temporanee e potenzialmente letali a seconda dell'ambiente, della concentrazione e della durata dell'esposizione; in particolare l'elevata emissività di

---

<sup>5</sup> NFPA: National Fire Protection Association, un'organizzazione internazionale no-profit con sede negli Stati Uniti

<sup>6</sup> CTIF: Comitato Internazionale per la Prevenzione Incendi, un'organizzazione mondiale che lavora per la sicurezza dei vigili del fuoco dal 1900

acido fluoridrico HF diventa una differenza significativa negli incendi che coinvolgono auto elettriche all'interno di spazi chiusi. [23]

La previsione dei prodotti di combustione tossici è particolarmente complessa, essendo condizionata dalla natura dell'incendio e delle conseguenti condizioni di combustione che possono generare una vastissima gamma di prodotti di pirolisi. Per avere una conoscenza approfondita dei prodotti della combustione, fondamentale per migliorare la protezione delle persone presenti e dei soccorritori, si sono sviluppati diversi studi. Questi studi hanno permesso lo sviluppo di strumenti per la previsione dei rischi, migliorando la capacità di affrontare le emergenze. I risultati sono ancora molto limitati soprattutto relativamente alla complessità e variabilità dei risultati.

Le indagini condotte da Hynnen et al. hanno evidenziato sostanziali differenze qualitative e quantitative nelle emissioni generate dagli incendi dei veicoli, in funzione del sistema di propulsione adottato.

Nello specifico, per i veicoli con motore a combustione interna (ICEV) alimentati a benzina, è stata rilevata una concentrazione predominante di piombo (Pb). Al contrario, nel caso dei veicoli elettrici (EV), l'analisi dei residui ha mostrato una presenza significativa di metalli caratteristici della chimica delle celle, quali nichel, cobalto, litio e manganese, le cui proporzioni variano in base alla specifica composizione catodica della batteria.

Tuttavia, la divergenza più critica sotto il profilo della tossicità riguarda le emissioni di acido fluoridrico (HF). La concentrazione limite, secondo SFPE *Handbook of fire protection engineering*, oltre la quale si considera compromessa la capacità della persona di adottare azioni adeguate per mettersi in salvo, stimata come la concentrazione alla quale il gas induce incapacità nel 50% della popolazione esposta, è pari a 500 ppm.

Lo studio di Hynnen evidenzia un incremento drastico di questo composto negli incendi di veicoli elettrici rispetto a quelli tradizionali: mentre per gli ICEV i valori rilevati si attestano tra 11 e 15 g, per gli EV le quantità salgono vertiginosamente in un range compreso tra 120 e 859 g, rappresentando il principale fattore di rischio chimico differenziale. Anche i test condotti da Lecocq et al [31] concludono evidenziando un'emissione maggiore di HF nei veicoli elettrici, pari fino a 1540 g. Inoltre, evidenziano come gli altri gas di combustione sono prevalentemente funzione dell'abitacolo, ovvero veicoli più grandi portano a una maggiore quantità di materiale combustibile.

Per valutare l'effetto combinato di diversi gas tossici nell'ambiente durante un incendio, ovvero per misurare l'esposizione in termini di incapacità o morte per la popolazione, viene utilizzata la misurazione della FED, *Fractional Effective Dose*, dove l'esposizione di ciascun gas tossico viene ponderata in funzione della concentrazione e della durata dell'esposizione. Questo permette il calcolo dell'ASET ovvero il tempo disponibile per l'esodo (*Available Safe Escape Time*) definito dall'ISO 13571, riferimento autorevole in questo campo, come il tempo a disposizione dagli occupanti, minore nei seguenti quattro modelli:

- modello gas tossici
- modello gas irritanti
- modello del calore
- modello dell'oscuramento della visibilità da fumo

Per l'obiettivo primario, la salvaguardia della vita umana, è quindi necessaria una valutazione attenta dei prodotti della combustione.

Come indicato da Marotta nel Libro INCENDI 2 [32], l'interazione tra gas tossici, irritazione sensoriale e oscuramento visivo rappresentano i pericoli principali. I gas tossici, come monossido di carbonio e anidride carbonica, compromettono l'efficienza respiratoria, l'inalazione di sostanze irritanti provoca tosse, lacrimazione intensa e bruciore alle mucose limitando la capacità di movimento e di concentrazione già fortemente limitata dai fumi densi che disorientano e ostacolano la capacità di trovare la via di fuga.

Come per i veicoli a combustione interna è necessario valutare la produzione di CO<sub>2</sub> e CO e, in aggiunta, la quantità di HF. Nello studio di Hynynen et Al. [33] viene osservato un aumento lineare con l'energia elettrica nominale della batteria di alcuni metalli specifici come nichel cobalto, litio e manganese a seconda della composizione chimica della batteria. L'analisi dei prodotti della combustione è necessaria anche per la valutazione del rischio ambiente. I veicoli elettrici, ad eccezione della parte della batteria, presentano il medesimo impatto ambientale dei veicoli a combustione interna, e quindi in gran parte paragonabili. Tutte le tipologie di veicoli emettono fumi tossici e contaminano

l'acqua di spegnimento. La differenza di valutazione si limita ai metalli specifici delle batterie.

Oltre alla salvaguardia della vita umana è necessario tutelare anche i beni e l'ambiente; è quindi necessario prestare attenzione al corretto smaltimento delle acque utilizzate per lo spegnimento, potenzialmente contaminate

### *1.3.5 Rischio esplosione*

Nella valutazione del rischio associato alla presenza di veicoli elettrici all'interno delle autorimesse non è possibile escludere la possibilità di eventi di natura esplosiva. Le batterie agli ioni di litio, infatti, possono contenere o generare, in condizioni di guasto, sovraccarico o surriscaldamento, gas infiammabili quali idrogeno e altri composti volatili. Il rilascio di tali gas, in ambienti confinati o scarsamente ventilati, può determinare la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive, qualora le concentrazioni rientrino nei limiti di infiammabilità in aria. La Regola Tecnica Verticale RTV 2 del Codice di Prevenzione Incendi fornisce i criteri per la valutazione e la gestione del rischio di esplosione derivante dalla presenza di sostanze infiammabili in grado di generare atmosfere esplosive, imponendo al progettista l'analisi delle possibili sorgenti di rilascio, delle condizioni di accumulo e delle potenziali sorgenti di innesco. In tale contesto, un ruolo fondamentale è svolto dai sistemi di ventilazione, la cui funzione è quella di diluire e allontanare i gas infiammabili, riducendo la probabilità di formazione di miscele esplosive. Tuttavia, anche in presenza di una ventilazione correttamente dimensionata, la RTV 2 evidenzia come possano verificarsi accumuli localizzati di gas in prossimità delle sorgenti di rilascio, rendendo necessario un approccio progettuale prudente. Pertanto, la valutazione del rischio di esplosione nelle autorimesse con veicoli elettrici deve essere condotta in modo integrato, tenendo conto delle caratteristiche dell'ambiente, delle modalità di utilizzo, della presenza di infrastrutture di ricarica e delle misure di prevenzione e protezione adottate, al fine di garantire livelli di sicurezza adeguati.

## 1.4 Mitigazione del rischio incendio e inquadramento

### normativo

#### 1.4.1 Estinzione

In termini generali, i processi di estinzione di un incendio si basano sulla rimozione di almeno uno dei tre elementi costitutivi del cosiddetto *triangolo del fuoco*: combustibile, comburente (ossigeno) o calore. Gli agenti estinguenti agiscono pertanto mediante soffocamento, raffreddamento o separazione del combustibile. Nel caso degli incendi che coinvolgono batterie agli ioni di litio, tale approccio risulta particolarmente complesso, poiché tutti e tre gli elementi del triangolo sono intrinsecamente presenti all'interno della batteria stessa, rendendo difficile l'interruzione del processo combustivo.

A seguito dell'innesco del *thermal runaway* (TR), le reazioni esotermiche interne alla batteria assumono un carattere estremamente violento, generando elevate quantità di calore in tempi molto brevi. Le velocità di incremento termico possono raggiungere valori dell'ordine di 100 °C/s, mentre le temperature massime superano frequentemente gli 800 °C. Poiché tali fenomeni si sviluppano all'interno del pacco batteria, l'azione diretta dell'agente estinguente risulta fortemente limitata. Ne consegue che, pur ottenendo un abbattimento della temperatura superficiale, il mantenimento di elevate temperature interne (tra i 400 e 1000 °C) favorisce un'elevata probabilità di riaccensione, in presenza di una sorgente di innesco ancora attiva.

Risulta pertanto evidente come un sistema di estinzione efficace debba essere in grado non solo di sopprimere rapidamente le fiamme libere, ma anche di garantire un raffreddamento profondo ed efficace del pacco batteria, al fine di interrompere la propagazione del *thermal runaway*.

Il Codice di Prevenzione Incendi prevede la selezione degli agenti estinguenti in funzione della natura del combustibile, classificando gli incendi secondo la norma EN 2 nelle seguenti classi:

- **Classe A:** incendi di materiali solidi;
- **Classe B:** incendi di materiali liquidi o solidi liquefacibili;
- **Classe C:** incendi di gas;

- **Classe D:** incendi di metalli;
- **Classe F:** incendi di oli e grassi da cottura.

L'inquadramento di un incendio di batterie agli ioni di litio all'interno di tali classi non risulta immediato. Sebbene alcune caratteristiche possano richiamare gli incendi di liquidi infiammabili (Classe B), esse sono aggravate dalle condizioni di confinamento e dalla complessità del sistema elettrochimico. Non è invece appropriata la classificazione in Classe D, poiché il litio è presente in forma ionica e non metallica. Resta tuttavia evidente il coinvolgimento di apparecchiature elettriche in tensione, riconducibili alla categoria degli incendi di tipo elettrico (EX – Classe E). Ne deriva la necessità di una valutazione specifica del rischio incendio, non essendo possibile l'adozione di una classificazione standardizzata. [34] A causa della difficoltà di collocare gli incendi di batterie al litio nelle classi preesistenti, lo standard ISO 3941:2026 è stato aggiornato con la creazione della specifica **Classe L**, definendoli come incendi che coinvolgono celle e batterie agli ioni di litio, in cui non è presente litio allo stato metallico, ed evidenzia la natura elettrochimica di questi incendi che possono avere elevata densità di energia e maggiore velocità di crescita rispetto alle classi tradizionali.

Sulla base delle caratteristiche di tali incendi, un agente estinguente ideale per batterie agli ioni di litio dovrebbe possedere:

- elevata capacità termica, per garantire un raffreddamento rapido ed efficace;
- proprietà dielettriche, per evitare cortocircuiti durante le operazioni di spegnimento;
- elevata bagnabilità e bassa viscosità, al fine di favorire la penetrazione all'interno di pacchi batteria compatti;
- capacità di prevenire la riaccensione e la propagazione del TR ai moduli adiacenti;
- disponibilità operativa e ridotto impatto ambientale;
- efficacia nella riduzione dei fumi tossici, migliorando la visibilità durante le operazioni di soccorso.

Numerosi studi sperimentali indicano che i migliori risultati in termini di capacità estinguente e raffreddamento si ottengono con l'utilizzo di agenti a base d'acqua, qualora riescano a entrare in contatto diretto con la superficie dell'accumulatore; senza penetrazione, l'acqua raffredda solo l'esterno, prevenendo la propagazione agli oggetti vicini, ma non è in grado di arrestare le reazioni interne [35].

Gli agenti estinguenti maggiormente impiegati o studiati includono: anidride carbonica, azoto liquido, halon, polveri secche, aerosol, acqua (in diverse configurazioni), schiume e sali.

L'anidride carbonica, pur essendo idonea per incendi elettrici, agisce prevalentemente per soffocamento e raffreddamento limitato; la produzione autonoma di ossigeno da parte della batteria ne compromette tuttavia l'efficacia.

L'azoto liquido e altri refrigeranti criogenici consentono un rapido abbattimento termico, ma i costi elevati di stoccaggio e trasporto ne limitano l'applicabilità su larga scala [36].

Gli halon, che agiscono interrompendo le reazioni a catena della combustione, risultano efficaci solo se riescono a penetrare all'interno della batteria, circostanza difficilmente realizzabile a causa delle scocche protettive.

Le polveri secche, comunemente utilizzate per incendi di classe ABC, mostrano una limitata capacità di raffreddamento profondo: prove sperimentali hanno evidenziato temperature superficiali ancora elevate dopo l'estinzione, con conseguente rischio di propagazione del TR e riaccensione, rendendole inadatte alla protezione di moduli batteria complessi. Inoltre, alcuni aerosol di tipo K producono sottoprodotti ad alta temperatura a causa di reazioni esotermiche, aumentando il rischio di riaccensione.

L'acqua rappresenta l'agente estinguente più diffuso ed efficace grazie alla sua elevata capacità di assorbimento termico. In funzione della dimensione delle gocce, si distinguono sistemi a getto pieno, sprinkler o diluvio e nebulizzata. È stato osservato in diversi studi [37] che il volume d'acqua necessario per spegnere incendi di veicoli elettrici è generalmente superiore a quello richiesto per veicoli convenzionali.

I sistemi a nebbia d'acqua (*Water Mist*), caratterizzati da gocce con diametro inferiore a 1000  $\mu\text{m}$ , migliorano l'assorbimento energetico grazie all'elevata superficie di scambio. I sistemi a diluvio, dotati di ugelli aperti, consentono una copertura rapida e uniforme delle superfici esposte, risultando particolarmente efficaci per il raffreddamento. I sistemi ad alta pressione (*Hi-Fog*) utilizzano quantità ridotte di acqua, ma mostrano un'efficacia di raffreddamento inferiore in caso di incendio diretto della batteria.

L'efficacia dei sistemi *Water Mist* dipende da prove sperimentali in scala reale. Studi recenti indicano che un tempo di applicazione e un'intensità di spruzzo adeguati (almeno

2,0 L/min·m<sup>2</sup>) possono limitare la propagazione del TR, mentre volumi insufficienti risultano inefficaci [38].

Gli agenti bagnanti (*Wetting Agents*), grazie alla riduzione della tensione superficiale dell'acqua, migliorano la penetrazione e la diffusione dell'agente estinguente. Le loro prestazioni, tuttavia, variano significativamente in funzione della composizione chimica, rendendo complessa una valutazione univoca della loro efficacia negli incendi ad alta temperatura delle batterie agli ioni di litio.

Infine, le coperte antincendio agiscono per isolamento e soffocamento, risultando efficaci nel contenimento del fumo e nella protezione di compartimenti o veicoli adiacenti. Tuttavia, come segnalato dalla *Fire Safety Research Institute* e dalla *Fire Protection Research Foundation* (FPRF) [39], esse non estinguono l'incendio della batteria e possono favorire l'aumento della temperatura interna, accelerando la propagazione del TR e contribuendo al rischio di esplosione quando si reintroduce aria. Il loro utilizzo è pertanto raccomandato solo in combinazione con sistemi di raffreddamento attivo, come barriere o muri d'acqua, prestando particolare attenzione al rischio di riaccensione al momento della rimozione.

#### 1.4.2 Contesto normativo internazionale

Gli incendi che interessano batterie agli ioni di litio sono complessi per diversi aspetti. Come già spiegato, il primo, il *thermal runaway*, fa sì che tutti gli elementi del triangolo del fuoco siano all'interno dell'accumulatore. Inoltre, è molto difficile accedere al pacco batterie per raffreddarlo e questo è motivo anche di possibili riaccensioni.

Ciò non significa che sia inutile combattere un incendio che coinvolge una batteria agli ioni di litio; le celle, infatti, non contengono ossigeno per bruciare tutto il materiale e il raffreddamento limita la propagazione dell'incendio.

Come qualsiasi tipo di incendio gli incendi di veicoli elettrici a batteria possono rappresentare una minaccia significativa per la salvaguardia della vita umana. Gli incendi possono propagarsi velocemente tra i veicoli, sia quelli a motore a combustione interna che quelli a batteria, generando fumi e gas tossici molto pericolosi.

Questa tipologia di incendio, ovvero quella che interessa una batteria, non sono ancora stati studiati in modo consistente, al contrario delle conoscenze ormai consolidate rispetto agli incendi dovuti a vettori energetici convenzionali.

A livello europeo, nel 2025 la Commissione Europea, con l'assistenza di ALVERE e di Fire Safe Europe, ha presentato una guida elaborata per il forum sul trasporto sostenibile [40] fornendo delle indicazioni per affrontare le sfide in materia di sicurezza antincendio nei parcheggi coperti in cui sono presenti veicoli elettrici a batteria, cercando di contribuire ad un ambiente più sicuro per la diffusione di questi veicoli. Il documento sottolinea la relativa rarità degli incendi di veicoli elettrici. Infatti, secondo l'Agenzia svedese per le emergenze civili (MSB) bruciano 20 volte meno spesso veicoli elettrici rispetto a quelli a combustione interna. Questo dato si basa però su un parco macchine elettrico ancora limitato e relativamente nuovo. Secondo le prime analisi prodotte da RISE nel progetto LASH FIRE attraverso test su scala reale si sono rilevate differenze minime tra incendi di veicoli a diversa tipologia di propulsione. Le caratteristiche fondamentali dell'incendio sono dettate in prevalenza dai materiali e dalle dimensioni dell'abitacolo, ovvero i prodotti della combustione di un incendio di un veicolo elettrico sono simili a quelli di un incendio di un veicolo con motore a combustione interna poiché i produttori tendono ad utilizzare materiali e componentistica simili per gli interni dei vari veicoli che producono.

È interessante notare che un aumento del rischio di incendio nei nuovi veicoli non è dovuto al sistema di propulsione, ma alle dimensioni e ai materiali della carrozzeria stessa. Infatti, i veicoli moderni presentano velocità di crescita dell'incendio maggiore perché di dimensioni maggiori e con maggiore utilizzo di materiale plastico. Un uso molto maggiore di plastica, da meno del 6% degli anni '50 a più del 20% attuali e aumento di massa e dimensioni, che si traduce anche in un minore spazio libero tra auto e auto e tra auto e soffitto, hanno impatti importanti sulla propagazione dell'incendio. [41]

Gli incendi dei veicoli elettrici, come concluso nel rapporto di ricerca condotto dall'EMPA [42], non sono significativamente più estesi, più intensi o più pericolosi di quelli di veicoli con combustione interna, presentando molte somiglianze ma anche dei rischi specifici che richiedono un'attenzione particolare.

La propagazione degli incendi dei veicoli elettrici a batteria ai veicoli adiacenti non è in generale più rapida di quella degli incendi dei veicoli a motore a combustione interna.

Sebbene le batterie possano produrre fiamme, gli ICEV possono disperdere carburante per diversi metri. Anche il serbatoio del carburante in polimero si incendia più rapidamente rispetto a quello delle batterie. Rimane però, secondo la NFPA degli USA, più difficile lo spegnimento di un incendio che ha interessato una batteria al litio che può presentare più picchi e riaccensioni anche dopo diverso tempo (22h). [43]

Questo dipende dall'energia residua intrappolata e dalla temperatura interna del pacco batteria dopo l'estinzione primaria.

In Italia non sono ancora state emanate delle linee guida specifiche, mentre in altri Paesi questi rischi aggiuntivi sono stati presi in considerazione, innalzando i profili di rischio.

#### *1.4.3 Quadro normativo italiano verso la nuova RTV 6*

La normativa italiana definita come semi-prescrittiva consente l'adozione di soluzioni conformi oppure alternative per poter raggiungere gli obiettivi di sicurezza primari (salvaguardia della vita umana e tutela di beni e ambiente). In particolare, per le autorimesse di superficie complessiva superiore a 300 m<sup>2</sup> è presente una regola tecnica verticale (RTV6).

Il Codice di Prevenzione Incendi prevede due approcci distinti: quello prescrittivo e quello prestazionale. Il primo si caratterizza per un insieme di regole che il progettista è tenuto ad applicare rigorosamente per soddisfare i criteri di rischio residuo accettabile definiti dal normatore. Al contrario, l'approccio prestazionale (o ingegneristico, *Fire Safety Engineering*) valuta l'evoluzione dell'incendio attraverso modelli di calcolo, concedendo al progettista una maggiore flessibilità nelle scelte progettuali.

Tuttavia, l'attuale Regola Tecnica Verticale (V.6) non affronta esplicitamente il rischio specifico introdotto dai veicoli elettrici. Tale lacuna potrebbe rendere le vigenti misure prescrittive non più sufficienti a garantire la sicurezza. Applicando l'approccio prescrittivo e in funzione di parametri quali le caratteristiche degli occupanti, la superficie lorda e la quota dei piani, si determinano generalmente una resistenza al fuoco compresa tra R30 e R90 e l'obbligo di misure di controllo di base, come estintori e rete idranti. L'adozione di livelli di prestazione superiori (IV o V), che impongono sistemi automatici di controllo o estinzione (es. sprinkler), è richiesta obbligatoriamente solo per autorimesse con superficie lorda superiore a 10.000 m<sup>2</sup> o per autosili.

Va notato che la V.6 è attualmente l'unica norma verticale a fornire indicazioni specifiche per l'applicazione dei Metodi (Capitolo M), proponendo tre scenari di incendio descritti da curve RHR(t). Tali scenari prevedono, in presenza di impianti sprinkler, una riduzione del 50% della potenza termica e l'assunzione di mancata propagazione dal momento dell'attivazione. Tuttavia, questi profili di progetto si riferiscono a veicoli a combustione interna e non riflettono la cinetica di incendio delle batterie al litio.

Il Codice rammenta che la carrozzeria degli autoveicoli influenza l'efficacia dei sistemi automatici di controllo dell'incendio. Non è quindi possibile limitare la potenza termica al valore raggiunto all'attivazione del sistema, ma è possibile solamente una riduzione percentuale della potenza termica rilasciata [44].

L'INAIL, nel quaderno tecnico sulla RTV 6 in appendice, suggerisce che le autovetture elettriche rappresentino un rischio aggiuntivo e innalza la velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio da media (300s) a rapida (150s).

Come suggerito anche in altri articoli, si innalzano le misure di protezione ma questa metodologia di valutazione del rischio non presenta una validazione scientifica, in quanto un innalzamento generale delle misure di protezione sicuramente abbassa il rischio ma, senza valutazioni oggettive, può portare a oneri importanti senza un abbattimento importante del rischio. Al contrario, misure fatte su misura per la tipologia di rischio aggiuntivo possono permettere un abbassamento drastico del rischio, senza impatti economici o edili esagerati.

Stante l'attuale carenza di disposizioni prescrittive specifiche per il rischio incendio derivante dai veicoli elettrici, l'approccio prestazionale (FSE) rappresenta lo strumento idoneo per la definizione di strategie di sicurezza. La validità di tale approccio dipende strettamente dalla corretta definizione del focolaio e dalla quantificazione del contributo fornito dai sistemi di protezione attiva nel mitigare gli scenari incidentali.

È prevedibile che a breve venga pubblicata una revisione della RTV 6; ciò rappresenterà una risposta all'ingresso dei veicoli elettrici e ibridi nel parco circolante. Le attuali bozze e le anticipazioni del settore [45] suggeriscono l'introduzione da parte del codice del concetto chiave di modularità del rischio, ovvero, l'organizzazione di posti auto dedicati ai veicoli elettrici in gruppi separati da setti incombustibili o distanze libere di 1,5 m. Tali bozze prevedono, verosimilmente, la separazione fisica tra veicoli elettrici e a combustione interna, imponendo raggruppamenti limitati di blocchi da 6 posti auto e

restrizioni ancora maggiori per le stazioni di ricarica con blocchi da 4 unità con rilevazione automatica dedicata.

L'applicazione di tale direttiva impone il sacrificio di un'unità di sosta ogni sette. In uno scenario di integrazione diffusa, che non preveda la segregazione delle aree per veicoli elettrici ma una generalizzazione dell'infrastruttura, si stima una contrazione dell'offerta di sosta nell'ordine del 14%.

Galeotti, presidente di FSE progetti srl, conclude indicando il bisogno di norme che crescano con la tecnologia, non che la inseguano, così da ottenere un sistema di prevenzione incendi credibile, efficace e, soprattutto, utile. Tuttavia, l'entrata in vigore di tali prescrizioni comporterebbe significative limitazioni in termini di layout e sfruttamento degli spazi per le autorimesse.

Tale approccio prescrittivo, sebbene orientato alla sicurezza, appare poco sostenibile sotto il profilo del layout e dell'ottimizzazione degli spazi, specialmente nelle autorimesse esistenti. Inoltre, la segregazione dei veicoli in base alla motorizzazione rischia di rivelarsi una strategia miope di fronte alla progressiva elettrificazione dell'intero parco circolante, rendendo le "soluzioni conformi" tecnicamente o economicamente inattuabili. Va altresì notato che, sebbene la fase di ricarica aumenti la probabilità di innesco, la potenza termica rilasciata (RHR) durante l'incendio non dipende dallo stato di carica, bensì dal carico d'incendio intrinseco del veicolo, come illustrato nel Capitolo 1.

Alla luce di ciò, il presente elaborato si pone l'obiettivo di fornire ai progettisti un metodo basato sull'approccio ingegneristico (FSE) per garantire il necessario livello di sicurezza senza stravolgere il layout dei parcheggi esistenti o di nuova concezione, preservando l'ottimizzazione degli spazi ed evitando, ove possibile, l'installazione di barriere fisiche invasive.

#### *1.4.4 Caratterizzazione del focolaio*

L'incendio che interessa un'autovettura con batteria non è in funzione solo della batteria ma è influenzato da questa; è quindi importante uno studio a scala reale degli incendi di intere autovetture e un confronto con quelle a propulsione tradizionale.

I casi di incendio di veicoli elettrici possono essere classificati secondo lo studio di Brzezinska e Bryant [37] in una di queste tipologie:

- il veicolo prende fuoco da fermo (autoaccensione), dovuto a condizioni meteo estreme o guasti interni alla batteria o è investito da un incendio di origine differente oppure il veicolo prende fuoco in quanto soggetto a fiamme dirette, convezione oppure irraggiamento generato nelle vicinanze (per esempio un altro veicolo);
- il veicolo prende fuoco durante la ricarica, a causa di malfunzionamenti della batteria dovuti da sovraccarico o stazioni di ricarica difettose;
- il veicolo elettrico prende fuoco a seguito di collisione.

Inoltre, è necessario prendere in considerazione la riaccensione dopo la prima estinzione dell'incendio.

Nonostante in letteratura sia disponibile un numero limitato di prove su scala reale, i dati esistenti costituiscono un valido punto di partenza per l'analisi. In prima istanza, l'attenzione si concentra sui veicoli a combustione interna: il grafico pone a confronto le curve RHR(t) ottenute da diverse campagne sperimentali del RISE [11], Applied [43] e Lecocq [31] con la curva proposta dal codice prevenzione incendi e quella proposta da

Suveren<sup>7</sup> [46], vengono riprodotte come riferimento le curve media ( $t\alpha=300s$ ) e veloce ( $t\alpha=150s$ ).

---

<sup>7</sup> SUVEREN è un progetto di ricerca finanziato dal Ministero Federale per la Ricerca e l'Istruzione (BMBF) che ha affrontato i nuovi rischi e i futuri concetti di sicurezza legati al crescente utilizzo di nuove fonti di energia nei veicoli.

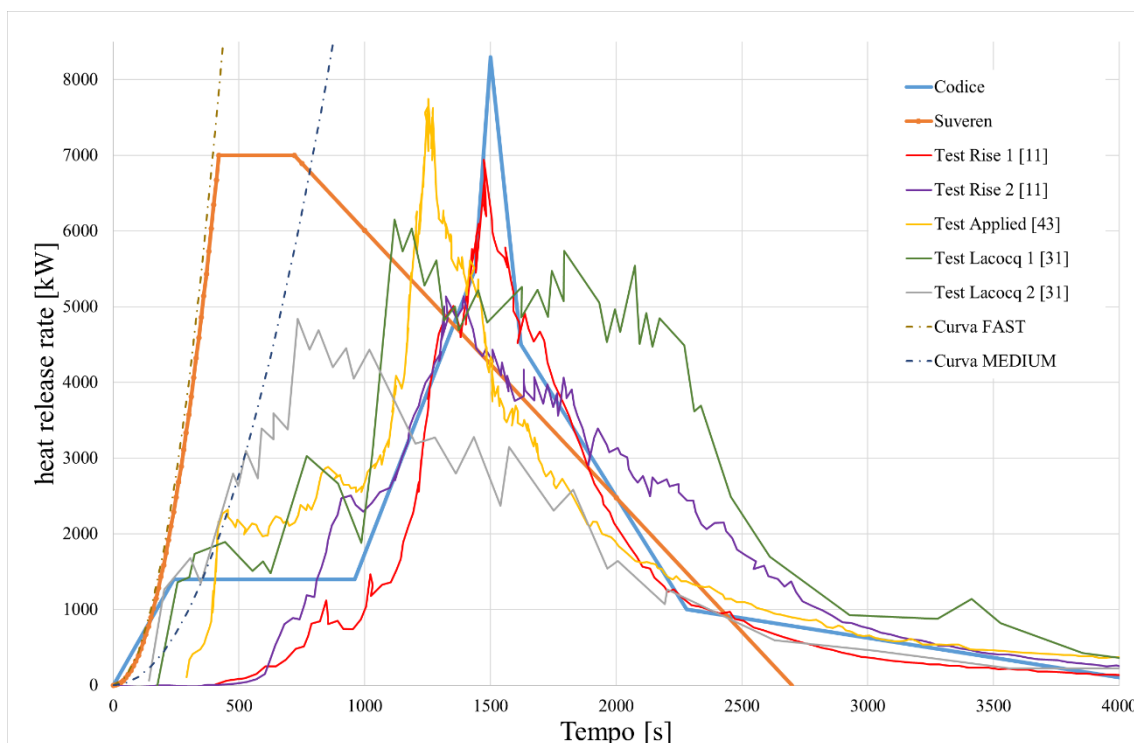


Figura 1.12: Grafico delle curve RHR di automobili a combustione interna

La curva proposta nella RTV 6 sembra avere un andamento paragonabile con quelle dei test anche se questi ultimi risultano leggermente più rapidi. Questo può essere imputabile al cambiamento dei materiali usati nella costruzione delle auto moderne come già esposto precedentemente nel paragrafo 1.4.2.

Se invece la curva proposta dal codice viene confrontata con i test a scala reale di veicoli elettrici proposti dagli stessi studi usati per le auto a trazione convenzionale e da Lam et al. [47], si evidenzia una velocità di crescita iniziale nettamente diversa contro però un valore di energia totale e di potenza massima simili.

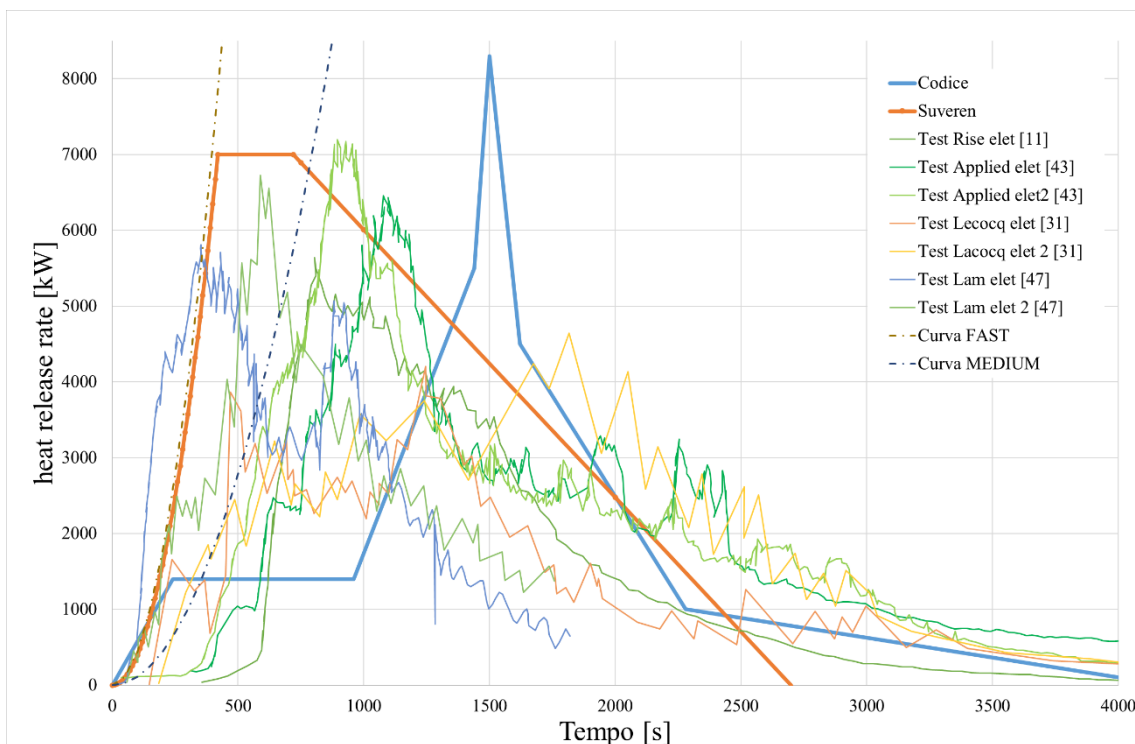


Figura 1.13: Grafico delle curve RHR di automobili elettriche

Gli studi dimostrano infatti che, a parità di dimensione del veicolo, l'energia totale rilasciata e la potenza massima sono comparabili. La differenza principale risiede piuttosto nella dinamica di crescita che appare più rapida superando 1 MW dopo 160.

Il carico di incendio, ovvero l'energia totale per autoveicoli, risulta essere di circa 10 GJ dalla curva SUVEREN contro i circa 7 GJ che prevede il Codice Prevenzione Incendi. Le evidenze suggeriscono che tale aumento del carico di incendio non debba essere correlato alla presenza di accumulatori elettrici, quanto piuttosto alla variazione delle dimensioni dei veicoli e ai materiali degli allestimenti interni e della carrozzeria. Facendo infatti un confronto tra benzina e batterie, ovvero escludendo la carrozzeria, il carico di incendio dovrebbe essere minore per l'auto elettrica. Infatti, facendo un confronto focalizzato sui soli vettori energetici, il potenziale termico complessivo risulta teoricamente inferiore per l'auto elettrica; un serbatoio con 50 litri di benzina possiede un'energia chimica di oltre 1500 MJ. Per contro, una batteria da 100 kWh ha un contenuto di energia elettrica pari a 360 MJ. Sebbene a questo valore vada sommato il calore di combustione dei materiali interni della cella (elettroliti, polimeri, anodo in grafite), studi sperimentali [11] indicano che l'energia termica totale rilasciata varia tipicamente tra 1,5

e 2 volte l'energia elettrica nominale. Anche ipotizzando lo scenario peggiore (ca. 700-800 MJ totali), il carico termico del pacco batterie rimane significativamente inferiore rispetto a quello di un serbatoio di combustibile fossile pieno.

Nonostante le curve reali siano influenzate da numerose variabili (come la tipologia e il punto di innesco), l'analisi evidenzia che la curva proposta dalla RTV 6 non appare sufficientemente cautelativa. Il modello normativo, infatti, prevede un picco ritardato che, in molte circostanze sperimentali – incluse alcune relative a motori a combustione interna – viene raggiunto con largo anticipo. Ne consegue che l'adozione di una curva a crescita rapida (*Fast*), analoga a quella proposta dal progetto SUVEREN, rispecchierebbe con maggiore fedeltà la severità degli scenari reali.

Particolare attenzione va posta sulla localizzazione dell'innesco: i test mostrano che le crescite più violente si verificano quando l'incendio origina direttamente dal pacco batteria, mentre gli inneschi limitati all'abitacolo presentano un'evoluzione più lenta. Tuttavia, non potendo escludere a priori l'innesco nella batteria, è necessario assumere tale scenario come riferimento in fase di valutazione del rischio, orientandosi verso modelli di progetto maggiormente a favore di sicurezza.

#### *1.4.5 Misure di prevenzione e protezione*

La prima misura finalizzata a proteggere l'incolumità delle persone consiste nella prevenzione, ovvero nell'evitare l'insorgere dell'incendio. La prevenzione è possibile solo con una corretta valutazione del rischio, a cui seguono valutazioni per definire le caratteristiche della destinazione d'uso corretta dei locali. Una corretta destinazione si esplica in una limitazione dei carichi di incendio, messa in opera degli impianti a regola d'arte e corretta manutenzione, rispetto di divieti e limitazioni di esercizio e un'adeguata formazione ed informazione di tutto il personale.

Nel caso in cui insorga un incendio sono necessarie delle misure di protezione ovvero delle misure per limitare le conseguenze dell'incendio. Queste possono essere suddivise in attive e passive.

Le prime si realizzano con degli impianti di sicurezza come rilevazione automatica, di allarme, di controllo fumi e calore, di spegnimento automatico o portatili e di illuminazione di sicurezza.

I sistemi in grado di rilevare i gas di scarico a basse concentrazioni possono fornire un allarme tempestivo di un'imminente fuga termica e attivare sistemi di spegnimento.

Non è raro che un efficace rilevamento dei gas, specificamente adattato per essere sensibile a gas (prevalentemente H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, gas idrocarburici e solventi elettrolitici per batterie), lo rilevi entro 30 secondi dal suo rilascio iniziale dalla cella. Si noti che la presenza e l'accumulo di quantità significative di gas H<sub>2</sub> e idrocarburi possono presentare un rischio di esplosione. La ventilazione è una caratteristica importante nella mitigazione dei rischi potenzialmente esplosivi.

Bekaert [48] durante il *SFPE Engineering Solutions Symposium*<sup>8</sup> di Lisbona ha evidenziato come una diagnosi precoce permette di intervenire prima che si sviluppino condizioni di rischio elevato, riducendo significativamente danni a persone, strutture e beni. Bekaert descrive la cascata di degradazioni interne composta dal riscaldamento localizzato, la generazione e l'accumulo di gas, la creazione di cortocircuiti con reazioni esotermiche e il TR ovvero il riscaldamento autonomo incontrollato. Comprendere questi passaggi è fondamentale per rilevare i segnali precoci, evidenziando come le anomalie iniziali sono di entità ridotta, localizzate, facili da risolvere ma rilevabili solo a livello di batteria.

Le misure di protezione passiva si realizzano invece con l'adozione di materiali classificati in base alla reazione al fuoco, idonei sistemi di vie di fuga e una compartimentazione congrua con il carico di incendio, realizzata con opportune distanze di separazione o realizzazione di elementi resistenti al fuoco.

Per le autorimesse viene richiesta, in conformità con il codice, una resistenza al fuoco, in base alla quota dei piani e se aperta o chiusa, tra i 30 e 90 min. L'attività deve inoltre essere dotata di misure di controllo dell'incendio di livello da 2 a 4. Un livello 2 o 3 si raggiunge installando estintori d'incendio a protezione dell'intera attività e una rete idranti a protezione dell'intera attività o dei singoli compartimenti.

---

<sup>8</sup> SFPE Engineering Solutions Symposium: La Society of Fire Protection Engineers (SFPE) è un'importante organizzazione professionale fin dalla sua fondazione nel 1950 e dalla sua costituzione come organizzazione no-profit nel 1971. In qualità di associazione leader a livello mondiale, rappresenta i professionisti che operano nel campo della protezione antincendio e dell'ingegneria della sicurezza antincendio. I simposi SFPE sono strutturati per riunire e formare ingegneri su temi e sfide emergenti che la professione antincendio deve affrontare. Nel 2025 a Lisbona si sono affrontate le sfide europee in materia di sicurezza antincendio delle batterie agli ioni di litio e costituisce uno dei riferimenti più aggiornati sul tema.

Il Livello di prestazione IV è prescritto per configurazioni ad alto rischio, quali le autorimesse automatizzate o i piani ubicati a quote critiche (inferiori a -10 m o superiori a 24 m). In tali circostanze, è obbligatoria l'installazione di un sistema automatico di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio, tipicamente realizzato mediante impianti sprinkler (SPK) o tecnologie equivalenti ad acqua.

La funzione primaria di tali impianti è duplice: rilevare ed estinguere il principio d'incendio nello stadio iniziale, oppure — funzione spesso prevalente in scenari complessi — contenerne la potenza termica (controllo), permettendo alle squadre di soccorso di completare l'estinzione in sicurezza.

Nel contesto della progettazione contemporanea, tale strategia deve necessariamente integrare la valutazione del rischio specifico introdotto dai Veicoli Elettrici (EV). Le batterie agli ioni di litio sono soggette a dinamiche di incendio governate dal *thermal runaway*, fenomeno che richiede un'azione di raffreddamento massiva e prolungata, spesso superiore alle capacità di spegnimento immediato dei sistemi standard. Di conseguenza, la priorità tattica dei sistemi di protezione attiva nelle autorimesse diviene il contrasto alla propagazione laterale ("effetto domino"), al fine di impedire il coinvolgimento a catena dei veicoli in sosta adiacenti.

Sulla base dei dati presentati in questo primo capitolo, è evidente che i veicoli dotati di batterie di accumulo ad alta capacità debbano essere oggetto di attenta analisi nella valutazione del rischio incendio. Sebbene qualsiasi incendio in autorimessa rappresenti una criticità — complice il progressivo aumento delle dimensioni dei veicoli e la crescente massa di materiali plastici combustibili — l'evento che coinvolge una batteria può evolvere con cinetiche estremamente rapide, pur in assenza, ad oggi, di dati statistici consolidati sulla frequenza di accadimento.

A tal proposito, Così e Di Bari [45] evidenziano come la sostituzione dei materiali metallici con polimeri plastici nei veicoli moderni favorisca la propagazione dell'incendio ai veicoli limitrofi. Gli autori riportano che, per vetture parcheggiate a distanze comprese tra 40 e 80 cm, la propagazione causata principalmente dall'irraggiamento avviene in un intervallo temporale tra i 5 e i 28 minuti, ovvero quando il flusso termico radiante raggiunge valori compresi tra 11 e 18,5 kW/m<sup>2</sup>.

Anche secondo gli studi presentati da Węgrzyński al *SFPE Engineering Solutions Symposium* di Lisbona, le modalità di propagazione del fuoco sono analoghe per veicoli

EV e ICEV. Tuttavia, l'autore sottolinea il ruolo cruciale della geometria dell'autorimessa: poiché l'irraggiamento verso il pavimento (e quindi verso gli altri veicoli) dipende in gran parte dall'estensione delle fiamme sotto il soffitto (*ceiling jet*), una maggiore altezza dei locali riduce la radiazione verso il pavimento, limitando notevolmente la propagazione. Węgrzyński conclude esprimendo preoccupazione per le autorimesse con altezza ridotta (inferiore a 2,70 m), identificandola come un fattore di rischio significativo. In tale contesto, l'adozione di sistemi automatici di controllo o estinzione ad acqua (sprinkler o water mist) risulta determinante per prevenire la propagazione e ridurre i danni.

Infine, la presenza di infrastrutture di ricarica introduce variabili aggiuntive che richiedono una pianificazione specifica del layout. È raccomandabile posizionare le stazioni di ricarica in prossimità dei punti di estrazione dell'aria e lontano dalle vie di esodo, per minimizzare l'esposizione degli occupanti ai fumi tossici. Sebbene l'installazione di sistemi di rivelazione, ventilazione e contenimento sia essenziale, l'analisi progettuale deve considerare i tempi tecnici di attivazione di tali impianti per garantirne l'efficacia prima che l'incendio raggiunga dimensioni critiche.

## Capitolo 2

# GUIDA ALL'APPROCCIO PRESTAZIONALE COME RISPOSTA AI NUOVI RISCHI E PRESCRIZIONI

### 2.1 Inquadramento e contesto normativo

La rapida evoluzione del parco veicolare circolante, caratterizzata da una crescente penetrazione della mobilità elettrica, rende necessaria una revisione della normativa tecnica di settore, con specifico riferimento alla RTV V.6 del Codice di Prevenzione Incendi. I veicoli elettrici (BEV e PHEV) introducono variabili inedite nell'analisi del rischio incendio che le prescrizioni attuali faticano a mitigare efficacemente. Una regolamentazione che non si adatti dinamicamente all'innovazione tecnologica rischia di creare un divario tra la conformità formale e la sicurezza sostanziale.

Le ipotesi di revisione della RTV V.6 suggeriscono l'introduzione di vincoli stringenti per il parcheggio di veicoli elettrici. Tale approccio prescrittivo, sebbene orientato alla sicurezza, appare poco sostenibile sotto il profilo del layout e dell'ottimizzazione degli spazi, specialmente nelle autorimesse esistenti. Inoltre, la segregazione dei veicoli in base alla motorizzazione rischia di rivelarsi una strategia miope di fronte alla progressiva elettrificazione dell'intero parco circolante, rendendo le "soluzioni conformi" tecnicamente o economicamente inattuabili.

In questo scenario, l'approccio prestazionale (Fire Safety Engineering) si configura come lo strumento dirimente. Questo capitolo illustra un protocollo operativo per l'utilizzo avanzato della modellazione numerica (CFD) tramite il software FDS (Fire Dynamics Simulator). In accordo con la Sezione M del Codice di Prevenzione Incendi e

basandosi su standard internazionali (ISO 23932:2009, Quaderni tecnici INAIL, manualistica specialistica), si definirà un percorso analitico atto a dimostrare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza, offrendo una risposta progettuale flessibile e scientificamente validata.

## 2.2 La progettazione antincendio prestazionale

Presente in vari documenti con diversi sinonimi: metodo ingegneristico, *Fire Safety Engineering*, ingegneria della sicurezza antincendio o approccio *Performance Based*, la progettazione antincendio prestazionale viene definita dalla ISO/TR13387 come “L’applicazione di principi ingegneristici, di regole e di giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell’incendio e del comportamento umano, finalizzati alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell’ambiente, alla quantificazione dei rischi d’incendio e dei relativi effetti nonché alla valutazione analitica delle misure di protezione ottimali, necessarie a limitare, entro livelli prestabiliti, le conseguenze dell’incendio”, consentendo quindi di quantificare e valutare l’effetto di ogni misura alternativa attraverso l’uso di modelli, misurando i risultati rispetto ai valori minimi ritenuti accettabili per le prestazioni richieste.

La sezione M – Metodi del Codice Prevenzione Incendi riporta metodologie di progettazione antincendio innovative ed alternative a quelle riportate nelle prime tre sezioni, volte alla risoluzione di specifiche problematiche tecniche della progettazione antincendio. La metodologia si delinea in due fasi: una fase preliminare necessaria a definire i rischi e i relativi obiettivi e soglie di sicurezza e una seconda fase quantitativa in cui si calcolano gli effetti dell’incendio e si confrontano i risultati con gli obiettivi prefissati nella fase uno.

Le fasi standard che il progettista dovrebbe seguire, adattandole caso per caso, possono essere riassunte nel diagramma di flusso (Figura 2.1) e analizzate nei paragrafi seguenti, evidenziando le problematiche più comuni e presentando le soluzioni ritenute più corrette per le autorimesse.

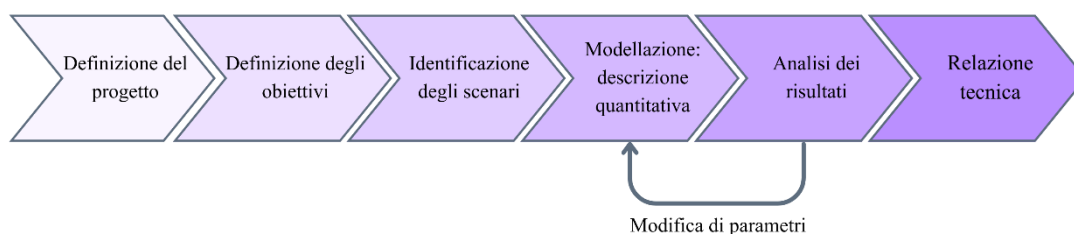


Figura 2.1: Diagramma di flusso delle fasi per la progettazione antincendio prestazionale

## 2.3 Definizione del progetto

La fase preliminare della progettazione prestazionale impone la definizione univoca dello scopo dell'analisi, identificando il profilo di rischio e le specifiche della destinazione d'uso. Nel caso dell'autorimessa – definita dalla normativa come "*area coperta, con servizi e pertinenze, destinata alla sosta e alla manovra di veicoli*" è necessario caratterizzare la superficie complessiva (al netto delle pertinenze compartimentate) e il contesto urbanistico (opera isolata o inserita in volumi misti civili/ commerciali).

Questa fase di inquadramento non è meramente descrittiva, ma costituisce il fondamento della strategia antincendio. Ogni autorimessa rappresenta un sistema unico: le peculiarità geometriche e le condizioni al contorno possono invalidare strategie di sicurezza rivelatesi efficaci in altri contesti. Un piano di emergenza teoricamente valido può fallire se applicato a un modello che non rispecchia la realtà fisica. Pertanto, la modellazione in FDS non deve limitarsi a replicare volumi vuoti, ma deve includere tutte le criticità sito-specifiche che influenzano la fluidodinamica e l'esodo.

Sotto il profilo probabilistico, l'autorimessa è generalmente classificata come ambiente in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva è un evento improbabile o di breve durata, grazie alle volumetrie e ai requisiti di aerazione che garantiscono un sufficiente fattore di diluizione. Di conseguenza, nella definizione degli scenari di incendio, l'analisi si concentra prevalentemente sulla propagazione dell'incendio e dei fumi, piuttosto che sul rischio di esplosione generalizzata.

### 2.3.1 Caratteristiche architettoniche

Le autorimesse si sviluppano frequentemente su più livelli, spesso interrati, e possono presentare estensioni planimetriche e geometrie estremamente variabili. La prima fase dell'analisi deve concentrarsi sulla descrizione dettagliata delle caratteristiche architettoniche e strutturali, definendo prioritariamente l'eventuale compartimentazione per garantire una corretta trasposizione nel modello computazionale (dominio di calcolo).

È necessaria una caratterizzazione puntuale dei materiali strutturali (sovente costituiti da materiali incombustibili come il calcestruzzo) e degli elementi non strutturali di finitura. Fondamentale è l'individuazione e il dimensionamento di tutte le aperture che

mettono in comunicazione l'ambiente con l'esterno o con altri compartimenti: uscite di sicurezza, rampe carrabili e aperture di ventilazione.

Nel definire la geometria in FDS, è cruciale verificare l'altezza netta, prestando particolare attenzione alla presenza di elementi strutturali come le travi ribassate. Tali elementi, infatti, comportano variazioni del livello del soffitto che possono creare "sacche" di ristagno dei fumi o ostacolare lo scorrimento del *ceiling jet*. Infine, è necessario mappare i posti auto, distinguendoli per tipologia (autovetture, motocicli) e localizzando con precisione le infrastrutture di ricarica per i veicoli elettrici, che rappresentano i punti di innesco preferenziali per gli scenari specifici di questa trattazione.

### 2.3.2 Caratteristiche impiantistiche

La ventilazione e i sistemi attivi sono le variabili che governano l'evoluzione dello scenario d'incendio in FDS. È necessario censire le aperture di smaltimento e i sistemi meccanici, classificandoli secondo le tipologie del Codice:

- SEa: superfici permanentemente aperte<sup>9</sup>;
- SEb: superfici dotate di sistema automatico con attivazione asservita da IRAI;
- SEc: superfici provviste di elementi di chiusura ad apertura comandata da posizione protetta e segnalata;
- SEd: superfici provviste di elementi di chiusura non permanenti apribili anche da posizione non protetta;
- SEe: superfici provviste di elementi di chiusura permanente per cui sia possibile l'apertura nelle effettive condizioni di incendio o la possibilità di immediata demolizione da parte delle squadre di soccorso.

Per una corretta simulazione prestazionale, vanno infine definiti i parametri di attivazione e le curve di performance dei sistemi attivi:

- Sistemi di rilevazione automatica (fumo/calore);
- Sistemi di ventilazione forzata;
- Impianti di spegnimento automatico (es. *Sprinkler*, *Water mist*).

---

<sup>9</sup> Sebbene teoricamente ammessa, l'assenza di aperture SEa è sconsigliata nelle autorimesse per garantire lo smaltimento ordinario dei gas di scarico delle auto a combustione interna

### 2.3.3 Aspetti gestionali

La Gestione della Sicurezza Antincendio (GSA) non deve essere intesa come un mero adempimento burocratico, bensì come una misura compensativa e preventiva fondamentale, specialmente qualora si adotti l'approccio prestazionale (FSE). In conformità con la Sezione S.5 del Codice di Prevenzione Incendi, la GSA definisce l'insieme delle misure organizzative atte a garantire nel tempo il livello di sicurezza previsto dal progetto, operando sinergicamente sia in fase di esercizio che in emergenza. Ai fini della modellazione numerica, la caratterizzazione della GSA assume un ruolo determinante, influenzando direttamente gli input della timeline dell'esodo (RSET).

Nello specifico contesto dell'autorimessa, è necessario implementare un protocollo operativo che integri prevenzione e protezione, adattandosi dinamicamente all'evoluzione del parco veicolare. In via prioritaria, occorre imporre rigorosi divieti concernenti l'uso di fiamme libere, il fumo e lo stoccaggio improprio di materiali combustibili; parallelamente, è imperativo mantenere elevati standard di ordine e pulizia (*housekeeping*). Tali azioni sono indispensabili per non alterare il carico d'incendio di progetto e minimizzare le probabilità di innesco. Particolare attenzione deve essere riservata alla gestione dei lavori di manutenzione straordinaria: tali attività, introducendo rischi specifici, necessitano di una valutazione preliminare e di procedure di autorizzazione dedicate.

Sul fronte della protezione attiva e passiva, risulta essenziale garantire l'integrità della compartimentazione, verificando costantemente la corretta chiusura dei serramenti tagliafuoco e la non occlusione delle aperture di aerazione. Analogamente, deve essere pianificata la manutenzione periodica di tutti i presidi antincendio, quali estintori, reti idranti e impianti di rilevazione.

Relativamente alla gestione dei veicoli elettrici (BEV) e ibridi *plug-in* (PHEV), si ritiene strategicamente inefficace la segregazione in aree dedicate. Considerata la diffusione delle nuove motorizzazioni, è necessario progettare la sicurezza accettando la promiscuità di stazionamento. Tale scenario impone l'adozione di agenti estinguenti idonei ai rischi delle batterie agli ioni di litio e una rigorosa gestione delle infrastrutture di ricarica, le quali devono essere conformi alle normative vigenti e posizionate in modo da non ostacolare i percorsi d'esodo. Assume inoltre un ruolo critico la definizione planimetrica degli stalli: una demarcazione chiara garantisce il rispetto delle distanze di

sicurezza, limitando la velocità di propagazione dell'incendio per irraggiamento verso i veicoli adiacenti. Infine, è auspicabile l'implementazione di sistemi di controllo accessi per monitorare i flussi e prevenire ingressi non autorizzati.

A completamento delle misure gestionali, per garantire la consapevolezza dell'utenza, è opportuno affiggere in punti strategici, quali gli ingressi pedonali e carrabili, un'adeguata cartellonistica riportante i divieti, le istruzioni di sicurezza e le procedure di emergenza.

#### 2.3.4 Caratteristiche degli occupanti

Qualora l'obiettivo primario della progettazione sia la salvaguardia della vita umana, è indispensabile una profilazione dettagliata della popolazione presente. Tale analisi richiede la definizione dell'affollamento complessivo e della sua distribuzione spaziale, includendo una quota parte di occupanti con disabilità motorie, sensoriali o cognitive, le quali comportano inevitabilmente tempi di evacuazione (RSET) maggiori.

Una variabile cruciale è rappresentata dalla *familiarità* con l'ambiente: mentre in ambiti residenziali o pertinenze private (es. autorimesse condominiali) è ipotizzabile una conoscenza consolidata dei percorsi, in contesti pubblici complessi tale familiarità è spesso assente, con un impatto diretto sui tempi di pre-movimento e decisionali.

Ai fini della modellazione dell'esodo, la popolazione è segmentata in due macrocategorie: occupanti normodotati (o abili) e occupanti affetti da disabilità. La categoria degli occupanti senza disabilità comprende soggetti le cui prestazioni variano in funzione di età, vincoli sociali e dati antropometrici:

- **Utenti Standard (Adulti):** Soggetti con capacità motorie nella media statistica, in grado di percepire l'allarme e muoversi autonomamente;
- **Anziani:** Categoria caratterizzata da una fisiologica riduzione della velocità di marcia e da tempi di reazione (*pre-movement time*) generalmente più elevati;
- **Bambini:** Soggetti con ingombri ridotti e velocità inferiori rispetto all'adulto. In ambito FSE, il loro comportamento è fortemente influenzato dal *group behavior*, tendendo all'evacuazione assistita o di gruppo;
- **Utenti con impedimenti al moto** (es. bagagli, passeggeri): Presentano velocità ridotte e un ingombro effettivo maggiorato che può ridurre la capacità di deflusso delle vie di esodo;

- **Soccorritori (Vigili del Fuoco):** Operatori con equipaggiamento specifico. Il loro moto può avvenire in direzione opposta al flusso di esodo (*counter-flow*), con velocità variabili in base alle operazioni di soccorso.

Per gli occupanti con disabilità, si adotta una classificazione basata sull'impatto funzionale:

- **Disabilità motorie:** Soggetti con ridotta capacità di deambulazione o non deambulanti (utenti su sedia a rotelle). Si caratterizzano per velocità ridotte, ingombri maggiori e frequente necessità di assistenza;
- **Disabilità sensoriali:** Soggetti le cui limitazioni impattano sulla fase di *Detection* e *Alarm* e sull'orientamento (*wayfinding*).

Nel caso specifico delle autorimesse, in accordo con la Tabella S.4-13 del Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 18/10/2019), si può assumere un affollamento di progetto pari a 2 persone per veicolo parcheggiato. La distribuzione degli occupanti può essere assunta uniforme lungo le corsie di transito, modellando le autovetture come ostacoli fisici che limitano la larghezza effettiva delle vie di fuga.

La Tabella 2: Modellazione degli occupanti Tabella 2 sintetizza i parametri adottati per le simulazioni. Per la definizione quantitativa degli stessi si è fatto riferimento alle statistiche nazionali fornite da ISTAT, dalle quali risulta una popolazione italiana pari a 58.943.464 individui, di cui 14.579.867 con età superiore a 65 anni e 5.864.840 compresi tra 3 e 14 anni.

L'adozione della distribuzione demografica nazionale include quote significative di popolazione caratterizzate da velocità medie di movimento inferiori; pertanto, tale scelta può essere considerata cautelativa ai fini della simulazione. È comunque opportuno affiancare a questa impostazione una valutazione specifica della reale tipologia di utenza del parcheggio: l'ipotesi risulta generalmente appropriata e prudentiale per parcheggi a servizio di centri commerciali, mentre potrebbe non essere altrettanto rappresentativa — e quindi richiedere ulteriori verifiche — nel caso di strutture sanitarie o residenze assistenziali, dove la presenza di utenti con ridotta mobilità può essere più elevata.

Per la determinazione delle velocità di marcia (*walking speed*) e delle dimensioni antropometriche si è fatto riferimento alla norma ISO/TR 16738:2009.

<b>Tipologia Occupante</b>	<b>Percentuale</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Dimensioni e Geometria</b>
Standard	55%	1.19	Cilindro (d=50 cm, h=180 cm)
Anziani (> 65 anni)	25%	0.81	Standard
Bambini (3-14 anni)	12%	0.80	Standard (h=100 cm)
Utenti con impedimenti	5%	0.57	Rettangolo (70x110 cm, h=180 cm)
Disabile motorio	2%	0.89	Rettangolo (70x120 cm)
Disabile sensoriale	1%	0.80	Standard (+50s tempo reazione)
Soccorritori	-	1.50	Standard

Tabella 2: Modellazione degli occupanti

## 2.4 Definizione degli obiettivi

Nell'ambito della progettazione prestazionale, la definizione degli obiettivi di sicurezza costituisce il criterio di giudizio attraverso il quale validare o rigettare lo scenario progettuale. A differenza dell'approccio prescrittivo, in cui l'obiettivo è implicito nel rispetto della regola, qui è necessario esplicitare *cosa* si intende proteggere e *fino a che punto*.

Gli obiettivi principali nell'applicazione del metodo prestazionale possono essere due:

1. la salvaguardia della vita umana, con la dimostrazione diretta ed esplicita della possibilità per tutti gli occupanti di raggiungere o permanere in un luogo sicuro senza un'eccessiva esposizione agli effetti dell'incendio. Questo obiettivo deve essere raggiunto nella fase *pre-flashover* e dipende essenzialmente dal movimento di fumi e calore nell'edificio ed è legato, in prima approssimazione, all'RHR ed alla qualità del focolare. A questo primario obiettivo si lega anche la dimostrazione della possibilità per i soccorritori di operare in sicurezza.
2. la sicurezza strutturale, determinando la resistenza al fuoco degli elementi strutturali e di compartimentazione, consentendo di prevedere la temperatura a cui saranno esposti. Questo obiettivo si valuta principalmente nella fase *post-flashover*.

A seconda dell'obiettivo si definiscono le soglie di prestazione, ovvero si quantificano gli obiettivi. Questo permetterà di discriminare in modo oggettivo le soluzioni che soddisfano gli obiettivi antincendio da quelle che non raggiungono le prestazioni richieste.

Per la valutazione strutturale il fattore critico è la temperatura. Definito il livello di prestazione l'analisi permetterà la conoscenza della curva naturale, cioè l'andamento delle temperature nel tempo, per permettere poi l'analisi strutturale in base alla tipologia e materiale dell'elemento.

### 2.4.1 Modelli e relative soglie di prestazione

Per la salvaguardia della vita degli occupanti e dei soccorritori è possibile riferirsi alla tabella M.3-2 del Codice Prevenzione Incendi che indica i valori riportati in Tabella 3.

Modello	Soglie di prestazione occupanti	Soglie di prestazione soccorritori
Oscuramento della visibilità da fumo*	10 m	5 m
Gas tossici e irritanti (FED e FEC)*	0.1	-
Calore (temperatura di esposizione)	60 °C	80 °C
Calore (irraggiamento)	2,5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>

\* misurati a 1,80 m dal piano di calpestio

Tabella 3: soglie di prestazione

Il concetto di FED consente di valutare l'effetto combinato di diversi gas tossici presenti nell'ambiente. Il calcolo viene eseguito effettuando una somma ponderata delle dosi di esposizione ai gas tossici, tenendo conto della concentrazione e del tempo di esposizione di ciascun gas specifico.

$$FED = \sum_{i=1}^n \sum_{t_1}^{t_2} \left( \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} \right) \cdot \Delta t$$

Ovvero, in formulazione continua nel tempo,

$$FED = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} dt$$

dove:

$C_i$  è la concentrazione dell'*i*-esimo gas in un determinato intervallo di tempo espressa in ppm (parti per milione)

$(C \cdot t)_i$  è un parametro che rappresenta la dose di esposizione critica dell'*i*-esimo gas, ovvero la combinazione concentrazione – tempo ritenuta tossica.

I valori FED sono di tipo probabilistico e indicano il potenziale rischio di incapacità, ovvero la non autonomia nell'esodo, di una determinata popolazione. Con un valore 3 di

FED si stima che 89% della popolazione diventi incapace; con un valore unitario la probabilità è del 50% della popolazione. Un valore di riferimento che tenga in considerazione anche la popolazione più sensibile, come bambini, anziani e disabili, è di 0,3.

Essendo l'obiettivo primario la salvaguardia della vita umana e quindi quello di garantire a tutte le persone presenti di avere la possibilità di sopravvivere, il codice di prevenzione incendi consiglia l'adozione di un valore di FED pari a 0,1. Un valore oggettivamente basso, che permette di ridurre la popolazione potenzialmente incapacitata minima (circa l'1%) riflettendo l'importanza di un approccio equo e inclusivo alla sicurezza, specchio di una concezione moderna ed etica della sicurezza. Solo progettando i sistemi di sicurezza considerando le categorie più fragili è possibile garantire che nessuno venga escluso dalla possibilità di raggiungere un luogo sicuro, salvaguardando il diritto universale di sicurezza. È lasciato al progettista l'onere di selezionare e giustificare un valore più adatto a seconda della tipologia di popolazione coinvolta.

L'applicazione corretta del modello della *Fractional Effective Dose* (FED), essenziale per valutare la sopravvivenza in scenari di incendio, richiede una conoscenza dettagliata, o quantomeno una stima accurata, delle concentrazioni spazio-temporali delle singole specie tossiche presenti nell'ambiente. A tal fine, l'impiego di software di fluidodinamica computazionale (CFD) come il *Fire Dynamics Simulator* (FDS) consente di modellare la dispersione dei prodotti della combustione e la loro evoluzione in funzione della geometria e delle condizioni di ventilazione. Tuttavia, l'affidabilità di tali simulazioni nella determinazione della tossicità è soggetta all'incertezza dei dati di input forniti.

L'effetto dei gas irritanti può essere stimato con la FEC, *Fractional Effective Concentration*, che rappresenta la somma delle concentrazioni dei gas irritanti. La FEC è definita come il rapporto tra la concentrazione di un gas irritante presente e la concentrazione incapacitante di quel gas. L'approccio è quindi il medesimo della FED assumendo l'ipotesi di additività, ovvero ogni gas amplifica il rischio in maniera lineare senza considerare interazione tra essi.

Solitamente, la modellazione dei gas irritanti non viene implementata in assenza di sorgenti significative nel materiale combustibile. Tuttavia, gli incendi di accumulatori agli ioni di litio rappresentano un caso particolare, dovendo tenere conto dell'emissione

di HF e HCl. Tali gas, estranei ai processi di combustione standard, richiedono quindi una parametrizzazione mirata.

Per il modello del calore, assumendo conservativamente le soglie di prestazione proposte dal Codice Prevenzione Incendi nel capitolo M.3.5 (irraggiamento  $< 2,5 \text{ kW/m}^2$ , temperatura ambientale sugli occupanti  $< 60^\circ\text{C}$ ), l'esposizione termica risultante non è sufficientemente elevata da superare la soglia di rischio garantendo agli occupanti un tempo sicuro per evacuare.

Uno dei modelli spesso critico è quello dell'oscuramento della visibilità da fumo, basato sul concetto di minimo contrasto percettibile. Il fumo, oscurando il passaggio della luce, può ostacolare la visibilità della segnaletica di sicurezza, rendendo difficoltosa l'evacuazione.

Il parametro più utilizzato per la stima della visibilità è il coefficiente di estinzione  $C_s$ , Extinction Coefficient, che rappresenta la misura dell'attenuazione luminosa per unità di lunghezza

$$C_s = \sigma \cdot \rho_{smoke}$$

quindi

$$L = \frac{C}{\sigma \cdot \rho_{smoke}}$$

dove

L è la visibilità espressa in metri

C è un fattore di visibilità adimensionale tipicamente pari a 3 per la segnaletica di esodo riflettente e 8 per la segnaletica retroilluminata

$C_s$  è il coefficiente di estinzione luminoso prodotta di  $\sigma$ , il coefficiente massico di estinzione della luce ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) tipicamente  $8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ , e  $\rho_{smoke}$ , la massa volumica dei fumi ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

Viene quindi calcolata la visibilità localmente, ovvero, immediatamente vicino all'osservatore; questo però lascia una lacuna in quanto, se l'osservatore si trova in un punto di aria limpida ma è presente del fumo denso lungo la linea di vista, questo viene ignorato calcolando una visibilità elevata, anche se il fumo potrebbe precludere di vedere i segnali di emergenza. Questa discrepanza evidenzia una limitazione osservabile in situazioni di fumo non uniformemente distribuito.

Nella valutazione della sicurezza in caso di incendio, è fondamentale non considerare i valori limite proposti dalle normative come parametri di inabilitazione assoluti. Al contrario, la letteratura scientifica ha ampiamente dimostrato come la tolleranza umana sia una funzione dinamica, strettamente correlata al tempo di esposizione, oltre che alle condizioni ambientali e fisiologiche del soggetto.

Per quanto concerne la risposta termica dell'organismo, la letteratura identifica generalmente il limite estremo di sopravvivenza in una temperatura corporea profonda (*core temperature*) di 42 °C. Tuttavia, l'inabilitazione psicofisica si manifesta tipicamente a temperature inferiori (circa 39,5 °C - 40 °C). Il superamento di tali soglie induce uno stato di ipertermia che può degenerare nel colpo di calore (*heatstroke*), una condizione critica caratterizzata dal collasso dei meccanismi di termoregolazione. Un riferimento metodologico di rilievo in questo ambito è rappresentato dagli studi di Blockley [49] (Figura 2.2), il quale ha approfondito la correlazione tra indici di stress termico e tempi di tolleranza, fornendo criteri essenziali per l'analisi in ambienti termicamente degradati.

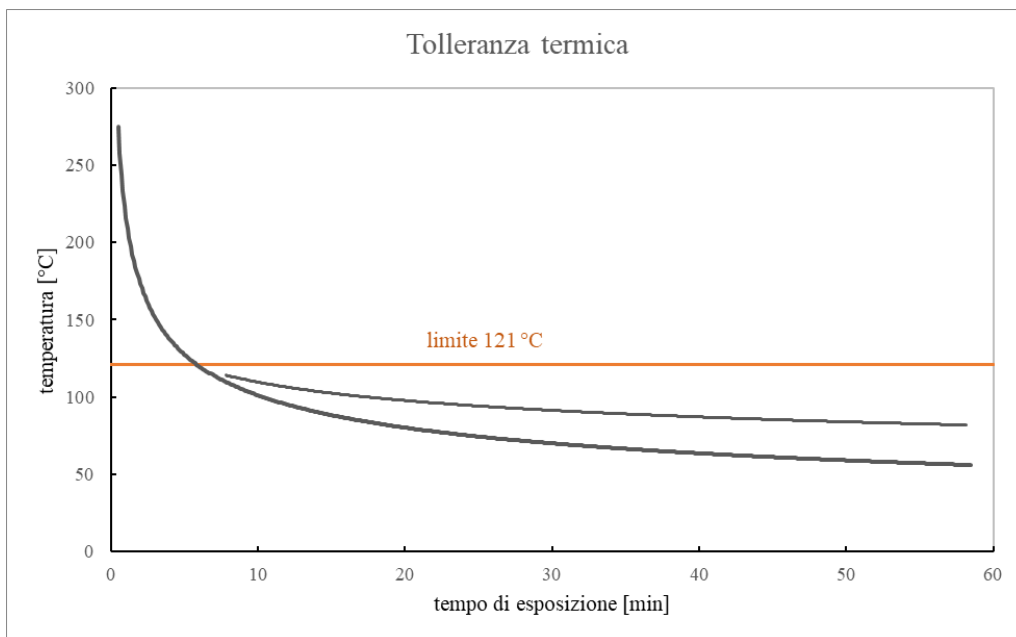


Figura 2.2: Tolleranza termica per uomini a riposo, pelle nuda e basso movimento dell'aria [49]

Come illustrato in Figura 2.2, il grafico si divide in due macro-aree separate da un'isoterma critica, posta a circa 121 °C. Al di sopra di tale valore, in aria secca, il fattore limitante è rappresentato dalle ustioni a carico delle vie respiratorie dovute all'inalazione di aria calda. Al di sotto di questa soglia, l'ipertermia diviene il parametro critico e il tempo di esposizione assume un ruolo determinante. A titolo esemplificativo, ad una temperatura ambientale di 60 °C, il tempo massimo di esposizione tollerabile è stimato in circa 30 minuti. Tale evidenza dimostra che una temperatura di 60 °C non costituisce né una condizione di sicurezza operativa permanente, né un limite invalicabile in senso assoluto, bensì un punto di equilibrio critico in cui è la durata della permanenza a definire la transizione verso il danno biologico.

Oltre alla temperatura dell'aria, occorre valutare gli effetti del flusso termico. Il calore convettivo viene trasferito attraverso il moto dei fluidi (aria e fumi) e dipende fortemente dalle dinamiche fluido-termiche dell'ambiente. Al contrario, il calore radiante si propaga direttamente sotto forma di radiazione elettromagnetica, venendo assorbito istantaneamente dalla pelle e dai tessuti esposti. Analogamente a quanto avviene per la temperatura dell'aria, anche per i flussi termici i valori di soglia variano in funzione del tempo. Secondo la norma ISO 13571:2012, la tolleranza al calore radiante per individui con pelle esposta è rappresentata da curve decrescenti (Figura 2.3), che presentano un andamento asintotico verso il limite di sopportazione del dolore prolungato, fissato a 2,5 kW/m<sup>2</sup>.

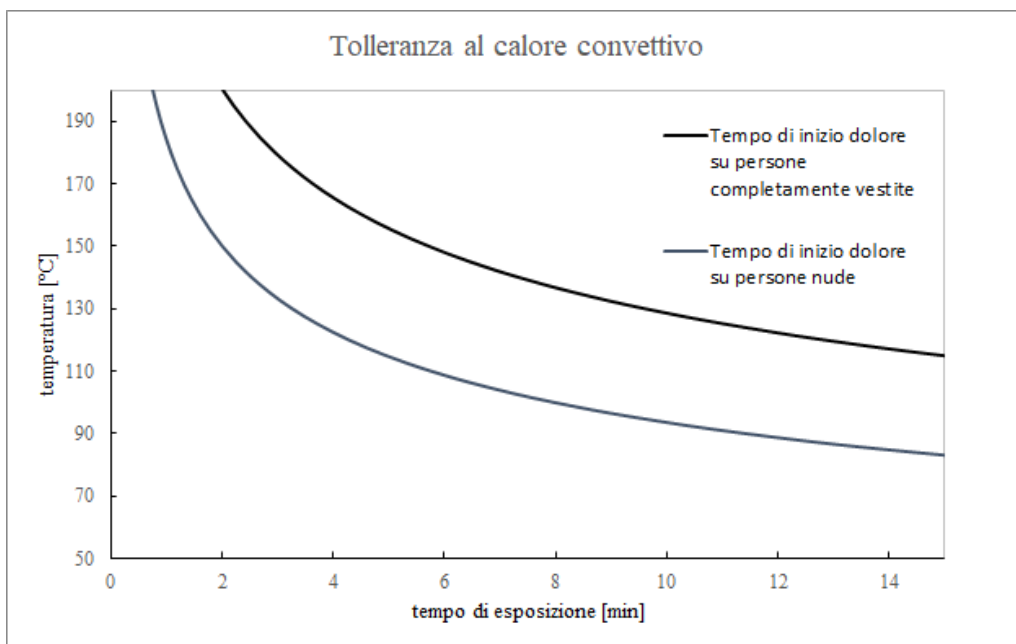


Figura 2.3: Tolleranza al calore convettivo per individui con pelle esposta e completamente vestite

Un modello per tenere conto dell'impatto cumulativo di diverse fonti di calore (radiante e convettivo) è quello  $X_{FED}$

$$X_{FED} = \sum_{t1}^{t2} \left( \frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \Delta t$$

Dove  $t_{Irad}$  e  $t_{Iconv}$  sono i tempi di incapacitazione per calore radiante e calore convettivo. L'equazione combina i contributi di radiazione e convezione. Il raggiungimento di un valore unitario configura la soglia critica.

Questo stesso principio di cumulabilità nel tempo viene applicato anche alla tossicità dei fumi. Il modello FED integrato in software di simulazione fluidodinamica come FDS (*Fire Dynamics Simulator*) permette di valutare i rischi per gli occupanti basandosi sui modelli proposti da Purser [1] e recepiti dalla ISO 13571:2012. In tale modello, si utilizza il fattore moltiplicativo  $V_{CO_2}$  per simulare l'effetto iperventilatorio indotto dalla presenza di anidride carbonica, che accelera l'assorbimento degli altri gas asfissianti. La formulazione tiene conto anche degli effetti debilitanti dei gas irritanti, permettendo così un'analisi prestazionale completa e realistica del rischio di tossicità negli scenari di incendio.

Per reperire le formulazioni usate si può fare riferimento al manuale di FDS [50] che riporta le seguenti formulazioni:

$$FED_{tot} = (FED_{CO} + FED_{CN} + FED_{NOx} + FLD_{irr}) \times HV_{CO_2} + FED_{O_2}$$

$$FIC_{irr} = \left[ \frac{C_{HCl}(t)}{F_{FIC,HCl}} \right] + \left[ \frac{C_{HBr}(t)}{F_{FIC,HBr}} \right] + \left[ \frac{C_{HF}(t)}{F_{FIC,HF}} \right] + \left[ \frac{C_{SO_2}(t)}{F_{FIC,SO_2}} \right] + \left[ \frac{C_{NO_2}(t)}{F_{FIC,NO_2}} \right] + \left[ \frac{C_{C_3H_4O}(t)}{F_{FIC,C_3H_4O}} \right] + \left[ \frac{C_{CH_2O}(t)}{F_{FIC,CH_2O}} \right]$$

L'analisi di tali equazioni evidenzia l'assoluta necessità di definire un'accurata cinetica chimica e una corretta composizione dei reagenti. Affinché i modelli di tossicità restituiscano stime affidabili, è infatti fondamentale che la simulazione tracci correttamente la produzione di tutte le specie chimiche nocive. A tal proposito, occorre evidenziare un limite delle reazioni di combustione predefinite nel software: esse non contemplano la generazione di acido fluoridrico (HF). Poiché il rilascio di HF è una criticità peculiare e altamente pericolosa negli incendi di batterie agli ioni di litio, risulta indispensabile definire all'interno del modello una reazione chimica personalizzata che ne simuli esplicitamente la formazione.

## 2.5 Identificazione degli scenari

Uno scenario di incendio di progetto (*Design Fire Scenario*) rappresenta una descrizione qualitativa completa dell'evoluzione dell'evento accidentale, definita univocamente attraverso un set di ipotesi ricavate dall'analisi preliminare. Tali ipotesi fissano le condizioni al contorno: posizione del focolare, caratteristiche della sorgente, stato dei sistemi di protezione attiva e passiva, e condizioni di ventilazione.

Il numero di scenari teoricamente possibili in un'autorimessa è infinito. Tuttavia, data l'elevata onerosità computazionale delle simulazioni CFD (che possono richiedere giorni di calcolo per singola *run*), l'approccio ingegneristico impone una selezione ragionata. Il progettista è chiamato a identificare un numero limitato di scenari rappresentativi, applicando il principio del *worst-case scenario* (scenario peggiore credibile) in relazione agli obiettivi di sicurezza prefissati. La selezione avviene concentrandosi sugli eventi incidentali prevedibili<sup>10</sup> che si possano sviluppare durante la vita utile dell'attività.

Gli scenari di incendio di progetto dovrebbero identificarsi nella combustione di un'autovettura. Sono quindi da identificare le posizioni dell'incendio che possono ragionevolmente essere i seguenti:

- in aree che bloccano un'uscita di emergenza;
- lontano da aperture;
- al centro, per massimizzare la propagazione.

Se sono presenti geometrie complesse le posizioni vanno valutate con maggiore attenzione.

---

<sup>10</sup> Secondo la prassi consolidata della Fire Safety Engineering, sono considerati prevedibili tutti gli eventi accidentali che possono ragionevolmente verificarsi durante il normale esercizio (es. corto circuito, guasto meccanico). Sono generalmente esclusi, salvo specifica analisi del rischio (es. obiettivi sensibili), gli scenari derivanti da sabotaggio, atti terroristici o catastrofi naturali che compromettano l'integrità strutturale a priori

## 2.6 Descrizione quantitativa

### 2.6.1 Modellazione

La fase di *pre-processing* (o modellazione) rappresenta lo stadio più critico dell'intero processo di simulazione. In questa fase è imperativo definire con accuratezza i parametri di *input*, fondamentali affinché il solutore possa elaborare correttamente le equazioni governanti i fenomeni fisico-chimici coinvolti, quali la cinetica della combustione, la fluidodinamica, la termodinamica e i meccanismi di scambio termico.

In tale contesto trova piena applicazione il principio informatico GIGO (*Garbage In, Garbage Out*): l'affidabilità dei risultati finali è intrinsecamente dipendente dalla validità dei dati immessi. Un errore nella definizione degli *input* compromette irrimediabilmente l'*output*, rendendo la simulazione priva di valore ingegneristico. Pertanto, è richiesta non solo una conoscenza approfondita del software di calcolo, ma anche una rigorosa verifica preliminare delle unità di misura e delle condizioni ambientali e al contorno oggetto di studio.

La scelta del software da utilizzare è fondamentale. I modelli di calcolo disponibili sono i modelli a zone o di campo. I primi applicano un approccio semplificato, considerando la stratificazione in due strati: zona superiore dove sono presenti i prodotti della combustione e zona inferiore libera dal fumo. I modelli di campo o fluidodinamici, molto più complessi in termini matematici e computazionali, permettono di risolvere le equazioni di Navier-Stokes per ogni cella, consentendo di analizzare la turbolenza locale, l'interazione tra getti d'aria e fumi, e la distribuzione puntuale delle temperature. Per parcheggi di grandi dimensioni, in particolare se presente un sistema di ventilazione forzata o spegnimento automatico, è più indicato utilizzare un modello fluidodinamico.

Al modello fluidodinamico per comprendere l'evoluzione dell'incendio, per la salvaguardia della vita umana è necessario affiancare un modello per la simulazione dell'esodo; si consiglia un modello comportamentale, caratterizzando correttamente gli occupanti. È opportuno scegliere un software in grado di integrare i dati dei risultati del modello dell'incendio. Un esempio di software ampiamente utilizzati nel settore sono *PyroSim* e *Pathfinder* di Thunderhead Engineering®.

La geometria è generalmente importata da modelli 3d di altri software ma potrebbe essere necessario apportare delle modifiche semplificative prima dell'esportazione, limitandosi alla sola geometria architettonica e strutturale e, se l'autorimessa è all'interno di un edificio molto ampio, è opportuno importare solo la parte utilizzata nel software antincendio.

Un fattore critico nella costruzione del modello risiede nella definizione della dimensione della maglia. I valori tipici variano tra i 3 cm e i 30 cm; sebbene una maglia più fitta possa fornire risultati più accurati, il tempo di elaborazione aumenta in modo significativo, basti pensare che un cubo di lato 30 cm contiene 1000 cubi da 3 cm. Un calcolo che permette di validare la dimensione della mesh, fornito dal manuale FDS passa attraverso la definizione del diametro caratteristico del fuoco

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

in cui:

$Q$  : Potenza termica del focolaio

$\rho_{\infty}$ : Densità dell'aria ambiente

$c_p$ : Calore specifico dell'aria

$T_{\infty}$ : Temperatura ambiente

$g$  : Accelerazione di gravità

assumendo:

$$Q = 7000 \text{ kW}$$

$$\rho_{\infty} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_{\infty} = 293 \text{ K}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Si ottiene

$$D^* = \left( \frac{7000}{1,2 \cdot 1 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,8}} \right)^{\frac{2}{5}} = 2,09 \text{ m}$$

Secondo la guida di validazione (NUREG-1824), una risoluzione adeguata per la simulazione ingegneristica si ottiene quando il rapporto  $D^*/dx$  è compreso tra 4 e 16; per una qualità media, corrispondente a  $D^*/dx$  di 10 otteniamo una dimensione nominale della cella di 0,20 m.

$$dx = \frac{D^*}{10} = \frac{2,09 \text{ m}}{10} = 0,21 \text{ m}$$

A seconda delle dimensioni dell'autorimessa si dimensiona la griglia (ottenibile anche al seguente link <https://fdstutorial.com/fds-mesh-size-calculator/>). Le maglie possono essere variabili, più sottili nella zona dell'incendio e più larghe con l'aumentare della distanza, ma le diverse maglie devono essere multipli l'una dell'altra. Oltre al dimensionamento teorico è buona norma ingegneristica verificare l'indipendenza dei risultati dalla griglia di calcolo, effettuando test comparativi con maglie a diversa risoluzione per accertare che l'infittimento della mesh non produca variazioni significative delle grandezze monitorate (temperature e visibilità), confermando così la convergenza della soluzione numerica.

Una volta stabilita l'estensione geometrica della mesh, è necessario definire il trattamento dei confini del dominio di calcolo. Tipicamente, per le interfacce comunicanti con l'ambiente esterno, si adotta una condizione di contorno di tipo "Aperto". Questa scelta modellistica è cruciale in quanto autorizza i flussi di massa attraverso il confine, garantendo l'espulsione dei fluidi caldi generati dall'incendio e il fisiologico afflusso di aria comburente dall'esterno. Per quanto concerne i flussi d'aria, il modello opera in regime di ventilazione naturale qualora non siano previsti impianti di controllo fumi; viceversa, l'inclusione di un sistema di ventilazione forzata impone una modellazione fluidodinamica esplicita e accurata dello stesso.

### 2.6.2 Focolare

La definizione della sorgente d'incendio rappresenta l'*input* più gravoso e determinante per l'esito della simulazione. Come anticipato nel paragrafo 1.4.3, la curva di incendio che meglio e cautelativamente rappresenta un incendio di un'automobile, anche nel caso in cui essa sia elettrica e la batteria sia bruciata nelle fasi iniziali, è quella proposta da SUVEREN.

Questa curva di incendio di progetto illustra la relazione tra velocità di rilascio di calore (RHR) e il tempo. Il valore massimo della velocità di rilascio del calore (pRHR) è pari a 7 MW e viene raggiunto in 420 secondi.

Le equazioni che descrivono matematicamente la curva sono [51]<sup>11</sup>:

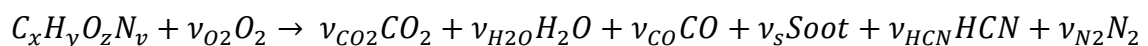
$$RHR(t) \begin{cases} 892,857 \text{ kW} \cdot \left(\frac{t}{150 \text{ s}}\right)^2 & , \text{ per } 0 \text{ s} \leq t \leq 420 \text{ s} \\ 7000 \text{ kW} & , \text{ per } 420 \text{ s} < t \leq 720 \text{ s} \\ -3,535 \frac{\text{kW}}{\text{s}} \cdot t + 9545,454 \text{ kW} & , \text{ per } 720 \text{ s} < t \leq 2700 \text{ s} \end{cases}$$



Figura 2.4: Curva RHR SUVEREN

La definizione della reazione, insieme alla curva RHR, costituisce l'*input* più importante nelle simulazioni numeriche di un incendio. Essa deve essere rappresentativa dei materiali del veicolo e della batteria per prevedere con precisione le condizioni termiche e di tossicità.

Il modello di combustione spesso utilizzato denominato “chimica semplice” (*Simple Chemistry*) è calibrata su idrocarburi convenzionali composti esclusivamente da C, H, O e N che reagendo formano H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Fuliggine e CO in cui è sufficiente la scelta della chimica di base e la definizione delle rese post-combustione di CO e fuliggine.

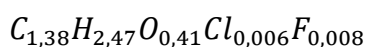


<sup>11</sup> Si segnala un refuso nell'unità di misura all'interno del documento originale: i valori, erroneamente indicati in MW, sono stati qui riportati in kW per garantire la coerenza dimensionale/fisica.

Questo modello risulta intrinsecamente inadatta per modellare scenari d'incendio di veicoli elettrici, a causa dell'assenza degli elementi alogeni (Fluoro e Cloro) caratteristici dei pacchi.

Nel caso in esame è stata quindi necessaria la definizione manuale dei reagenti e dei prodotti per tracciare correttamente la formazione di gas acidi tossici (HCl e HF) e degli inquinanti da combustione incompleta (CO e Fuliggine).

Facendo riferimento al lavoro di Girardin, Drean & El Houssami [52], è stato possibile risalire a una formulazione chimica attraverso l'analisi incrociata dei dati tossicologici sui prodotti di combustione, dei tassi di produzione e della resa di consumo di ossigeno



Con le seguenti resa degli affluenti

CO	Fuliggine	HF	HCl
0,04550 g/g <sub>comb</sub>	0,01090 g/g <sub>comb</sub>	0,00630 g/g <sub>comb</sub>	0,00845 g/g <sub>comb</sub>

Tabella 4: Valori di definizione del focolare

Tali risultati si rivelano pienamente coerenti con quanto evidenziato in altri studi presenti in letteratura, in particolare nelle referenze [31] e [33].

Il bruciatore, rappresentante un'automobile, può essere modellato come parallelepipedo di dimensioni 4,0 x 2,0 x 1 m sollevata di 40 cm da terra. Le sei superfici portano a 28 m<sup>2</sup>.

### 2.6.3 Definizione della reazione di combustione

La simulazione della combustione in Fire Dynamics Simulator (FDS) e la sua implementazione tramite l'interfaccia PyroSim richiedono una definizione accurata della chimica di reazione, specialmente in presenza di elementi alogeni che esulano dalla cinetica semplificata standard (limitata agli elementi C, H, O, N).

È importante sottolineare che questo approccio richiederebbe, formalmente, un'indagine sperimentale dedicata per ogni specifico gas o prodotto della combustione che si intende rilevare nel modello, al fine di estrapolarne i corretti valori di resa. Tale

aspetto risulta estremamente impattante ai fini della modellazione, in quanto non esiste attualmente un vero e proprio database consolidato da cui attingere queste informazioni per i veicoli elettrici. A questa lacuna si aggiunge la forte eterogeneità degli accumulatori: le batterie e i loro singoli componenti non sono standardizzati, ma presentano formulazioni chimiche che variano e si evolvono rapidamente in funzione del continuo avanzamento tecnologico del settore. L'introduzione continua di nuove miscele elettrolitiche e l'imminente arrivo delle batterie allo stato solido (*solid-state batteries*) rendono infatti i pochi dati sperimentali oggi disponibili potenzialmente obsoleti nel breve periodo. Affinché l'approccio prestazionale della FSE possa esprimere appieno il suo potenziale nella progettazione di autorimesse per veicoli di nuova generazione, sarà imperativo che gli enti normatori e gli istituti di ricerca promuovano campagne sperimentali su larga scala, finalizzate alla creazione di archivi *open-source* contenenti le rese di reazione standardizzate per le diverse famiglie di accumulatori agli ioni di litio.

Il materiale combustibile è stato definito attraverso la sua formula bruta empirica, normalizzata a 1 mole di combustibile come indicato nel paragrafo 2.6.2:

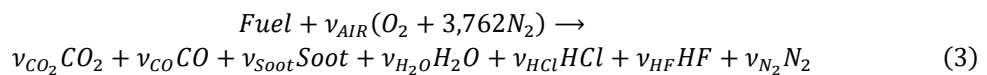


Sulla base dei pesi atomici standard, è stato calcolato il peso molecolare medio del combustibile ( $MW_{FUEL}$ ):

$$MW_{FUEL} = 1,38(12,011) + 2,47(1,008) + 0,41(15,999) + 0,006(35,453) + 0,008(18,998) \\ = 25,989g/mol \quad (2)$$

La reazione di combustione è stata modellata considerando l'aria come comburente (miscela di  $O_2$  e  $N_2$ ) e una serie di prodotti che includono le specie maggioritarie ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ), i prodotti di combustione incompleta ( $CO$ , Soot) e i gas acidi derivanti dagli alogeni ( $HCl$ ,  $HF$ ).

L'equazione generale di reazione adottata è la seguente:



I coefficienti stechiometrici ( $\nu$ ) per i prodotti minori sono stati derivati a partire dalle rese di produzione ( $Y$ , yield) note sperimentalmente, secondo la relazione:

$$\nu_i = \frac{Y_i \cdot MW_{FUEL}}{MW_i} \quad (4)$$

Utilizzando i valori di resa per il monossido di carbonio ( $Y_{CO} = 0.04550$  g/g) e per la fuliggine ( $Y_{SOOT} = 0.01090$  g/g), e assumendo una conversione stechiometrica completa per Cloro e Fluoro nei rispettivi acidi, si ottengono i seguenti valori molari:

*monossido di carbonio*

$$v_{CO} = \frac{Y_{CO} \cdot MW_{FUEL}}{MW_{CO}} = \frac{0,04550 \cdot 25,989}{(12,011+15,999)} = 0,042 \text{ moli}$$

*Fuliggine (soot)*

$$v_{soot} = \frac{Y_{SOOT} \cdot MW_{FUEL}}{MW_{SOOT}} = \frac{0,01090 \cdot 25,989}{12,011} = 0,024 \text{ moli}$$

*Acido Fluoridrico*

$$v_{HF} = \frac{Y_{HF} \cdot MW_{FUEL}}{MW_{HF}} = \frac{0,00630 \cdot 25,989}{(1,008+18,998)} = 0,008 \text{ moli}$$

*Acido Cloridrico*

$$v_{HCl} = \frac{Y_{Cl} \cdot MW_{FUEL}}{MW_{Cl}} = \frac{0,00845 \cdot 25,989}{(1,008+35,453)} = 0,006 \text{ moli}$$

Per chiusura del bilancio di massa atomico, si determinano i restanti coefficienti per i prodotti di ossidazione completa e per l'aria necessaria:

$$v_{CO_2} = 1,314 \text{ moli}$$

$$v_{H_2O} = 1,228 \text{ moli}$$

$$v_{AIR} = 1,744 \text{ moli}$$

$$v_{N_2} = 6,560928 \text{ moli}$$

I parametri di input (*Species*) inseriti nel modello sono riportati in Tabella 5, i cui nomi inglesi riportati nella seconda colonna corrispondono all'identificativo testuale richiesto dall'interfaccia software FDS.

---

**Formula del Combustibile (*Reagenti EV*)**

C1.38H2.47O0.41C10.006F0.008

---

**Aria (*Air*)<sup>12</sup>, composizione in volume:**

Azoto	<i>Nitrogen</i>	6,560928
Ossigeno	<i>Oxygen</i>	1,744

---

**Prodotti (*Prodotti EV*), composizione in volume:**

Anidride carbonica	<i>Carbon Dioxide</i>	1,314
Monossido di carbonio	<i>Carbon Monoxide</i>	0,042
Acido cloridrico	<i>Hydrogen Chloride</i>	0,006
Acido fluoridrico	<i>Hydrogen Fluoride</i>	0,008
Azoto	<i>Nitrogen</i>	6,560928
Fuliggine	<i>Soot</i>	0,024
Vapore acqueo	<i>Water Vapor</i>	1,228

---

Tabella 5: Parametri di input focolare

Nel modello di reazione, è stato impostato il bilancio chimico affinché la specie definita come Reagente (Fuel) reagisca con la specie di fondo (Air) per formare la specie aggregata dei Prodotti (Products), secondo i rapporti molari precedentemente calcolati. Si imposta quindi nella scheda *Reactions* una reazione di tipo complessa (*Complex Stoichiometry*) i valori unitari a *AIR* e *Reagente EV* come *Reactant* e *Prodotti EV* come *Product*. In questa scheda si è definita anche l'energia rilasciata per unità di massa di combustibile consumato (*Heat of Combustion*) pari a 30,25 MJ/kg.

La sorgente dell'incendio è stata modellata definendo una specifica condizione al contorno di tipo superficie (*Surface Boundary Condition*), applicata alla geometria rappresentativa del focolaio.

---

<sup>12</sup> L'aria è stata definita come specie di fondo (*background species*), permettendo al solutore di calcolarne la frazione di massa per differenza rispetto agli altri composti e di utilizzarla per l'inizializzazione dell'intero dominio computazionale.

Dal punto di vista numerico, la superficie è stata configurata come un "bruciatore" (*Burner Surface*), imponendo un tasso di rilascio termico per unità di area (RHRPUA, *Heat Release Rate Per Unit Area*) pari a  $7000\text{kW} / 28\text{ m}^2 = 250\text{ kW/m}^2$ . Per simulare l'andamento dell'incendio, alla superficie è stata associata una funzione di rampa temporale (*Ramp Function*) che ripercorre quella proposta da SUVEREN; i valori sono inseriti come frazione ovvero il valore 1 è associato al massimo, l'RHRPUA. I valori inseriti sono riportati in Tabella 6.

Tabella 6: Valori per la definizione della funzione curva di crescita

Time(s)	Fraction
0.0	0.0
10.0	0.000566
20.0	0.002267574
30.0	0.005102041
40.0	0.009070295
50.0	0.014172336
60.0	0.020408163
70.0	0.027777778
80.0	0.036281179
90.0	0.045918367
100.0	0.056689342
110.0	0.068594104
120.0	0.081632653
130.0	0.095804988
140.0	0.111111111
150.0	0.12755102
160.0	0.145124716
170.0	0.163832199
180.0	0.183673469
190.0	0.204648525
200.0	0.226757369
210.0	0.249999999
220.0	0.274376416
230.0	0.29988662
240.0	0.326530611
250.0	0.354308389
260.0	0.383219953
270.0	0.413265305
280.0	0.444444443
290.0	0.476757368
300.0	0.51020408
310.0	0.544784579
320.0	0.580498864
330.0	0.617346937
340.0	0.655328796
350.0	0.694444442
360.0	0.734693875
370.0	0.776077095
380.0	0.818594102
390.0	0.862244895
400.0	0.907029476
410.0	0.952947843
420.0	0.999999997

720.0	1.0
750.0	0.984848436
1000.0	0.858585793
2000.0	0.353535221
2700.0	0.0

Tabella 6: Valori per la definizione della funzione curva di crescita

#### 2.6.4 Propagazione

La definizione dello scenario di incendio non può prescindere dalla valutazione del rischio di propagazione ai veicoli adiacenti. Se l'obiettivo dell'analisi è limitato alla salvaguardia della vita umana durante le prime fasi dell'esodo, potrebbe essere accettabile limitare la simulazione all'incendio di un singolo veicolo, assumendo che l'evacuazione (generalmente della durata di 5-10 minuti) si completi prima che l'incendio coinvolga altre vetture. Tuttavia, per analisi di resistenza strutturale o per scenari di esodo complesso, la propagazione è un fattore determinante che incrementa drasticamente l'RHR complessivo e la produzione di fumi.

Mentre per i veicoli a combustione interna (ICE) è disponibile in letteratura una consolidata base statistica relativa alle frequenze e alle dinamiche di propagazione degli incendi, l'attuale stato dell'arte presenta una significativa carenza di modelli stocastici applicabili ai veicoli elettrici a batteria (BEV). L'innescò di un veicolo bersaglio, a seguito dell'esposizione all'irraggiamento termico generato da uno o più veicoli in fiamme, è un fenomeno termofluidodinamico complesso. La propagazione può avere origine in molteplici punti di vulnerabilità, quali l'abitacolo, il vano motore, i paraurti o gli pneumatici. Inoltre, le geometrie del contorno (pareti e intradosso del solaio) e le specifiche condizioni di ventilazione influenzano in modo sostanziale le dinamiche di scambio termico e, conseguentemente, i tempi di ignizione.

A causa di tale complessità e della ridotta casistica storica di eventi reali in spazi confinati coinvolgenti veicoli EV, risulta ad oggi inattuabile derivare curve di probabilità di propagazione dotate di sufficiente affidabilità statistica. In questo contesto, l'assunzione temporale convenzionalmente adottata dalla normativa tecnica (la quale stima la propagazione al veicolo limitrofo dopo 12 minuti dall'innescò) risulta di difficile

generalizzazione e priva di una validazione sperimentale estesa per le nuove tecnologie automotive.

Per ovviare alle incertezze intrinseche dei modelli probabilistici, si rende necessario adottare un approccio di tipo puramente deterministico e cautelativo. Tale metodologia non mira a stimare la probabilità dell'evento, bensì a valutarne le condizioni fisiche di innesco: si assume, pertanto, che la propagazione avvenga sistematicamente nel momento in cui sul veicolo bersaglio vengano superate specifiche soglie critiche di flusso termico radiante o di temperatura superficiale.

Ai fini della modellazione fluidodinamica, il *target* di rilevamento viene posizionato a una distanza di 40 cm<sup>13</sup> dal veicolo sorgente. L'innesco del veicolo bersaglio viene vincolato al raggiungimento di una soglia di flusso termico incidente pari a 11 kW/m<sup>2</sup>. Tale parametro rappresenta il flusso termico critico assunto come limite conservativo per le autovetture. Come evidenziato dalle campagne sperimentali condotte dal *Building Research Establishment* (BRE<sup>14</sup>), un flusso di 11 kW/m<sup>2</sup> risulta critico per l'ignizione degli pneumatici. Per altre componenti esposte della carrozzeria l'energia di attivazione richiesta è maggiore; ne è un esempio il policarbonato/polipropilene dei paraurti plastici, la cui soglia critica di innesco si attesta intorno ai 17,5 kW/m<sup>2</sup>. L'adozione del limite inferiore (11 kW/m<sup>2</sup>) garantisce pertanto un margine di sicurezza adeguato nella simulazione dello scenario. [53]

È tuttavia necessario sottolineare che il modello radiativo appena descritto potrebbe sottostimare in modo significativo la velocità di propagazione nel caso specifico dei veicoli BEV. Durante un evento di Thermal Runaway, in linea teorica, la sovrappressione generata all'interno dei moduli batteria può portare allo sfiato violento (*venting*) di gas caldi e altamente infiammabili. L'ignizione di tali gas in uscita dal pacco batterie genera una fiamma direzionale (*Jet Flame*) che può colpire direttamente il veicolo vicino. In questo scenario il meccanismo predominante di scambio termico transita dall'irraggiamento alla convezione forzata ad altissima temperatura in grado di bypassare le fasi di riscaldamento preliminare dei materiali, portando i tempi di innesco delle vetture

---

<sup>13</sup> Tale valore è stato ricavato considerando uno stallo standard di larghezza 2.30 - 2.50 m e una larghezza veicolo di circa 1.80 - 1.90 m, la distanza libera (*gap*) tra le fiancate risulta mediamente di 0.40 - 0.60 m.

<sup>14</sup> BRE: Building Research Establishment ex laboratorio nazionale britannico (BRS) fornisce ricerca, consulenza, formazione, test, certificazione e standard per organizzazioni del settore pubblico e privato Regno Unito e all'estero.

limitrofe molto bassi. Nonostante la fondatezza teorica di tale dinamica, è doveroso precisare che, allo stato attuale della ricerca scientifica, non sono disponibili campagne di test sperimentali su scala reale (full-scale) che dimostrino empiricamente l'effettivo innesco di un veicolo adiacente causato in via esclusiva dall'impatto di un jet flame. Le prove attualmente documentate in letteratura si concentrano prevalentemente sul livello di singola cella o modulo; pertanto, sebbene l'impatto diretto della fiamma rappresenti un'ipotesi plausibile peggiorativa, la sua modellazione a livello di veicolo intero in condizioni reali di sosta rimane, ad oggi, un'assunzione cautelativa in attesa di validazione sperimentale.

#### *2.6.5 Effetto degli scenari di protezione attiva*

Un aspetto critico nella definizione degli scenari di progetto riguarda la corretta modellazione dell'efficacia dei sistemi di protezione attiva. L'attivazione di presidi quali gli impianti sprinkler è in grado di modificare sostanzialmente la dinamica dell'incendio; tale contributo è esplicitamente riconosciuto dal Codice di Prevenzione Incendi, che consente, in linea teorica, di applicare una riduzione alla curva di rilascio termico (RHR) del focolaio fino al 50%. L'azione combinata di bagnamento e raffreddamento esercitata dall'impianto, inoltre, mitiga il rischio di propagazione per irraggiamento o contatto diretto verso i veicoli adiacenti, permettendo di escluderli dagli scenari di calcolo.

Tuttavia, l'applicazione pratica di tale riduzione nella modellazione richiederebbe il supporto di dati sperimentali validati (curve RHR di test con soppressione). Allo stato attuale, la letteratura scientifica non offre ancora una banca dati sufficientemente consolidata e rappresentativa del parco auto moderno tale da giustificare in modo deterministico l'abbattimento della potenza. Di conseguenza, in assenza di curve sperimentali specifiche e perseguendo un approccio a favore di sicurezza, si assume che l'impianto agisca esclusivamente sul controllo delle temperature dei fumi e sull'inibizione della propagazione, trascurando la riduzione della potenza termica nominale (RHR) del veicolo innescato.

### 2.6.6 Punti di acquisizione

Per confrontare i risultati della modellazione con i criteri di prestazione stabiliti (cfr. Paragrafo 2.3), è necessario raccogliere una quantità significativa di dati numerici nelle zone strategiche del dominio di calcolo. In FDS, il monitoraggio delle grandezze fisiche avviene attraverso due strumenti principali: i sensori puntuali (*Devices*) e i piani di campionamento (*Slice Files*).

I sensori virtuali (&DEVC) vengono posizionati strategicamente per verificare le condizioni di tenibilità lungo i percorsi di esodo e in prossimità delle uscite di sicurezza.

In accordo con la metodologia prestazionale (Sezione M.3 del Codice), i parametri critici devono essere monitorati all'altezza delle vie respiratorie degli occupanti. Pertanto, i dispositivi di acquisizione sono collocati a una quota di 1,80 m dal piano di calpestio.

Le grandezze fisiche registrate puntualmente in funzione del tempo includono: la visibilità, la temperatura, la tossicità (FED, FEC e Concentrazioni) e l'irraggiamento.

Oltre ai dati puntuali, è fondamentale analizzare la distribuzione spaziale dei fumi. Vengono definiti dei piani di taglio 2D (&SLCF) che permettono di visualizzare l'andamento delle grandezze (temperatura, velocità, visibilità) sull'intera pianta dell'autorimessa.

Tali piani sono posizionati tipicamente:

- A quota  $z = 1.80$  m (altezza uomo) per verificare l'estensione delle zone insostenibili;
- Lungo l'asse longitudinale delle corsie di manovra e in corrispondenza del focolare, per analizzare il profilo verticale dei fumi e l'efficacia della stratificazione o della ventilazione orizzontale.

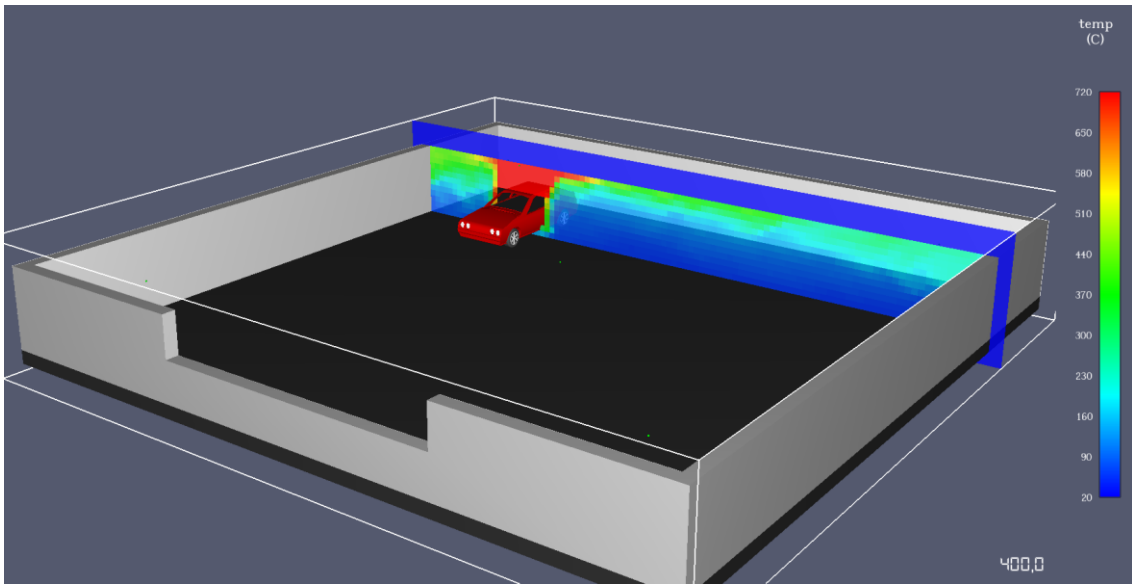


Figura 2.5: Esempio di slice della temperatura nel piano verticale

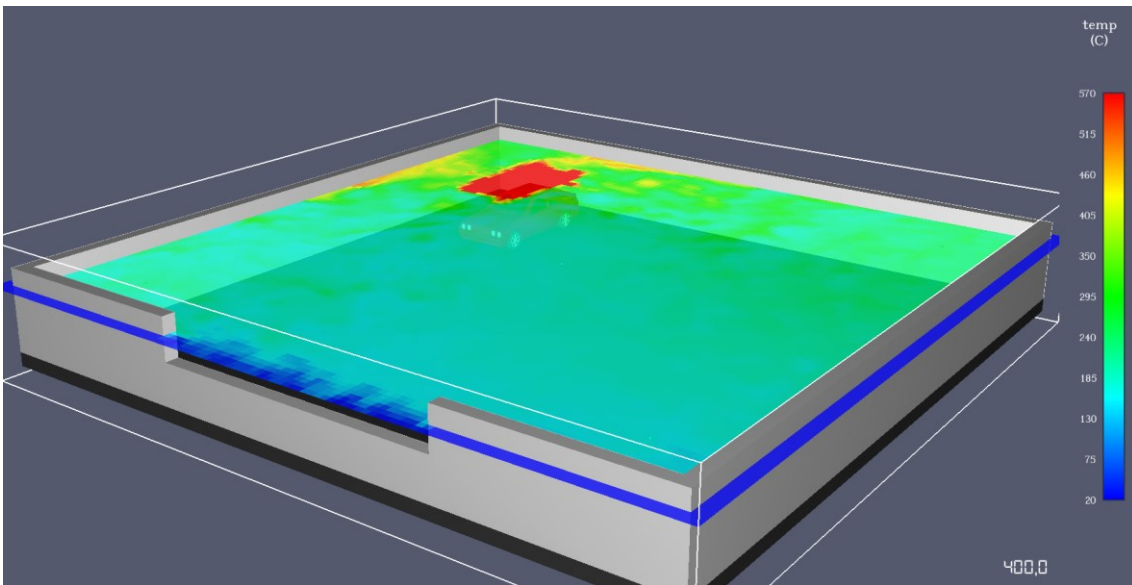


Figura 2.6: Esempio di slice della temperatura nel piano orizzontale a 1,8 m

### 2.6.7 Esodo

Per l'applicazione del metodo prestazionale per la salvaguardia della vita è necessario dimostrare in maniera diretta ed esplicita la possibilità per tutti gli occupanti di raggiungere o permanere in un luogo sicuro.

La procedura per analizzare il raggiungimento dell'obiettivo è il confronto tra il valore di ASET<sup>15</sup> ottenuto dalla simulazione dell'incendio e RSET<sup>16</sup> ottenuto dalla simulazione di esodo.

Il tempo richiesto per l'esodo è determinato da varie componenti, come il tempo di rilevazione ( $t_{det}$ ), il tempo di allarme generale ( $t_a$ ), il tempo di pre-movimento ( $t_{pre}$ ) e il tempo di movimento ( $t_{tra}$ ). È necessario sviluppare lo scenario comportamentale di progetto più appropriato, valutando il tempo di pre-movimento e la velocità d'esodo in base alla tipologia di popolazione considerata.

$$ASET > RSET + t_{marg} = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra} + t_{detmarg}$$

#### *Tempo di rilevazione*

Il tempo di rilevazione, ovvero il tempo che trascorre tra l'ignizione e il momento in cui l'incendio viene rilevato, è determinato a seconda della tipologia di sistema di rilevazione. Se presente un sistema di rilevamento automatico è possibile calcolare il  $t_{det}$  con apposita modellazione numerica.

#### *Tempo di allarme generale*

Il tempo che intercorre tra la rilevazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti  $T_a$  è pari a zero se la rilevazione attiva direttamente l'allarme generale; va valutato dal professionista se la rilevazione allerta una centrale che verifica e poi attiva l'allarme.

Un utile riferimento per quantificare l'intervallo di tempo  $t_{det} + t_a$  è fornito nel quaderno INAIL "Metodi per l'ingegneria della sicurezza antincendio" che per le autorimesse, R<sub>vita</sub> A" o B2 indica un tempo di rilevazione e allarme pari a 180 secondi.

<sup>15</sup> ASET: available safe escape time, è il tempo disponibile all'esodo per gli occupanti prima che una delle soglie di prestazione prefissate (visibilità, FED, FEC, calore) venga raggiunta

<sup>16</sup> RSET: required safe escape time, è il tempo richiesto per l'esodo, tra l'innesco dell'incendio e il momento in cui gli occupanti raggiungono un luogo sicuro. Ogni occupante possiede un proprio valore di RSET. La differenza tra ASET e RSET rappresenta il margine di sicurezza della progettazione prestazionale per la salvaguardia della vita

### Tempo di premovimento

Il tempo necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività che precedono il movimento vero e proprio verso il luogo sicuro. Questo tempo è suddividibile in due tempi: quello di riconoscimento, durante il quale gli occupanti continuano a svolgere le normali attività finché non riconoscono l'esigenza di evacuare e il tempo di risposta, in cui cessano l'attività e si dedicano all'esodo. In riferimento alla tabella E.2 del rapporto tecnico ISO/TR 16738 il  $t_{pre}$  può essere quantificato tra i 60 e i 180 secondi, se gli occupanti hanno familiarità con l'ambiente e fino a 240 se non ce l'hanno.

### Tempo di movimento

Il tempo impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro dal termine delle attività di premovimento. Per ottenere questo valore è necessaria una simulazione d'esodo basata sul comportamento (modello *agent-based*).

Il tempo ottenuto dalla somma di  $t_{det}$ ,  $t_a$ ,  $t_{pre}$  e  $t_{tra}$  deve risultare minore del tempo ASET con un certo margine di sicurezza pari al 10 % di RSET e comunque maggiore di 30 secondi.

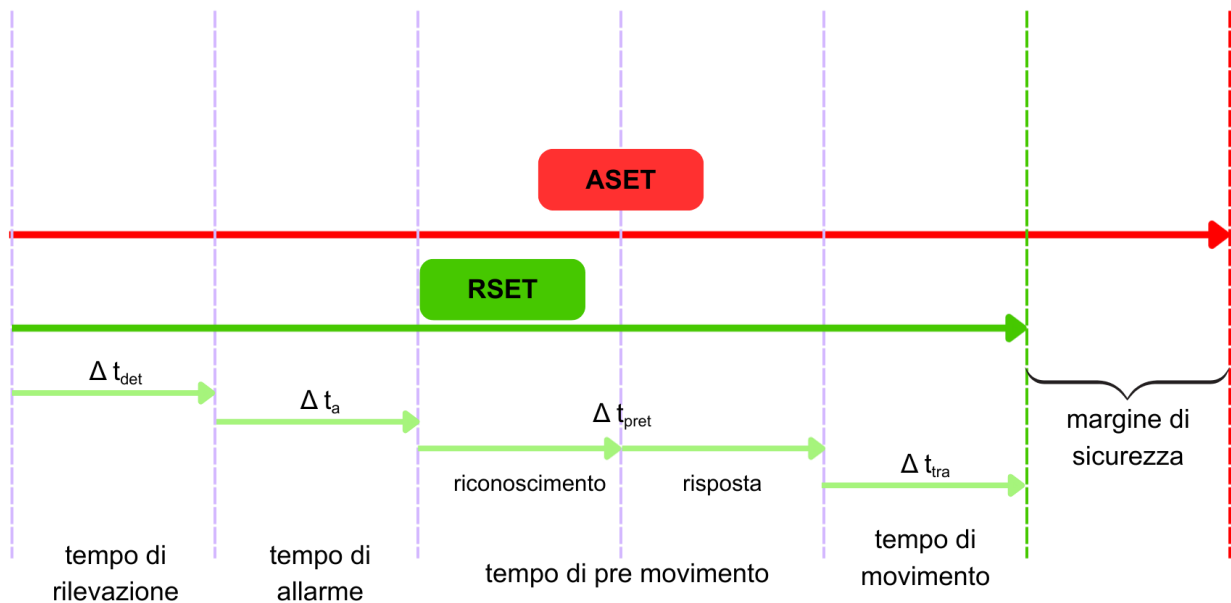


Figura 2.7: ASET e RSET

## 2.7 Analisi dei risultati

La fase di *post-processing* rappresenta il momento di sintesi dell'intero iter progettuale. Al termine della simulazione, il software restituisce una mole significativa di dati grezzi che necessitano di essere elaborati e interpretati per validare la strategia antincendio. L'analisi si svolge su due livelli paralleli: qualitativo (visuale) e quantitativo (numerico). Per una valutazione complessiva della dinamica dell'incendio, è fondamentale l'utilizzo di strumenti di visualizzazione, generando: Piani di visualizzazione (*Slice Files*), ovvero, mappe 2D colorimetriche che mostrano la distribuzione di temperatura, visibilità e velocità dell'aria in sezioni specifiche dell'autorimessa e Superfici di iso-livello (*Isosurfaces*), ovvero volumi 3D che delimitano le zone in cui una certa grandezza supera la soglia critica (es. dove la visibilità è inferiore a 10 m o la temperatura  $> 60^{\circ}\text{C}$ ). Questa analisi permette di individuare immediatamente zone di ristagno dei fumi, turbolenze impreviste o l'inefficacia locale del sistema di ventilazione.

La verifica formale del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza avviene tramite l'elaborazione dei dati numerici estratti dai sensori virtuali (*Devices*), posizionati strategicamente nel modello. I dati, esportati in formato CSV<sup>17</sup>, vengono elaborati tramite fogli di calcolo per generare grafici temporali (es. Temperatura vs Tempo). Su tali curve vengono sovrapposti i valori soglia di prestazione definiti nel paragrafo 2.3, permettendo di identificare l'istante esatto in cui le condizioni ambientali diventano insostenibili per gli occupanti.

I risultati numerici ottenuti vengono confrontati con i criteri di prestazione (soglie di accettabilità) inizialmente stabiliti. Tale verifica consente di identificare gli scenari che non soddisfano, con un adeguato margine di sicurezza, gli obiettivi di sicurezza prefissati. In caso di esito negativo, si innesca un processo iterativo di ottimizzazione: si analizzano e implementano strategie correttive, intervenendo sulle misure di protezione attiva (es. potenziamento degli impianti) o passiva (es. compartimentazione, vie di esodo). La modellazione viene quindi reiterata fino alla convergenza dei risultati verso i criteri di sicurezza richiesti.

---

<sup>17</sup> CSV (Comma-Separated Values) è un file di testo per salvare dati tabellari dove ogni riga contiene diversi valori separati da virgole (o altri delimitatori). Il modo migliore per elaborare e analizzare i dati contenuti in un file .csv è la sua importazione su un foglio di calcolo (Excel) che permette la suddivisione dei dati in colonne separate per poi generare grafici di facile lettura

Qualora, nonostante le iterazioni, non risulti tecnicamente fattibile individuare una soluzione progettuale idonea, si procede a una revisione critica dell'intero impianto analitico. In questa fase, è necessario riesaminare rigorosamente i dati di *input*, la severità degli scenari ipotizzati e i livelli di prestazione imposti, valutando se questi risultino eccessivamente conservativi o sproporzionati rispetto all'effettivo profilo di rischio dell'attività.

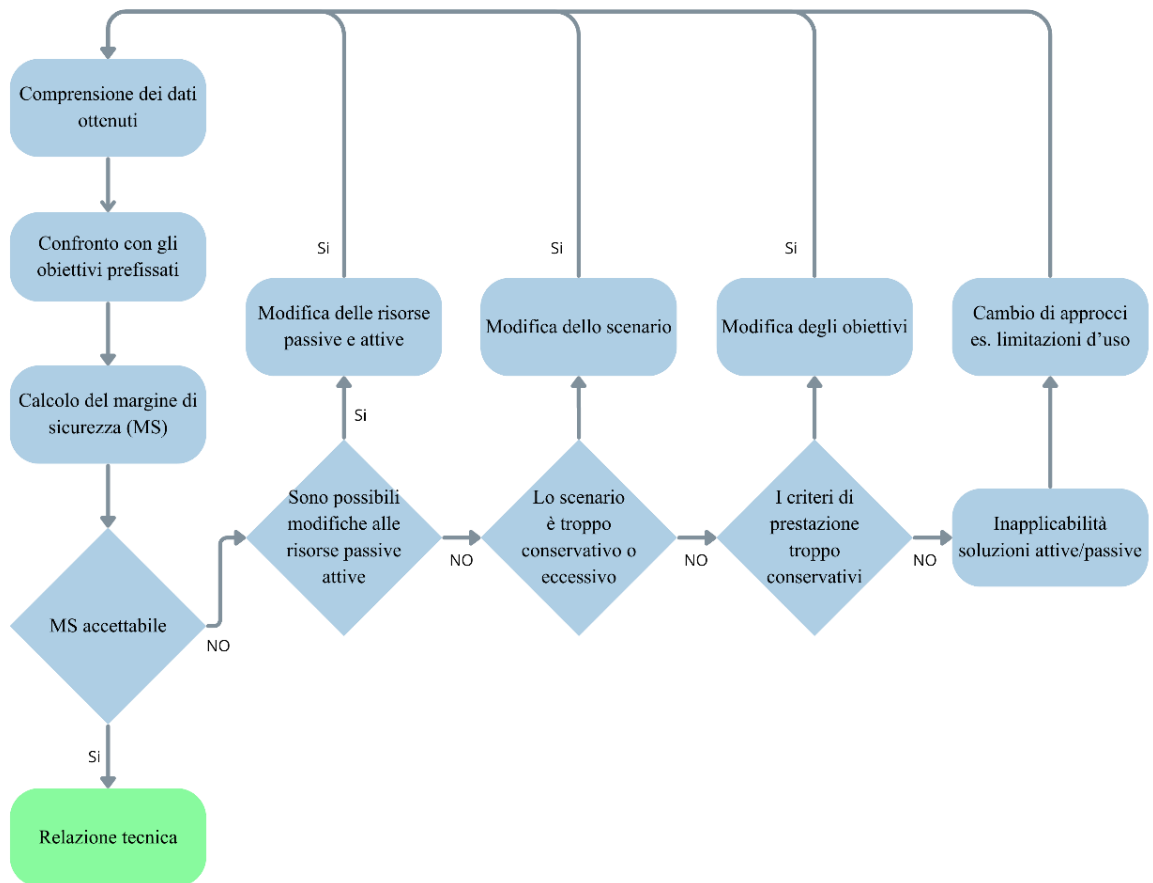


Figura 2.8: Processo decisionale per la verifica dei risultati

## 2.8 Relazione tecnica

Sebbene la consegna della relazione tecnica costituisca formalmente la fase conclusiva del processo prestazionale, la sua elaborazione deve accompagnare l'intero iter progettuale. È fondamentale, infatti, che il documento registri e descriva in maniera dettagliata e progressiva le diverse ipotesi assunte, le decisioni strategiche, i risultati intermedi e le conclusioni raggiunte, garantendo la piena tracciabilità del percorso logico-deduttivo seguito.

La relazione tecnica ha l'obiettivo primario di dimostrare la robustezza della soluzione progettuale agli organi di controllo (VVF). A tal fine, essa deve soddisfare il requisito della riproducibilità: un revisore terzo, leggendo il documento, deve essere in grado di ricostruire integralmente il modello di calcolo e ottenere i medesimi risultati, senza ambiguità interpretative.

Il documento deve esporre le soluzioni progettuali adottate per fronteggiare gli scenari di incendio identificati, presentando l'esito delle analisi quantitative attraverso un apparato iconografico chiaro ed esaustivo; tabelle riassuntive, schemi a blocchi, layout 2D e grafici temporali sono strumenti indispensabili per sostenere la validità delle scelte e dimostrare visivamente il rispetto delle soglie di prestazione ( $ASET > RSET$ ).

Un aspetto cruciale riguarda la giustificazione degli *input*: è onere del progettista riportare esplicitamente tutti i parametri fisici e geometrici posti alla base della modellazione (es. curve RHR, rese di fumo, parametri comportamentali), validandoli attraverso puntuali riferimenti alla letteratura scientifica accreditata, a norme tecniche internazionali o a dati sperimentali riconosciuti. Solo attraverso tale rigore documentale è possibile permettere la verifica formale e la validazione dell'analisi da parte degli organi di controllo.

## Capitolo 3

### FSE APPLICATA: SVILUPPO, VALIDAZIONE E

### ANALISI

Al fine di contestualizzare e validare l'impianto teorico finora descritto, il presente capitolo propone un'applicazione pratica focalizzata sugli aspetti più innovativi e complessi della procedura. Si è scelto deliberatamente di tralasciare la descrizione analitica delle fasi di simulazione ormai standardizzate e ampiamente consolidate nella pratica professionale. In particolare, non verrà dettagliato il calcolo del tempo richiesto per l'esodo (RSET) né la modellazione ordinaria del deflusso degli occupanti, trattandosi di operazioni metodologicamente codificate che non aggiungerebbero valore innovativo alla presente trattazione.

L'attenzione sarà invece posta in modo esclusivo su quei settaggi critici e peculiari — quali la definizione stechiometrica della reazione di combustione per le batterie agli ioni di litio, l'impostazione delle curve di rilascio termico (RHR) a crescita rapida e la tracciatura dei composti tossici alogeni — che costituiscono il vero elemento discriminante nell'affidabilità del modello numerico.

Questa scelta narrativa riflette la vocazione stessa dell'elaborato: l'approccio prestazionale (*Fire Safety Engineering*) qui impiegato trascende la logica convenzionale della mera verifica di un singolo progetto in deroga alle norme prescrittive, e permette di strutturare un iter metodologico rigoroso, flessibile e riproducibile. La finalità ultima è fornire ai progettisti uno strumento operativo concreto per affrontare il "nuovo rischio" legato alla transizione elettrica; una sfida tecnologica complessa di fronte alla quale gli attuali quadri normativi, ancora profondamente legati a scenari d'incendio tradizionali,

faticano a proporre modelli di valutazione e mitigazione realmente efficaci e al passo con l'innovazione.

## 3.1 Validazione della reazione

### 3.1.1 Validazione della produzione di HF

Al fine di validare l'affidabilità del modello numerico, con specifico riguardo alla capacità predittiva inerente alle emissioni di acido fluoridrico (HF), si è effettuata una ricostruzione computazionale di un caso studio sperimentale. Il setup chimico-stechiometrico implementato si basa sulle indagini condotte da FOGTEC [54] nell'ambito del progetto SUVEREN. Nello specifico, è stato preso in esame il test di incendio di un pacco batteria agli ioni di litio con celle prismatiche. L'accumulatore, dal quale erano stati rimossi due degli otto moduli originari, presentava un contenuto energetico pari a 24 kWh con uno stato di carica (SOC) del 100%. La prova si è svolta in assenza di sistemi di soppressione attivi e l'innesco è stato indotto meccanicamente tramite la perforazione di una singola cella, generando un cortocircuito interno.

La modellazione termo-fluidodinamica è stata sviluppata in ambiente PyroSim. Il dominio digitale è stato configurato integrando i parametri chimico-fisici precedentemente analizzati, con l'obiettivo di riprodurre specularmente le condizioni del test reale. Tuttavia, la trasposizione del setup sperimentale ha richiesto l'adozione di alcune ipotesi cautelative e stime ingegneristiche, rese necessarie dalla non totale completezza dei dati di input nel report originale. Nello specifico:

- Geometria e Setup: le dimensioni del dominio computazionale (calorimetro) e l'allestimento fisico sono stati dedotti attraverso l'analisi proporzionale della documentazione fotografica e dei disegni tecnici disponibili;
- Condizioni di ventilazione: in assenza di profili anemometrici di dettaglio, il flusso d'aria è stato modellato imponendo un regime di ventilazione costante, coerentemente con la portata del sistema di estrazione controllata impiegato nel test, pari a 1,5 m<sup>3</sup>/s;
- Campionamento dei gas: le sonde di misurazione virtuali sono state collocate ricercando la massima corrispondenza spaziale con la reale disposizione degli analizzatori FTIR e dei sensori multigas.

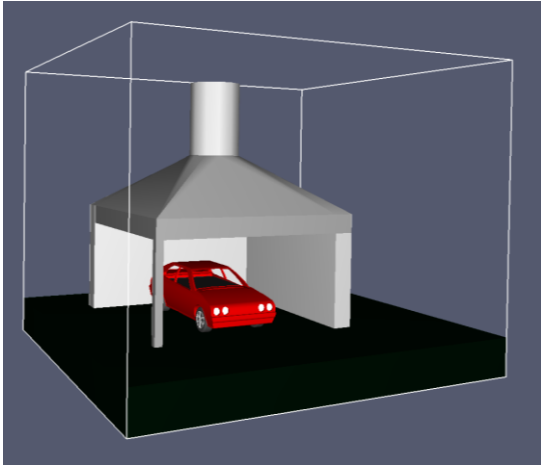


Figura 3.1: Simulazione in FDS, geometria generale realistica

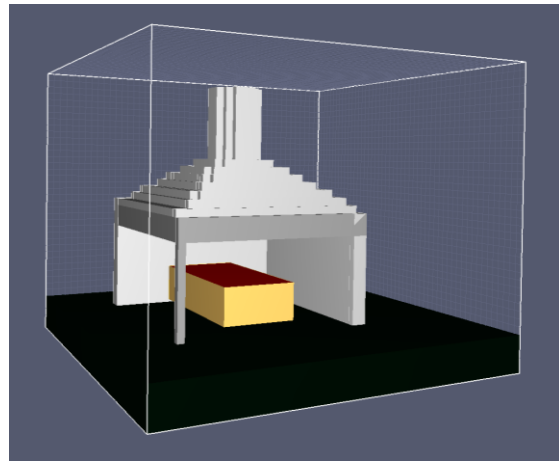


Figura 3.2: Simulazione FDS, geometria discretizzata

Per valutare il rischio chimico-tossicologico associato all'incendio di un intero veicolo elettrico (EV), si adotta un approccio modellistico ibrido. Data la scarsità in letteratura di dati esaustivi e dettagliati sulle emissioni prodotte da autoveicoli completi, la verifica della sorgente chimica si è basata sui risultati del suddetto test in scala reale. Tale scelta metodologica è volta a isolare e caratterizzare rigorosamente il rilascio di HF, criticità preponderante negli incendi di EV, la cui genesi è riconducibile quasi esclusivamente alla degradazione termica dell'elettrolita e dei leganti fluorurati presenti nelle celle.

L'analisi si è focalizzata sul confronto dell'andamento temporale della concentrazione di HF prodotta (Figura 3.7).

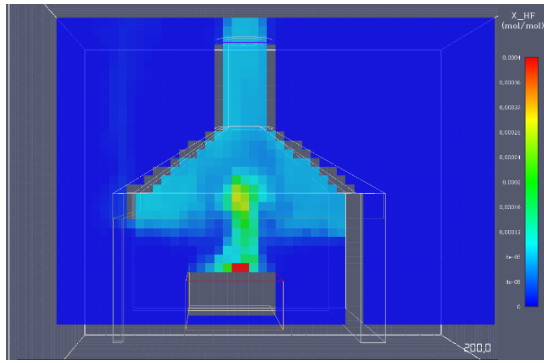


Figura 3.3: Slice della produzione di HF a 200

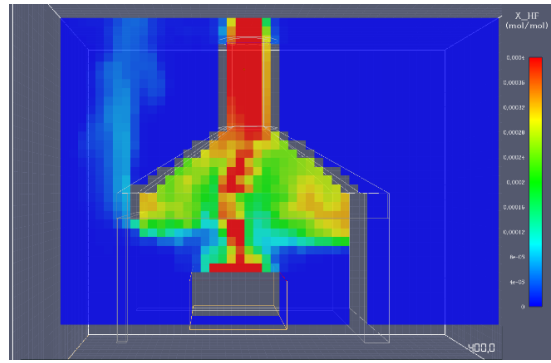


Figura 3.4: Slice della produzione di HF a 400 s

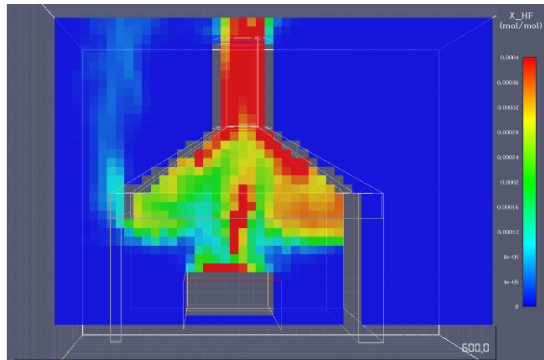


Figura 3.5: Slice della produzione di HF a 600

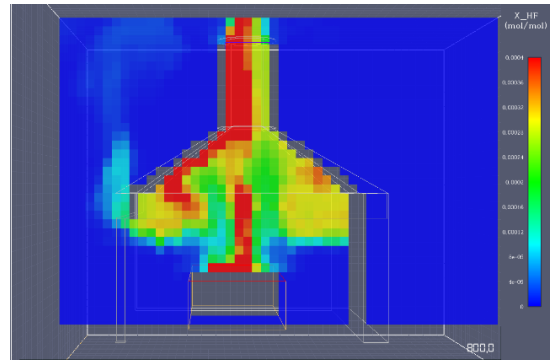


Figura 3.6: Slice della produzione di HF a 800

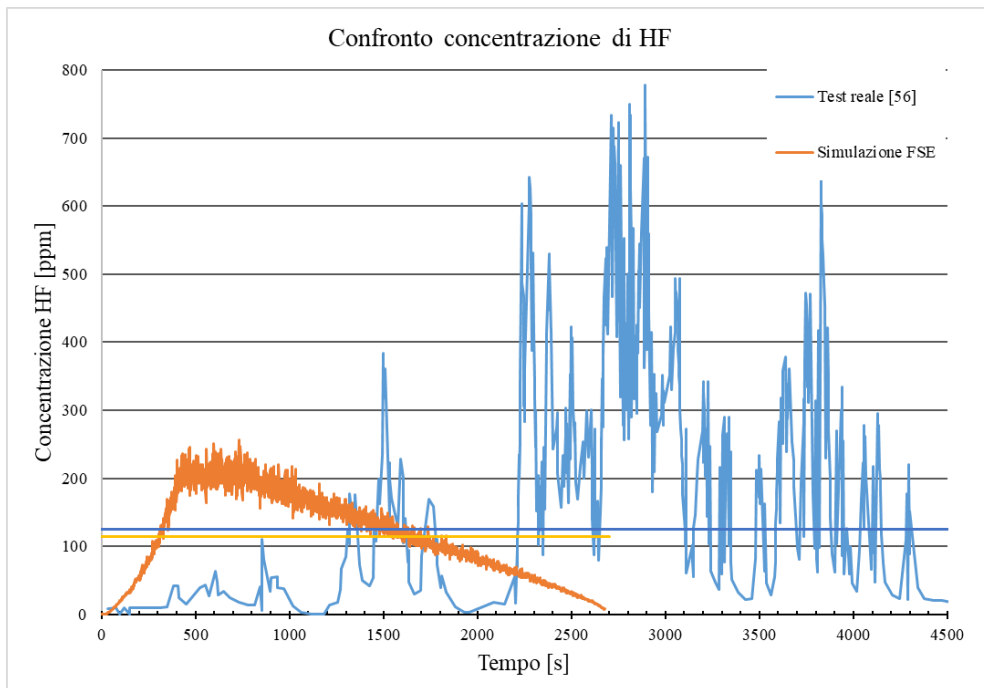


Figura 3.7: Confronto fra la concentrazione di HF prodotta nel test reale e nella simulazione

A fronte di una concentrazione media rilevata sperimentalmente pari a 128 ppm all'interno del volume di controllo ventilato, la simulazione numerica restituisce un valore medio di 114 ppm, dimostrando un'ottima coerenza complessiva.

Tuttavia, emergono differenze significative nell'evoluzione temporale del fenomeno. Nel test sperimentale la curva di emissione si sviluppa su un arco temporale dilatato, manifestando picchi irregolari (fino a circa 700-800 ppm) dopo oltre 30 minuti, in concomitanza con la propagazione sequenziale del *thermal runaway* tra le celle. Al contrario, la simulazione modella uno scenario più severo nelle fasi iniziali, caratterizzato da una rapida rampa di crescita che porta la concentrazione a superare tempestivamente la soglia dei 200 ppm.

Sebbene il modello computazionale tenda a regolarizzare l'andamento a impulsi tipico del cedimento sequenziale degli involucri delle celle, esso restituisce una stima media in linea con i dati empirici. Inoltre, l'anticipazione del picco di emissioni simulato rappresenta un approccio ingegneristico cautelativo, indicato ai fini della salvaguardia della vita umana (*Life Safety*). Nell'ottica della Fire Safety Engineering (FSE), infatti, le fasi iniziali dell'incendio sono le più critiche per la determinazione del tempo disponibile per l'esodo (ASET).

In conclusione, pur al netto delle limitazioni derivanti dalla parziale disponibilità di dati sperimentali di dettaglio, l'accordo tra i valori medi conferma che il modello chimico implementato produce stime di concentrazione di HF fisicamente plausibili. Ciò ne valida l'accuratezza per analisi di rischio su vasta scala e per la valutazione delle condizioni di sicurezza in ambienti confinati, pur evidenziando la necessità di future campagne sperimentali in scala reale per un'ulteriore calibrazione di dettaglio.

## 3.2 Scenario esemplificativo

### 3.2.1 Impostazione dello scenario

Al fine di contestualizzare l'analisi fluidodinamica e validare la cinetica di reazione implementata, il dominio computazionale è stato strutturato secondo la logica dello scenario peggiore credibile (*worst-case scenario*). La geometria di progetto simula un compartimento di 400 m<sup>2</sup> con un'altezza utile 2,4 m; pur nel pieno rispetto dei limiti normativi, tale quota rappresenta un'intrinseca criticità termofluidodinamica, poiché favorisce il rapido abbassamento dello strato dei fumi e amplifica l'irraggiamento termico dal *ceiling jet* verso i veicoli adiacenti. Per quanto concerne le condizioni al contorno relative alla ventilazione, è stata prevista un'unica superficie di smaltimento fumi e calore (SEa) pari a 10 m<sup>2</sup>, corrispondente al limite prescrittivo minimo (1/40 della superficie in pianta) imposto dal Codice di Prevenzione Incendi. Infine, per massimizzare il percorso di propagazione degli effluenti e valutare il massimo degrado delle condizioni di tenibilità ambientale, il veicolo innescato è stato collocato nel punto diametralmente opposto rispetto all'apertura di smaltimento. In quest'ottica, per il monitoraggio dei parametri di esodo (temperatura, visibilità e concentrazione di gas tossici), è stata predisposta una rete di dispositivi di rilevamento virtuali e piani di taglio (*slice files*) posizionati a una quota di 1,8 m dal piano di calpestio, rappresentativa dell'altezza degli occupanti.

Coerentemente con i criteri di validazione esposti nel paragrafo 2.6.1, la discretizzazione spaziale è stata mantenuta uniforme sull'intero dominio computazionale, adottando celle cubiche di spigolo pari a 0,2 m.

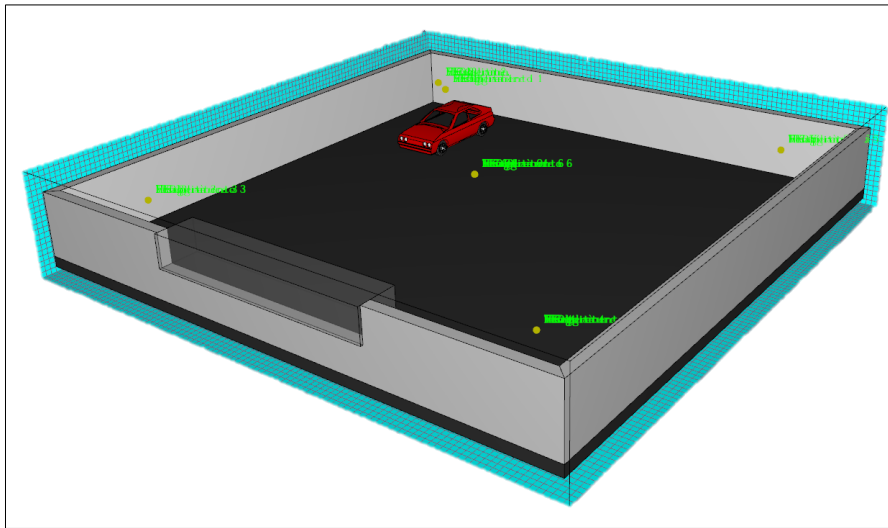


Figura 3.8: Rappresentazione del setup della simulazione in oggetto

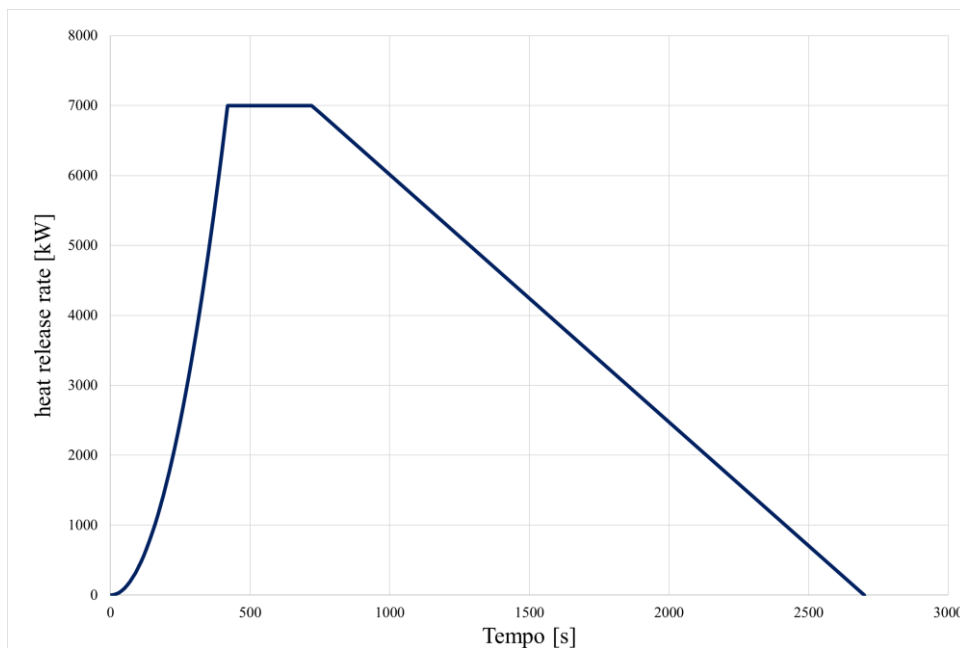
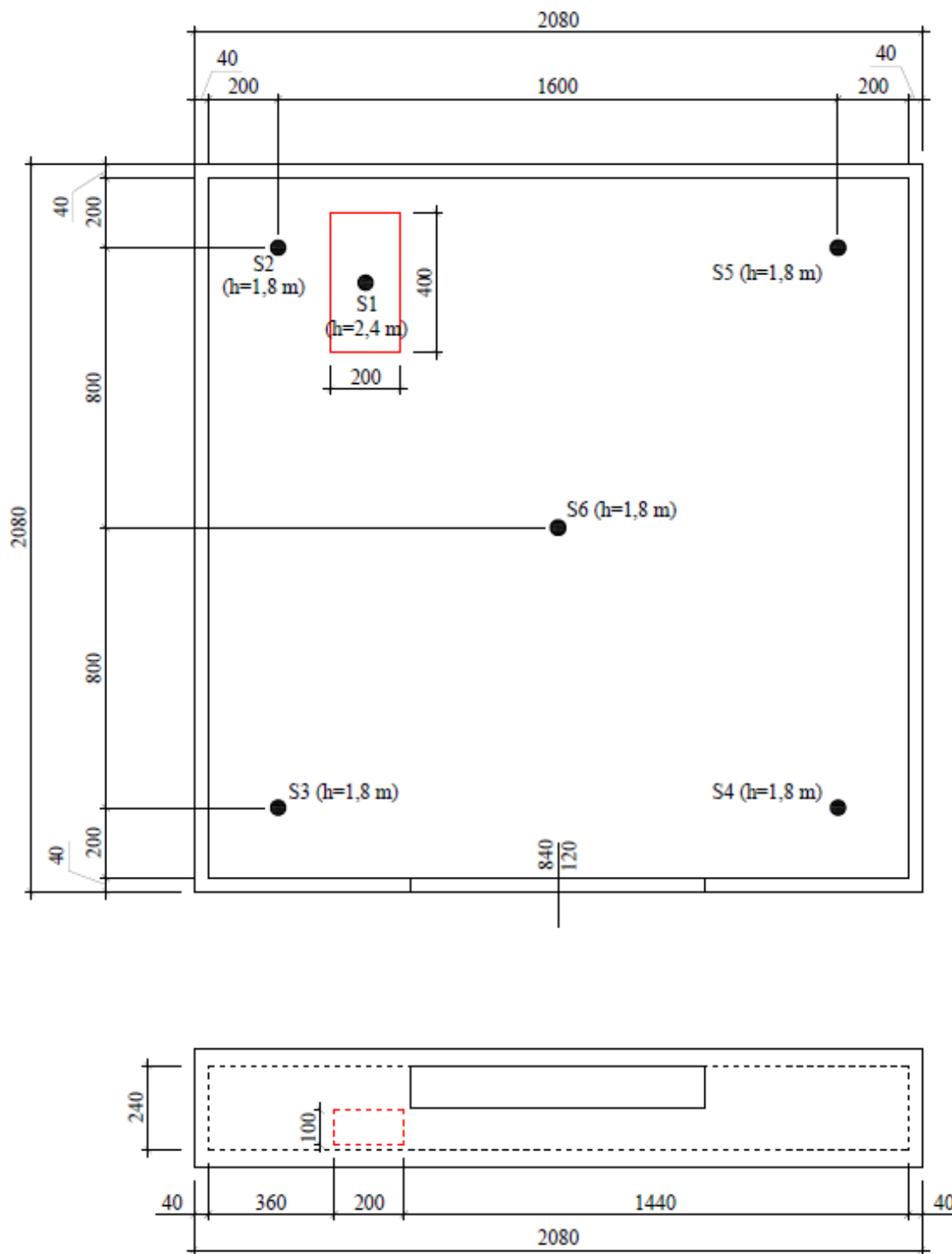


Figura 3.9: Curva RHR utilizzata come spiegato nel paragrafo 2.6.2

### 3.2.2 *Acquisizione dati*

Coerentemente con l'approccio metodologico dell'elaborato – orientato alla comprensione fenomenologica dell'evento piuttosto che alla mera verifica di conformità prestazionale di un progetto – il posizionamento dei dispositivi di misurazione è stato concepito per mappare estesamente l'intero dominio. Nello specifico, sono stati implementati sei punti di acquisizione virtuali (S1-S6): uno localizzato in asse al veicolo innescato e i restanti distribuiti negli angoli e al centro del compartimento. Tale configurazione si discosta volutamente dal posizionamento canonico lungo le vie d'esodo (indicato dalle linee guida di settore), al fine di analizzare la propagazione spaziale degli effluenti in modo più diffuso. Ciascun dispositivo è configurato per registrare l'andamento temporale di temperatura, irraggiamento termico, visibilità, tossicità (espressa tramite i parametri FEC e FED) e concentrazione di acido fluoridrico (HF). L'obiettivo è determinare quali di queste grandezze risultino maggiormente vincolanti per la salvaguardia della vita degli occupanti (Life Safety). Per quanto concerne le quote di rilevamento, il sensore S1, posto sulla verticale dell'innescato, è collocato a un'altezza di 2,4 m (all'intradosso del solaio) per monitorare le condizioni di massima severità. I restanti dispositivi (S2-S6) sono posizionati a una quota di 1,8 m dal piano di calpestio, in stretta conformità alle prescrizioni del Codice di Prevenzione Incendi per la valutazione della tenibilità. Alla medesima altezza sono stati inseriti dei piani di taglio orizzontali (*slice*), che restituiscono una mappatura cromatica bidimensionale e dinamica dell'evoluzione spaziotemporale delle grandezze fisiche indagate; a questi sono stati integrati ulteriori piani di taglio verticali, passanti per l'asse del veicolo innescato, indispensabili per apprezzare graficamente il gradiente termico, la stratificazione dei fumi e la dinamica del *ceiling jet* all'interno del dominio.

La disposizione planimetrica dei sensori e del veicolo sede dell'innescato è apprezzabile nella Figura 3.10 .



Disegno non in scala

Figura 3.10: Planimetria e prospettiva della simulazione con la posizione dei sensori

### 3.2.3 Valutazione dei risultati

L'esposizione dei risultati è strutturata in modo sistematico per ciascun parametro di riferimento. Per ogni grandezza viene dapprima analizzato il grafico relativo all'evoluzione temporale, i cui dati sono acquisiti dalle sonde virtuali distribuite nel dominio, con particolare attenzione (tramite ingrandimento dedicato) all'intervallo compreso tra 0 e 400 secondi, finestra temporale critica per l'esodo; per contestualizzare alcuni fenomeni dal punto di vista spaziale, come temperatura e visibilità, vengono proposti i piani di taglio (*slice files*) orizzontali e verticali. Tali mappature cromatiche sono estratte in corrispondenza di tre specifici istanti temporali (100, 200, 300, 500 s), ritenuti particolarmente significativi per descrivere l'evoluzione dello scenario incidentale. Nello specifico, la trattazione dei dati seguirà un rigoroso ordine di presentazione: temperatura, irraggiamento termico, visibilità, indici di tossicità (FED e FEC) e, infine, produzione di acido fluoridrico (HF). Si precisa, infine, che nell'analisi complessiva non verranno presi in considerazione i valori acquisiti dalla sonda posizionata al di sopra dell'autovettura, in quanto tali misurazioni non risultano pertinenti ai fini della valutazione dell'esodo.

#### *Temperatura*

Il primo parametro oggetto di indagine è la temperatura, la cui dinamica di propagazione costituisce il principale indicatore dell'evoluzione dell'incendio all'interno del compartimento; la comprensione del campo termico è infatti propedeutica all'analisi di tutte le successive grandezze fluidodinamiche e tossicologiche. Nei grafici e nelle figure a seguire vengono analizzati i profili termici puntuali registrati dalla rete di sensori (S1-S6), contestualizzati visivamente attraverso le mappature cromatiche dei piani di taglio estratti ai quattro istanti temporali di riferimento.

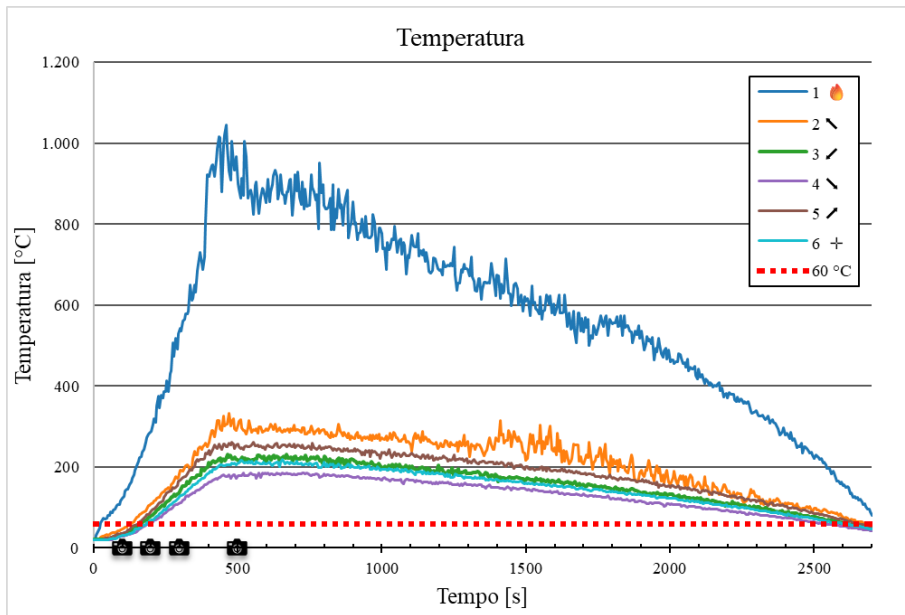


Figura 3.12: Grafico del modello del calore (temperatura) da 0 a 2700s

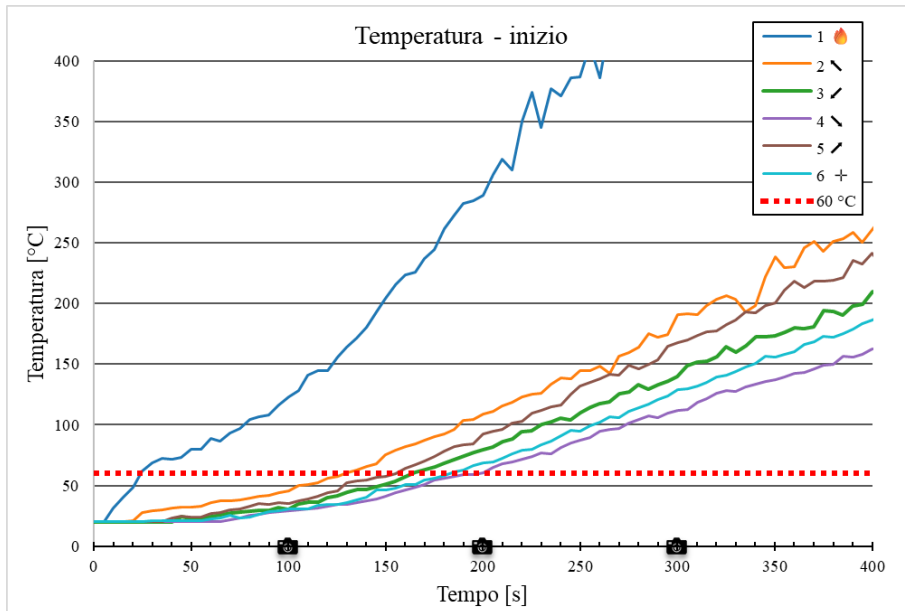


Figura 3.11: Grafico del modello del calore (temperatura) da 0 a 400s

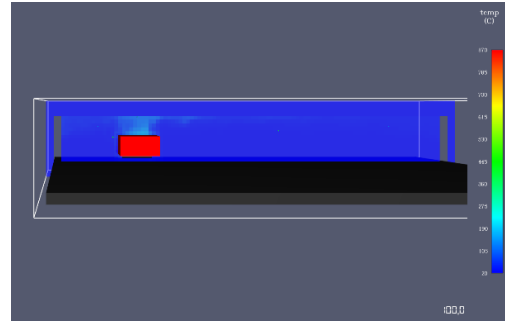
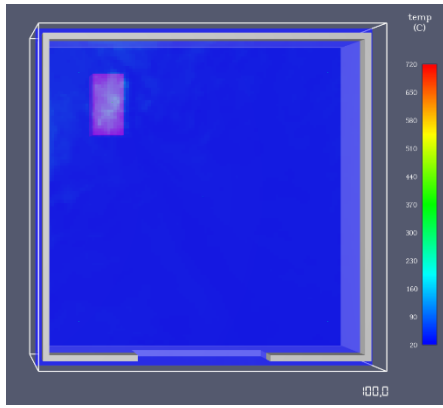


Figura 3.13: Slice della temperatura a 100 s

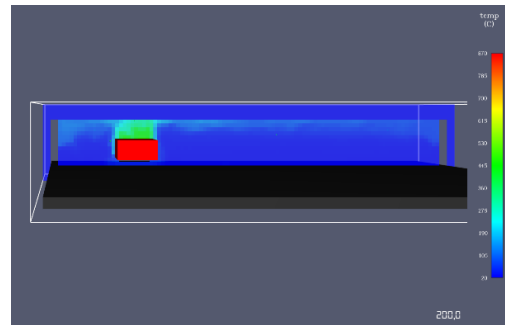
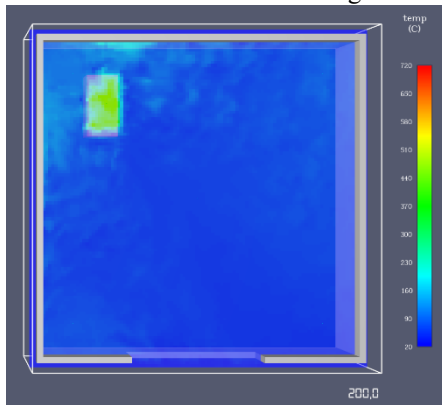


Figura 3.14: Slice della temperatura a 200 s

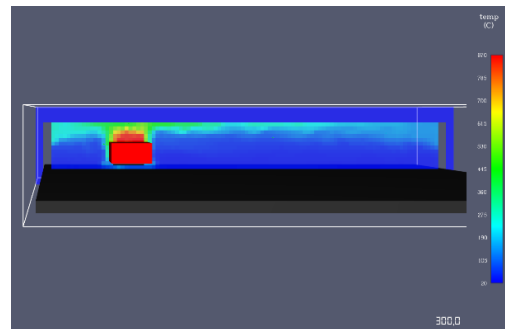
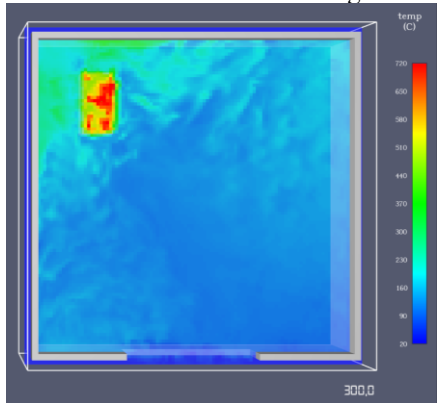


Figura 3.15: Slice della temperatura a 300 s

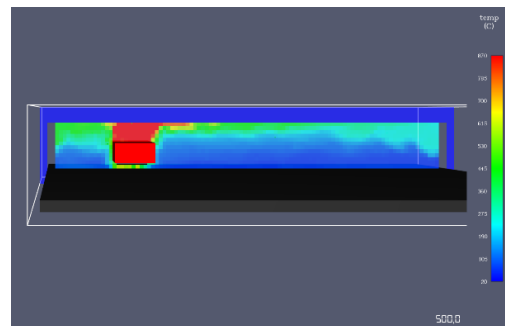
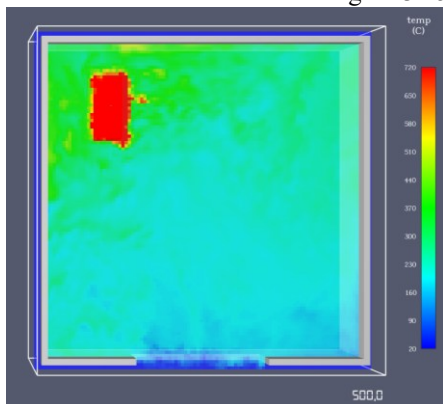


Figura 3.16: Slice della temperatura a 500 s

Dall'analisi dei dati si evince che la temperatura rappresenta uno dei fattori di maggiore criticità per l'esodo: il rapido incremento termico porta, infatti, al superamento della soglia di tenibilità di 60 °C in un intervallo di tempo compreso tra i 130 e i 160 secondi nelle diverse aree dell'autorimessa.

### *Irraggiamento*

L'irraggiamento termico costituisce il secondo parametro fondamentale per la valutazione della tenibilità ambientale; la sua analisi permette infatti di quantificare il flusso di calore radiante emesso dallo strato dei fumi e dalle fiamme verso gli occupanti in fuga. Ai fini della salvaguardia della vita, il limite normativo di sopportabilità per un'esposizione prolungata è comunemente fissato a 2,5 kW/m<sup>2</sup>; parallelamente, i valori registrati in prossimità del veicolo innescato forniscono un indicatore cruciale per valutare il rischio di propagazione dell'incendio ai bersagli adiacenti.

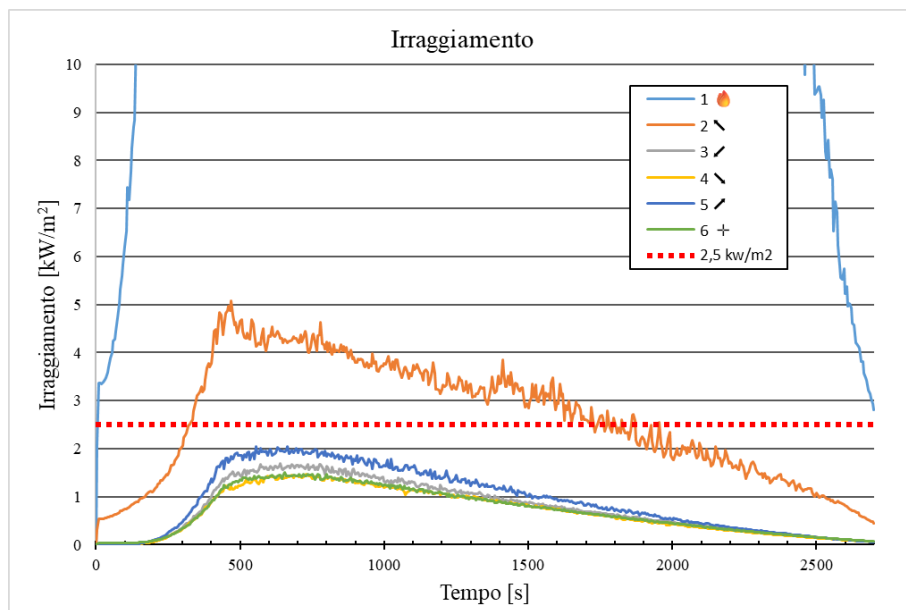


Figura 3.17: Grafico del modello del calore (irraggiamento) da 0 a 2700s

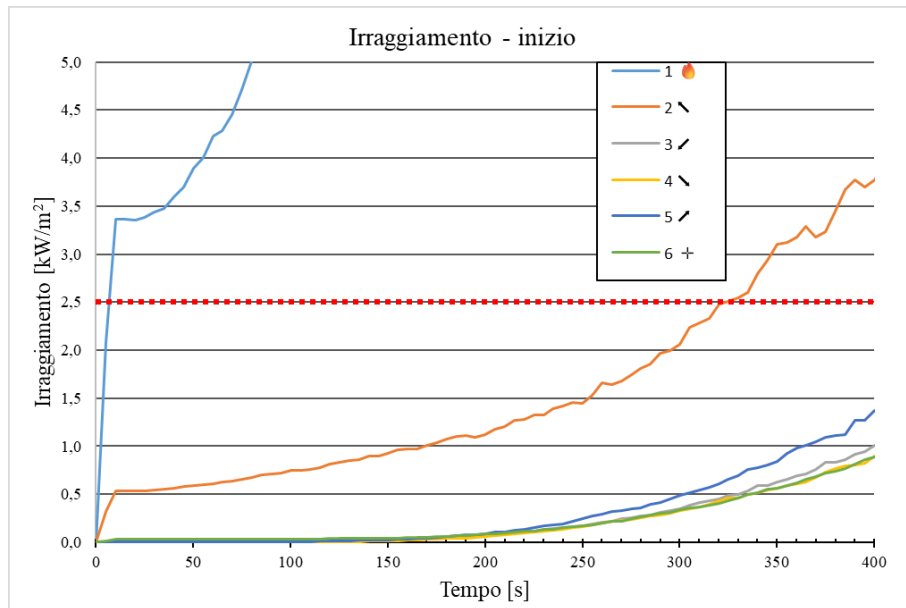


Figura 3.18: Grafico del modello del calore (irraggiamento) da 0 a 400s

Per quanto concerne l'irraggiamento termico, l'analisi dei risultati mostra che questo parametro non costituisce una criticità dirimente nelle fasi iniziali dell'emergenza, poiché il superamento dei valori soglia si registra solamente in una fase più avanzata, oltre i 300 secondi.

## Visibilità

La visibilità rappresenta un fattore critico per la determinazione del tempo disponibile per l'esodo (ASET), in quanto la densità dei fumi generati dalla combustione dei polimeri e del pacco batteria compromette rapidamente la percezione ottica delle vie di fuga; per garantire un'evacuazione sicura, la soglia minima di prestazione è assunta pari a 10, misurata alla quota di riferimento di 1,8 m dal piano di calpestio.

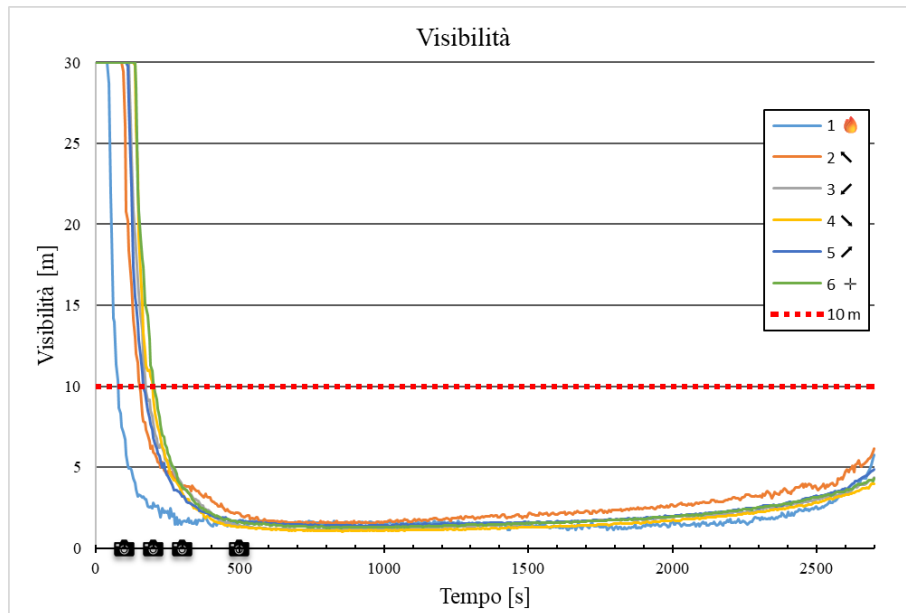


Figura 3.19: Grafico del modello di oscuramento della visibilità da 0 a 2700s

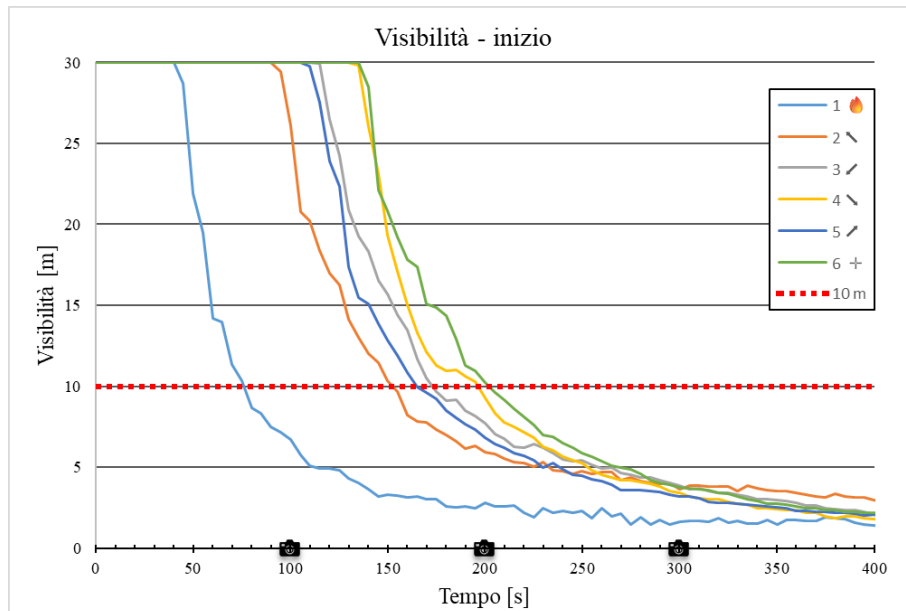


Figura 3.20: Grafico del modello di oscuramento della visibilità da 0 a 400s

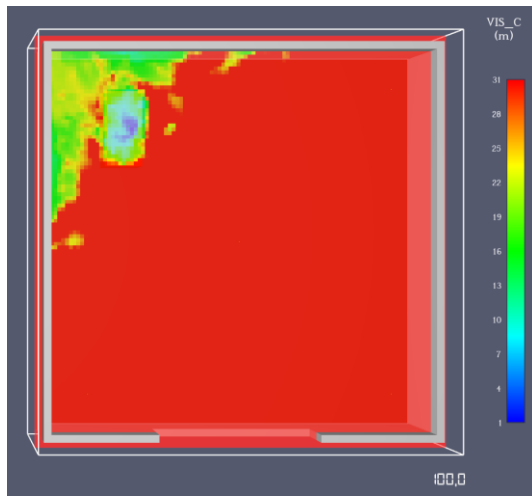


Figura 3.21: Slice visibilità a 100s

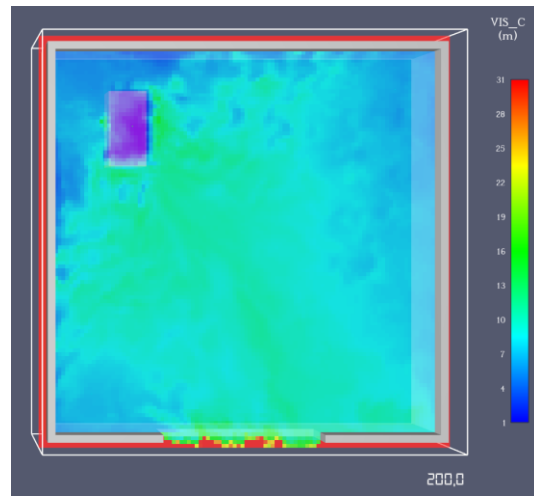


Figura 3.22: Slice visibilità a 200s

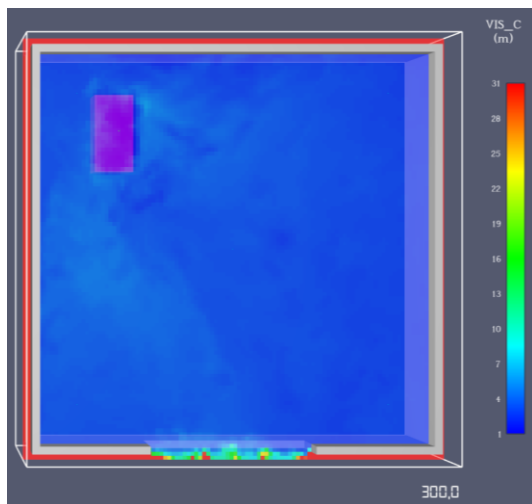


Figura 3.23: Slice visibilità a 300s

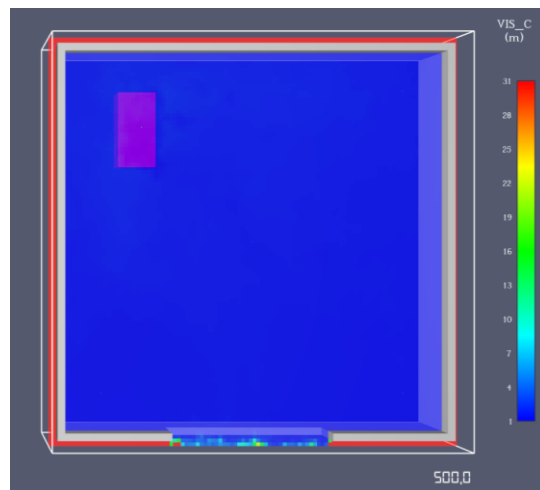


Figura 3.24: Slice visibilità a 500s

Così come la temperatura, la visibilità si conferma un parametro fortemente penalizzante ai fini della sicurezza. L'oscuramento degli ambienti dovuto ai fumi dell'incendio porta a una drastica riduzione della visibilità, la cui soglia minima di accettabilità viene criticamente superata tra i 150 e i 210 secondi.

### FED - Fractional Effective Dose

La valutazione della tossicità degli effluenti viene condotta in prima istanza attraverso il calcolo della Dose Efficace Frazionaria (FED); tale indice quantifica l'effetto letale cumulativo dei gas asfissianti (principalmente monossido di carbonio e anidride carbonica, uniti alla deplezione di ossigeno) inalati dagli occupanti durante l'esodo. Per garantire la tenibilità dell'ambiente, l'analisi verifica che i valori di FED registrati dai sensori si mantengano rigorosamente al di sotto della soglia limite di incapacitazione, precauzionalmente fissata a 0,1.

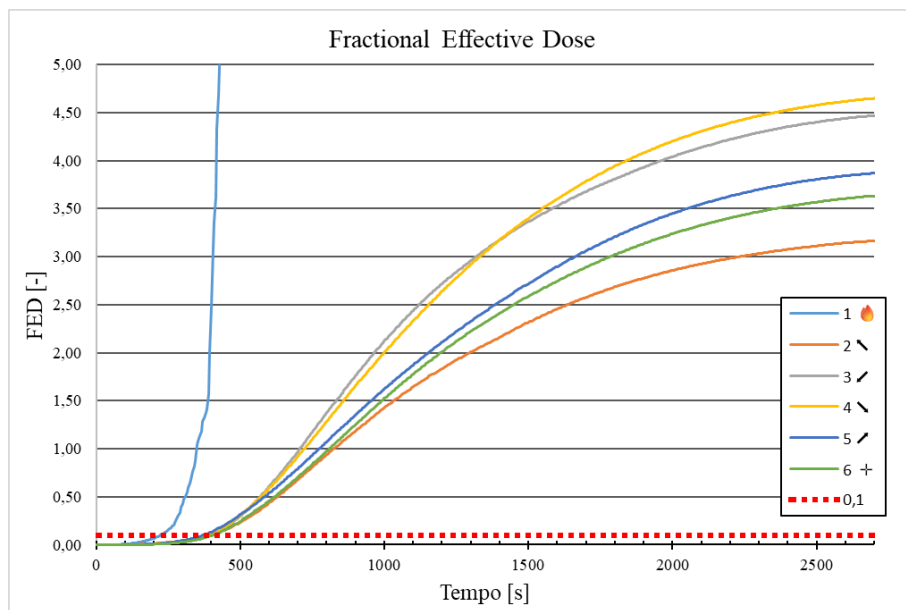


Figura 3.25: Grafico del modello dei gas tossici da 0 a 2700s

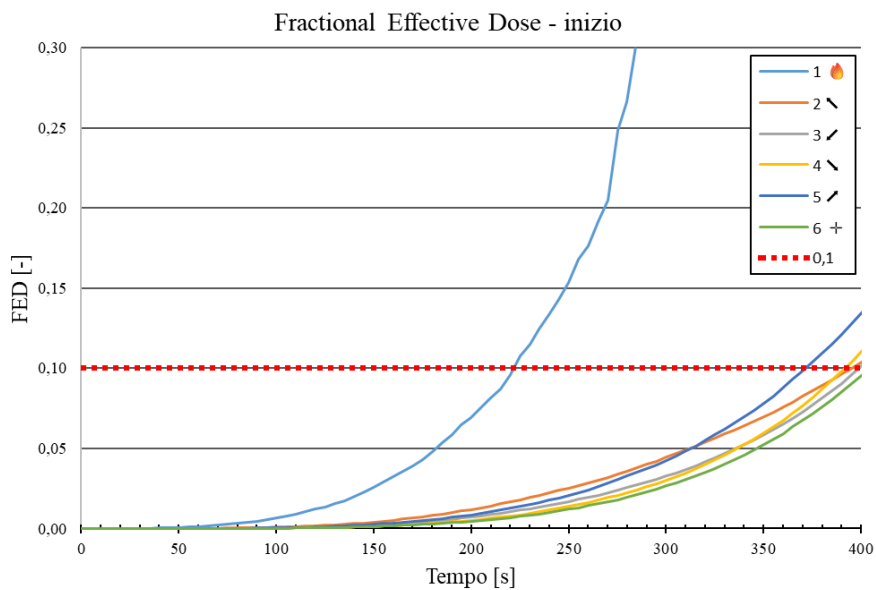


Figura 3.26:Grafico del modello dei gas tossici da 0 a 400s

La valutazione dell'indice FED (*Fractional Effective Dose*) dimostra che quest'ultimo risulta essere il fattore meno vincolante per l'evacuazione degli occupanti, raggiungendo il limite di guardia esclusivamente negli istanti finali del transitorio analizzato, tra i 380 e i 400 secondi.

### *FEC - Fractional Effective Concentration*

Parallelamente all'azione asfissiante, l'analisi della Concentrazione Efficace Frazionaria (FEC) risulta indispensabile per stimare gli effetti irritanti istantanei dei gas di combustione sulle mucose e sul tratto respiratorio. Anche in questo caso, il superamento della soglia prestazionale (pari a 0,1) determina una severa limitazione visiva e respiratoria, che può indurre l'incapacitazione degli occupanti e impedire il raggiungimento di un luogo sicuro.

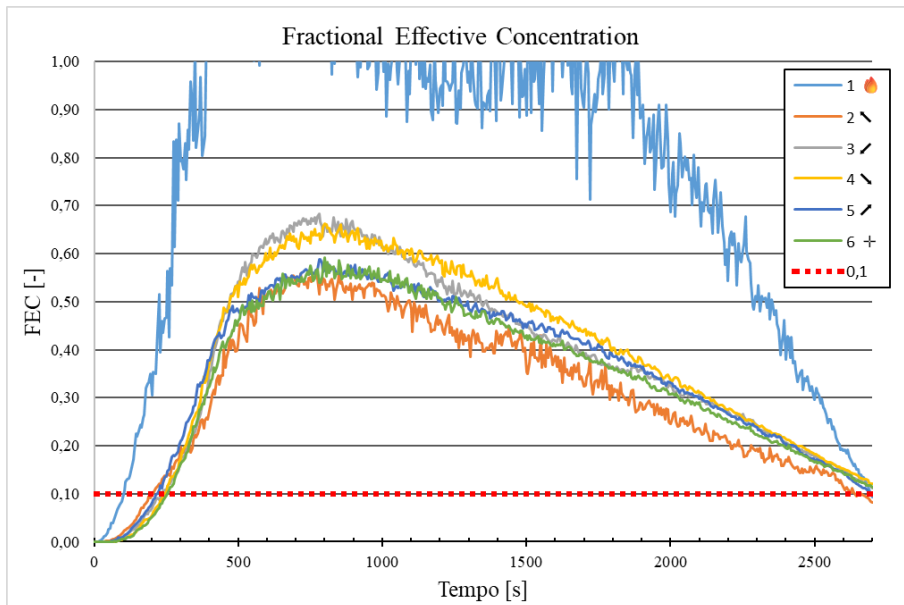


Figura 3.27: Grafico del modello dei gas irritanti da 0 a 2700s

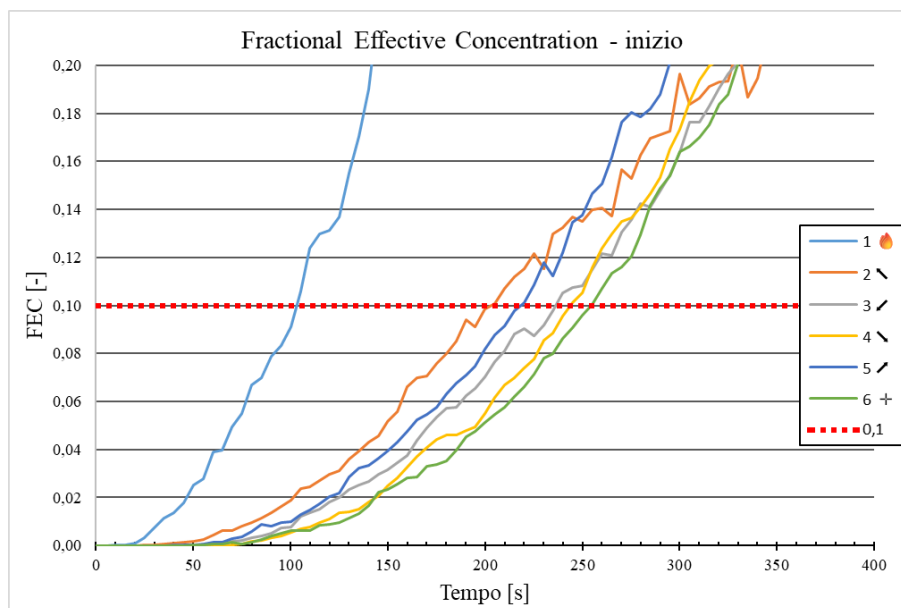


Figura 3.28: Grafico del modello dei gas irritanti da 0 a 400s

L'indice FEC (*Fractional Effective Concentration*), pur non rappresentando il fattore bloccante primario in questo specifico scenario, si rivela un parametro fondamentale da valutare: il superamento della sua soglia limite si verifica infatti tra i 200 e i 250 secondi, anticipando in modo significativo le criticità legate all'indice FED.

#### *Acido Fluoridrico (HF)*

Infine, un'attenzione particolare è riservata alla concentrazione di acido fluoridrico (HF), tracciante chimico altamente critico e specifico negli incendi che coinvolgono veicoli elettrici; la decomposizione termica dell'elettrolita e dei sali di litio (come il LiPF<sub>6</sub>) all'interno delle celle rilascia infatti questo gas estremamente tossico e corrosivo. I valori puntuali registrati dai dispositivi virtuali vengono pertanto monitorati per verificare il superamento delle soglie di esposizione acuta, evidenziando le peculiarità di rischio tossicologico tipiche della mobilità elettrica.

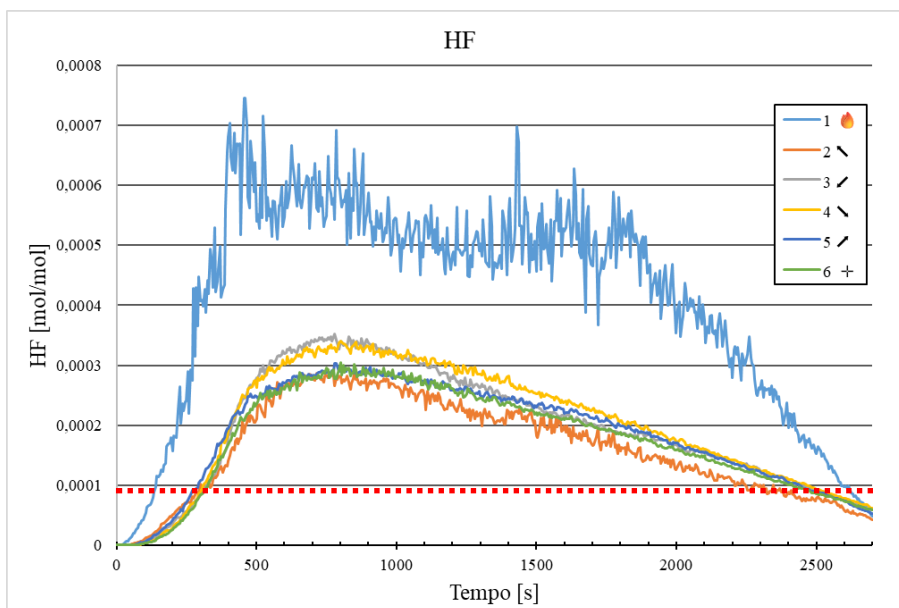


Figura 3.29: Grafico della produzione di HF da 0 a 2700 s

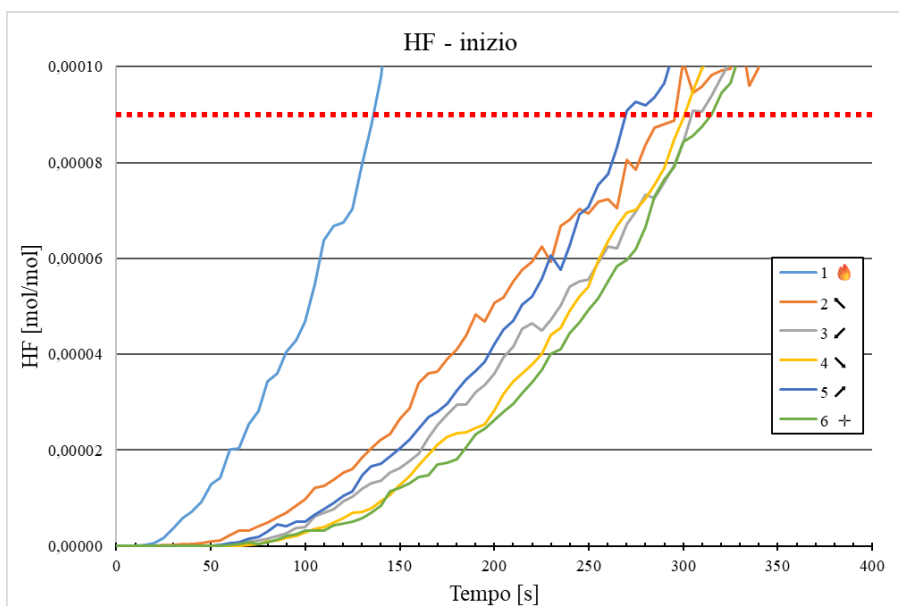


Figura 3.30: Grafico della produzione di HF da 0 a 400 s

Dall'analisi dei dati si osserva come l'andamento temporale della produzione di acido fluoridrico (HF) ricalchi fedelmente la curva della FEC. Tale sovrapposibilità evidenzia il contributo predominante di questo gas e sottolinea la necessità imprescindibile di includerlo nella valutazione del rischio.

Dalla disamina quali-quantitativa dei parametri finora esposti, emerge un quadro fluidodinamico e tossicologico in cui i criteri di inabilitazione per gli occupanti si manifestano con tempistiche nettamente sfalsate. L'incrocio delle curve temporali permette di identificare con precisione quali siano i veri "fattori bloccanti" dell'esodo in un'autorimessa che ospita veicoli elettrici. Tuttavia, è doveroso premettere che i risultati ottenuti si riferiscono a uno scenario di calcolo volutamente semplificato. Tale modello costituisce un utile caso studio esemplificativo e un punto di partenza metodologico, ma le sue conclusioni numeriche non possono essere aprioristicamente generalizzate a tutte le casistiche o a geometrie più complesse.

In questo specifico contesto, i risultati confermano che la temperatura e l'oscuramento visivo costituiscono le criticità primarie e immediate. La temperatura ambientale varca la soglia critica dei 60 °C in un arco temporale ristrettissimo (130-160 secondi), seguita a brevissima distanza dal crollo della visibilità sotto i 10 metri (150-210 secondi). Questa dinamica è la diretta conseguenza dell'interazione tra la violenta curva di rilascio termico (RHR) tipica del *thermal runaway* e l'altezza utile limitata del compartimento analizzato (2,4 m), che satura il volume a disposizione ostacolando la naturale stratificazione dei fumi.

Sotto il profilo chimico-tossicologico, l'analisi ha evidenziato un comportamento peculiare e strettamente legato alla natura del vettore energetico. Il rischio letale per asfissia (FED) si è rivelato un fattore tardivo, raggiungendo il limite di guardia solo a ridosso dei 400 secondi. Al contrario, l'incapacitazione sensoriale e respiratoria (FEC) si palesa in tempi quasi dimezzati (200-250 secondi), trainata in modo inequivocabile dalla massiccia produzione di Acido Fluoridrico (HF). Questo dato avvalorava in pieno la scelta metodologica di implementare una reazione chimica customizzata: l'utilizzo di librerie standard (prive di alogeni) avrebbe ignorato il picco di HF, portando a una pericolosa sovrastima della tenibilità ambientale.

In conclusione, sovrapponendo i vari modelli, il tempo fisicamente disponibile per un'evacuazione in sicurezza (ASET) risulta severamente vincolato dai parametri termici e ottici, attestandosi su un valore critico di circa 130-150 secondi. È essenziale sottolineare che questa stima deriva da un'analisi circoscritta al singolo veicolo innescato e priva di misure di protezione attiva: in questa fase, infatti, non è stata modellata l'eventuale propagazione dell'incendio ai veicoli adiacenti (che altererebbe drasticamente

la curva di RHR globale), né si è tenuto conto dell'azione mitigatrice di sistemi di spegnimento automatico (come reti sprinkler o water mist), che abbatterebbero le temperature e la densità dei fumi ritardando il raggiungimento delle soglie critiche.

Accertata la severità di questo scenario base per quanto concerne la salvaguardia della vita umana, l'analisi deve necessariamente spostarsi sulle dinamiche di sviluppo macroscopico del rogo. A tal fine, il parametro dell'irraggiamento termico — che nella fase iniziale di esodo si è mantenuto sotto i limiti di guardia — assume ora un'importanza elevata per valutare il rischio di innesco secondario (effetto domino). Il paragrafo successivo indagherà pertanto l'efficacia delle distanze di separazione tra i veicoli per contenere la propagazione dell'incendio.

#### *3.2.4 Valutazione del distanziamento delle auto*

A partire dai risultati di queste simulazioni preliminari, si è analizzata l'influenza della distanza di separazione tra i veicoli sulla dinamica di propagazione dell'incendio. A tal proposito, è opportuno confrontare tali esiti con le indicazioni contenute nell'attuale bozza di aggiornamento della Regola Tecnica Verticale per le autorimesse (RTV 6). Tale documento prescrive l'interposizione di una distanza libera di almeno 1,5 m ogni sei autoveicoli parcheggiati, senza imporre ulteriori vincoli di distanziamento all'interno del singolo sottogruppo. Sotto il profilo ingegneristico, tale approccio normativo assume come scenario di riferimento il contenimento del rogo all'interno di un massimo di sei veicoli, demandando allo spazio vuoto di 1,5 m la funzione di barriera di separazione. Tuttavia, l'applicazione di questo criterio solleva due considerazioni fondamentali che motivano la presente analisi: in primo luogo, la scarsità di letteratura scientifica consolidata a supporto di tale specifico valore rende necessaria una verifica fluidodinamica quantitativa; in secondo luogo, l'introduzione sistematica di tali varchi incide in modo oneroso sull'ottimizzazione degli spazi, riducendo drasticamente l'efficienza del layout architettonico e la redditività dell'autorimessa.

In accordo con gli studi di settore [55], riportati già nel paragrafo 2.6.4, si assume convenzionalmente che l'innesco secondario e la conseguente propagazione dell'incendio a un veicolo adiacente avvengano qualora il flusso termico incidente superi stabilmente la soglia critica compresa tra gli 11 e i 12 kW/m<sup>2</sup>.

Il modello di base ricalca quello impiegato nella simulazione precedente. La reazione come a curva RHR sono le medesime l'unica modifica del modello consiste nell'affiancare alla sorgente di innesco due autoveicoli – bersagli – disposti rispettivamente alla sua destra e alla sua sinistra. La distanza iniziale tra l'innesco e le vetture è stata fissata a 40 cm, per poi essere progressivamente incrementata negli scenari simulativi successivi; a questa prima simulazione sono seguite altre quattro interponendo una distanza libera pari a 60 cm, 80 cm, 120 cm e 150 cm.

Al fine di ottimizzare l'onere computazionale, la dimensione base delle celle della *mesh* è stata impostata a 40 cm, applicando un infittimento locale con celle da 10 cm esclusivamente nell'intorno dell'innesco e nello spazio interposto fino alle auto adiacenti.

L'obiettivo principale dell'analisi è determinare l'istante temporale in cui il veicolo limitrofo viene investito da un irraggiamento pari a  $11 \text{ kW/m}^2$  (soglia critica di propagazione). A tale scopo, su ciascun veicolo bersaglio sono stati implementati sei sensori virtuali (*device*). Tali dispositivi sono stati configurati per la misurazione dell'*Incident Heat Flux* (flusso termico incidente), ovvero la potenza termica radiativa che colpisce l'unità di superficie del bersaglio, espressa in  $\text{kW/m}^2$ . Come illustrato nella Figura 3.31, i sensori sono stati distribuiti come segue: tre posizionati sulla parte alta della vettura, a una quota di 1,4 m, e tre collocati sulla fiancata esposta all'innesco, a un'altezza di 1,0 m dal piano di calpestio.

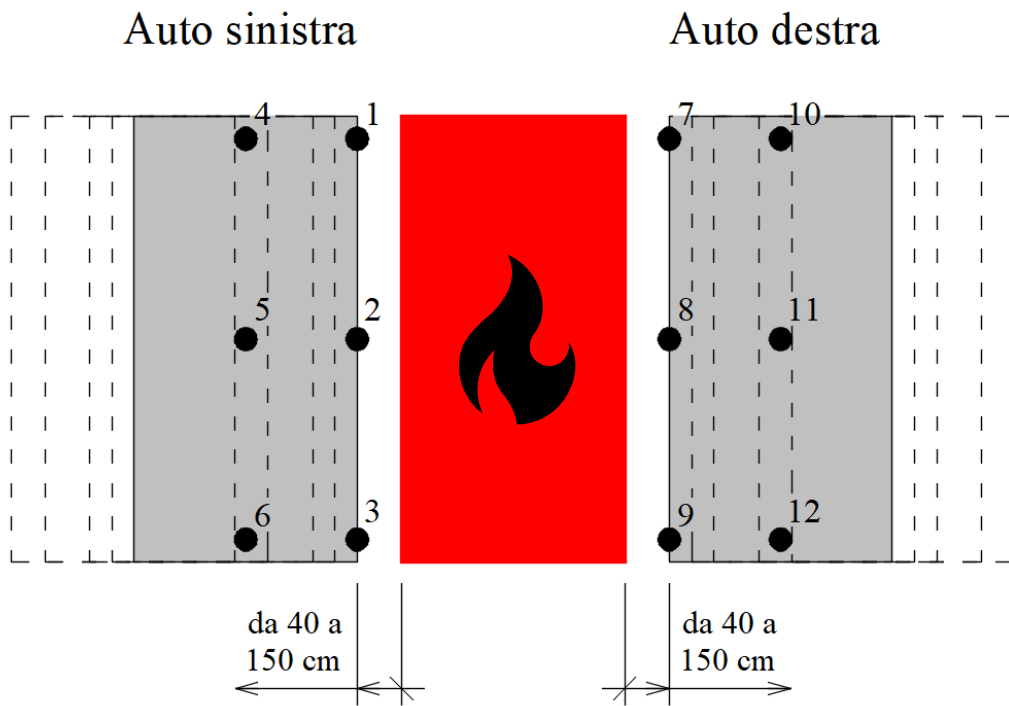


Figura 3.31: Configurazione della prova di propagazione

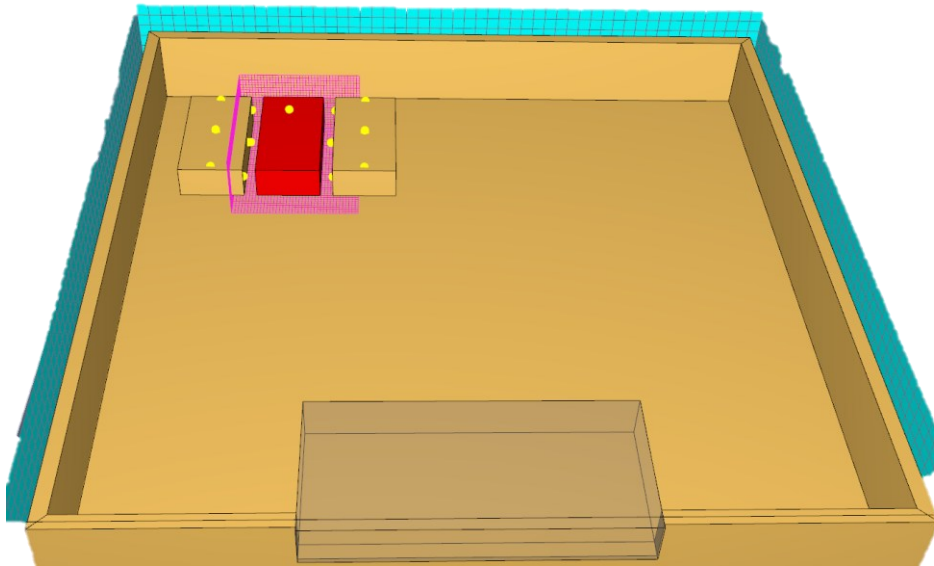


Figura 3.32: Configurazione nel software

## I. Auto a 40 cm

Rappresentando il caso più critico e maggiormente aderente agli standard delle autorimesse attuali, la distanza di 40 cm viene analizzata come configurazione di partenza.

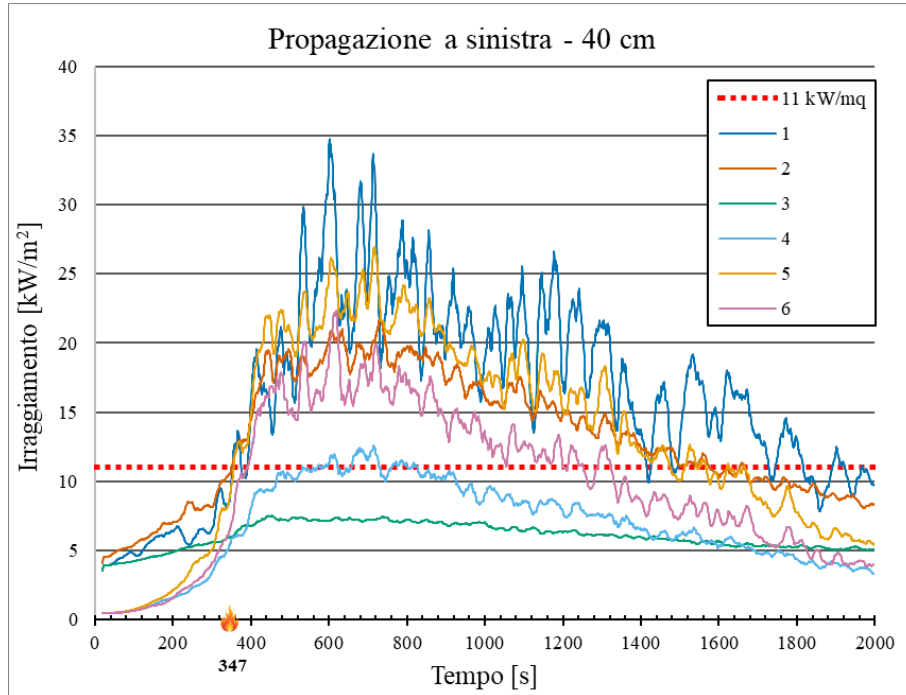


Figura 3.33: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 40 cm a sinistra dall'innesco

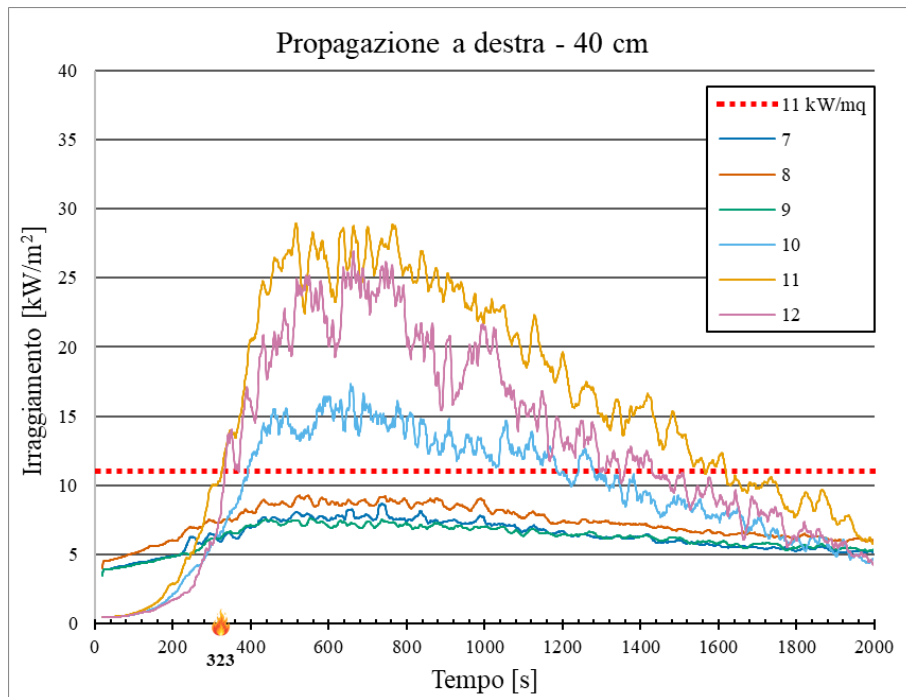


Figura 3.34: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 40 cm a destra dall'innesco

I risultati evidenziano una rapida propagazione: la soglia critica degli  $11 \text{ kW/m}^2$  viene superata da almeno un sensore a 347 secondi per il bersaglio di sinistra e a 323 secondi per quello di destra. Si nota un'asimmetria nell'esposizione termica: mentre a sinistra la quasi totalità dei sensori raggiunge il target, sul veicolo di destra l'innesco è registrato unicamente dai dispositivi posti sulla parte superiore dell'auto, indicando una potenziale inclinazione del pennacchio termico

## II. Auto a 60 cm

La seconda simulazione allontana le auto di ulteriori 20 cm dalla sorgente ovvero dispone di uno spazio libero di 60 cm per lato

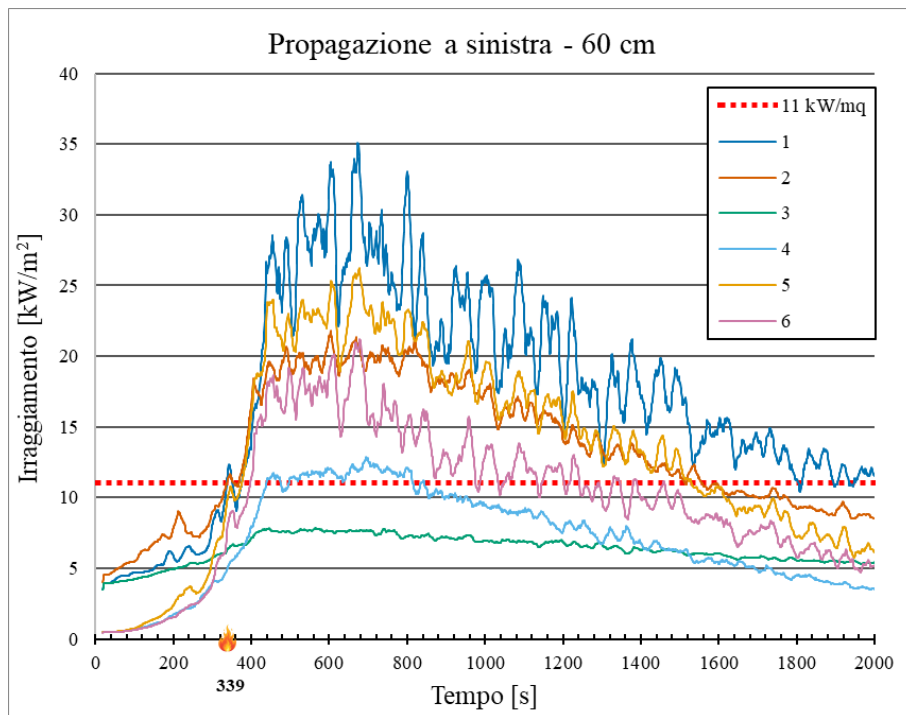


Figura 3.35: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 60 cm a sinistra dall'innesco

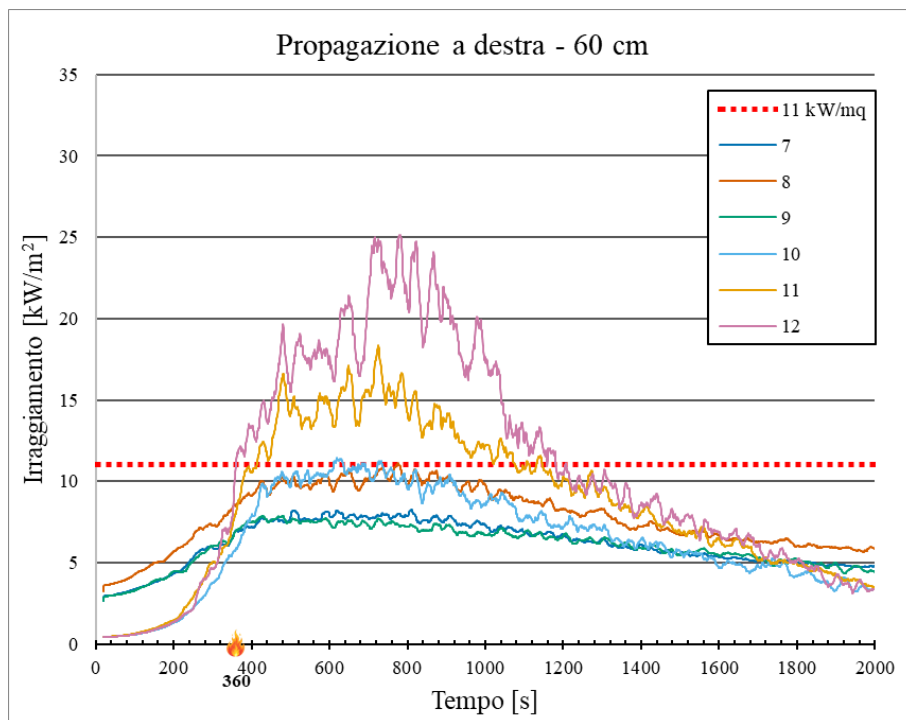


Figura 3.36: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 60 cm a destra dall'innesco

L'aumento della distanza genera un lieve ritardo nell'innesco secondario, quantificabile a 339 secondi per l'obiettivo di sinistra e a 360 secondi per quello di destra. Si riconferma la dinamica asimmetrica osservata a 40 cm: il superamento della soglia avviene prevalentemente tramite i sensori sulla fiancata per il veicolo di sinistra, e tramite quelli sul tettuccio per il veicolo di destra.

### III. Auto a 80 cm

La terza simulazione posiziona i bersagli a 80 cm dall'auto fonte di innesco. Tale configurazione è rappresentativa di stalli con larghezza pari a 2,8 m, ovvero maggiorati di 30 cm rispetto agli standard attuali.

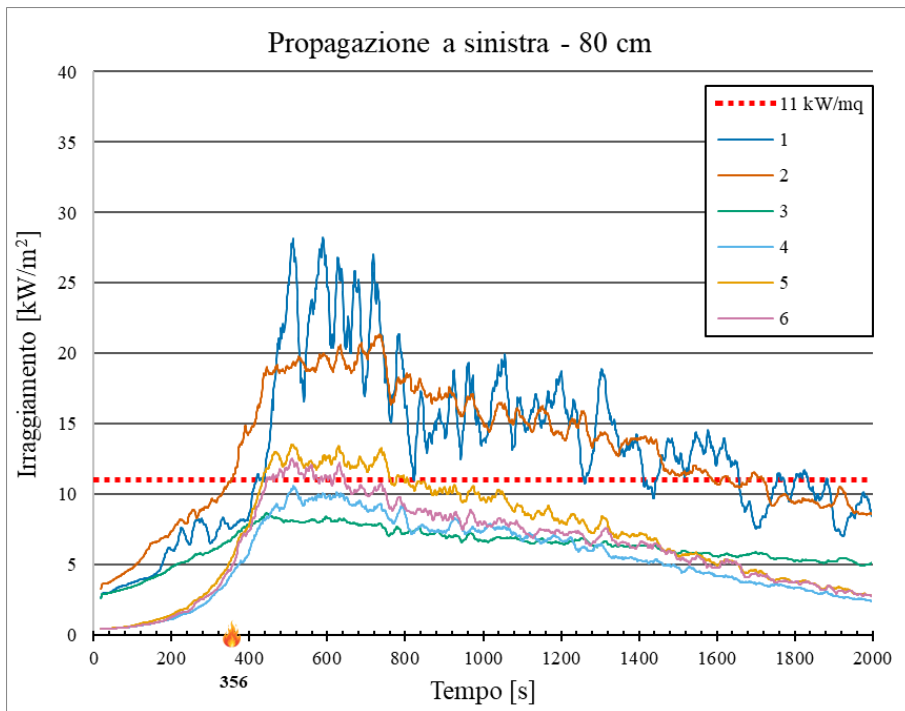


Figura 3.37: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 80 cm a sinistra dall'innesco

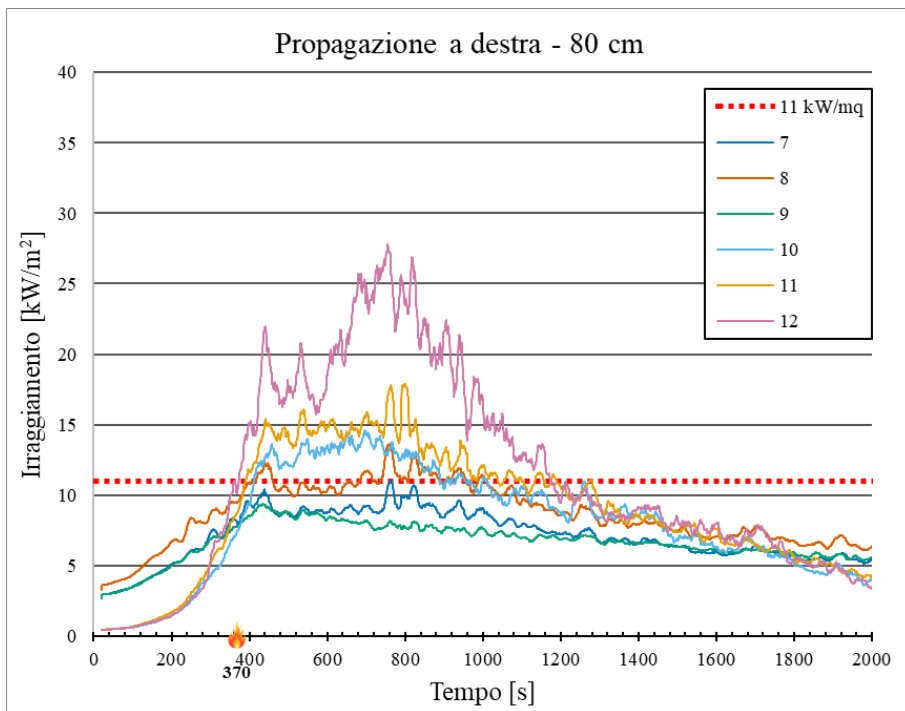


Figura 3.38: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 80 cm a destra dall'innesco

L'innesco dei bersagli è pari a 356 secondi per l'auto di sinistra e 370 per l'auto a destra. Si riconferma la propagazione delle precedenti simulazioni con un divario temporale di pochi secondi.

#### IV. Auto a 120 cm

La terza simulazione per la valutazione della propagazione pone le auto adiacenti all'innesco con l'interposizione di 120 cm di spazio libero. Questo valore vuole essere intermedio agli 80 cm della simulazione precedente e i 150 cm proposti nelle bozze della nuova RTV.

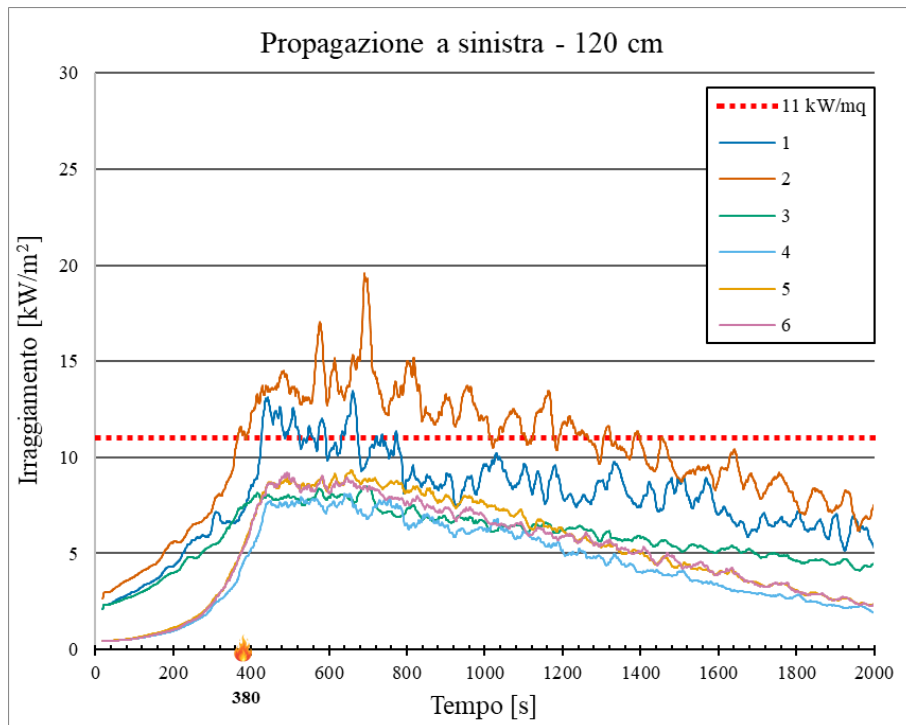


Figura 3.39: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 120 cm a sinistra dall'innesco

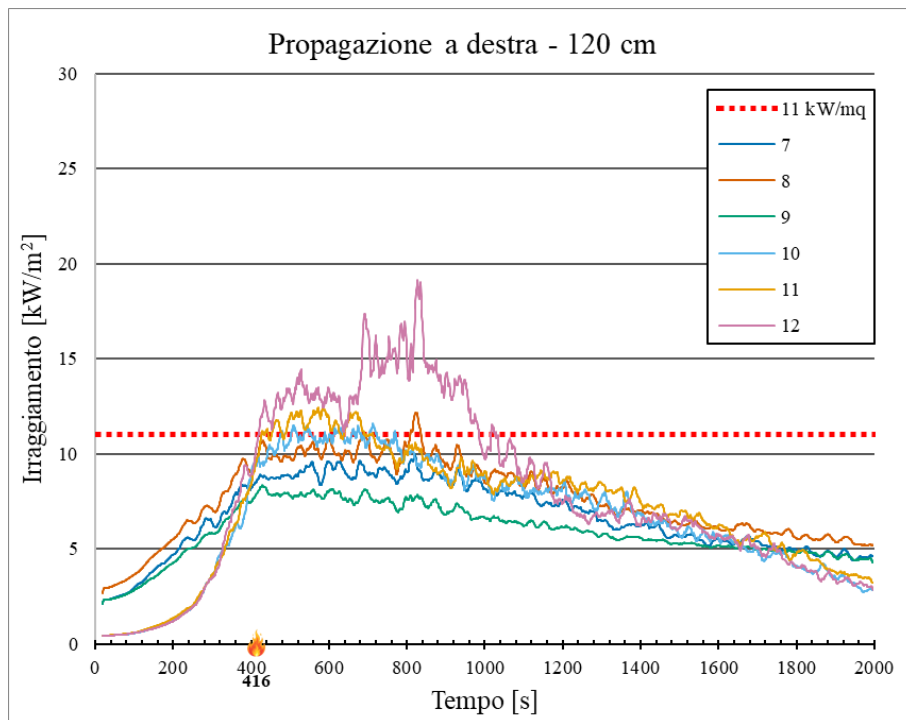


Figura 3.40: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 120 cm a destra dall'inesco

L'incremento della distanza inizia a sfavorire in modo netto il trasferimento radiativo. Il superamento della soglia subisce un ritardo sensibile, avvenendo a 380 secondi per il veicolo di sinistra e a 416 secondi per quello di destra. L'esposizione risulta inoltre più marginale, con solo due o tre *device* per vettura in grado di registrare valori superiori agli 11 kW/m<sup>2</sup>.

#### V. Auto a 150 cm

Interporre una distanza libera di 150 cm è la soluzione che emerge nelle bozze della nuova RTV 6 del Codice Prevenzione Incendi per evitare la propagazione di un incendio. Questo valore al momento non sembra avere riferimenti in letteratura solidi.

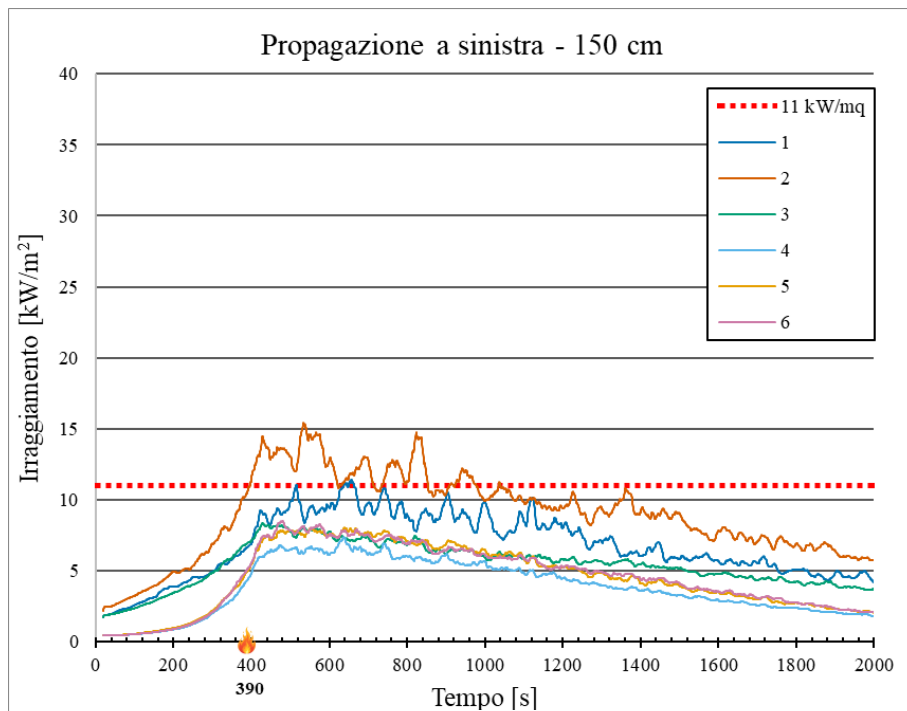


Figura 3.41: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 150 cm a sinistra dall'innesco

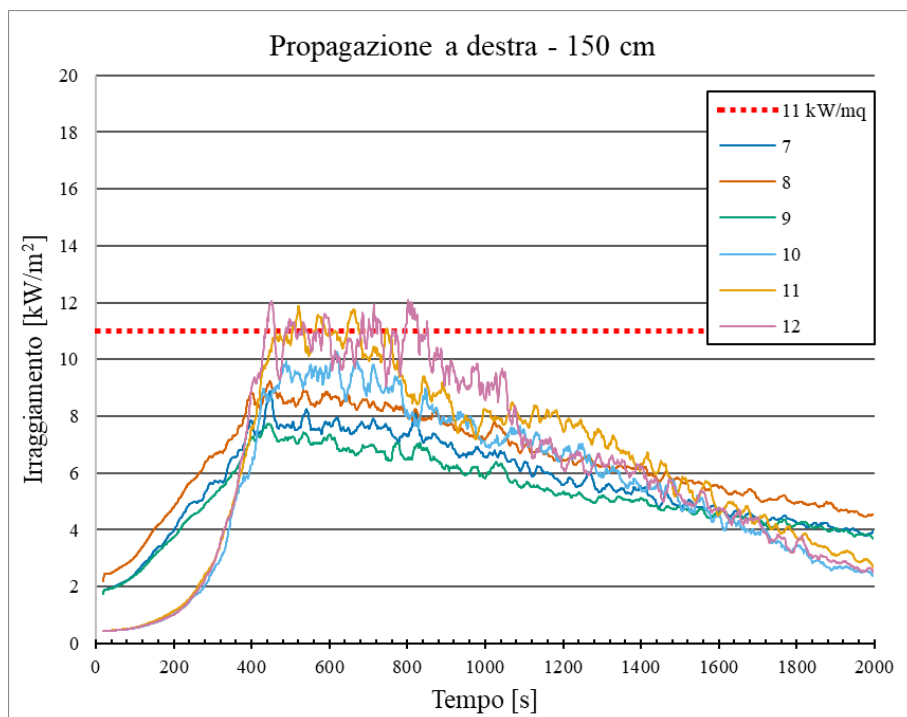


Figura 3.42: Irraggiamento nel tempo sull'auto posta a 150 cm a destra dall'innesco

Con uno spazio libero pari a 150 cm la propagazione risulta molto difficile; per l'auto a sinistra viene superata la soglia da un solo sensore a 390 s a destra ci sono delle oscillazioni superiori a  $11 \text{ kW/m}^2$  verso i 400 s ma con una durata di pochi secondi e mai superiori a  $13 \text{ kW/m}^2$ .

L'analisi della propagazione dell'incendio tra veicoli adiacenti rappresenta un fenomeno di cruciale importanza nella valutazione del rischio all'interno delle autorimesse. Le simulazioni condotte dimostrano che, alle distanze di parcheggio standard attualmente in uso (con spazi liberi compresi tra 40 cm e 80 cm), la soglia critica di irraggiamento pari a  $11 \text{ kW/m}^2$  viene superata rapidamente. Nelle simulazioni presentate, l'innescò secondario avviene infatti in circa 5 minuti. Tale rapida propagazione comporterebbe un drastico e repentino incremento della potenza termica rilasciata (RHR) globale, generando scenari di incendio che, a breve termine, risulterebbero non più controllabili.

Le analisi hanno altresì confermato la validità del distanziamento fisico come misura di mitigazione. Incrementando progressivamente lo spazio libero tra le vetture, il trasferimento radiativo viene nettamente sfavorito. In particolare, l'interposizione di una distanza libera pari a 150 cm – soluzione attualmente suggerita nelle bozze di aggiornamento della nuova Regola Tecnica Verticale (RTV 6) del Codice di Prevenzione Incendi – è risultata in grado di contenere efficacemente il fenomeno. I risultati numerici confermano infatti che con un divario di 1,5 m la propagazione risulta molto difficile: la soglia critica di  $11 \text{ kW/m}^2$  viene superata in modo del tutto marginale e solo dopo 390 secondi, registrando esclusivamente oscillazioni termiche di brevissima durata.

Nonostante la validazione ingegneristica dell'efficacia di tale misura nell'inibire l'effetto domino, è doveroso ribadire alcune forti perplessità riguardo alla sua reale applicabilità. L'imposizione di uno spazio libero di 1,5 m solleva infatti evidenti criticità in termini di *layout* architettonico delle autorimesse. Inoltre, l'indicazione normativa di interporre questa distanza libera ogni 6 veicoli suscita forti dubbi in merito alla reale gestione dell'emergenza: l'accettazione implicita di un danno e di una propagazione non ostacolata su una scala di ben 6 auto, in un ambiente confinato, può rappresentare un livello di rischio residuo elevato.

Alla luce di queste criticità geometriche e operative, i sistemi di protezione attiva ad acqua (come gli impianti sprinkler o ad acqua nebulizzata) potrebbero rappresentare un'ottima soluzione per limitare la propagazione dell'incendio a un singolo veicolo, svincolando la progettazione da rigidi limiti di distanziamento. Tuttavia, l'implementazione di tali sistemi all'interno delle simulazioni fluidodinamiche (CFD) necessita ancora di opportuni test su scala reale. Dati sperimentali aggiornati sono infatti

indispensabili per caratterizzare gli scenari che coinvolgono veicoli di nuova generazione, permettendo così di valutarne la reale efficacia all'interno dei modelli di Fire Safety Engineering.

## CONCLUSIONI

La gestione della sicurezza antincendio nelle autorimesse si trova oggi di fronte a una sfida ingegneristica senza precedenti, dettata dalla rapida diffusione dei veicoli a trazione elettrica e dalla specificità dei loro sistemi di accumulo.

Il presente lavoro di tesi ha evidenziato come le dinamiche di un evento incidentale che coinvolge pacchi batteria agli ioni di litio differiscano sostanzialmente da quelle dei veicoli tradizionali a combustione interna. Tale divergenza non risiede unicamente nell'energia totale rilasciata, quanto nell'estrema rapidità di crescita del focolare – ben rappresentata dalle curve di *Heat Release Rate* (RHR) e, soprattutto, nell'ingente emissione di gas alogeni altamente tossici, in primis l'acido fluoridrico (HF).

Alla luce di queste criticità, l'elaborato ha inteso dimostrare come l'approccio prestazionale basato sulla *Fire Safety Engineering* (FSE) rappresenti uno strumento metodologico indispensabile, capace di conciliare la salvaguardia della vita umana con la necessaria flessibilità architettonica e gestionale. Piuttosto che configurarsi come una mera alternativa per l'ottenimento di deroghe formali, la FSE, se rigorosamente applicata, garantisce livelli di sicurezza nettamente superiori, colmando i vuoti di un quadro normativo inevitabilmente in ritardo rispetto all'evoluzione tecnologica.

Dal punto di vista metodologico e dei risultati conseguiti, la ricerca si è concentrata sulla corretta caratterizzazione del "nuovo" rischio incendio. Dapprima si è motivata e validata l'adozione della curva RHR derivante dal progetto SUVEREN, ritenuta la più idonea a descrivere il reale sviluppo termico dei moderni veicoli elettrici. Successivamente, l'analisi ha approfondito due aspetti cruciali della modellazione fluidodinamica: la produzione di gas tossici e la dinamica di propagazione. Rifiutando le reazioni chimiche preimpostate nei software di calcolo, inadatte a descrivere i fenomeni legati ai sistemi di accumulo litio-ione, è stata definita e implementata una stechiometria personalizzata della combustione. Il confronto tra la produzione media di HF registrata in

scenari sperimentali reali e i risultati delle simulazioni ha confermato l'elevata affidabilità di tale scelta. Questo passaggio analitico si è rivelato essenziale per quantificare in modo realistico non solo la *Fractional Effective Dose* (FED), ma soprattutto la *Fractional Effective Concentration* (FEC). È opportuno sottolineare con forza come quest'ultima venga troppo spesso, ed erroneamente, tralasciata o sottovalutata nella pratica professionale corrente; al contrario, lo studio, attraverso un esempio applicativo, ha dimostrato come la FEC costituisca, a tutti gli effetti, un fattore critico e limitante per la tenibilità ambientale nei locali confinati qualora si verificino incendi di batterie al litio.

Sul fronte della propagazione, fissando una soglia critica di irraggiamento a 11 kW/m<sup>2</sup>, le simulazioni hanno restituito un quadro di massima attenzione: con l'attuale distanziamento standard tra gli stalli, compreso tra 40 e 60 centimetri, l'incendio risulta in grado di propagarsi ai veicoli adiacenti in appena cinque minuti. Di contro, lo studio ha permesso di validare l'efficacia del contenimento passivo dell'incendio qualora tale distanziamento venga prudenzialmente incrementato a 1,5 metri.

Nonostante i traguardi raggiunti nella modellazione, la metodologia proposta ha fatto emergere alcune criticità significative, le quali delineano in modo chiaro i futuri filoni di ricerca necessari per il settore. In primo luogo, la chimica qui proposta, pur avendo fornito ottimi riscontri con i test reali a disposizione, necessiterà di costanti aggiornamenti e di un bacino di dati più ampio per rimanere al passo con il continuo mutare della tecnologia delle batterie. In secondo luogo, la marcata carenza in letteratura di test sperimentali su scala reale ha impedito un'implementazione rigorosa dei sistemi di protezione attiva nella modellazione. Sebbene sia ragionevole ipotizzare che sistemi ad acqua, quali sprinkler e *water mist*, risultino efficaci per il contenimento dell'incendio al singolo veicolo, la particolare morfologia delle vetture elettriche – in cui i pacchi batteria sono tipicamente nel pianale dell'auto e difficilmente raggiungibili – preclude all'agente estinguente un accesso diretto al focolaio. Pertanto, prima di poter simulare nel software l'effetto di tali sistemi, sarà imperativo avviare campagne sperimentali di raccolta dati su veicoli interi, superando i limiti dei test condotti su singoli moduli batteria.

In conclusione, la sicurezza antincendio è stata per troppo tempo interpretata come un rigido vincolo progettuale. In una società tecnologicamente complessa, dove l'introduzione di nuovi sistemi di accumulo anticipa sistematicamente la regolamentazione, il solo rispetto formale delle norme, pur costituendo una base

imprescindibile, non appare più sufficiente. La sicurezza si configura oggi come una sfida etica, oltre che tecnica, che richiede all'ingegnere la responsabilità e la visione proattiva di adottare strumenti predittivi capaci di quantificare e mitigare il rischio reale, ponendo sempre al centro la tutela incondizionata della vita umana. Fino a quando la comunità scientifica non disporrà di database sperimentali completi e di parametri di spegnimento universalmente validati, affrontare le sfide della mobilità del futuro richiederà ai professionisti un'estrema sensibilità ingegneristica, unendo il massimo rigore dell'analisi prestazionale alla consapevolezza critica dei limiti insiti negli attuali strumenti di simulazione.

## RIFERIMENTI

- [1] eni, «Plenitude,» 2025. [Online].  
Available: <https://corporate.eniplenitude.com/it/one-plenitude-magazine/mobilita-elettrica/breve-storia-delle-auto-elettriche#>.
- [2] M. Alessandro, «Quattroruote,» 2021. [Online].  
Available: [https://www.quattroruote.it/news/tecnologia/2020/12/06/batterie\\_la\\_loro\\_evoluzione\\_dal\\_piombo\\_agli\\_elettrodi\\_a\\_secco.html](https://www.quattroruote.it/news/tecnologia/2020/12/06/batterie_la_loro_evoluzione_dal_piombo_agli_elettrodi_a_secco.html).
- [3] Movilia, 2025. [Online]. Available: <https://movilia.it/ibrido-serie-vs-ibrido-parallelo-funzionamento-e-vantaggi/>.
- [4] Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica, «Governo.it,» 2025. [Online].  
Available: <https://www.mase.gov.it/portale/mobilit%C3%A0-sostenibile-1>.
- [5] ACEA, 2025. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-3-in-february-2025-year-to-date-battery-electric-15-2-market-share/>.
- [6] eurostat, 2025. [Online].  
Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road\\_eqr\\_zev\\_\\_custom\\_18734589/default/line?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_eqr_zev__custom_18734589/default/line?lang=en).
- [7] ISPRA, 2017.
- [8] IEA, «Global EV Outlook 2025,» 31 Luglio 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>.
- [9] OICA, «Organization of Motor Vehicle Manufacturers,» [Online]. Available: <https://oica.net/statistics-sales/>.
- [10] HD motori, 2025. [Online]. Available: <https://www.hdmotori.it/classifica-produttori-batterie-2025-auto-elettriche/>.
- [11] R. Bisschop, O. Willstrand, F. Amon e M. Rosengren, Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles, RISE report 2019:50, 2019.
- [12] Bonnen battery, 2025. [Online].  
Available: <https://www.bonnenbatteries.com/it/ev-lithium-battery-thermal-runaway-trigger-mechanisms-global-standards-compared/>.
- [13] Flash battery, 2020. [Online].

- Available: <https://www.flashbattery.tech/it/blog/sicurezza-e-rischi-delle-batterie-al-litio/>.
- [14] Kamada power, [Online]. Available: <https://www.kmdpower.com/it/news/the-ultimate-guide-to-lithium-ion-battery-chemistries/>.
- [15] Flash battery, 2022. [Online].  
Available: <https://www.flashbattery.tech/it/blog/tipi-batterie-litio-quali-chimica-utilizzare/>.
- [16] D. Yih-Shing, S. Yujie, L. Xin, Z. Jiaojiao, W. Mingchen, Y. Wang, L. Xiaoying, J. Xiaoyu, Z. Zheng, Z. Shuo e Y. Gending, «Characterization on thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicles: A review,» *Journal of Energy Storage*, vol. 41, 2021.
- [17] emtez, 2024. [Online]. Available: <https://www.emtez.it/editorial/quali-sono-i-tipi-pi%C3%B9-comuni-di-batterie-agli-ioni-di-litio-disponibili>.
- [18] Fire Protection Research Foundation, *Lithium-Ion Batteries Hazard*, 2011.
- [19] RSA, *ELECTRIC VEHICLE CHARGING AND ENCLOSED CAR PARKS*, 2022.
- [20] G. R. K. von Leo Ronken, *Parkgaragen – ein mehrschichtiges Risiko? – Betrachtungen aus der Sicht der Feuerversicherung*, 2021.
- [21] AGCS, *THE ELECTRIC VEHICLES R-EV-OLUTION: FUTURE RISK AND INSURANCE IMPLICATIONS*, Greg Dobie and Joel Whitehead..
- [22] R. Bubbico, V. Greco e C. Menale, «Hazardous scenarios identification for Li-ion secondary batteries,» *Safety Science*, ottobre 2018.
- [23] A. Dorsz e M. Lewandowski, «Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of,» *Energies*, vol. 15, n. 1, 2021.
- [24] S. Shahid e M. Agelin-Chaab, «A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries,» *Energy Conversion and Management*, vol. 16, 2022.
- [25] D. Lisbona e T. Snee, «A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries,» *Process safety and environmental protection*, vol. 89, n. 6, 2011.
- [26] N. Kjeld, «Brandsikkerhed i garageanlaeg, oplag af litium-ion batterier og batterier til solcelleanlaeg i bygninger,» Denmark, 2022.
- [27] Vigili del fuoco, «Linee guida per la progettazione, realizzazione e l'esercizio di Sistemi di Accumulo di Energia Elettrica,» 2024.
- [28] National Transportation Safety Board, *Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles*, Washington D.C., 2020.

- [29] W. R. S. C. Z. F. H. L. W. L. Sun, «Thermal Runaway Characteristics and Modeling of LiFePO<sub>4</sub> Power Battery for Electric Vehicles,» *Automotive Innovation*, vol. 6, pp. 414-424, 2023.
- [30] ARUP, *Covered car parks - fire safety guidance for electric vehicles*, 2023.
- [31] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot e G. Marlair, «Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,» *Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2012*, pp. 183-194, settembre 2012.
- [32] N. Marotta, *Incendi 2: principi dell'ingegneria della sicurezza antincendio*, 2025.
- [33] J. Hynynen, O. Willstrand, P. Blomqvist e P. Andersson, «Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests,» Elsevier, 2023.
- [34] P. G. Cancelliere (CNVVF), «Valutazione su efficacia impianti di protezione attiva».
- [35] T. H. e. N. R. J. van der Graaf, «Fire safety of indoor car park accommodating electrically powered vehicles,» NIPV, Arnhem, 2021.
- [36] K. J. J. S. Q. W. S. K. Lin Zhang, «A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire,» *Fire Technology*, China, 2022.
- [37] D. Brzezinska e P. Bryant, «Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions.,» *Energies*, 2022.
- [38] C. C. S. Y. p. Z. X. Q. Shuai Yuan, «A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire,» *Journal of Energy Chemistry*, vol. 62, pp. 262-280, 2021.
- [39] Fire Safety Research Institute e la Fire Protection Research Foundation (FPRF), «FireEngineering,» Maggio 2025. [Online]. Available: [https://www.fireengineering.com/news/safety-advisory-hazard-involving-fire-blankets-for-ev-fire-suppression/?utm\\_source=fe\\_daily\\_newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=2025-6-2&oly\\_enc\\_id=0351F9949823E1E](https://www.fireengineering.com/news/safety-advisory-hazard-involving-fire-blankets-for-ev-fire-suppression/?utm_source=fe_daily_newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=2025-6-2&oly_enc_id=0351F9949823E1E).
- [40] European Commission, «GUIDANCE ON FIRE SAFETY FOR ELECTRIC VEHICLES PARKED AND CHARGING INFRASTRUCTURE IN COVERED PARKING SPACES,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025.
- [41] S. Olenik, M. Klassen e N. Hussain, «Classification of Modern Vehicle Hazards in Parking Structures & Systems – Ph II,» Fire Protection Research Foundation, Maryland USA, 2024.
- [42] Federal Roads Office, «Risk minimisation of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures,» 2020.

- [43] S. Kang, M. Kwon, J. Yoon Choi e S. Choi, «Full-scale fire testing of battery electric vehicles,» *Applied Energy*, vol. 332, 15 febbraio 2023.
- [44] «DM 3 agosto 2015 "Codice Prevenzione Incendi"».
- [45] G. Galeotti, «Autorimesse e veicoli elettrici: il coraggio normativo che serve all'Italia, alla luce della bozza della nuova RTV6,» *Ingenio*, 2025.
- [46] Suveren, «Fire protection guideline for car parks,» IFAB, Berlin, 2023.
- [47] C. M. D. K. R. L. G. e L. G. Lam, «Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles,» RISE, Baltimora, 2016.
- [48] E. Bekaert, J.-L. Dauvergne e E. J. I. T. Alvaro Herran, *Early Detection of Thermal Runaway Risks: Advanced Diagnostics for Safer Li-ion Battery Systems*, E. S. S. A. E. L. B. F. S. Challenges, A cura di, Lisbona, 2025.
- [49] Blockley W.V., *Temperature Tolerance: Man*, B. D. Book, A cura di, Federation of American Societies for Experimental Biology (FASEB), 1973, p. 781.
- [50] K. McGrattan, J. Floyd, S. Hostikka, R. McDermott, M. Vanella, E. Mueller e C. Paul, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST, 2025.
- [51] M. Kutschenreuter, S. Klüh, M. Lakkonen, R. Rothe e F. Leismann, «How electric vehicles change the fire safety design in underground structures,» in *Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Munich, 2020.
- [52] B. Girardin, V. Drean e M. El Houssami, «Fire safety engineering case study of an electric vehicle car park fire,» *Seventh International Conference on Fires in Vehicles*, Saint-Aubin, France, 2023.
- [53] H. Boehmer, M. Klassen e S. Olenick, «Fire Hazard Analysis of Modern Vehicles in Parking Facilities,» *Fire Technol*, vol. 57, pp. 2097-2127, 2021.
- [54] M. Kutschenreuter, A. Feltmann, T. Usner e F. Leismann, «Brandschutz in Tunnelanlagen bei Fahrzeugen mit neuen Energieträgern (NET): Erste Erkenntnisse aus Realbrandversuchen,» in *STUVA conference 2019*.
- [55] F. Cosi e C. Di Bari, «Le autorimesse ed i rischi di incendio dei veicoli moderni,» *antincendio*, Luglio 2021.
- [56] T. Liu, Y. Liu, X. Wang, X. Kong e G. Li, «Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium,» *Energy Conversion and Management*, n. 199, 2019.
- [57] M. Tohir, M. Zahirasri e M. Zahirasri, «Evaluating fire severity in electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A statistical approach to heat release rates,» *Fire Technology*, pp. 1 - 42, 2025.
- [58] M. Spearpoint e M. Stallwood, «Assessment of recent UK fire safety guidance for covered car parks and electric vehicles,» *Building Services Engineering Research and Technology*, 01 luglio 2024.

