



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
Anno accademico 2025/2026
Sessione di laurea marzo 2026

Gestione integrata della sicurezza antincendio:

modellazioni di Fire Safety Engineering e ricostruzioni
dimostrative di scenari emergenziali

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Vancetti

Candidato:

Emanuele Ricchiello

Correlatore:

Ing. Francesco Mantua
Geom. Paolo Mutton

Abstract

La Fire Safety Engineering è spesso impiegata come strumento di verifica progettuale, limitandone il potenziale alla dimostrazione del rispetto dei criteri di sicurezza previsti dalla normativa. Questa tesi ne propone invece un'applicazione estesa, nella quale la modellazione dinamica degli scenari di incendio e di esodo assume il ruolo di collegamento tra progetto antincendio, gestione della sicurezza e risposta all'emergenza.

La metodologia sviluppata non si limita alle analisi prestazionali finalizzate alla valutazione delle condizioni ambientali critiche, ma utilizza i risultati delle simulazioni per rappresentare in modo esplicito le conseguenze delle diverse strategie di sicurezza e delle scelte operative adottate in emergenza, trasformando la modellazione dinamica in uno strumento di formazione attiva, orientato alla comprensione delle criticità e alla ripetizione consapevole dei comportamenti adeguati.

L'approccio, integrato con contenuti multimediali, generati anche tramite AI, è applicato a un caso studio reale di compartimento multipiano ad uso uffici, dimostrando come la visualizzazione dinamica degli scenari possa migliorare consapevolezza, preparazione operativa ed efficacia complessiva del sistema di sicurezza antincendio.

Indice

1.	Introduzione.....	5
2.	Metodi e strumenti per la sicurezza antincendio.....	7
2.1.	Performance-based design.....	7
2.2.	SGSA	11
2.3.	Il Piano di Emergenza ed Evacuazione.....	15
2.4.	Formazione, informazione e addestramento degli operatori.....	19
2.5.	Apprendimento vicario	22
2.6.	BIM to GSA	25
2.7.	Realtà virtuale e aumentata	28
3.	Introduzione al caso studio.....	33
3.1.	Analisi del progetto LAD	33
3.2.	Progettazione antincendio	36
4.	Soluzione alternativa	39
4.1.	Caratteristiche dell'attività	39
4.2.	Caratteristiche degli occupanti.....	41
4.3.	Obiettivi di sicurezza e soglie di prestazione.....	45
4.4.	Scenari di incendio di progetto.....	46
4.5.	Calcolo del tempo di esodo RSET	48
4.6.	Scenario 1 – Incendio di materiale d'ufficio.....	52
4.6.1.	Caratterizzazione dell'incendio	52
4.6.2.	Determinazione di ASET per lo scenario 1	57
4.6.3.	Criterio $ASET > RSET$ per lo scenario 1	65
4.7.	Scenario 2 – Incendio di cavi su passerella in controsoffitto.....	66
4.7.1.	Caratterizzazione dell'incendio	66
4.7.2.	Determinazione di ASET per lo scenario 2	69
4.7.3.	Criterio $ASET > RSET$ per lo scenario 2	73
5.	Scenari aggiuntivi per la formazione.....	75

5.1.	Mancata compartimentazione del filtro.....	75
5.2.	Archivio non compartimentato	84
5.3.	Impianto di spegnimento automatico.....	100
5.4.	Sovraffollamento ai piani.....	104
6.	Attività della squadra di emergenza.....	113
6.1.	Definizione dei compiti.....	113
6.2.	Modellazione delle azioni	118
6.3.	Restituzione grafica.....	122
7.	Conclusione.....	133
8.	Indice delle figure	137
9.	Bibliografia.....	141
	Ringraziamenti	146

1. Introduzione

Nella pratica della progettazione antincendio, il raggiungimento della conformità normativa e l'impiego di strumenti avanzati di analisi non garantiscono necessariamente che un edificio sia gestibile in modo efficace durante un'emergenza reale. Spesso i risultati delle valutazioni tecniche restano confinati alla documentazione di progetto, senza tradursi in procedure operative chiare o in comportamenti adeguati da parte degli occupanti e degli addetti all'emergenza. La distanza tra progetto e risposta operativa rappresenta così una delle principali criticità nella gestione reale delle emergenze.

L'approccio prescrittivo ha assicurato nel tempo un quadro di riferimento stabile, fondato su requisiti definiti e criteri uniformi. La sua applicazione a edifici complessi o caratterizzati da condizioni d'uso variabili, però, evidenzia criticità legate alla difficoltà di rappresentare fenomeni dinamici quali l'organizzazione delle attività, la variabilità dell'affollamento e il comportamento umano in emergenza. In alcuni casi, il rispetto delle prescrizioni non è di per sé sufficiente a garantire l'efficacia delle strategie di sicurezza. L'introduzione della Fire Safety Engineering ha ampliato le possibilità di analisi progettuale, spostando l'attenzione dal rispetto delle prescrizioni al raggiungimento di obiettivi di sicurezza misurabili. La definizione di scenari di incendio di progetto e l'analisi quantitativa delle condizioni ambientali e dei processi di esodo permettono di valutare in modo più realistico le prestazioni del sistema edificio-occupanti-impianti.

Tuttavia, nella pratica professionale, questi strumenti vengono spesso utilizzati prevalentemente ai fini delle verifiche progettuali, con una limitata integrazione nella gestione operativa dell'emergenza. I risultati delle analisi prestazionali, espressi attraverso indicatori numerici e rappresentazioni tecniche, difficilmente vengono assimilati all'interno del sistema di gestione della sicurezza antincendio e del piano di emergenza ed evacuazione. Ne deriva una frammentazione tra il livello tecnico-specialistico delle valutazioni e il livello operativo, nel quale le persone sono chiamate ad agire in tempi ridotti e in condizioni di incertezza.

In tale contesto si colloca questo elaborato di ricerca, che indaga la possibilità di estendere l'utilizzo della FSE oltre la sola funzione di verifica, esplorandone il ruolo come strumento di supporto alla gestione della sicurezza e alla

preparazione delle persone all'emergenza. L'ipotesi di fondo è che la modellazione dinamica degli scenari di incendio ed esodo possa costituire un linguaggio comune tra progettisti, responsabili dell'attività e personale operativo, favorendo coerenza tra ipotesi di progetto, procedure gestionali e comportamenti attesi. La costruzione di scenari realistici mediante simulazioni numeriche avanzate consente non solo di verificare il criterio di sicurezza basato sul confronto tra tempo disponibile e tempo richiesto per l'esodo, ma anche di rendere esplicite le conseguenze delle scelte progettuali e delle azioni intraprese in emergenza.

La metodologia proposta si fonda sui principi dell'apprendimento vicario, inteso come processo attraverso il quale l'osservazione di comportamenti messi in atto da altri individui consente di interiorizzare modalità operative e di riprodurle in situazioni analoghe. In questo contesto, la visualizzazione di azioni corrette e scorrette, sia in condizioni di esercizio ordinario sia durante scenari di emergenza, permette di comprendere non solo le conseguenze di determinate scelte operative, ma soprattutto le modalità di intervento più efficaci da adottare. La rappresentazione comparativa di diversi scenari consente di trasformare i risultati della modellazione dinamica in strumenti di formazione e addestramento, favorendo una comprensione operativa delle procedure e delle dinamiche di emergenza. Attraverso immagini, sequenze e scenari simulati, le informazioni previste dalla Gestione della Sicurezza Antincendio e dal Piano di Emergenza ed Evacuazione vengono rese accessibili e interpretabili, supportando la memorizzazione e la ripetizione consapevole delle azioni corrette da mettere in atto in situazioni reali.

La tesi, svolta in collaborazione in un contesto aziendale all'interno del quale sono stati definiti obiettivi, scenari di riferimento e dati di base utilizzati per le analisi, mira allo sviluppo di un processo metodologico applicabile in situazioni reali e trasferibile ad altri progetti. Il caso studio di un compartimento multipiano ad uso uffici costituisce pertanto un contesto applicativo reale, coerente con esigenze progettuali e gestionali concrete, attraverso il quale è stato possibile verificare come l'integrazione tra progettazione prestazionale, gestione della sicurezza e formazione possa contribuire a ridurre la distanza tra le ipotesi di progetto e il comportamento atteso in condizioni di emergenza.

2. Metodi e strumenti per la sicurezza antincendio

2.1. Performance-based design

Nel contesto della prevenzione incendi, l'evoluzione del quadro normativo e tecnico ha condotto a un progressivo superamento di un'impostazione esclusivamente prescrittiva della sicurezza, a favore di un approccio fondato sulla valutazione prestazionale del rischio. Questo cambiamento non riguarda soltanto gli strumenti progettuali, ma implica una diversa concezione della sicurezza, intesa come capacità del sistema edificio-impianti-occupanti di garantire il raggiungimento degli obiettivi di tutela della vita umana, dei beni e dell'ambiente in condizioni realistiche di incendio. In questa prospettiva, la progettazione antincendio assume un ruolo centrale non solo nella definizione delle soluzioni tecniche, ma anche nella formalizzazione delle condizioni operative su cui si fonda la dimostrazione del livello di sicurezza.

Il Codice di Prevenzione Incendi costituisce oggi il riferimento normativo nazionale attraverso cui è stata introdotta una logica semiprestazionale, nella quale convivono l'impianto prestazionale (obiettivi, livelli di prestazione e strategie) e una componente ancora prescrittiva. In particolare, nell'adozione delle soluzioni conformi l'analisi del rischio e la calibrazione delle misure di sicurezza risultano già incorporate dal legislatore attraverso criteri, prestazioni attese e indicazioni progettuali che guidano il professionista verso esiti ritenuti accettabili senza necessità di dimostrazioni aggiuntive. Al tempo stesso, la struttura del Codice e la definizione di strategie antincendio consentono di superare la rigidità tipica delle regole tecniche tradizionali, permettendo di ricorrere a soluzioni alternative la cui efficacia deve essere motivata mediante un'adeguata valutazione tecnica.

In questo quadro, la Fire Safety Engineering si colloca come strumento metodologico di supporto poiché consente di quantificare le prestazioni del sistema di sicurezza e di verificare, in modo coerente con gli obiettivi, che le misure adottate garantiscano i livelli di sicurezza richiesti nelle specifiche condizioni di contesto. Il processo progettuale si articola in una fase preliminare di analisi qualitativa, finalizzata alla definizione degli obiettivi di sicurezza, all'individuazione dei pericoli rilevanti e alla selezione degli scenari di incendio di progetto, e in una fase di analisi quantitativa, destinata alla verifica delle soluzioni proposte mediante modelli di calcolo. Gli scenari di

incendio rappresentano condizioni credibili e rappresentative delle situazioni più gravose per l'attività e devono essere descritti considerando la sorgente d'incendio, l'ambiente fisico, le condizioni di ventilazione e la presenza dei sistemi di protezione.

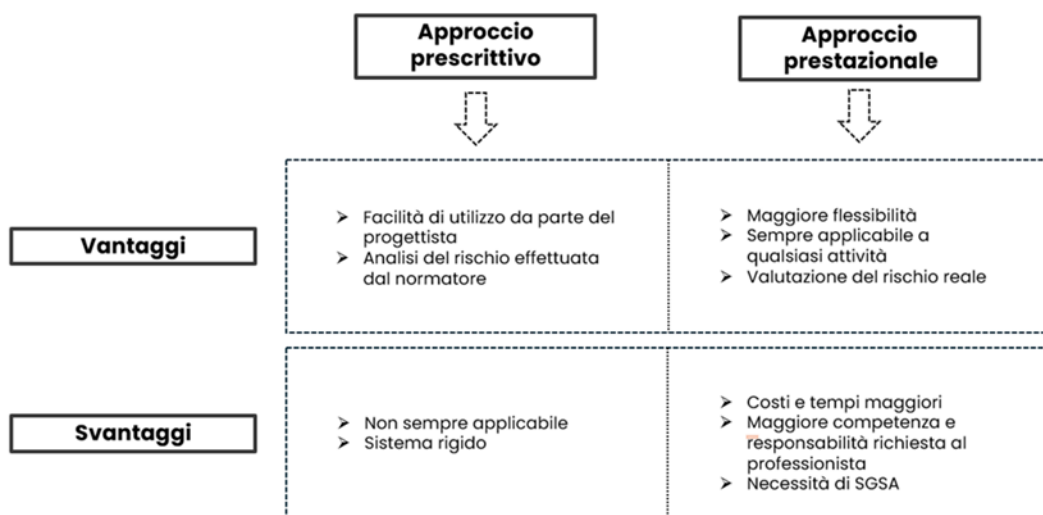


Figura 1: Approccio prescrittivo e prestazionale

Un elemento centrale della progettazione prestazionale è costituito dal confronto tra il tempo disponibile per l'esodo e il tempo richiesto per l'esodo. Il tempo disponibile per l'esodo è determinato dall'evoluzione dell'incendio e dal momento in cui le condizioni ambientali superano soglie di accettabilità incompatibili con la permanenza degli occupanti e con la transitabilità delle vie di fuga. La sua valutazione si basa sulla modellazione della dinamica dell'incendio e sull'analisi dei principali parametri critici, quali temperatura, irraggiamento termico, visibilità e concentrazioni di gas tossici e irritanti. Il tempo richiesto per l'esodo, invece, dipende dalla risposta degli occupanti all'emergenza e dalle caratteristiche degli spazi di esodo e comprende le fasi di rilevazione dell'incendio, diffusione dell'allarme, pre-movimento e movimento verso un luogo sicuro. Il confronto tra questi due tempi costituisce il criterio di verifica fondamentale per la salvaguardia della vita umana. Affinché gli obiettivi di sicurezza risultino soddisfatti, il tempo disponibile deve risultare superiore a quello richiesto, mantenendo un adeguato margine di sicurezza. Questo equilibrio può essere perseguito agendo sia sull'evoluzione dell'incendio, attraverso misure tecniche di controllo e contenimento, sia sulla risposta degli occupanti, mediante strategie organizzative, informative e formative. Ne deriva che la sicurezza prestazionale non è il risultato esclusivo di scelte impiantistiche, architettoniche o strutturali, ma di un insieme

integrato di misure che coinvolgono anche il comportamento umano. Il comportamento degli occupanti durante un'emergenza rappresenta una delle principali fonti di incertezza nella valutazione prestazionale. La risposta umana all'incendio non è immediata né uniforme, ma è influenzata da fattori cognitivi, sociali e ambientali che incidono in modo significativo sui tempi di reazione. Il tempo di pre-movimento risulta particolarmente critico, poiché dipende dalla capacità di riconoscere il pericolo, interpretare correttamente i segnali di emergenza e assumere una decisione di evacuazione. Fenomeni quali la ricerca di conferme, il comportamento imitativo, l'attaccamento sociale e la tendenza a recuperare oggetti personali possono generare ritardi rilevanti nell'avvio dell'esodo, con effetti diretti sul tempo richiesto complessivo.

A queste dinamiche si aggiungono le differenze legate alle caratteristiche individuali degli occupanti, quali età, condizioni psicofisiche e capacità motorie o sensoriali. La presenza di persone con esigenze specifiche richiede l'adozione di strategie dedicate e di misure organizzative di supporto, che devono essere coerenti con le ipotesi assunte in fase di progetto. La modellazione del comportamento umano nelle simulazioni di evacuazione risulta quindi essenziale per ottenere una valutazione realistica dei rischi e per verificare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza.

La modellazione dinamica degli scenari di incendio ed evacuazione costituisce lo strumento operativo attraverso cui queste complessità vengono integrate nel processo progettuale. I modelli di incendio consentono di descrivere l'evoluzione temporale dei fenomeni fisici e dei prodotti della combustione, mentre i modelli di evacuazione permettono di analizzare il movimento degli occupanti in relazione alle condizioni ambientali e alla configurazione degli spazi. L'affidabilità dei risultati ottenuti dipende tuttavia in modo diretto dalla correttezza delle ipotesi di base e dalla coerenza tra il modello di calcolo e le condizioni operative considerate.

Affollamenti, modalità di utilizzo degli ambienti, configurazione organizzativa, nonché disponibilità e affidabilità dei sistemi di sicurezza costituiscono condizioni di progetto che vengono definite e assunte esplicitamente in fase di progettazione prestazionale. Queste condizioni non rappresentano variabili libere, ma ipotesi vincolanti su cui si fondano le verifiche prestazionali e la dimostrazione del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza. Qualsiasi scostamento rispetto a quanto assunto in fase di progetto comporta la

perdita di validità delle verifiche effettuate e richiede una rivalutazione del rischio incendio e delle soluzioni adottate. Ne consegue che la progettazione prestazionale non può essere intesa come un processo statico o meramente autorizzativo, ma come un sistema che richiede il presidio costante delle condizioni operative assunte, affinché esse rimangano coerenti nel tempo con il quadro progettuale di riferimento.

Alla luce di queste considerazioni, il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza non dipende esclusivamente dalla qualità delle analisi ingegneristiche svolte, ma dalla capacità dell'organizzazione di garantire nel tempo la coerenza tra le ipotesi progettuali e le condizioni reali di esercizio dell'attività. Le prestazioni di sicurezza definite in fase di progetto devono essere mantenute attraverso un insieme strutturato di azioni organizzative, procedurali e di controllo, in grado di impedire scostamenti non governati e di assicurare la permanenza delle condizioni di sicurezza previste. In questa prospettiva, la dimensione gestionale assume un ruolo centrale nel garantire la continuità tra fase progettuale e fase operativa, ponendosi come elemento necessario per rendere effettive e durature le prestazioni di sicurezza.

[1], [2], [3], [4], [5], [6]

2.2. SGSA

Nell'ambito dell'approccio prestazionale la gestione della sicurezza antincendio rappresenta l'elemento di continuità tra la fase progettuale e quella operativa del sistema di sicurezza. Il concetto di gestione, descritto nel capitolo S5 del Codice, si pone come obiettivo quello di assicurare che i livelli di sicurezza stabiliti in sede di progetto siano effettivamente mantenuti nel tempo. Il Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio (SGSA) costituisce pertanto il dispositivo operativo attraverso il quale viene garantita la permanenza delle condizioni di sicurezza, assicurando che il comportamento dell'organizzazione e il funzionamento degli impianti, delle attrezzature e dei presidi antincendio restino coerenti con gli obiettivi di sicurezza definiti nella fase di progettazione. La centralità del SGSA deriva dal presupposto che la sicurezza antincendio non possa essere considerata una condizione statica o limitata al momento della richiesta del certificato o dell'approvazione del progetto, ma debba essere intesa come un processo dinamico e continuo, che accompagna l'intero ciclo di vita dell'attività. In questa prospettiva, la gestione diventa un requisito imprescindibile per la validità dell'intero sistema di prevenzione incendi: essa consente infatti di garantire che le misure tecniche e impiantistiche previste dal progetto mantengano nel tempo la loro efficacia, che le condizioni di utilizzo dell'attività non si discostino dalle ipotesi di progetto e che eventuali modifiche, siano esse strutturali, impiantistiche, gestionali o funzionali, vengano valutate in termini di impatto sulla valutazione del rischio incendio. Ogni modifica rispetto a quanto valutato in fase progettuale, deve quindi essere analizzata e approvata, con aggiornamento della documentazione tecnica e garantendo un mantenimento dei livelli di sicurezza prestabiliti.

Il SGSA, come definito dal Codice e dai riferimenti normativi collegati quali il DM 9 maggio 2007, il DM 7 agosto 2012 e le linee guida UNI-INAIL, si configura come uno strumento gestionale volto a individuare e controllare, all'interno della struttura organizzativa dell'attività, responsabilità, procedure, risorse e modalità operative necessarie a garantire la sicurezza antincendio. Esso opera su due piani differenti: da una parte assicura la gestione della sicurezza in esercizio, cioè la costante osservanza delle misure di prevenzione e protezione, dall'altra disciplina la gestione dell'emergenza, ovvero l'insieme delle procedure di risposta organizzativa agli eventi incidentali. Questi due

aspetti, strettamente interconnessi, concorrono alla realizzazione di un sistema unitario, in grado di mantenere nel tempo l'efficacia delle misure di sicurezza e di garantire un'adeguata capacità di risposta in caso di incendio. Il SGSA trova quindi il suo fondamento nel principio di coerenza e continuità tra progetto e gestione, che costituisce uno dei punti principali dell'approccio prestazionale. Nel momento in cui il progetto antincendio viene sviluppato attraverso la FSE, esso si basa su un insieme di ipotesi, parametri e condizioni operative che definiscono il comportamento del sistema edificio-occupanti-impianti in caso d'incendio, definendo limitazioni e condizioni individuate durante l'analisi del rischio. Queste ipotesi devono essere garantite nel tempo, poiché ogni deviazione da esse potrebbe compromettere la validità dei risultati progettuali e, di conseguenza, la sicurezza dell'attività. Il rapporto tra progettista e responsabile dell'attività assume per questa ragione una valenza cruciale. Il primo, nell'elaborazione del modello di gestione, definisce e documenta nella relazione tecnica le misure, le condizioni e le limitazioni necessarie al mantenimento del livello di sicurezza, fornendo un quadro operativo di riferimento al responsabile dell'attività. Quest'ultimo, a sua volta, è tenuto a tradurre le indicazioni in procedure, controlli e azioni concrete, adottando un sistema di gestione adeguato alla complessità dell'attività. Il SGSA si configura dunque come il risultato di una corresponsabilità tecnica e gestionale, in cui il progetto fornisce la struttura di riferimento e la gestione ne assicura la corretta attuazione ed efficacia.

La normativa prevede che il sistema di gestione debba includere un insieme di processi finalizzati al controllo complessivo del rischio incendio. Questi processi riguardano l'organizzazione del personale, l'identificazione dei pericoli, il controllo operativo, la gestione delle modifiche, la pianificazione dell'emergenza, la sicurezza delle squadre di soccorso, la manutenzione dei sistemi di protezione e il riesame periodico del sistema. L'integrazione di questi elementi all'interno di una struttura coerente consente di trasformare la sicurezza da un insieme di prescrizioni statiche a un sistema dinamico di gestione, capace di reagire ai cambiamenti dell'organizzazione e dell'ambiente operativo. Uno dei principi cardini del SGSA è appunto il controllo operativo, inteso come la capacità dell'organizzazione di mantenere sotto controllo le condizioni di rischio e i parametri stabiliti nel progetto. Ciò comporta l'adozione di procedure di sorveglianza e manutenzione, la pianificazione di verifiche periodiche e la registrazione sistematica delle

attività svolte. Il registro dei controlli, previsto espressamente dal Codice, rappresenta un punto fondamentale di questo processo: esso attesta il mantenimento nel tempo della funzionalità delle misure antincendio e costituisce la base informativa per ogni eventuale revisione o aggiornamento del sistema. Il controllo operativo non si limita tuttavia all'aspetto tecnico, ma include anche la gestione documentale e la definizione di procedure per le condizioni ordinarie, anomale ed emergenziali, assicurando la tracciabilità e la riproducibilità delle azioni di sicurezza.

La dimensione organizzativa del SGSA si concretizza nella definizione di ruoli, responsabilità e competenze. L'individuazione delle figure coinvolte, la pianificazione delle attività e la distribuzione delle risorse costituiscono il presupposto per l'efficacia dell'intero sistema, che non si limita a prescrivere procedure, ma struttura un vero e proprio modello organizzativo della sicurezza, nel quale la gestione del rischio d'incendio diventa parte integrante della gestione complessiva dell'attività. La formazione e l'informazione del personale, che saranno oggetto di approfondimento nel capitolo successivo, rappresentano una componente essenziale di questo modello, poiché la competenza degli operatori costituisce il principale fattore di affidabilità del sistema.

Altro aspetto di rilievo è il controllo delle prestazioni, attraverso cui si verifica nel tempo la conformità del sistema alle condizioni progettuali e ai requisiti normativi. Questo processo si basa su riscontri oggettivi, quali la valutazione degli incidenti, l'esito delle prove e delle ispezioni, le analisi delle anomalie di funzionamento e la verifica del mantenimento delle competenze professionali del personale addetto. L'obiettivo è assicurare che il livello di sicurezza rimanga coerente con quello inizialmente previsto, individuando tempestivamente eventuali scostamenti o criticità. In questo modo, il SGSA assume una valenza di miglioramento continuo, che lo avvicina ai sistemi di gestione della sicurezza e salute sul lavoro di matrice UNI-INAIL e OHSAS18001, con i quali condivide la logica di pianificazione, attuazione, verifica e riesame. La manutenzione dei sistemi di protezione antincendio rappresenta un altro ambito operativo di particolare rilievo. Essa deve essere effettuata a regola d'arte e nel rispetto delle norme tecniche di riferimento, da personale qualificato e garantendo la costante efficienza delle misure di prevenzione e protezione. Il piano di mantenimento del livello di sicurezza, previsto dal Codice, integra le attività di controllo tecnico con la gestione delle risorse

umane e organizzative, assicurando un approccio sistematico alla conservazione delle condizioni di sicurezza nel tempo.

Ulteriore elemento da tenere in considerazione all'interno del SGSA il controllo e la revisione periodica del sistema stesso. Il responsabile dell'attività è tenuto ad effettuare valutazioni periodiche del SGSA, volte ad assicurarne la sua efficienza, la conformità alle norme, l'idoneità e la necessità di eventuali correzioni. Questo processo di revisione, analogo al riesame della direzione nei sistemi di gestione della qualità e della sicurezza, costituisce il momento in cui l'esperienza operativa e gli esiti dei controlli si traducono in miglioramento organizzativo e tecnico. In questo modo, la gestione della sicurezza antincendio si configura come un ciclo continuo di pianificazione, attuazione, verifica e aggiornamento, coerente con i principi dell'approccio prestazionale e della gestione del rischio. All'interno di questo quadro, la pianificazione dell'emergenza assume una funzione di raccordo tra la gestione ordinaria e la risposta agli eventi critici. Essa rappresenta il momento in cui la struttura gestionale, le procedure operative e la formazione del personale si traducono in capacità di azione concreta. Pur rientrando a pieno titolo nel sistema di gestione della sicurezza, la pianificazione dell'emergenza costituisce un ambito specifico che merita un'analisi autonoma. Essa, infatti, integra gli aspetti organizzativi e tecnici della gestione con le strategie di esodo, di allarme e di intervento, configurandosi come la componente dinamica del sistema di sicurezza. Nel contesto dell'approccio prestazionale, la pianificazione dell'emergenza non è solo un adempimento procedurale, ma una misura progettuale funzionale al conseguimento degli obiettivi di sicurezza per la vita umana, i beni e l'ambiente. Essa rappresenta dunque la naturale prosecuzione della gestione in esercizio, completando il ciclo della sicurezza con la dimensione operativa della risposta.

[4], [7]

2.3. *Il Piano di Emergenza ed Evacuazione*

Il Piano di Emergenza ed Evacuazione (PEE) rappresenta lo strumento operativo fondamentale per garantire un'organizzazione efficace della risposta agli eventi incidentali. La sua funzione si colloca nel sistema più ampio della Gestione della Sicurezza Antincendio (GSA), di cui costituisce la componente dinamica e reattiva, finalizzata a coordinare le azioni da intraprendere in caso di incendio per salvaguardare la vita delle persone, contenere i danni ai beni e assicurare la continuità delle condizioni di sicurezza. Il PEE non è solo un adempimento formale, ma un elemento essenziale della pianificazione della sicurezza, strettamente connesso con le logiche dell'ingegneria della sicurezza antincendio e con i principi gestionali che governano il sistema di prevenzione. La normativa nazionale che disciplina il piano di emergenza trova il suo principale riferimento nel *DM 2 settembre 2021*, contenente i "Criteri per la gestione dei luoghi di lavoro in esercizio ed in emergenza e caratteristiche dello specifico servizio di prevenzione e protezione antincendio", conosciuto come "*Decreto GSA*". Esso ha sostituito le disposizioni precedenti contenute nel *DM 10 marzo 1998*, armonizzando il quadro normativo con il *D.lgs. 81/2008* e con il *DM 3 agosto 2015*. In particolare, l'allegato II del Decreto GSA definisce in modo dettagliato i contenuti minimi del piano di emergenza, le modalità di redazione, aggiornamento e coordinamento, nonché i requisiti organizzativi connessi alla sua attuazione. Il piano è obbligatorio in tutti i luoghi di lavoro per i quali ricorre l'obbligo di valutazione dei rischi ai sensi dell'art. 2, comma 2, del decreto stesso, e deve essere predisposto mantenuto aggiornato dal datore di lavoro. La struttura e la funzione del PEE discendono direttamente dal principio secondo cui la gestione dell'emergenza non può essere improvvisata, ma deve essere oggetto di una pianificazione preventiva, documentata e coerente con le condizioni di rischio specifiche dell'attività. L'art. 3 del suddetto decreto stabilisce che il piano debba contenere le azioni che i lavoratori devono mettere in atto in caso di incendio, le procedure per l'evacuazione, le modalità di richiesta dell'intervento dei Vigili del Fuoco e le misure di assistenza alle persone con esigenze speciali. In tal senso, il PEE costituisce un documento tecnico-gestionale volto a garantire la tempestività, la coordinazione e l'efficacia delle operazioni in caso di emergenza, traducendo in procedure operative i principi di prevenzione e protezione che governano il

il sistema di sicurezza antincendio. Il decreto prevede inoltre che il piano identifichi un adeguato numero di addetti al servizio antincendio, incaricati di sovrintendere e attuare le procedure previste. Questi addetti devono essere designati in numero congruo rispetto alle dimensioni e alla complessità dell'attività, nonché in funzione delle turnazioni e delle assenze prevedibili. L'efficacia del piano, infatti, dipende non solo dalla chiarezza delle procedure, ma anche dalla presenza di un'organizzazione interna in grado di garantire la continuità della gestione dell'emergenza. Un altro aspetto importante introdotto dal DM 2 settembre 2021 riguarda l'obbligo di aggiornamento del piano di emergenza. Il legislatore ha infatti previsto che il PEE sia oggetto di revisione quando vi siano modifiche che possono alterare le misure di prevenzione e protezione, come variazioni strutturali, impiantistiche, organizzative o di destinazione d'uso. Questo aggiornamento deve essere accompagnato da un'adeguata informazione ai lavoratori e dal coinvolgimento diretto degli addetti alla gestione dell'emergenza, garantendo così la coerenza del sistema e la consapevolezza diffusa delle procedure. La logica su cui si basa questo aggiornamento è quella della gestione dinamica del rischio, secondo cui la sicurezza non è un valore statico, ma un processo soggetto a continue verifiche e miglioramenti.

Il piano di emergenza deve essere redatto in forma scritta e basato su istruzioni chiare e documentate. Esso deve riportare le caratteristiche dei luoghi, con particolare riferimento alle vie di esodo e alle compartimentazioni antincendio, le modalità di rilevazione e diffusione dell'allarme, il numero e la distribuzione delle persone presenti, i lavoratori esposti a rischi particolari e il livello di formazione del personale. Il piano deve inoltre descrivere i compiti del personale con funzione di sicurezza, i provvedimenti per assicurare la diffusione delle informazioni, le procedure per la chiamata dei soccorsi e l'assistenza alle persone con esigenze speciali. A tal proposito, Il decreto dedica specifica attenzione alla tutela di quest'ultime, imponendo che il datore di lavoro individui le necessità particolari e preveda misure di supporto adeguate, tra cui modalità di allarme accessibili, percorsi agevolati e sistemi di comunicazione multisensoriale, in coerenza con la norma UNI EN 17210:2021 sull'accessibilità e fruibilità dell'ambiente costruito. Elemento fondamentale del PEE è senza dubbio la rappresentazione grafica dei luoghi e dei presidi antincendio. Il decreto prescrive infatti che il piano contenga una o più planimetrie aggiornate, nelle quali siano riportate la distribuzione degli spazi,

le vie di esodo, i compartimenti antincendio, l'ubicazione delle attrezzature e degli impianti di estinzione, dei sistemi di allarme e della centrale di controllo, nonché dei dispositivi di sezionamento e intercettazione degli impianti. Queste rappresentazioni grafiche costituiscono strumenti di supporto operativo essenziali, sia per il personale interno che per i soccorritori esterni, facilitando l'orientamento e la rapidità degli interventi.

Un ulteriore aspetto disciplinato dal Decreto GSA riguarda il coordinamento dei piani di emergenza in caso di più attività ubicate nello stesso edificio ma appartenenti a titolari diversi. In questi casi, il decreto impone la redazione di piani coordinati, al fine di garantire coerenza e integrazione delle procedure, evitando sovrapposizioni o interferenze che possano compromettere l'efficacia complessiva della gestione dell'emergenza. Ciò riflette la necessità di una visione sistemica della sicurezza, che consideri le interdipendenze fisiche e organizzative tra le diverse attività, coerentemente con il concetto di promiscuità trattato anche nel capitolo S.5 del codice. Il decreto prevede inoltre la possibilità di istituire un centro di gestione delle emergenze, dove è previsto da norme specifiche o ritenuto opportuno in base alla valutazione dei rischi. Questo centro, dotato di strumentazioni e collegamenti idonei, consente il coordinamento in tempo reale delle operazioni di soccorso e rappresenta una misura organizzativa avanzata per le attività di maggior complessità, evidenziando come la gestione dell'emergenza sia parte integrante della progettazione della sicurezza e non un elemento accessorio e confermando la piena integrazione tra pianificazione, organizzazione e risposta operativa. Il piano di emergenza ed evacuazione si inserisce, dunque, nel più ampio sistema di gestione della sicurezza e costituisce la traduzione pratica degli obiettivi di sicurezza definiti in fase di progettazione. Esso rappresenta il punto di convergenza tra la fase progettuale e la fase gestionale dell'attività, traducendo in termini organizzativi e procedurali le prestazioni di sicurezza determinate attraverso l'applicazione della normativa. La sua redazione non può prescindere, in caso di utilizzo della FSE, dalle analisi di rischio e degli scenari di incendio elaborati nel progetto prestazionale, dai quali derivano le strategie di evacuazione, le modalità di allarme e i tempi di esodo da verificare in relazione al criterio ASET/RSET. In questa prospettiva, il PEE diventa parte integrante del processo di validazione del progetto, contribuendo alla verifica del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza prefissati.

Dal punto di vista gestionale, il piano costituisce anche lo strumento attraverso cui si concretizza la formazione e l'addestramento del personale, elementi imprescindibili per l'efficacia della gestione dell'emergenza. La conoscenza delle procedure, la familiarità con le vie di esodo e la capacità di agire con tempestività sono risultati che si ottengono solo mediante un percorso di informazione e formazione sistematico, che datore di lavoro è tenuto a garantire in conformità D.lgs. 81/2008 e dal DM 2 settembre 2021. Risulta quindi indispensabile, un processo di formazione, informazione e addestramento degli operatori, al fine di garantire l'efficacia di quanto previsto all'interno del sistema di gestione della sicurezza e soprattutto del piano di emergenza.

[4], [7]

2.4. *Formazione, informazione e addestramento degli operatori*

All'interno del sistema di gestione della sicurezza antincendio, la formazione, l'informazione e l'addestramento costituiscono i principali strumenti di garanzia della competenza operativa e della consapevolezza organizzativa. Essi assicurano che le misure di prevenzione e protezione, definite nella fase di progettazione, possano trovare effettiva applicazione durante l'esercizio dell'attività. In questa prospettiva, la sicurezza non è mai una condizione statica, ma un processo dinamico e continuo che si fonda sulla conoscenza e sulla partecipazione consapevole di tutte le persone coinvolte. Per il quadro normativo di riferimento è delineato dal Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro, ovvero il D.lgs. 81/2008, che definisce i principi fondamentali in materia di informazione, formazione e addestramento, fornendo le definizioni ufficiali dei tre concetti che rappresentano le basi teoriche e operative dell'intero sistema:

- *Formazione*: Processo educativo attraverso il quale trasferire ai lavoratori ed agli altri soggetti del sistema di prevenzione e protezione aziendale conoscenze e procedure utili alla acquisizione di competenze per lo svolgimento in sicurezza dei rispettivi compiti in azienda e all'identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi (*art.2, comma1, lett. aa, D.lgs. 81/08*)
- *Informazione*: Complesso delle attività dirette a fornire conoscenze utili alla identificazione, alla riduzione e alla gestione dei rischi in ambiente di lavoro (*art.2, comma1, lett. bb, D.lgs. 81/08*)
- *Addestramento*: Complesso delle attività dirette a fare apprendere ai lavoratori l'uso corretto di attrezzature, macchine, impianti, sostanze, dispositivi, anche di protezione individuale, e le procedure di lavoro (*art.2, comma1, lett. cc, D.lgs. 81/08*)

Queste tre definizioni, che il legislatore distingue in modo preciso, individuano un sistema progressivo e integrato di trasmissione del sapere e delle competenze: l'informazione fornisce la conoscenza dei rischi, la formazione trasferisce le competenze per gestirli, e l'addestramento consente di applicare concretamente le procedure di sicurezza. Questa ripartizione è coerente con l'impostazione della FSE, che integra la dimensione tecnica, organizzativa e

comportamentale in un unico modello prestazionale. Gli articoli 36, 37 e 73 del testo unico definiscono nel dettaglio gli obblighi del datore di lavoro rispetto a questi tre strumenti. L'articolo 36 disciplina l'informazione dei lavoratori, stabilendo che il datore di lavoro debba garantire una comunicazione chiara e comprensibile sui rischi per la salute e la sicurezza, sulle procedure di primo soccorso, di lotta antincendio e di evacuazione, nonché sui nominativi degli addetti e dei responsabili del servizio di prevenzione e protezione. L'articolo 37 si concentra invece sulla formazione, imponendo al datore di lavoro l'obbligo di assicurare a ciascun lavoratore una formazione "sufficiente ed adeguata" in materia di salute e sicurezza. La formazione deve essere effettuata all'inizio del rapporto di lavoro, in occasione di cambiamenti di dimensione o di introduzione di nuove tecnologie o sostanze, e deve essere periodicamente aggiornata. In particolare, il comma 9 prevede che i lavoratori incaricati dell'attività di prevenzione incendi, lotta antincendio, evacuazione e gestione dell'emergenza ricevano una formazione specifica e un aggiornamento periodico, ponendo un esplicito collegamento tra la normativa generale della sicurezza e la gestione del rischio incendio. Il datore di lavoro deve assicurarsi che i lavoratori incaricati dispongano di ogni necessaria informazione e istruzione e ricevano un'adeguata formazione e addestramento. Il legislatore sottolinea così il principio secondo cui la competenza operativa è condizione imprescindibile per l'efficacia delle misure di prevenzione, in quanto un'attrezzatura sicura non garantisce di per sé la sicurezza se il suo utilizzatore non è correttamente formato e addestrato. Nel contesto della gestione della sicurezza antincendio, prevista dal Codice, queste disposizioni assumono un valore strategico, e vengono riprese e integrate all'interno del D.M. 2 settembre 2021. La GSA rappresenta la misura organizzativa e gestionale finalizzata al mantenimento nel tempo del livello di sicurezza antincendio, e la formazione ne costituisce il principale strumento di attuazione. La sicurezza, infatti, non è assicurata unicamente dalla conformità del progetto alle norme tecniche, ma dalla capacità dell'organizzazione di gestire coerentemente le procedure e le risorse. In questo senso, il personale formato e addestrato diviene parte integrante del sistema di protezione: la competenza umana si aggiunge, come misura prestazionale, ai dispositivi tecnologici e alle strategie di esodo progettuali. Il Decreto GSA, che aggiorna i criteri di gestione in esercizio di emergenza dei luoghi di lavoro, ha introdotto prescrizioni specifiche in materia di formazione antincendio. Il decreto impone che il datore di lavoro assicuri ai

lavoratori incaricati della prevenzione incendi, della lotta antincendio e della gestione dell'emergenza una formazione adeguata ed aggiornata, correlata alla tipologia di rischio dell'attività. Le modalità e i livelli formativi (rischio basso, medio ed elevato) sono definiti in base alla complessità del contesto e alle misure di sicurezza previste dal Piano di Emergenza ed Evacuazione. La formazione non è più vista come un adempimento isolato, ma come una misura organica di gestione inserita nel ciclo continuo di pianificazione, attuazione, controllo e miglioramento tipico del SGSA. La formazione e l'addestramento assumono inoltre un ruolo determinante nella verifica del mantenimento delle prestazioni di sicurezza. Così come le attrezzature e gli impianti richiedono manutenzione periodica per conservare la loro efficienza, anche le competenze del personale devono essere oggetto di aggiornamento e verifica continua. Il PEE, ad esempio, trova la propria efficacia solo se gli operatori coinvolti ne conoscono i contenuti, sanno interpretarne le procedure e le hanno sperimentate attraverso l'addestramento. In assenza di esperienza anche il piano più accurato rimarrebbe inefficace.

L'interazione tra progettazione prestazionale e formazione del personale diventa dunque un elemento essenziale per la validazione del progetto stesso. Sotto il profilo organizzativo, la formazione e l'informazione concorrono alla costruzione di una cultura della sicurezza, intesa come insieme condiviso di conoscenze, valori e comportamenti orientati alla prevenzione, condizione necessaria affinché le procedure e i piani elaborati nell'ambito del SGSA diventino parte integrante della prassi quotidiana e non rimangano meri adempimenti documentali. L'efficacia del sistema, infatti, dipende dalla consapevolezza collettiva del rischio e dalla capacità di ogni soggetto di riconoscere il proprio ruolo nella gestione della sicurezza.

[8], [9]

2.5. *Apprendimento vicario*

L'apprendimento vicario rappresenta un meccanismo cognitivo di particolare rilevanza per il trasferimento di comportamenti operativi in sistemi complessi caratterizzati da condizioni di rischio, nei quali l'esperienza diretta risulta limitata o difficilmente replicabile. Questo meccanismo è stato formalizzato nella teoria dell'apprendimento sociale sviluppata da Albert Bandura, secondo cui gli individui possono acquisire nuovi comportamenti osservando le azioni di altri soggetti e le conseguenze ad esse associate, senza la necessità di un coinvolgimento diretto nello scenario di rischio. Il comportamento umano non è esclusivamente il risultato di rinforzi sperimentati in prima persona, ma deriva da processi di modellazione cognitiva che consentono di anticipare gli esiti delle azioni sulla base di esperienze osservate. Ciò assume un ruolo centrale nei contesti analizzati dalla Fire Safety Engineering, nei quali il comportamento umano costituisce una variabile critica per il raggiungimento degli obiettivi prestazionali di sicurezza. Dal punto di vista operativo, Bandura descrive l'apprendimento osservazionale come un processo articolato in fasi di attenzione, ritenzione, riproduzione e motivazione. In termini ingegneristici, queste fasi possono essere interpretate come condizioni necessarie affinché un'informazione comportamentale venga acquisita, memorizzata e successivamente riprodotta in condizioni operative reali. La fase attentiva dipende dalla chiarezza del modello osservato e dalla leggibilità dell'azione all'interno dello scenario; la ritenzione comporta la codifica simbolica dell'azione in strutture cognitive stabili; la riproduzione riguarda la capacità di tradurre tali rappresentazioni in un comportamento coerente; infine, la motivazione incide sulla probabilità di attivazione del comportamento appreso. In situazioni di emergenza, caratterizzate da stress elevato e ridotta disponibilità decisionale, la presenza di schemi comportamentali già interiorizzati attraverso osservazione contribuisce in modo significativo alla riduzione degli errori e all'aumento dell'affidabilità della risposta umana.

In questo quadro si colloca il ruolo delle simulazioni visive come strumenti di supporto all'apprendimento vicario. Le simulazioni consentono di rappresentare in modo dinamico e controllato scenari complessi, rendendo osservabili sequenze di eventi, interazioni tra soggetti e ambiente e conseguenze delle decisioni operative. La metanalisi condotta da Pieter

Wouters evidenzia come l'impiego di simulazioni e serious games produca, in media, risultati di apprendimento superiori rispetto ai metodi di istruzione convenzionali, sia in termini di acquisizione delle conoscenze sia di ritenzione nel tempo. Gli autori attribuiscono tali risultati alla capacità delle simulazioni di attivare processi cognitivi profondi, favorendo la costruzione di modelli mentali coerenti con le dinamiche del sistema reale e con le decisioni richieste in contesti operativi complessi.

Un contributo particolarmente rilevante delle simulazioni visive risiede nella possibilità di rendere esplicito il confronto tra azioni corrette e azioni errate. L'apprendimento vicario è fortemente influenzato dall'osservazione delle conseguenze associate ai comportamenti osservati, in particolare quando le conseguenze sono negative. La visualizzazione degli errori consente al discente di acquisire informazioni critiche senza dover sperimentare direttamente le conseguenze dell'azione errata, svolgendo una funzione preventiva che risulta essenziale nei contesti di sicurezza. Le simulazioni permettono di mostrare in modo chiaro il nesso causa-effetto tra decisioni operative e sviluppo dello scenario, facilitando la costruzione di schemi cognitivi orientati alla prevenzione e alla riduzione della probabilità di errore umano. Il valore operativo di questi meccanismi è stato confermato anche in ambito di formazione alla sicurezza sul lavoro attraverso studi di tipo meta-analitico. In particolare, l'analisi condotta da Michael J. Burke sull'efficacia dei metodi di formazione in materia di salute e sicurezza rileva come gli approcci ad alto livello di coinvolgimento risultino significativamente più efficaci rispetto ai metodi di tipo passivo. I programmi formativi basati su modeling comportamentale, osservazione di azioni corrette ed esercitazioni producono miglioramenti più marcati sia nella conoscenza della sicurezza sia nei comportamenti sicuri effettivamente adottati dai lavoratori, evidenziando come l'osservazione strutturata di comportamenti rappresenti un elemento chiave per il trasferimento di competenze operative in ambito safety-critical. L'integrazione tra i principi dell'apprendimento vicario e i risultati emersi dagli studi sull'efficacia dei metodi di formazione consente di interpretare le simulazioni visive non come semplici strumenti illustrativi, ma come componenti attive dei sistemi di addestramento. In questa prospettiva, la visualizzazione di comportamenti corretti e scorretti all'interno di scenari simulati permette di standardizzare le risposte operative e di ridurre la variabilità individuale, aumentando la prevedibilità del comportamento

umano. I metodi di formazione basati su modeling e osservazione risultano particolarmente efficaci nel promuovere comportamenti sicuri, confermando empiricamente i presupposti teorici formulati da Bandura sull'apprendimento osservazionale. Nel contesto della Fire Safety Engineering, la formazione e l'addestramento assumono un ruolo strategico nel garantire che le soluzioni progettuali si traducano in comportamenti coerenti con gli obiettivi di sicurezza. Sebbene la FSE sia orientata primariamente alla valutazione prestazionale degli scenari di incendio, l'affidabilità del sistema dipende in misura significativa dalla risposta umana. Le simulazioni visive derivate da modelli di incendio ed evacuazione possono essere impiegate come strumenti di supporto alla formazione, consentendo agli operatori di osservare l'evoluzione dello scenario e l'impatto delle decisioni assunte. Attraverso l'apprendimento vicario, queste osservazioni contribuiscono alla costruzione di modelli mentali anticipatori, che possono essere richiamati in fase operativa riducendo i tempi di reazione e migliorando la coerenza delle azioni intraprese. [10], [11], [12]

2.6. *BIM to GSA*

L'utilizzo del Building Information Modeling applicato alla gestione della sicurezza antincendio consente di estendere il modello informativo digitale oltre la fase progettuale, trasformandolo in uno strumento operativo a supporto della Gestione della Sicurezza Antincendio. In questa prospettiva, il BIM non viene inteso come un semplice modello geometrico, ma come un'infrastruttura informativa capace di raccogliere, organizzare e rendere interrogabili i dati necessari al mantenimento nel tempo delle condizioni di sicurezza definite in fase di progetto. L'integrazione tra BIM e GSA risponde all'esigenza, tipica dell'approccio prestazionale, di garantire la coerenza tra le ipotesi progettuali e l'esercizio reale dell'attività, assicurando il presidio continuo delle condizioni operative assunte.

La disponibilità di un modello informativo federato, strutturato secondo logiche di interoperabilità, consente di associare agli elementi rilevanti ai fini antincendio non solo informazioni geometriche, ma anche dati prestazionali, requisiti normativi e informazioni gestionali. In questo modo, le strategie antincendio definite in sede progettuale possono essere tradotte in oggetti digitali dotati di proprietà specifiche, coerenti con le misure previste dal Codice di Prevenzione Incendi e, in particolare, con la strategia S.5 relativa alla gestione della sicurezza antincendio. Il modello informativo diventa così il supporto digitale attraverso cui organizzare le informazioni necessarie alla gestione in esercizio e alla pianificazione delle attività di controllo e manutenzione.

Un ulteriore contributo rilevante dell'approccio BIM-Based è rappresentato dalla possibilità di esportare il modello geometrico tridimensionale verso software specialistici di simulazione, garantendo l'interoperabilità tra le diverse piattaforme utilizzate nel processo di progettazione prestazionale. Attraverso l'impiego di formati aperti e standardizzati, il modello BIM può essere utilizzato come base geometrica per la costruzione degli scenari di incendio e di esodo, riducendo la necessità di ricostruzioni manuali e limitando il rischio di incongruenze tra il modello di progetto e i modelli di simulazione. Questa interoperabilità consente di mantenere un allineamento coerente tra geometria, compartimentazioni, percorsi di esodo e configurazione degli spazi, migliorando l'affidabilità complessiva delle analisi FSE e rafforzando il legame tra progettazione, verifica prestazionale e gestione.

All'interno di questo quadro si collocano anche le esperienze di digitalizzazione della prevenzione incendi promosse a livello istituzionale, tra cui il progetto *Fire Digital Check*. Questa iniziativa, orientata alla traduzione del Codice di Prevenzione Incendi in un linguaggio digitale interoperabile, evidenzia il potenziale del BIM come strumento di verifica, controllo e tracciabilità delle misure di sicurezza. Pur non costituendo oggetto diretto di applicazione nel presente lavoro, il Fire Digital Check rappresenta un riferimento concettuale significativo, poiché introduce il principio secondo cui le prescrizioni normative e i requisiti prestazionali possono essere codificati in forma parametrica e associati agli elementi del modello informativo, rendendo più efficiente il controllo della conformità e il dialogo tra progettazione e gestione.

In un'ottica di integrazione tra BIM e GSA, il modello informativo può essere utilizzato per strutturare e supportare le attività previste dal Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio. A ciascun presidio antincendio, impianto di protezione attiva o elemento rilevante ai fini della sicurezza possono essere associati i dati necessari alla compilazione del registro dei controlli, alla pianificazione delle manutenzioni periodiche e alla tracciabilità delle verifiche effettuate. In questo modo, ogni oggetto del modello non rappresenta soltanto un elemento grafico, ma diventa un'entità informativa coerente con le esigenze della gestione, contenente informazioni aggiornabili e verificabili nel tempo.

L'integrazione del modello BIM con sistemi di facility management consente di estendere ulteriormente queste potenzialità, trasformando il modello in uno strumento di governo dei processi di controllo e manutenzione. Il collegamento con piattaforme CAFM o CMMS permette di pianificare gli interventi, monitorare le scadenze previste dalla normativa e registrare in modo sistematico le attività svolte, garantendo continuità informativa tra progetto, gestione e documentazione. Questa digitalizzazione consente di superare la tradizionale gestione cartacea dei registri e dei piani di manutenzione, migliorando la tracciabilità, la trasparenza e l'affidabilità del sistema di gestione.

In relazione all'approccio prestazionale, il contributo principale dell'integrazione BIM-GSA risiede nella possibilità di supportare il mantenimento nel tempo delle condizioni assunte in fase di progetto. Le ipotesi relative ad affollamenti, configurazione degli spazi, disponibilità dei presidi e affidabilità dei sistemi di sicurezza, che costituiscono vincoli

fondamentali delle verifiche prestazionali, possono essere esplicitate e monitorate attraverso il modello informativo, riducendo il rischio di scostamenti non governati. Il BIM diventa quindi uno strumento di supporto alla gestione, capace di rendere operative e controllabili le condizioni progettuali, contribuendo alla coerenza tra progettazione prestazionale ed esercizio dell'attività.

In questo senso, il passaggio da BIM a GSA non rappresenta una semplice estensione tecnologica, ma l'evoluzione naturale di un approccio integrato alla sicurezza antincendio, nel quale il modello informativo assume il ruolo di piattaforma di raccordo tra progettazione, simulazione, gestione e controllo. L'utilizzo del BIM come supporto digitale al SGSA consente di tradurre in strumenti operativi le logiche della progettazione prestazionale, ponendo le basi per applicazioni sperimentali orientate alla gestione, alla formazione e al monitoraggio continuo della sicurezza.

[13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

2.7. Realtà virtuale e aumentata

L'evoluzione dei processi di digitalizzazione applicati alla progettazione e alla gestione della sicurezza ha introdotto nuovi strumenti capaci di trasformare il modo in cui il rischio d'incendio viene analizzato, comunicato e gestito. La realtà virtuale (VR)¹ e la realtà aumentata (AR)² rappresentano le tecnologie più promettenti in questo ambito, poiché consentono di passare dalla semplice rappresentazione bi-dimensionale alla costruzione di esperienze immersive capaci di riprodurre con elevato realismo le condizioni di emergenza e di simulare le risposte cognitive, percettive e motorie degli occupanti. L'integrazione tra modelli BIM, simulazioni ingegneristiche di FSE e ambienti immersivi apre la strada a una nuova fase della progettazione antincendio, in cui la valutazione delle prestazioni non è più limitata alla dimensione numerica, ma si estende alla percezione e al comportamento umano.

Partendo dal modello BIM, che contiene l'insieme delle informazioni geometriche e funzionali dell'edificio, è possibile generare, come abbiamo visto in precedenza, scenari d'incendio e di esodo attraverso specifici software, ed esportare parametri e dati prestazionali utili all'analisi ingegneristica. Tuttavia, queste simulazioni, per quanto accurate dal punto di vista fisico e ingegneristico, non restituiscono la percezione reale dell'emergenza e non consentono di valutare l'effettiva leggibilità degli spazi o l'efficacia dei sistemi di allarme. L'utilizzo della realtà virtuale risponde a questa esigenza, permettendo di immergere l'utente in ambienti tridimensionali interattivi che riproducono gli scenari di incendio generati dai modelli FSE.

¹ VR - **Realtà virtuale** - La simulazione del mondo fisico (*simulazione del reale*) è un ambito tecnico-scientifico in cui, avvalendosi dell'informatica, dell'interfaccia uomo-macchina (HMI, *Human machine interface*) e di altre scienze applicate, un essere umano interagisce in prima persona, in modo naturale, con un ambiente tridimensionale di sintesi completamente creato dal computer.

² AR - **Realtà aumentata** - Tecnica di, in inglese *augmented reality*, attraverso cui si aggiungono informazioni alla scena reale. Questa tecnica è realizzabile attraverso piccoli visori sostenuti, come i caschi immersivi, da supporti montati sulla testa che permettono di vedere la scena reale attraverso lo schermo semitrasparente del visore (*see-through*), utilizzato anche per mostrare grafica e testi generati dal computer.

Fonte: Treccani.it – Enciclopedie on line, Roma, Istituto dell'Enciclopedia Italiana. Consultata il 16/01/2026
[https://www.treccani.it/enciclopedia/realtà-virtuale_\(Lessico-del-XXI-Secolo\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/realtà-virtuale_(Lessico-del-XXI-Secolo)/)
https://www.treccani.it/enciclopedia/realtà-aumentata_%28Lessico-del-XXI-Secolo%29/

All'interno di questi ambienti i risultati numerici vengono trasformati in elementi percettivi: il decadimento della visibilità si traduce in nebbia o oscuramento, le curve di temperatura influenzano la colorazione delle superfici, le sorgenti sonore e luminose simulano allarmi, sirene e indicazioni visive.

Ciò consente di valutare in modo diretto l'impatto delle condizioni d'incendio sulla capacità di orientamento e sulle decisioni degli occupanti, fornendo una forma di verifica qualitativa complementare a quella ingegneristica. In questa prospettiva, la realtà virtuale non è più un semplice strumento di rappresentazione, ma diventa una piattaforma in grado di unire dati oggettivi e risposte soggettive, offrendo al progettista un quadro più completo della sicurezza complessiva del sistema edificio-occupante. Uno dei vantaggi più significativi di questa metodologia riguarda la possibilità di verificare in modo semi-immersivo le strategie di esodo e la configurazione delle vie di fuga. I percorsi di evacuazione possono essere esplorati in prima persona, osservando come la visibilità, la densità dei fumi o la disposizione della segnaletica influenzino il comportamento dell'utente.

L'esperienza immersiva permette inoltre di valutare l'efficacia delle soluzioni progettuali prima della loro realizzazione, riducendo i margini di incertezza e migliorando la comunicazione tra le diverse figure coinvolte nel processo, dal progettista al responsabile della sicurezza, fino agli organi di controllo. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante nell'approccio prestazionale, in cui la dimostrazione dell'obiettivo di sicurezza non si limita al rispetto di prescrizioni normative, ma si fonda sulla verifica dell'effettivo raggiungimento dei livelli di prestazione. La realtà virtuale permette quindi di testare il comportamento umano in condizioni realistiche, restituendo parametri che i modelli tradizionali di esodo difficilmente possono rappresentare: tempi di percezione dell'allarme, scelta del percorso, reazioni alla riduzione della visibilità, cooperazione o comportamento imitativo. Le sperimentazioni più recenti hanno dimostrato che l'osservazione del comportamento degli individui in ambienti immersivi fornisce dati preziosi per la calibrazione dei modelli di simulazione, contribuendo a rendere più realistici criteri di valutazione del rischio. In questo modo, il modello ingegneristico viene validato anche dal punto cognitivo, integrando la dimensione umana nel processo prestazionale. Oltre alla fase progettuale, le tecnologie immersive trovano un'applicazione particolarmente efficace nel campo della formazione e dell'addestramento

antincendio, componenti essenziali della Gestione della Sicurezza Antincendio. La formazione tradizionale, basata su lezioni frontali o prove di evacuazione, presenta spesso limiti di realismo e di coinvolgimento. La realtà virtuale, al contrario, consente di far vedere ai partecipanti esperienze simulate, riproducendo le condizioni sensoriali e ambientali tipiche di un incendio, migliorando la capacità di riconoscere i segnali di pericolo e di adottare comportamenti appropriati, ma senza alcun rischio reale.

La possibilità di interagire con l'ambiente virtuale, di prendere decisioni e di osservare le conseguenze delle proprie azioni favorisce un apprendimento attivo basato sulla sperimentazione. Questo approccio, riconducibile ai principi del serious game, consente di sviluppare competenze operative e di ridurre i tempi di reazione in situazioni reali. L'addestramento immersivo si rivela particolarmente utile per il personale antincendio aziendale, gli addetti alla gestione dell'emergenza e le squadre di primo intervento, ma può essere esteso anche alla popolazione generale, diventando uno strumento di sensibilizzazione e di comunicazione del rischio.

Un ulteriore campo di applicazione riguarda la validazione dei sistemi di segnaletica e di allarme, in quanto, attraverso la realtà virtuale, è possibile testare l'efficacia visiva delle indicazioni di emergenza, il contrasto cromatico dei segnali o l'intelligibilità dei messaggi acustici in ambienti saturi di fumo.

Accanto alla realtà virtuale, la realtà aumentata offre ulteriori opportunità, soprattutto nella fase operativa e manutentiva. Grazie a visori o dispositivi mobili, gli operatori possono visualizzare in sovrapposizione all'ambiente reale dati digitali provenienti dal modello BIM, come la posizione degli impianti, i punti di intercettazione o lo stato dei dispositivi di sicurezza.

Durante un'ispezione, la AR può segnalare eventuali scadenze di manutenzione, indicare la conformità dei presidi antincendio o mostrare procedure di intervento.

La combinazione di VR e AR contribuisce così a costruire un ambiente informativo esteso, in cui la progettazione, la gestione e la formazione si fondono in un sistema continuo e coerente, dando vita, partendo dal modello geometrico, a un gemello digitale capace di alimentare in tempo reale gli scenari simulativi e le applicazioni immersive. La possibilità di collegare i dati di simulazione, i parametri impiantistici e i piani di manutenzione ad un ambiente tridimensionale interattivo consente di ridurre errori, tempi di aggiornamento e dispersione informativa, realizzando una reale

interoperabilità tra le fasi del ciclo di vita dell'opera. L'applicazione delle tecnologie immersive alla Fire Safety Engineering comporta inoltre vantaggi significativi in termini di comunicazione e collaborazione interdisciplinare, permettendo a progettisti, committenti e autorità di controllo di analizzare gli scenari di incendio, discutere le soluzioni e valutare le prestazioni. Questa modalità riduce le incomprensioni derivanti da rappresentazioni complesse e consente di prendere decisioni più consapevoli, offrendo uno strumento immediato di supporto alla comunicazione e rendendo più trasparente la dimostrazione del livello di sicurezza raggiunto .

La progressiva diffusione di dispositivi economici e facilmente accessibili, come visori standalone, sensori di tracciamento e software open source, sta rendendo le applicazioni di VR e AR sempre più applicabili anche in contesti professionali e ordinari. In prospettiva, queste applicazioni potranno diventare componenti standard del processo di progettazione e gestione della sicurezza, così come oggi sono i modelli BIM o le simulazioni FSE. L'obiettivo è arrivare ad un approccio integrato in cui le diverse discipline, progettuale, gestionale e formativa, confluiscono in unico "ecosistema digitale" capace di migliorare la prevenzione, la risposta all'emergenza e la resilienza complessiva degli edifici. [20], [21], [22], [23], [24]

3. Introduzione al caso studio

3.1. Analisi del progetto LAD

L'edificio oggetto di analisi di questa tesi si inserisce nel più ampio progetto di trasformazione urbana denominato Linate Airport District (LAD), all'interno del Masterplan Linate 2030, un programma di riqualificazione e rilancio dell'intero comparto aeroportuale di Milano Linate e delle aree limitrofe. Il masterplan, promosso da SEA - Società Esercizi Aeroportuali in collaborazione con COSTIM-Gruppo POLIFIN, prevede la riconversione di porzioni del sedime aeroportuale e delle aree di margine oggi destinate a parcheggio e funzioni di servizio, con l'obiettivo di creare un nuovo polo urbano multifunzionale che integri spazi direzionali, ricettivi, commerciali e di intrattenimento in un contesto ad alta accessibilità e qualità ambientale. L'intervento si sviluppa in stretta connessione con la rete infrastrutturale milanese, in particolare con la nuova linea metropolitana M4, che collega direttamente l'aeroporto con il centro di Milano e con il sistema ferroviario metropolitano.



Figura 2: Localizzazione del sito di intervento – Immagine satellitare catturata da Google Earth

Il progetto punta a valorizzare la posizione strategica dello scalo e a trasformarlo in una vera e propria porta d'ingresso alla città, capace di coniugare mobilità, innovazione e sostenibilità. Il piano urbanistico prevede la creazione di nuovi spazi pubblici e verdi, percorsi pedonali e ciclabili e una rete

di servizi che si aprono verso il paesaggio dell'Idroscalo, elemento naturalistico e ricreativo di grande importanza per l'area. Il LAD punta a divenire un quartiere ibrido e policentrico, dove funzioni lavorative, ricreative e commerciali convivono in un sistema spaziale permeabile e sostenibile.

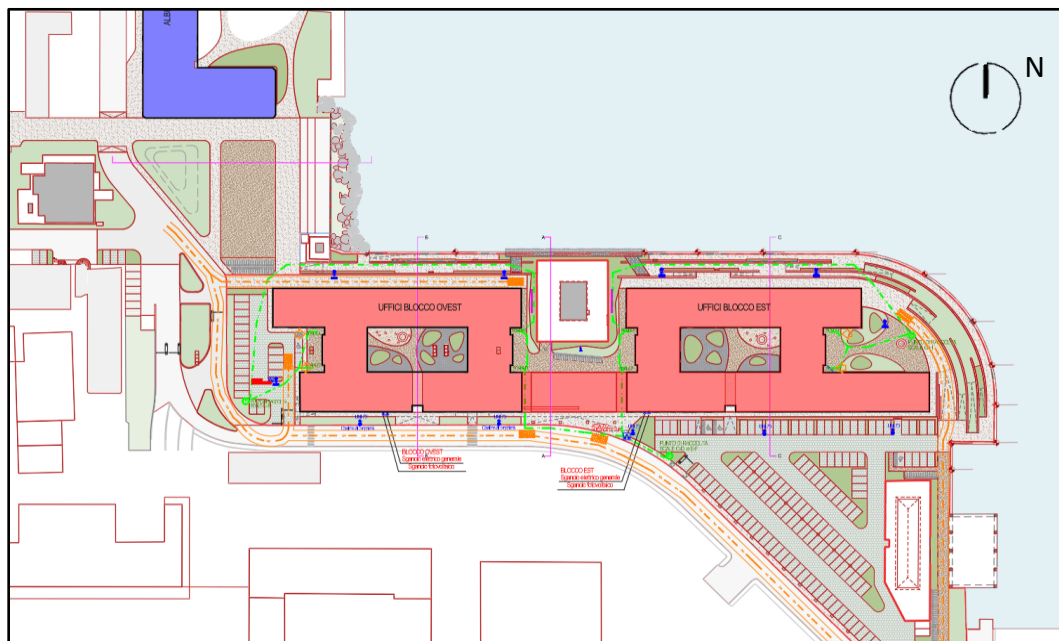


Figura 3: Inquadramento del progetto

All'interno di questa riqualificazione si colloca un blocco uffici, che rappresenta uno dei corpi principali del nuovo distretto e che sarà il caso studio su cui verranno effettuate le sperimentazioni in questo progetto di ricerca. L'edificio nasce lungo l'asse occidentale del lotto, vicino all'ingresso viario principale e agli spazi di connessione pedonale che collegano il complesso con le aree verdi e con la viabilità aeroportuale. Si tratta di un fabbricato di quattro piani fuori terra, con una quota massima di circa 16 metri e una superficie complessiva di circa 18.000 m², composto da due corpi paralleli, Blocco Est e Blocco Ovest, collegati da nuclei centrali di distribuzione verticale contenenti vani scala, ascensori e cavedi tecnici.



Figura 3: Render di progetto

L'edificio si distingue per un'architettura lineare e compatta dallo stile contemporaneo. I prospetti sono caratterizzati da ampie facciate vetrate continue con profili metallici verticali, che garantiscono elevata luminosità naturale e continuità visiva con gli spazi esterni. L'impianto distributivo interno prevede ampie aree open space destinate a uffici, integrate da sale riunioni e spazi di supporto disposti attorno ai nuclei di distribuzione verticale. Al piano terra si trovano spazi di accoglienza, locali commerciali e aree di servizio, in continuità funzionale con i piani superiori destinati agli uffici, mentre la copertura ospita locali tecnici, impianto fotovoltaico e un'area utilizzabile dagli occupanti per il tempo libero che affaccia direttamente sull'acqua. La struttura portante è in cemento armato, con pilastri e travi in opera e solai in laterocemento. Le chiusure verticali sono in vetro e alluminio e contribuiscono alle prestazioni energetiche e al comfort interno, in linea con gli standard ambientali indicati nel masterplan. Le vie di esodo verticali, costituite da scale esterne protette, garantiscono la connessione diretta con le aree a cielo libero, mentre la disposizione planimetrica regolare agevola l'organizzazione dei percorsi di emergenza e la distribuzione degli impianti.

3.2. Progettazione antincendio

L'attività in esame rientra tra le attività soggette a controllo da parte dei Vigili del Fuoco elencate all'interno dell'allegato I del D.P.R. n. 151/2011:

ATTIVITA' N. 73.2. C: Edifici e/o complessi edilizi a uso terziario e/o industriale caratterizzati da promiscuità strutturale e/o dei sistemi delle vie di esodo e/o impiantistica con presenza di persone superiore a 300 unità, ovvero di superficie complessiva superiore a 5.000 m², indipendentemente dal numero di attività costituenti e dalla relativa diversa titolarità. Capienza oltre 500 persone e superficie > 6.000 mq

ATTIVITA' N. 71.3.C: Aziende ed uffici con oltre 300 persone presenti (oltre 800 persone presenti).

La redazione del progetto antincendio è stata condotta osservando il D.M. 3 agosto 2015. Trattandosi di edificio avente al suo interno attività dotate di specifica regola tecnica, tutti i capitoli riguardanti le strategie antincendio sono stati integrati con le indicazioni complementari della rispettiva regola tecnica, in particolare si fa specifico riferimento al *D.M. 8 giugno 2016* capitolo V.4 "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per gli uffici".

Il profilo di rischio R_{VITA} è stato attribuito per compartimenti, in funzione delle caratteristiche prevalenti degli occupanti e della velocità prevalente di crescita dell'incendio riferita al tempo t_{α} . Il livello di rischio è stato ridotto di un grado in quanto l'attività è servita da misure di controllo dell'incendio di livello di prestazione V (capitolo S.6). Pertanto, il profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana attribuito risulta essere:

Comparto	R_{VITA}
Uffici aperti al pubblico	B1
Locali commerciali	B1
Locali tecnici	A1

Per quanto concerne il profilo di rischio R_{BENI} si considera che l'edificio NON è ritenuto strategico dal Gestore e dalla Proprietà. Inoltre, il fabbricato non è vincolato per arte o storia.

		Attività o ambito vincolato	
		NO	SI
Attività o ambito strategico strategica	NO	$R_{beni}=1$	$R_{beni}=2$
	SI	$R_{beni}=3$	$R_{beni}=4$

Dunque, il profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici è **$R_{BENI}=1$** .

Il rischio relativo alla tutela dell'ambiente dagli effetti dell'incendio, tenuto conto di tutte le misure antincendio connesse al profilo di rischio vita A1 e B1 che consentono di ritenere il rischio "mitigato" e delle tipologie di attività presenti all'interno del fabbricato, è considerato **$R_{AMBIENTE}=Non\ Significantivo$** .

Sulla base dei profili di rischio determinati, le strategie previste dal Codice sono state applicate in modo coerente con i livelli di prestazione attribuiti ai singoli compartimenti e agli ambiti funzionali dell'edificio. Queste strategie, di natura prevalentemente prescrittiva, non vengono riportate in modo esteso nel presente elaborato, in quanto l'attenzione del caso studio è infatti rivolta agli aspetti prestazionali e gestionali della progettazione antincendio, con particolare riferimento alle condizioni che richiedono il superamento del campo di applicazione delle soluzioni conformi.

In particolare, per quanto concerne la compartimentazione multipiano, non è risultato possibile applicare integralmente le soluzioni conformi previste dal Codice e dalla regola tecnica verticale. Trattandosi di un compartimento multipiano con profilo di rischio per la vita umana $RVITA$ pari a B1, comprendente piani posti a quota superiore a -1 m e fino a 32 m, si ricade infatti nelle condizioni che impongono il ricorso a una soluzione alternativa, secondo quanto stabilito dal capitolo M.3 del Codice di Prevenzione Incendi.

Il compartimento multipiano, infatti, non soddisfa i requisiti prescrittivi della tabella S.3-7 del Codice di prevenzione incendi, poiché la configurazione proposta non prevede la suddivisione interpiano necessaria per l'applicazione delle soluzioni conformi.

R _{vita}	Compartimenti multipiano	Prescrizioni antincendio aggiuntive
A1, A2, A3, B1, B2, B3, E1, E2, Cii1, Cii2, Ciii1, Ciii2	I piani a quota > -1 m e ≤ 6 m possono essere inseriti in uno o più compartimenti multipiano	Nessuna
A1, A2	I piani a quota > -5 m e ≤ 12 m possono essere inseriti in uno o più compartimenti multipiano (Esempio in tabella S.3-8)	Nessuna
A3, B1, B2, Cii1, Cii2, Ciii1, Ciii2		[1], [2]
B3		[3]
A1, A2	I piani a quota > 12 m e ≤ 32 m possono essere inseriti in uno o più compartimenti multipiano, con massimo dislivello tra i piani inseriti ≤ 7 m (Esempio in tabella S.3-8)	[3]
B1, B2		[3], [4]
[1] Rivelazione ed allarme di livello di prestazione III (capitolo S.7)		
[2] Se q _f < 600 MJ/m ² , controllo dell'incendio di livello di prestazione III, altrimenti IV (capitolo S.6)		
[3] Rivelazione ed allarme di livello di prestazione IV (capitolo S.7)		
[4] Controllo dell'incendio di livello di prestazione IV (capitolo S.6).		

Figura 4: Condizioni per la realizzazione di comparti multipiano secondo C.P.I.

Le esigenze funzionali e gestionali espresse dalla committenza richiedono la massima flessibilità d'uso dei blocchi uffici, determinando alcune scelte distributive e impiantistiche che incidono direttamente sulla configurazione antincendio. In particolare, si riscontra:

- La presenza di una scala aperta tra piano terra e primo piano del blocco Sud 2 Est, finalizzata a garantire continuità operativa tra i livelli senza ricorrere alla scala esterna protetta. Questa rimane esclusa dai percorsi di esodo, tuttavia rappresenta un'interferenza potenziale tra piani: uno scenario di incendio al piano terra potrebbe generare condizioni incidenti sull'esodo del primo piano;
- L'assenza di elementi di compartimentazione verticale tra i piani e di fasce di separazione;
- La presenza di aperture nei solai per il transito di cavi e canalizzazioni, che possono costituire vie preferenziali di propagazione verso piani non direttamente interessati dal focolaio principale.

È presente un impianto idrico antincendio con impianto di spegnimento automatico. Tuttavia, nella simulazione non si è scelto di non tenere conto del contributo di né questo sistema di protezione né del sistema di smaltimento fumi e calore, in quanto la simulazione si limiterà a garantire l'esodo in sicurezza degli occupanti.

La progettazione antincendio è stata pertanto sviluppata mediante un approccio prestazionale, finalizzato a dimostrare, attraverso analisi ingegneristiche e simulazioni dinamiche dell'incendio e dell'esodo, che la salvaguardia della vita degli occupanti risulta comunque garantita anche in assenza delle soluzioni conformi previste per la compartimentazione multipiano.

4. Soluzione alternativa

4.1. *Caratteristiche dell'attività*

Il compartimento multipiano oggetto di studio si sviluppa su quattro livelli fuori terra, ciascuno caratterizzato da un'altezza interpiano pari a circa 4 m. In ogni piano è presente un controsoffitto ispezionabile con intercapedine di 40 cm, destinato alla distribuzione orizzontale degli impianti elettrici e meccanici. Le dorsali verticali sono invece convogliate all'interno di un cavedio tecnico compartimentato, ricavato nel core distributivo centrale.

Il piano terra è configurato come un ampio spazio ad uso ufficio in soluzione open space di circa 800 m², direttamente collegato al piano primo tramite una scala interna. Il livello è dotato di quattro uscite di sicurezza con esodo orizzontale diretto verso l'esterno, alle quali si aggiunge un'uscita che consente il collegamento con il corpo scale centrale, compartimentato rispetto al comparto uffici.

Il primo piano presenta una zona open space in prossimità dello sbarco della scala interna, un locale archivio compartimentato e quindici uffici ricavati tramite partizioni verticali prefabbricate leggere. Il secondo piano ospita ventisette uffici realizzati con analoghe tecnologie costruttive, mentre il terzo piano ripropone una distribuzione mista, con aree open space e uffici chiusi, in continuità tipologica con i livelli sottostanti.

Ciascun piano è dotato di impianto di rivelazione incendio sia manuale, ubicato lungo i percorsi d'esodo e in prossimità delle uscite di sicurezza, sia automatico, con dispositivi collocati a pavimento, a soffitto e all'interno del controsoffitto.

I livelli fuori terra superiori sono serviti da un corpo scale centrale che collega i blocchi Nord e Sud dell'edificio. Questo corpo distributivo, compartimentato rispetto alle aree d'uso, ospita i servizi igienici, alcuni locali tecnici, due ascensori ordinari non utilizzabili in emergenza, due spazi calmi (uno per ciascun tenant) e due scale antincendio del tipo protetto e a prova di fumo, poiché ubicate all'esterno. L'accesso al core è garantito da due uscite di sicurezza per ciascun piano.

In corrispondenza dell'ingresso principale di ciascun tenant sono previsti i seguenti dispositivi: ripetitori della centrale di allarme incendio, pulsanti di comando per l'apertura motorizzata dei serramenti dedicati allo smaltimento

di fumo e calore dell'ambito, nonché dotazioni di dispositivi di protezione individuale antincendio. Le strategie d'esodo risultano definite all'interno del Piano di Emergenza e riportate negli appositi pannelli informativi installati ai piani.

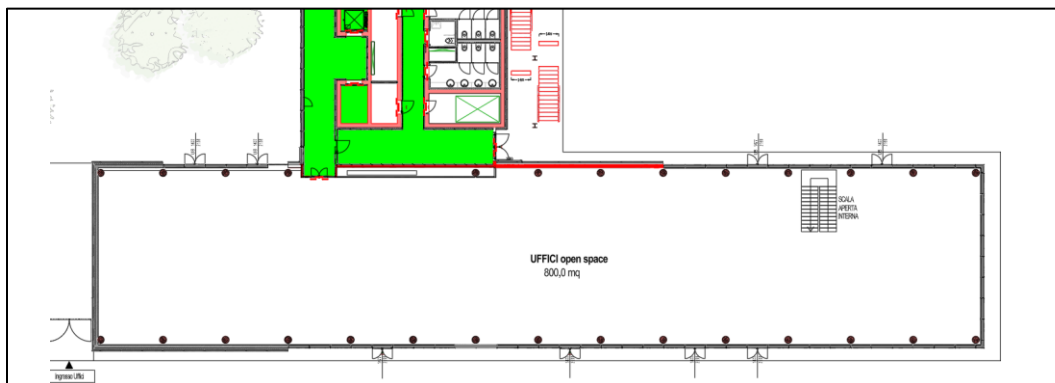


Figura 5: Comparto multipiano - Piano terra

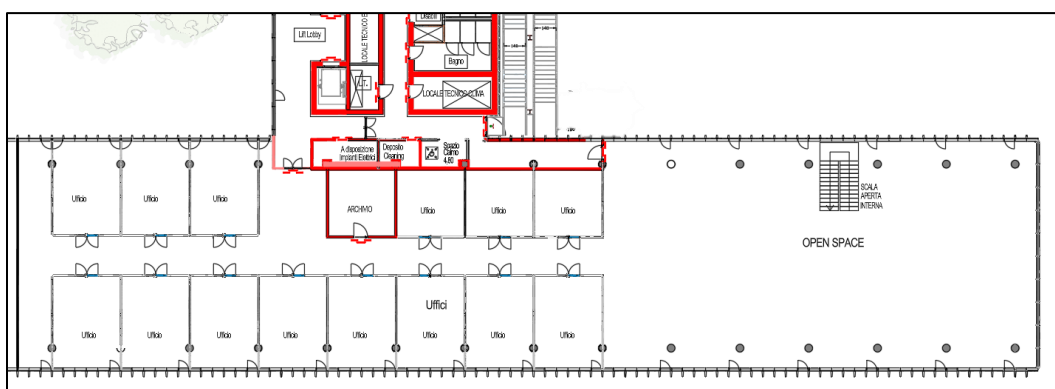


Figura 6: Comparto multipiano - Piano primo

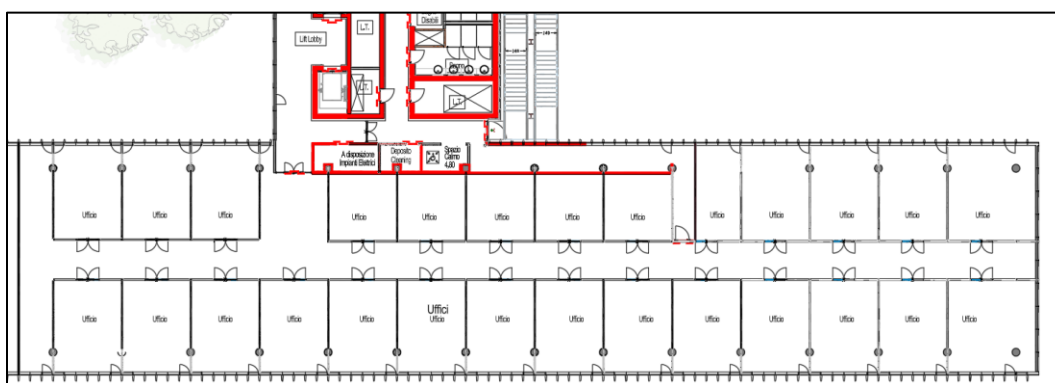


Figura 7: Comparto multipiano - Piano secondo



Figura 8: Comparto multipiano - Piano terzo



Figura 9: Comparto multipiano - Sezione

4.2. Caratteristiche degli occupanti

Gli occupanti prevalenti del comparto uffici, tutti in stato di veglia, possono essere suddivisi in due macrocategorie: conoscitori e non conoscitori dell'edificio.

- I conoscitori coincidono con il personale dipendente stabilmente presente nelle varie unità operative: lavoratori in età attiva, con adeguate capacità motoria e cognitiva, e con un buon livello di familiarità con i percorsi interni, gli spazi funzionali e le uscite di emergenza. In ragione dell'attività lavorativa continuativa e dei percorsi informativi e formativi obbligatori, questi soggetti risultano generalmente istruiti sulle procedure di emergenza e sono in grado di attuare le azioni di autoprotezione con maggiore rapidità ed efficacia.
- I non conoscitori comprendono invece gli occupanti temporanei, quali visitatori, clienti occasionali, manutentori, consulenti esterni, fornitori o

ospiti dell'edificio. Questo gruppo è intrinsecamente eterogeneo e può includere soggetti con limitata familiarità con gli ambienti o con esigenze specifiche, tra cui persone con ridotta capacità motoria, anziani, bambini o categorie vulnerabili. Queste differenze comportano variabilità nei tempi di pre-movimento, nella capacità di orientamento e nella gestione dei percorsi di esodo.

Questa classificazione è coerente con i criteri utilizzati dal Codice di prevenzione incendi per l'attribuzione del profilo R_vita, nei quali la conoscenza del luogo, la capacità di movimento e la rapidità di reazione costituiscono parametri fondamentali per la valutazione della sicurezza dell'esodo e per la definizione dei requisiti prestazionali da soddisfare nell'ambito della progettazione antincendio.

L'affollamento massimo teorico dell'attività ad uso uffici, calcolato secondo quanto previsto dal D.M. 03/08/2015 (coefficiente di affollamento pari a 0,4 persone/m²), sarebbe pari a 1200 persone, considerando una superficie utile di circa 3000 m².

Tipologia di attività	Densità di affollamento
Ambiti all'aperto destinati ad attività di spettacolo o intrattenimento, delimitati e privi di posti a sedere	2,0 persone/m ²
Locali al chiuso di spettacolo o intrattenimento (es. sale concerti, trattenimenti danzanti, ...) privi di posti a sedere e di arredi, con carico di incendio specifico $q_f \leq 50 \text{ MJ/m}^2$	
Ambiti per mostre, esposizioni	1,2 persone/m ²
Ambiti destinati ad attività di spettacolo o intrattenimento (es. sale concerti, trattenimenti danzanti, ...) con presenza di arredi o con carico di incendio specifico $q_f > 50 \text{ MJ/m}^2$	
Ambiti adibiti a ristorazione	0,7 persone/m ²
Ambiti adibiti ad attività scolastica e laboratori (senza posti a sedere)	0,4 persone/m ²
Sale d'attesa	
Uffici	0,4 persone/m²
Ambiti di vendita di <i>piccole</i> attività commerciali al dettaglio con settore alimentare o misto	0,2 persone/m ²
Ambiti di vendita di <i>medie</i> e <i>grandi</i> attività commerciali al dettaglio con settore alimentare o misto	
Ambiti di vendita di attività commerciali al dettaglio senza settore alimentare	
Sale di lettura di biblioteche, archivi	
Ambulatori	0,1 persone/m ²
Ambiti di vendita di attività commerciali all'ingrosso	
Ambiti di vendita di <i>piccole</i> attività commerciali al dettaglio con specifica gamma merceologica non alimentare	
Civile abitazione	0,05 persone/m ²

Figura 10: Densità di affollamento per tipologia di attività - S.4-12

Tuttavia, sulla base delle ipotesi progettuali e delle informazioni fornite dal committente, è stata elaborata una stima realistica dell'affollamento atteso

negli uffici e, in particolare, all'interno del compartimento multipiano. Il dimensionamento rappresenta il valore di progetto da assumere ai fini della sicurezza antincendio, al quale il responsabile dell'attività dovrà attenersi nell'organizzazione e gestione dei locali. Il numero di occupanti previsto, ovvero il massimo numero di persone ammesse nei vari piani, è riportato nella tabella seguente.

<i>PIANO</i>	<i>N° DI OCCUPANTI</i>
PIANO TERRA	73
PIANO PRIMO	93
PIANO SECONDO	93
PIANO TERZO	93
<i>TOTALE:</i>	<i>352 OCCUPANTI</i>

Considerando l'influenza delle variabili comportamentali sul tempo di esodo, i diversi gruppi di occupanti sono stati caratterizzati mediante profili comportamentali specifici, che riflettono le azioni ritenute plausibili in fase di emergenza. La tabella di seguito riporta i comportamenti associati a ciascuna categoria:

<i>COMPORTAMENTO</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
OCCUPANTI_COMUNI	Si dirigono verso una qualsiasi uscita di sicurezza
OCCUPANTI_MOBILITÀ RIDOTTA_SENZAASSISTENZA_PIANI ELEVATI	Si dirigono verso lo spazio calmo dedicato
OCCUPANTI_MOBILITÀ RIDOTTA_ CONASSISTENZA_PIANI ELEVATI	Attendono l'assistente e si dirigono verso lo spazio calmo dedicato
OCCUPANTI_MOBILITÀ RIDOTTA_CONASSISTENZA_PT	Attendono l'assistente e si dirigono verso una qualsiasi uscita di sicurezza

OCCUPANTI_GRPPO	Si riuniscono all'interno del compartimento prima di iniziare la procedura d'esodo
ASSISTENTE	Si dirigono verso i richiedenti assistenza e iniziano la procedura d'esodo
OCCUPANTI_VICINIALE FOCOLARE	Si accorgono per primi dell'incendio e iniziano la procedura d'esodo rapidamente
SQUADRA EMERGENZA	Eseguono quanto stabilito dal PEE

Ciascun comportamento individuato è stato associato alle diverse categorie di occupanti presenti nell'attività analizzata, definendone le caratteristiche direttamente all'interno del modello di simulazione. Per ogni categoria sono state impostate le velocità di spostamento previste dalla norma **ISO/TR 16738:2009**, così da rappresentare in modo realistico le condizioni di movimento degli utenti durante la fase di esodo.

Type of situation		Measured travel speeds m/s (ft/min)				
	Transport terminals [51]	1,35 (265) on walkways				
	Average under "normal conditions" [55]	1,0				
	Experiment with disabled subjects [13]	Min.	1st quartile	3rd quartile	Max.	Mean
	On horizontal surfaces:					
	All disabled subjects	0,10	0,71	1,28	1,77	1,00
	With locomotion disability	0,10	0,57	1,02	1,68	0,80
	No aid	0,24	0,70	1,02	1,68	0,95
	Crutches	0,63	0,67	1,24	1,35	0,94
	Cane	0,26	0,49	1,08	1,60	0,81
	Walker/rollator	0,10	0,34	0,83	1,02	0,57
	Without locomotion disability	0,82	1,05	1,34	1,77	1,25
	Unassisted wheelchair	0,85	—	—	0,93	0,89
	Assisted ambulant	0,21	0,58	0,92	1,40	0,78
	Assisted wheelchair	0,84	1,02	1,59	1,98	1,30

Tabella 1: ISO/TR 16738:2009 – TAB. G.4

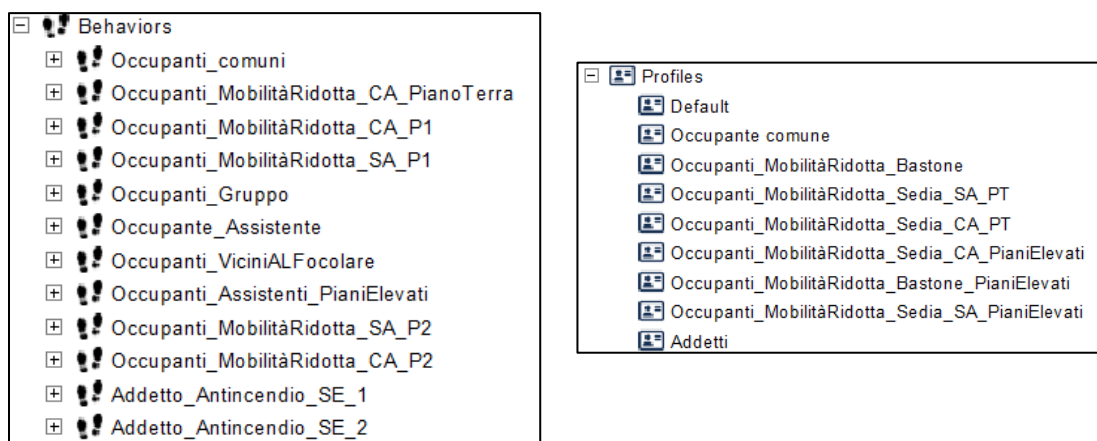


Figura 11: Profili e comportamenti inseriti in Pathfinder

4.3. Obiettivi di sicurezza e soglie di prestazione

In questo studio l'attenzione è rivolta esclusivamente alla salvaguardia della vita degli occupanti, obbiettivo primario della progettazione prestazionale ai sensi del Capitolo M.3 del Codice di Prevenzione Incendi, in linea con quanto previsto dalla tabella sottostante relativa alle soluzioni alternative. La verifica delle condizioni di sicurezza viene condotta dimostrando che, per gli scenari d'incendio di progetto considerati, gli occupanti sono in grado di raggiungere un luogo sicuro prima che si sviluppino condizioni incapacitanti, secondo il principio $ASET > RSET$.

Oggetto della soluzione	Modalità progettuale
Caratteristiche dello spazio scoperto (§ S.3.5.1), del compartimento, del filtro (§ S.3.5.4), dell'ubicazione (§ S.3.9)	Si dimostri, anche con modelli analitici, che non avviene propagazione dell'incendio e dei suoi effetti nella configurazione considerata.
Compartimento a prova di fumo (§ S.3.5.3), filtro a prova di fumo (§ S.3.5.5), compartimentazione multipiano (§ S.3.6.2), comunicazioni (§ S.3.10)	Si dimostri che è comunque garantita la salvaguardia della vita degli occupanti (capitolo M.3) e, se applicabile, la protezione dei beni.
Distanza di separazione (§ S.3.8) e suo calcolo (§ S.3.11)	Si dimostri che è limitata la propagazione dell'incendio e dei suoi effetti. Può essere applicata la stessa procedura analitica del paragrafo S.3.11.3, impiegando ad esempio il valore di E_{soglia} adeguato al bersaglio effettivamente esposto all'incendio, il fattore di vista F_{2-1} e la piastra radiante corrispondente alla reale configurazione geometrica, la potenza termica radiante E_1 riferita all'incendio naturale. Possono essere anche impiegati modelli numerici di simulazione dell'incendio, dei suoi effluenti e dell'irraggiamento.

Figura 12: Modalità progettuali per le soluzioni alternative

Le soglie di prestazione relative alla salvaguardia della vita rappresentano i limiti oltre i quali gli occupanti e i soccorritori non possono essere esposti a condizioni incapacitanti generate dagli effetti dell'incendio. Nel caso di applicazione di metodi di calcolo avanzati, tali soglie costituiscono i parametri di riferimento indispensabili per valutare l'evoluzione dello scenario

incidentale e per verificare che l'esodo possa avvenire in condizioni di sicurezza. Nella tabella seguente sono riportati i valori di soglia da rispettare per ciascun parametro di prestazione, coerentemente con le prescrizioni del Codice.

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilità da fumo	Visibilità minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m ² : 5 m	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m ² : 2,5 m	[1]
Gas tossici	FED, <i>fractional effective dose</i> e FEC, <i>fractional effective concentration</i> per esposizione a gas tossici e gas irritanti, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 0,1	ISO 13571:2012, limitando a 1,1% la porzione di occupanti incapacitati al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	-
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 80°C	[1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell'incendio, struttura) di esposizione degli occupanti	Occupanti: 2,5 kW/m ²	ISO 13571:2012, per esposizioni inferiori a 30 minuti
		Soccorritori: 3 kW/m ²	[1]

[1] Ai fini di questa tabella, per soccorritori si intendono i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, ad operare in condizioni di scarsa visibilità. Ulteriori indicazioni possono essere desunte ad esempio da documenti dell'Australian Fire Authorities Council (AFAC) per hazardous conditions.

Figura 13: Esempio di soglie di prestazione impiegabili con il metodo di calcolo avanzato

Le soglie di prestazione da rispettare nel presente caso studio, con riferimento ai modelli di calcolo avanzato, riguardano esclusivamente i parametri critici per la salvaguardia della vita degli occupanti. Questi valori rappresentano i limiti fisici oltre i quali le condizioni generate dallo scenario d'incendio diventano incapacitanti e compromettono l'esodo.

4.4. Scenari di incendio di progetto

Nel seguente paragrafo vengono identificati tutti gli scenari possibili d'incendio che possono svilupparsi durante lo svolgersi dell'attività. Le attività svolte negli ambienti individuati sono attività di ufficio amministrativo, tecnico e commerciale. All'interno di ciascun compartimento, individuato come blocco uffici verticale, non sono presenti lavorazioni, impianti tecnologici di servizio generale quali cabine elettriche, impianti di climatizzazione e locali tecnici principali, che saranno compartimenti rispetto alle aree uffici. Ai piani sono previste le ordinarie attività di ufficio, saranno presenti impianti elettrici

di distribuzione e impianti di climatizzazione (ventilconvettori, canali ad aria, ecc). Gli inneschi che si ritengono efficaci ai fini dell'analisi sono:

- Inneschi di tipo elettrico dall'impianto
- Inneschi di tipo elettrico da PC, stampanti, apparecchiature

L'individuazione degli scenari di progetto è stata condotta tenendo conto della posizione del focolare nelle configurazioni significative per intralcio all'esodo e inneschi. Gli scenari individuati sono riportati nella tabella sottostante:

Scenario	Zona/condizioni ambientali	SCOPO	Descrizione	Innesco	Selezione
1	Incendio di arredi ufficio nell'open space del piano terra in prossimità della scala e parete di coinvolgimento	Mantenimento delle condizioni ambientali per l'esodo	Focolaio HRR arredi ufficio	Impianto elettrico	SI, costituisce incendio caratteristico
2	Ufficio piano primo; corridoio con innesco in controsoffitto con interferenza esodo nel piano sovrastante	Mantenimento delle condizioni ambientali per l'esodo	Focolaio predefinito HRR cavi elettrici	Impianto elettrico	SI, incendio caratteristico per tipologia
3	Ufficio piano tipo; innesco in controsoffitto con interferenza esodo nel piano sovrastante	Mantenimento delle condizioni ambientali per l'esodo	Focolaio predefinito HRR cavi elettrici	Impianto elettrico	NO, meno gravoso dello scenario 2
4	Incendio piano copertura verso controsoffitto 3P	Mantenimento delle condizioni ambientali per l'esodo	Focolaio predefinito HRR cavi elettrici	Impianto elettrico	NO, meno gravoso dello scenario 2

Sono stati scelti e approfonditi i primi due scenari d'incendio, in quanto rappresentano le condizioni più gravose.

4.5. Calcolo del tempo di esodo RSET

Ai fini di un calcolo analitico della gestione dell'evacuazione si è scelto di utilizzare il calcolo dei tempi utilizzando i criteri dettati dal capitolo M3 e dalla norma **ISO TR 16738**.

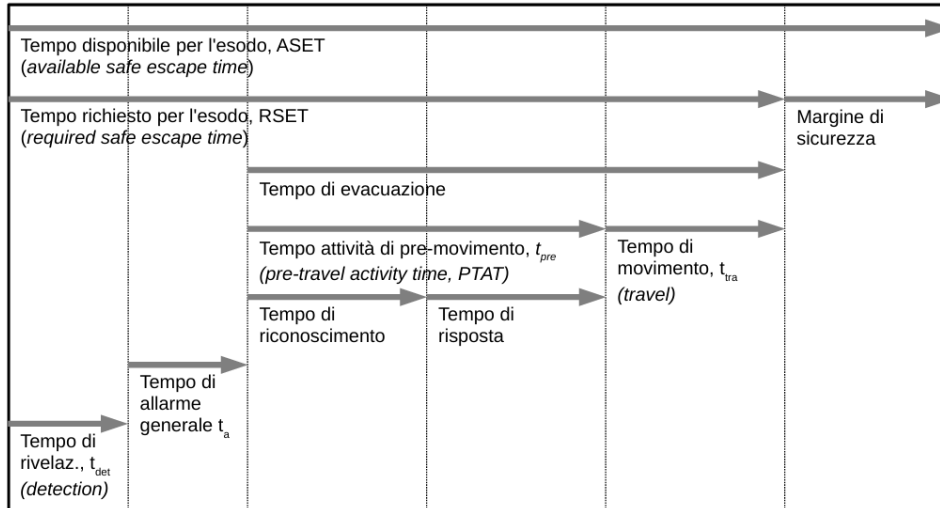


Figura 14: Confronto tra ASET ed RSET - M.3-1

Si calcola il tempo di RSET, determinato dalle seguenti componenti individuati in figura e molti dei quali sono in stretta relazione con la qualità del comportamento messo in atto dagli occupanti:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}$$

Dove:

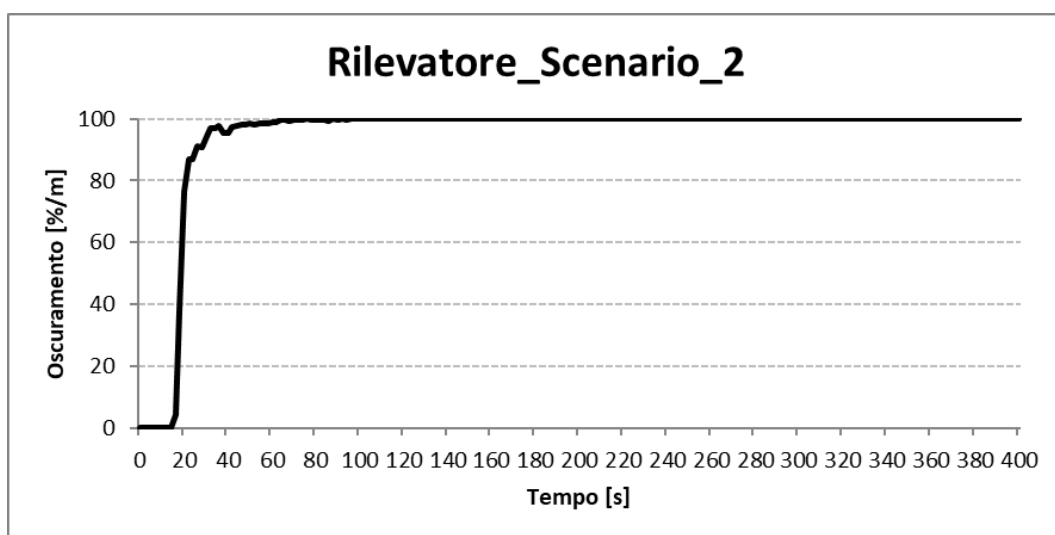
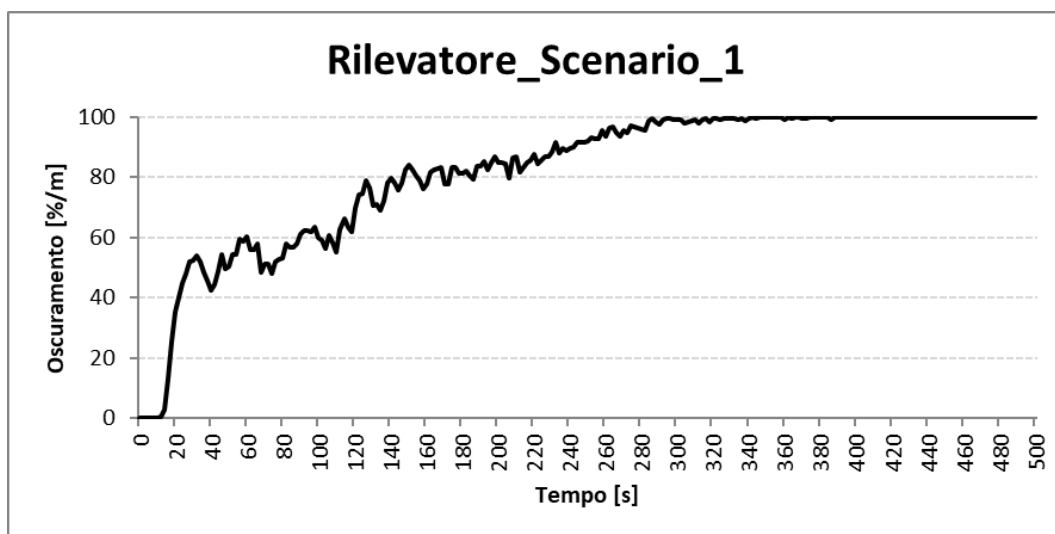
- **Δt_{det}** tempo di rivelazione
- **Δt_a** tempo di allarme generale
- **Δt_{pre}** tempo di pre-movimento
- **Δt_{trav}** tempo di movimento

Per il calcolo dei tempi sopra indicati si è tenuto conto delle caratteristiche degli occupanti, della formazione degli stessi, delle caratteristiche del fabbricato e del tempo di crescita dell'incendio. I tempi sono calcolati come segue:

- *Tempo di rivelazione:*

Il locale è dotato di impianto di rivelazione automatico e manuale, realizzati in conformità alla norma UNI 9795. Al fine del calcolo del tempo di attivazione dell'impianto di rivelazione fumi, nel codice di calcolo l'impianto di rivelazione è stato simulato con rivelatori puntiformi posizionati in ambiente. In entrambi

gli scenari d'incendio il codice di calcolo ha restituito come tempo di rivelazione 20 s, dato in linea con quanto previsto dato il sistema di rilevazione automatica diffuso nell'intera area analizzata.



- *Tempo di allarme generale:*

Il tempo di allarme generale è il tempo che intercorre tra la rivelazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti, dell'allarme generale. Il tempo di allarme generale sarà pari a 0 s, in quanto, in entrambi gli scenari, visto il sistema di rilevazione automatico previsto, la rilevazione di un secondo dispositivo nei pressi del focolare in tempi analoghi e confrontabili con il primo rilevatore, attiva direttamente l'allarme generale dell'edificio. L'allarme generale viene diffuso anche in seguito all'azionamento del rilevatore manuale o alla comunicazione diretta di un addetto all'emergenza al centro di coordinamento

- *Tempo di pre-movimento:*

In conformità alle indicazioni del documento ISOTR 16738, il tempo di pre-movimento degli occupanti viene fissato in funzione dei seguenti parametri:

- *Livello sistema di allarme: **A1*** - Tenuto conto che i locali sono dotati di un sistema di rivelazione, questo genera un allarme sonoro diffuso ed EVAC)
- *Livello complessità edificio: **B2*** - Edificio multipiano, con layout semplice e bene definito
- *Livello di gestione della sicurezza: **M1*** - Gli occupanti prevalenti sono normalmente addestrati ad un buon livello di gestione della sicurezza antincendi e nella gestione della prevenzione e manutenzione. Esiste un piano di emergenza ben strutturato con prove effettuate regolarmente. Esiste un impianto di rivelazione fumi e allarme incendio. Le persone che occuperanno la struttura e che non hanno familiarità con gli ambienti saranno informate sulle procedure di esodo prima dell'accesso ai locali)
- *Livello di familiarità: **Tipo B*** - Gli occupanti possono non avere familiarità con la struttura

Il valore di Δt_{pre} si ottiene, in conformità al riferimento tecnico utilizzato, dalla seguente tabella:

Scenario category and modifier levels ^a	First occupants t_{pre} (1st percentile)	Occupant distribution t_{pre} (99th percentile)
A: Awake and familiar		
M1 B1 – B2 A1 – A2 ^a	0,5	1,5
M2 B1 – B2 A1 – A2	1	3
M3 B1 – B2 A1 – A3	> 15 ^b	> 30 ^b
For B3, add 0,5 for way-finding.	—	—
M1 normally requires a voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present.	—	—
B: Awake and unfamiliar		
M1 B1 A1 – A2	0,5	2,5
M2 B1 A1 – A2	1,0	4,0
M3 B1 A1 – A3	> 15 ^b	> 30 ^b
For B2, add 0,5 for way-finding.	—	—
For B3, add 1,0 for way-finding.	—	—
M1 normally requires a voice alarm/PA.	—	—

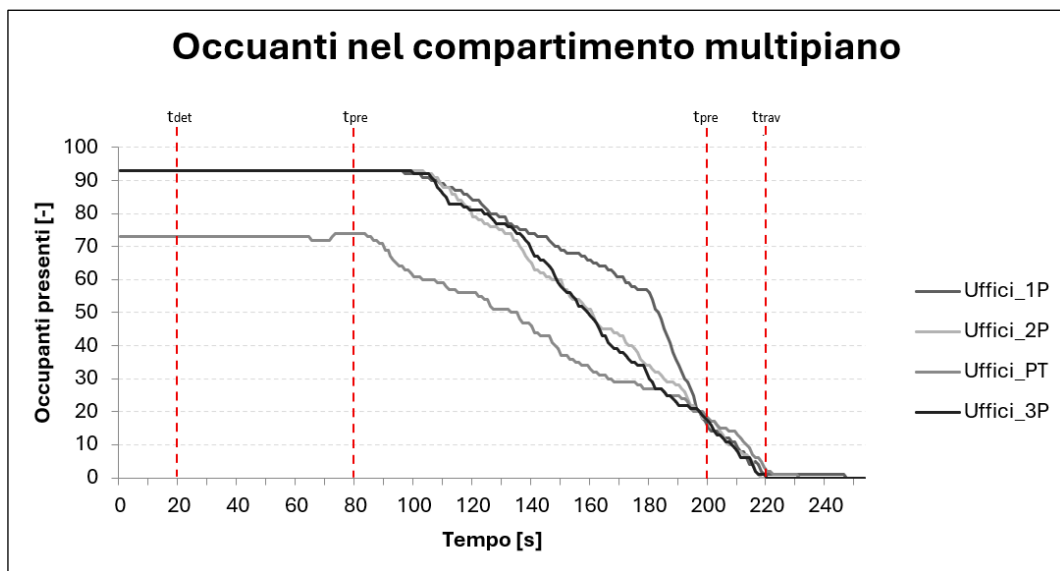
Figura 15: Tempi di pre-movimento indicati da norma ISO 116738

Il tempo di pre-movimento del primo occupante (1° percentile) che si accorge dell'evento è assunto pari a $\Delta t_{pre1^\circ}=60$ s, mentre il tempo di pre-movimento dell'ultimo occupante (99° percentile) è assunto pari a $\Delta t_{pre99^\circ}=180$ s.

Figura 16: Ritardo inserito all'interno del software di simulazione ($t_{det} + t_{pre}$)

- *Tempo di movimento:*

Per la determinazione del tempo di movimento sono stati analizzati i dati ottenuti dalla simulazione di esodo condotta mediante il software Pathfinder. Il grafico riportato in seguito rappresenta l'andamento temporale dell'evacuazione del compartimento oggetto di studio.



Dall'osservazione dei risultati emerge che, nello scenario più gravoso, l'esodo degli occupanti si completa in un intervallo di circa 220 secondi, valore che include sia il tempo di rilevazione dell'incendio sia la fase di pre-movimento. Questa durata non considera gli addetti alle emergenze, i quali possono permanere all'interno dell'edificio per un tempo maggiore, essendo specificamente formati, addestrati e dotati dei necessari dispositivi di protezione individuale.

Sulla base di tali valutazioni, il tempo di movimento può essere assunto pari a 20 s.

4.6. Scenario 1 – Incendio di materiale d'ufficio

4.6.1. Caratterizzazione dell'incendio

Per la simulazione è stato adottato uno scenario d'incendio rappresentativo di un ambiente d'ufficio, facendo riferimento ai risultati di prove sperimentali condotte da *Daniel Madrzykowski presso il Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.*

Questo studio aveva l'obiettivo di caratterizzare l'andamento dell'Heat Release Rate (HRR) associato a differenti configurazioni di arredi tipici degli uffici, ricavate mediante test in scala reale su postazioni di lavoro con geometrie e sviluppi planimetrici variabili. Le configurazioni sperimentate includevano scrivanie e workstation con differenti livelli di "confinamento" (su due, tre o quattro lati) e la presenza di materiali comunemente riscontrabili in un ambiente lavorativo.

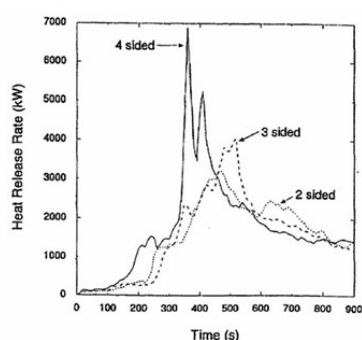


Figure 5. Heat release rate curves for two, three and four-sided work station configurations.

Item Description (cm)	Mass (kg)
Desk, high pressure laminate over particle board, 178 X 76 X 76h	101.8
Office chair, plastic outer shell, padded seat, and steel pedestal base	15.9
Partitions: 91.4 X 2.5 X 152.4h (3) 121.9 X 2.5 X 152.4h (1)	69.1
Fabric over fiberglass batting with 6 mm hardboard core, metal frame, and support poles	
Book shelf with "flipper door" and work light	32
Computer terminal with keyboard	15.9
File boxes with paper, 10 kg (4)	40
Paper, notebooks, file holders, and newspaper	60
Total Load	334.7

Figura 17: Curva sperimentale utilizzata nello scenario 1

Confrontando le curve sperimentali con le curve standard, si individua che la curva 3-sides è molto simile alla curva con crescita media. Essa è in linea con quanto indicato anche dal prospetto E5 della UNI 1991-1, la quale prevede una velocità di crescita media. Pertanto, si utilizzerà la curva dell'esperimento 3-side.

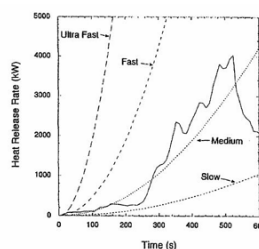


Figure 4. Three-sided work station heat release rate curve compared with "T-squared" curves.

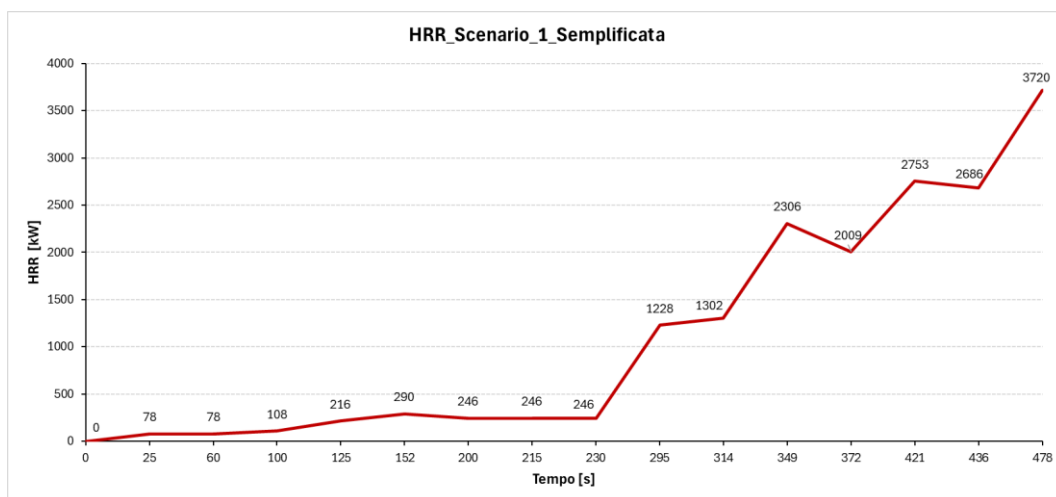
prospetto E.5 Velocità di crescita dell'incendio e $RH\dot{R}_t$ per differenti destinazioni d'uso

Velocità massima di rilascio di calore $RH\dot{R}_t$			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_{gr} [s]	$RH\dot{R}_t$ [kW/m ²]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Figura 18: Prospetto E5 – UNI EN 1991-1-2

Di seguito si riportano i parametri inseriti all'interno del software di simulazione per ricreare le condizioni sperimentali di riferimento.

Edit Surfaces			Tempo (s)	Frazione	HRR (kW)
Surface ID: BURNER			0	0,00	0,00
Description:			25	0,02	78,12
Tags:			60	0,02	78,12
Color: ■ Appearance: X			100	0,03	107,88
Surface Type: Burner			125	0,06	215,76
Fuel Composition			152	0,08	290,16
Geometry			200	0,07	245,52
Particle Injection			215	0,07	245,52
Advanced			230	0,07	245,52
Heat Release			295	0,33	1227,60
Thermal			314	0,35	1302,00
Heat Release			349	0,62	2306,40
Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 3720,0 kW/m²			372	0,54	2008,80
Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m²·s)			421	0,74	2752,80
Ramp-Up Time: Custom Edit Values...			436	0,72	2685,84
Extinguishing Coefficient: 0,0 m²/(kg·s)			478	1,00	3720,00



Le altre caratteristiche del focolaio sono quelle dello scenario predefinito riportato in Tabella M.2-2. Per attività di tipo civile è possibile utilizzare:

- Resa in particolato Y_{soot} : 0,07 kg/kg
- Resa in monossido di carbonio Y_{CO} : 0,10 kg/kg
- Calore di combustione 20 MJ/kg

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_a	150 s (<i>fast</i>)	75 s (<i>ultra-fast</i>)
RHR _{max} totale RHR _{max} per m ² di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m ² [1]	50 MW 500 -1000 kW/m ² [1]
Resa in particolato Y _{soot}	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y _{co}	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH _c	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y _{co2}	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y _{H2O}	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR in irraggiamento (Radiative fraction)	35% [3]	

[1] Da impiegare in alternativa all'RHR_{max} totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato.

[2] Robbins A P, Wade C A, Study Report no 185 "Soot Yield Values for Modelling Purposes - Residential Occupancies", BRANZ, 2008

[3] "C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design", New Zealand Building Code

[4] "SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA, 4^a ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da polyurethane flexible foams.

[5] Stec A A, Hull T R, "Fire Toxicity", Woodhead Pub., 2010. § 2.4 con $\Phi = 1,25$ (underventilated fire)

[6] In alternativa alle rese Y_{co2} e Y_{H2O}, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico CH₂O_{0,5}.

Figura 19: Focolari predefiniti - M.2-2

Reazione M.2-2

New...

Add From Library...

Rename...

Delete...

Description:

Tags:

Reaction Type: Simple Chemistry

Fuel

Fire Suppression

Byproducts

Advanced

Energy Released:

☐ Specify release per unit mass oxygen: 1,31E+4 kJ/kg
 ☒ Specify heat of combustion: 2,0E+4 kJ/kg
 ☐ Radiative Fraction: 0,35
 ☒ Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)

CO Yield (Y_{co}): 0,1

Soot Yield (Y_s): 0,07

HCN Yield (Y_{hcn}): 0,0

&SPEC ID="SFPE POLYURETHANE_GM27_fuel", FORMULA="C1.0H1.7O0.3N0.08"/

&REAC ID="Reazione M.2-2", FUEL="SFPE POLYURETHANE_GM27_fuel", CO_YIELD=0.1, SOOT_YIELD=0.07, HEAT_OF_COMBUSTION=2.0E+4, IDEAL=.TRUE./

Apply

OK

Cancel

Figura 20: Reazione di combustione inserita su Pyrosim

L'area in cui è ubicato lo scenario è in prossimità della scala interno al piano terra come indicato nella figura sottostante:

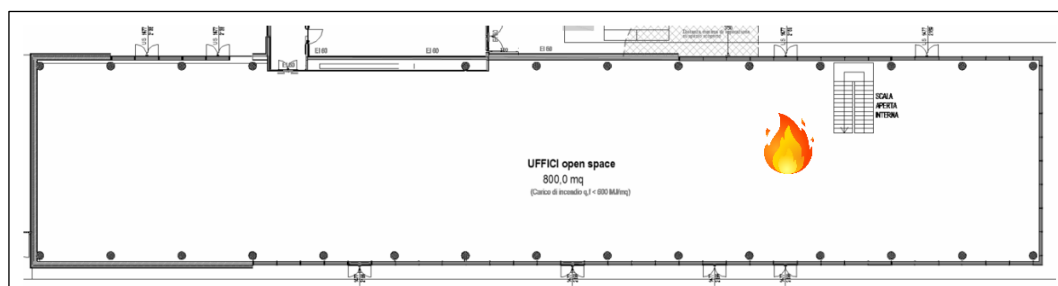
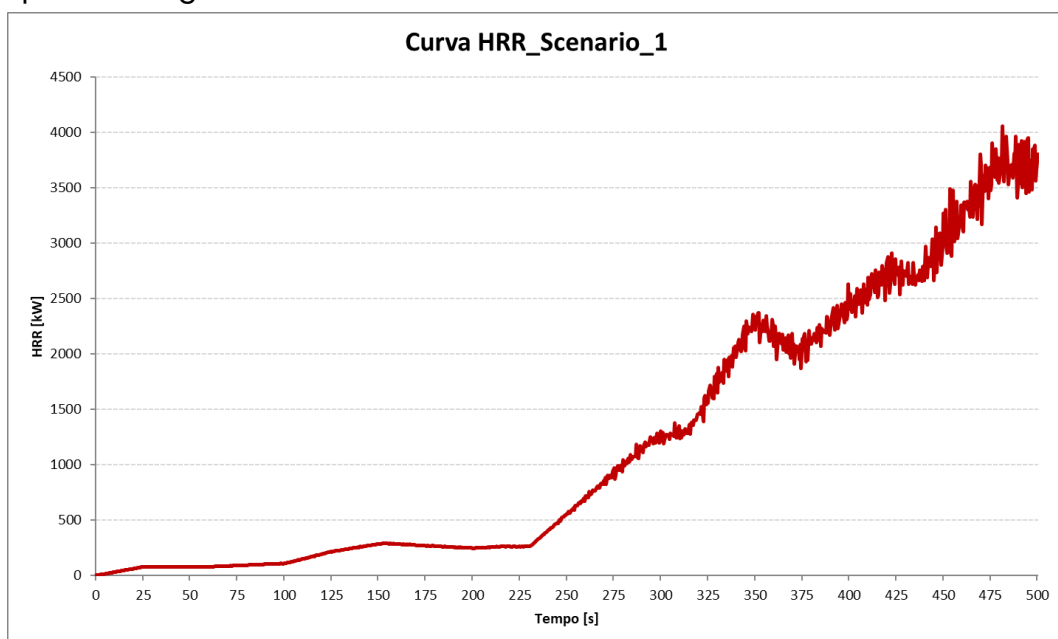


Figura 21: Localizzazione del focolare per lo scenario 1

Per garantire le condizioni di una combustione completa l'incendio non è controllato dalla ventilazione. Esso è di tipo con fiamma e l'accensione di tutto il materiale coinvolto avviene al tempo $t=0$. Il combustibile considerato è quello generico proposto dalla tabella M.2-2 e caratterizzato dalla formula chimica $\text{CH}_2\text{O}_{0,5}$ e calore di combustione $\Delta\text{HC}=20 \text{ MJ/kg}$. Il focolare ha dimensioni di 1 mq con caratteristiche HRR della curva sperimentale e la potenza termica è rilasciata dalla faccia superiore.

Si riporta di seguito la curva HRR calcolata dal software di simulazione:



All'interno del modello di simulazione sono state collocate, a quota 1,80 m dal piano di calpestio, specifiche sonde in prossimità delle uscite di sicurezza dei diversi livelli del compartimento. Questi dispositivi consentono di valutare in modo quantitativo le condizioni di sicurezza lungo i percorsi di esodo, monitorando i parametri di prestazione richiesti dal Codice di Prevenzione Incendi, ovvero irraggiamento termico massimo, visibilità, indice FED e temperatura di esposizione. Questa configurazione permette di verificare l'effettiva utilizzabilità delle vie di esodo nelle fasi critiche dell'evoluzione

dell'incendio. Di seguito un esempio delle tipologie di sonde utilizzate al piano terra, con la relativa collocazione.



Figura 22: Collocazione delle sonde di rilevazione

Gas-phase Device

Properties

Advanced

Name:

SONDA_PT_RAD_01

Tags:

Freeze Output:

<Never>

Quantity:

Radiative Heat Flux Gas

☐ Enable Setpoint: 0,0 kW/m²

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Ascending

Location

X: 65,102575 m

Y: 13,419903 m

Z: 1,8 m

Orientation

X: 0,0

Y: 0,0

Z: -1,0

Rotation:

0,0 °

&DEVC ID='SONDA_PT_RAD_01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=65.102575,13.419903,1.8, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0/

Gas-phase Device

Properties

Advanced

Name:

SONDA_PT_TEMP_01

Tags:

Freeze Output:

<Never>

Quantity:

Temperature

☐ Enable Setpoint: 0,0 °C

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Ascending

Location

X: 65,102575 m

Y: 13,419903 m

Z: 1,8 m

Orientation

X: 0,0

Y: 0,0

Z: -1,0

Rotation:

0,0 °

&DEVC ID='SONDA_PT_TEMP_01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=65.102575,13.419903,1.8/

Gas-phase Device

Properties

Advanced

Name:

SONDA_PT_VIS_01

Tags:

Freeze Output:

<Never>

Quantity:

Visibility

☐ Enable Setpoint: 0,0 m

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Ascending

Location

X: 65,102575 m

Y: 13,419903 m

Z: 1,8 m

Orientation

X: 0,0

Y: 0,0

Z: -1,0

Rotation:

0,0 °

&DEVC ID='SONDA_PT_VIS_01', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=65.102575,13.419903,1.8/

Gas-phase Device

Properties

Advanced

Name:

SONDA_PT_FED_01

Tags:

Freeze Output:

<Never>

Quantity:

Fractional Effective Dose (FED)

Activity Level:

Light Activity

☐ Enable Setpoint: 0,0

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Ascending

Location

X: 65,102575 m

Y: 13,419903 m

Z: 1,8 m

Orientation

X: 0,0

Y: 0,0

Z: -1,0

Rotation:

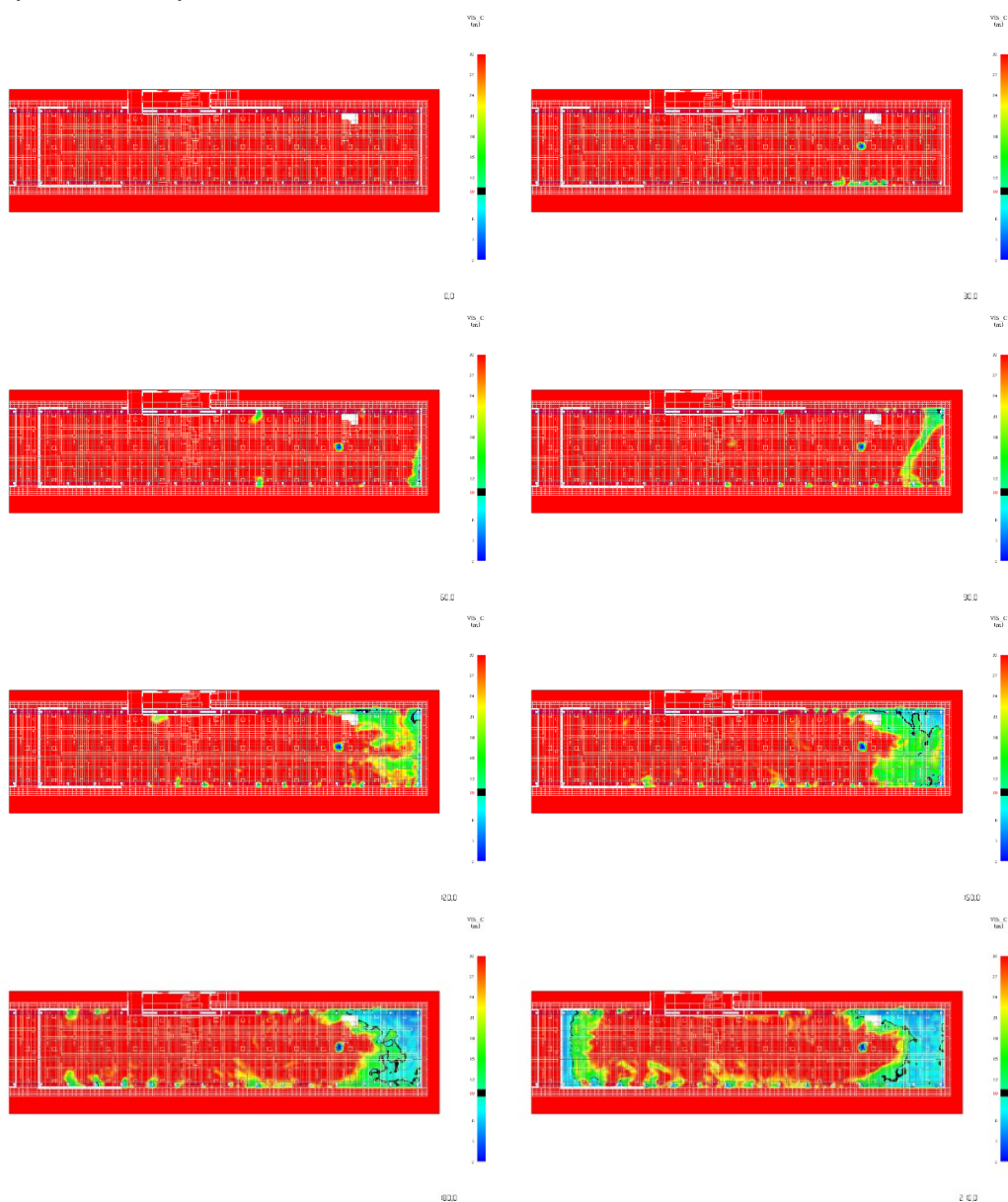
0,0 °

&DEVC ID='SONDA_PT_FED_01', QUANTITY='FED', XYZ=65.102575,13.419903,1.8/

Figura 23: Esempio di sonde inserite per la rilevazione dei parametri

4.6.2. Determinazione di ASET per lo scenario 1

Dalle simulazioni effettuate si nota come il modello più critico per l'analisi prestazionale risulta essere quello dell'oscuramento della visibilità da fumo. Pertanto, si è iniziato il processo di verifica andando a visualizzare l'andamento della visibilità attraverso l'utilizzo di alcune slice 2D poste all'altezza di 1,80 metri da piano di calpestio per il piano terra e il piano primo e di una slice 2D verticale per verificare la presenza di fumo anche ai piani superiori. Si riportano di seguito i risultati ottenuti sotto forma di screen in sequenza temporale di 30 s.



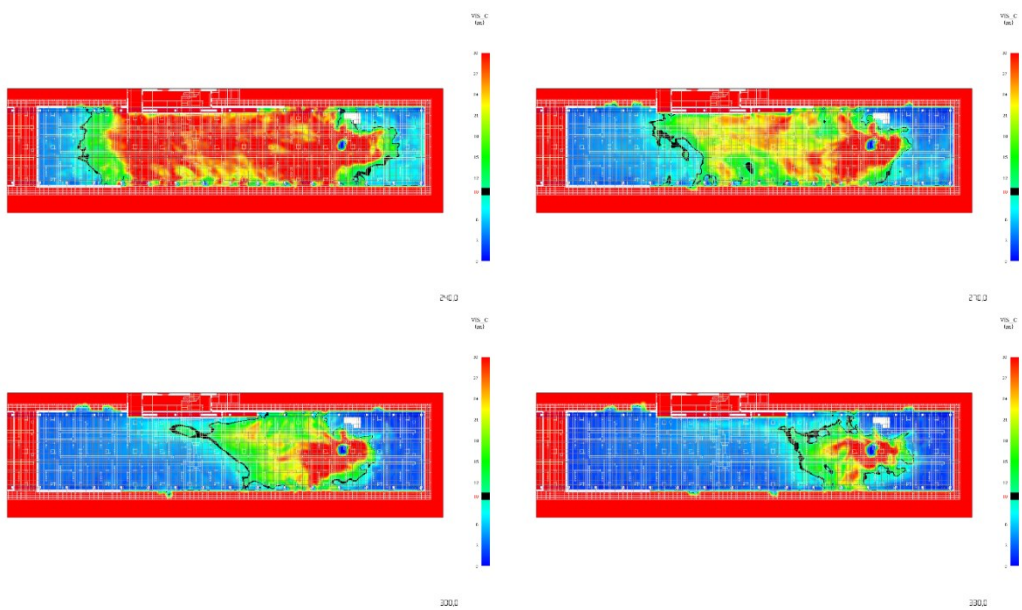
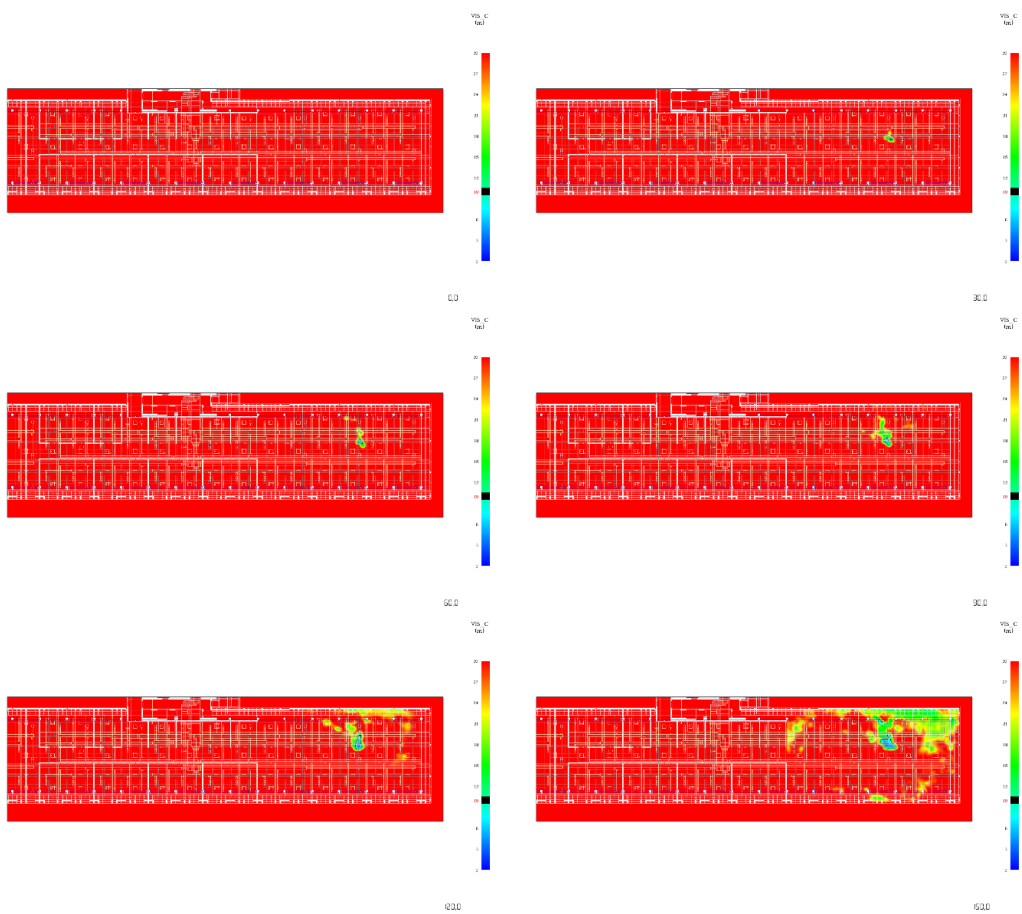


Figura 24: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m – Piano terra



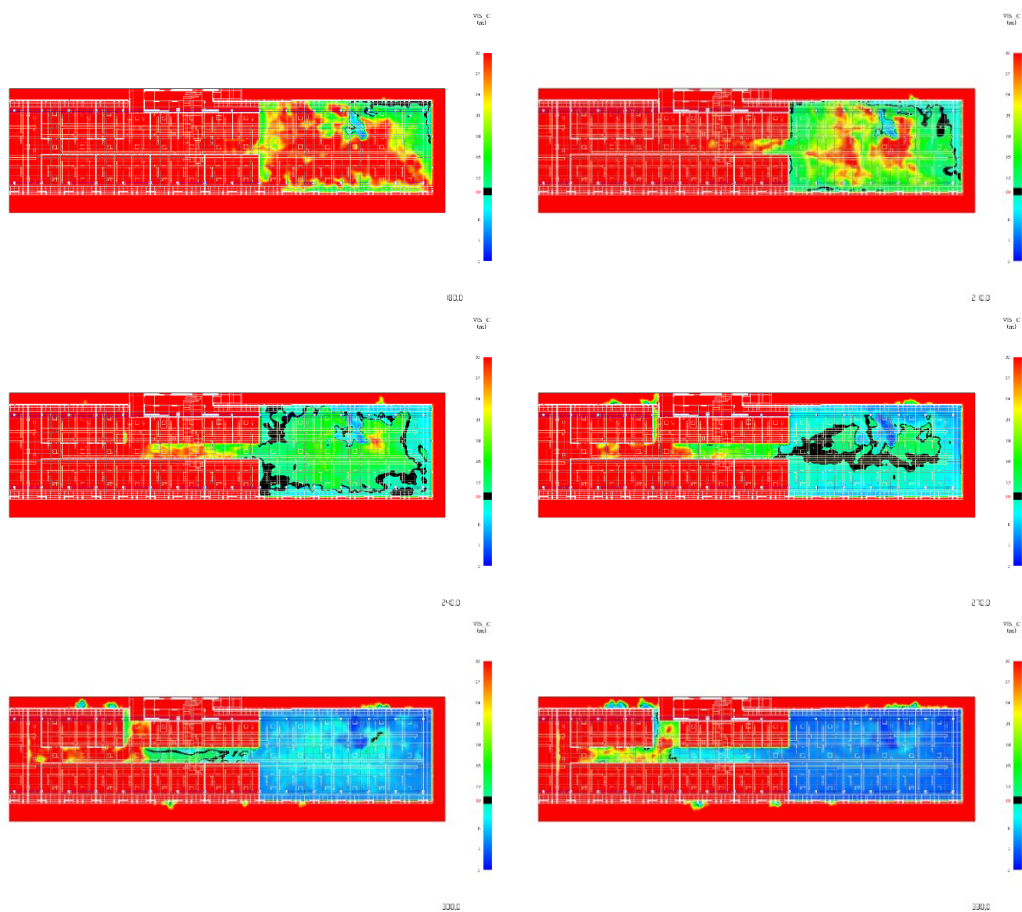
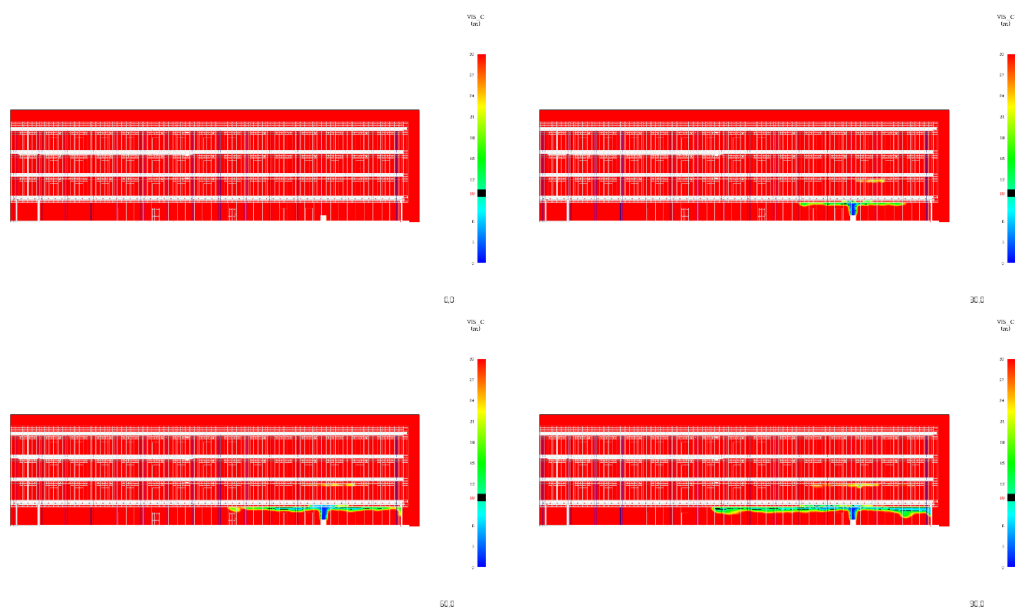


Figura 25: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m - Piano primo



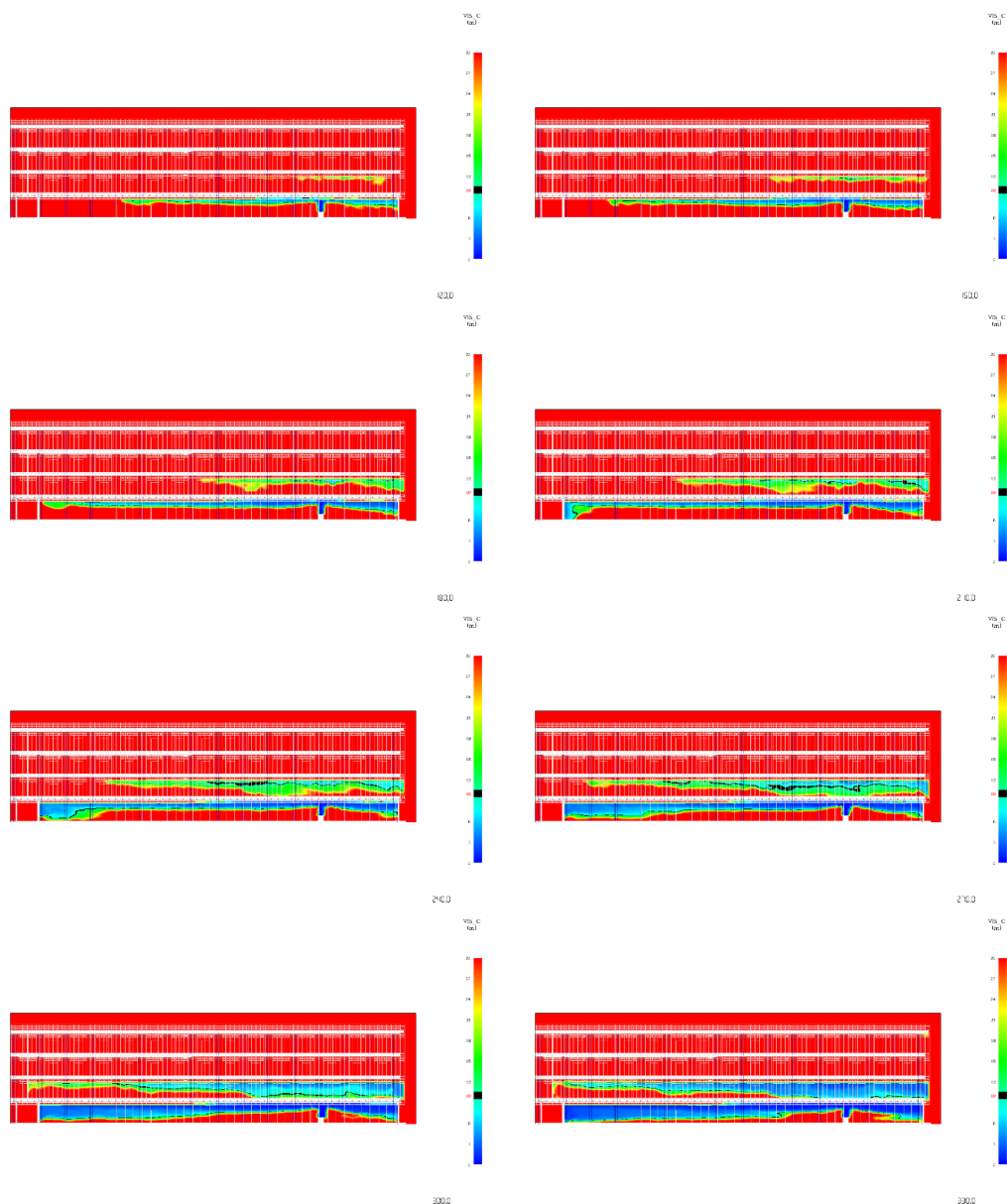


Figura 26: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. 1

Oltre alla verifica della visibilità, si riportano gli screen della slice 2D verticale relativa alla temperatura di massima di esposizione, altro parametro rilevante che solitamente rappresenta un valore critico. Tuttavia, come è possibile notare, la temperatura critica è limitata alla zona prossima al focolare. Questa non rappresenta un dato preoccupante ai fini del rispetto delle soglie di prestazione in quanto quest'area è abbandonata dagli occupanti in breve tempo dopo l'inizio del principio d'incendio.

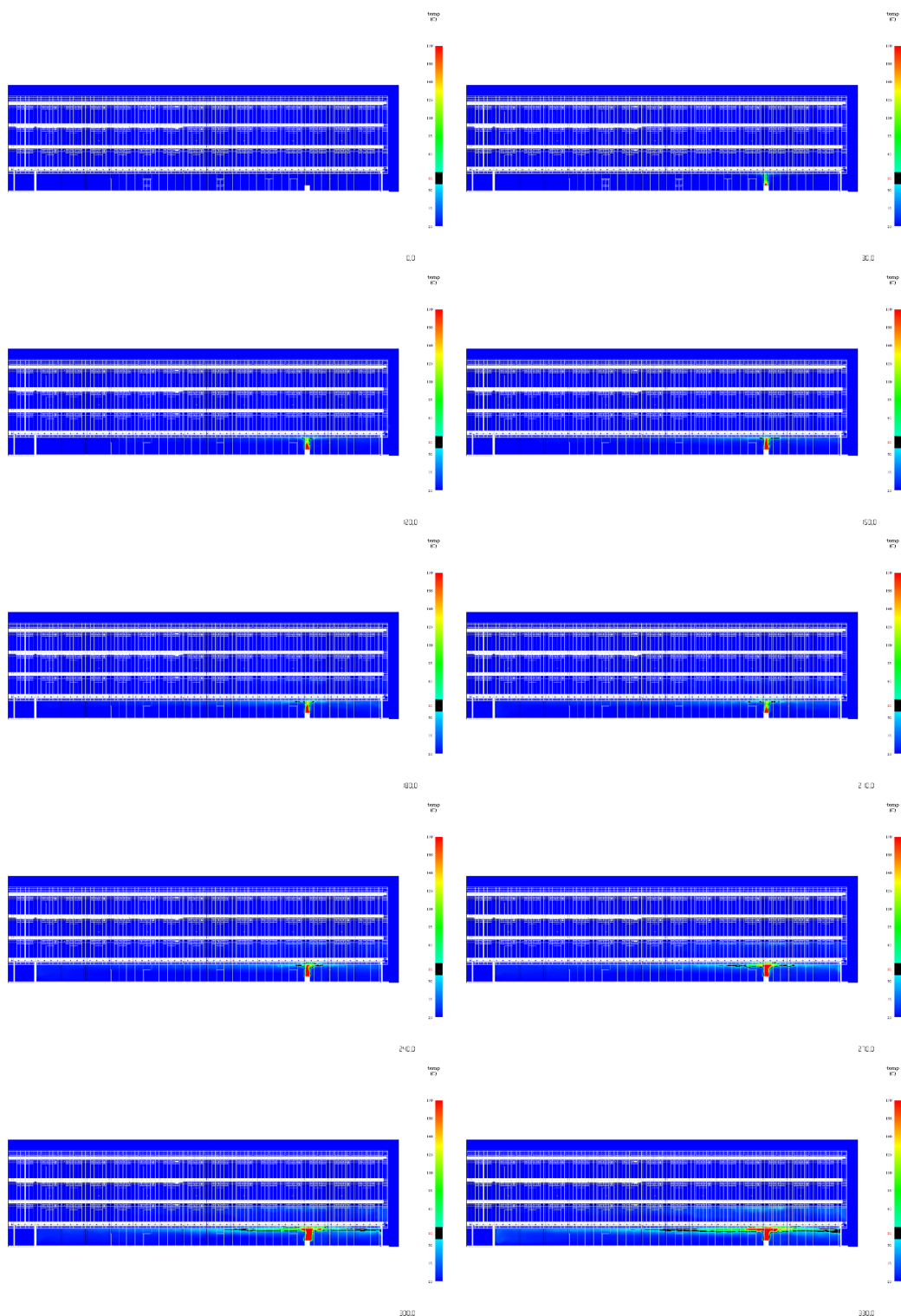
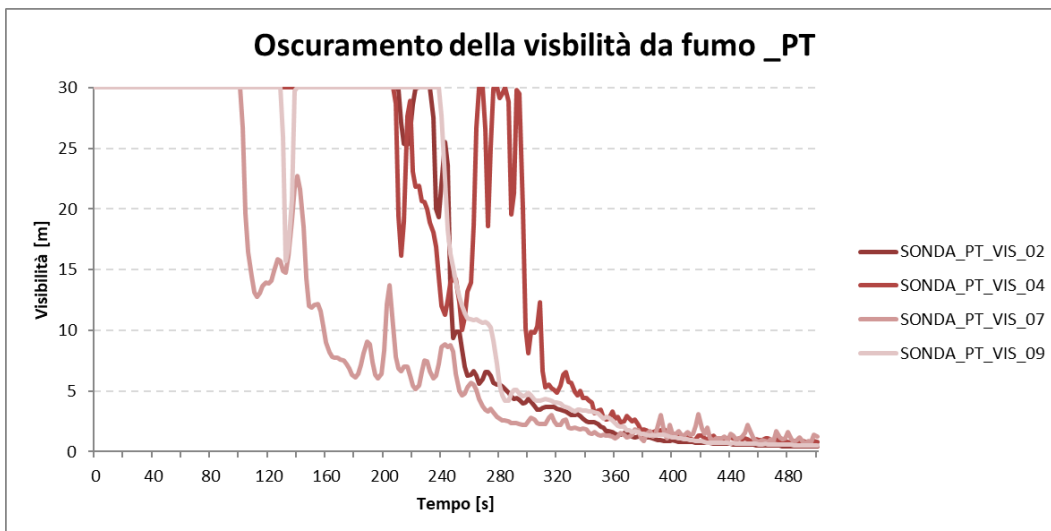
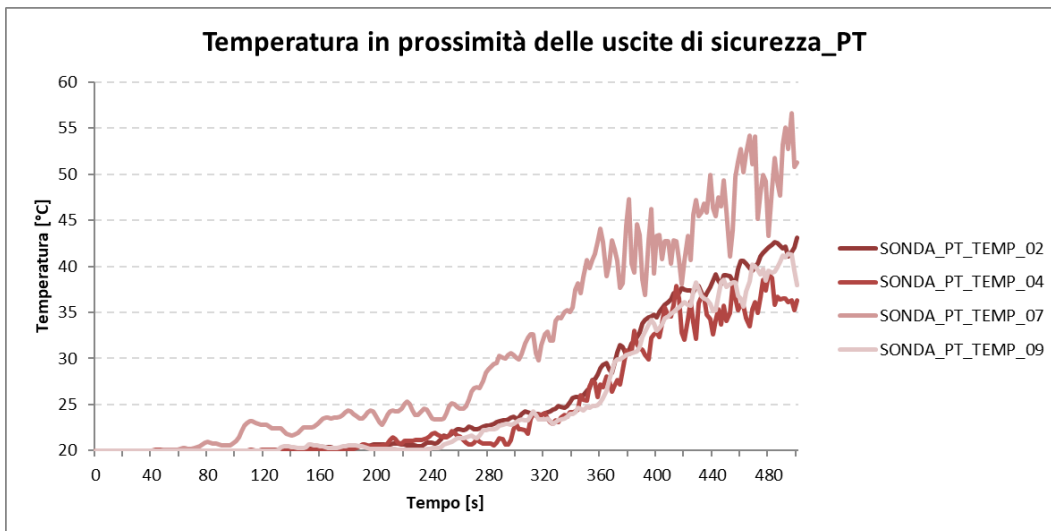
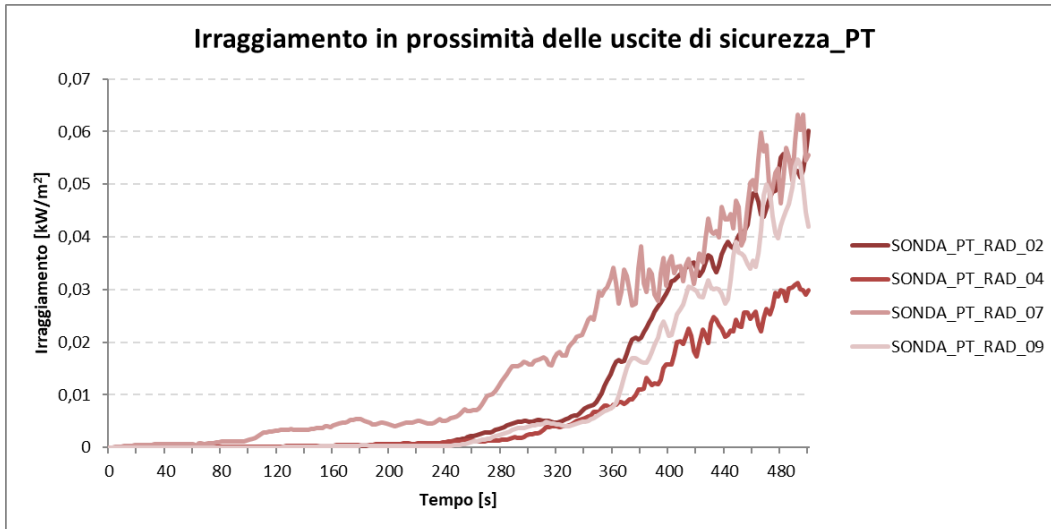
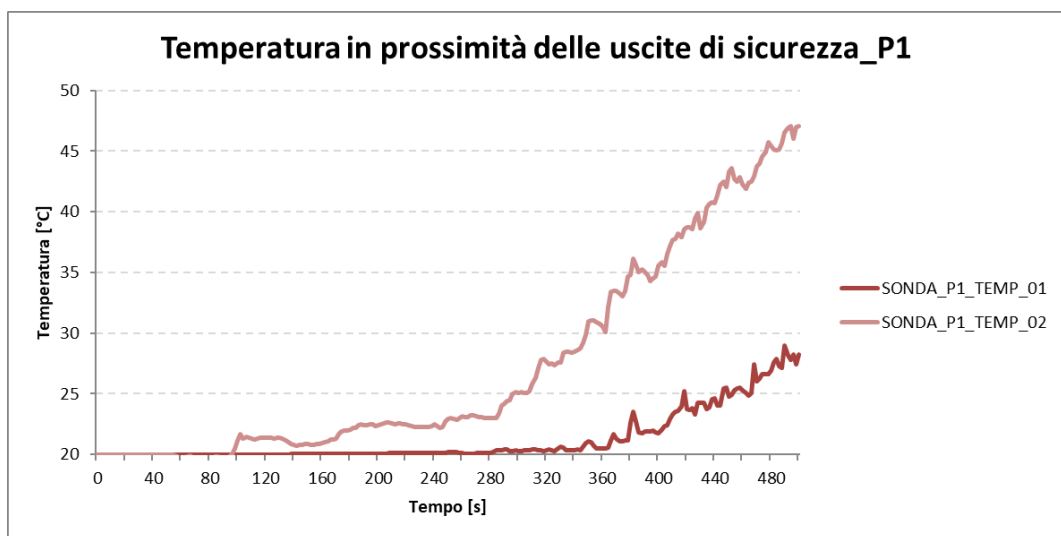
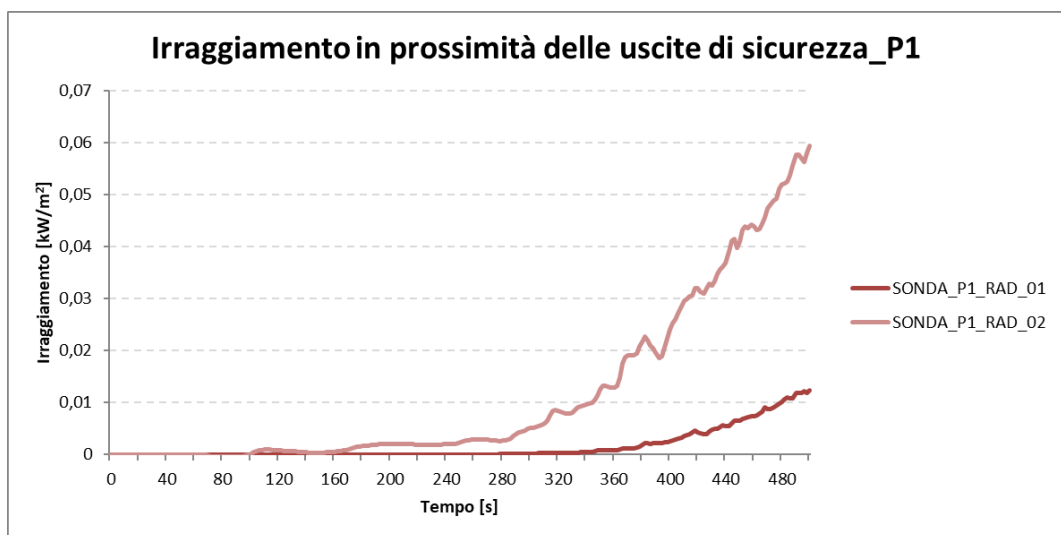
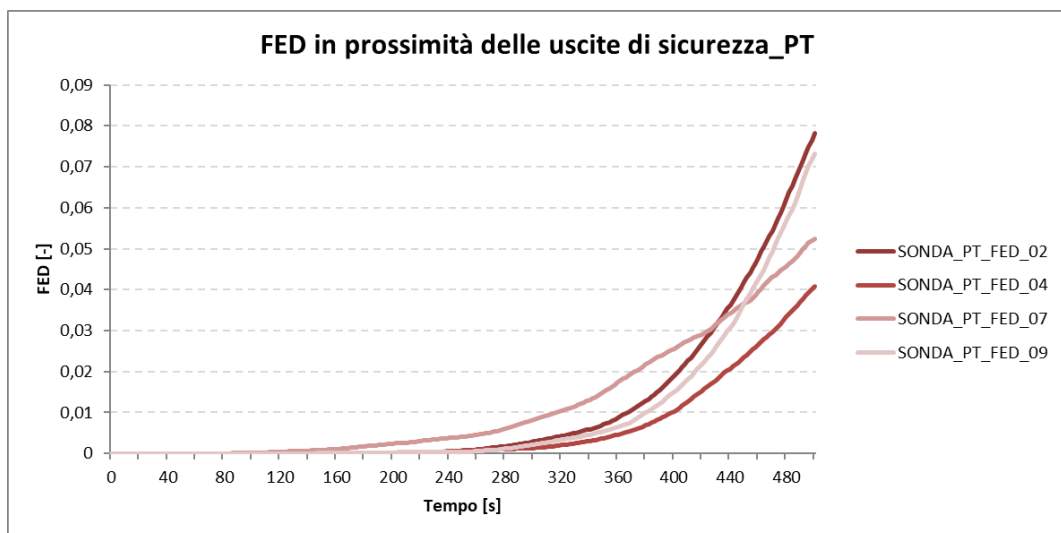
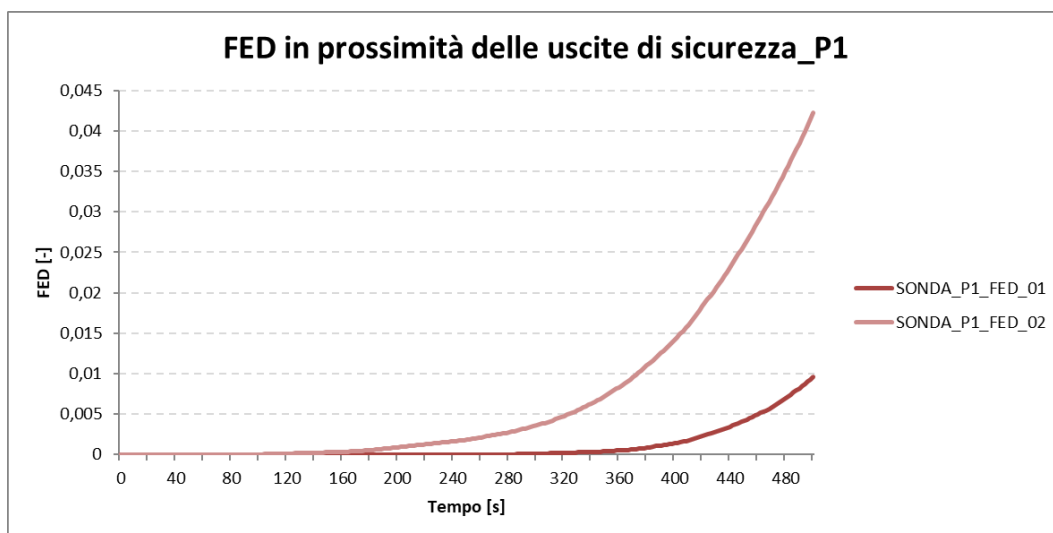
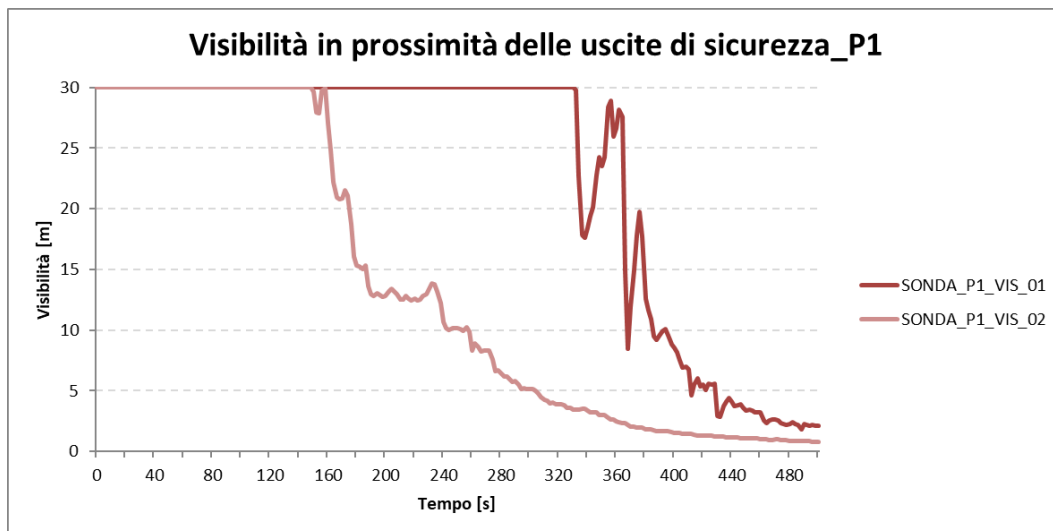


Figura 27. Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura di esposizione – Sezione – Scen. 1

Per una valutazione quantitativa si riportano di seguito i grafici relativi alle sonde posizionate all'interno del piano terra e del piano primo del compartimento in prossimità delle uscite di sicurezza per la valutazione di dettaglio delle soglie di prestazione da garantire.







Come prevedibile dalla visualizzazione tramite slice 2D, l'unico parametro da valutare con attenzione risulta essere quello dell'oscuramento della visibilità da fumo. Questo dato risulta però non allarmante in quanto sono sempre disponibili uscite di sicurezza e percorsi d'esodo in cui è garantita la visibilità. Inoltre, è importante sottolineare come, ai fini del calcolo della visibilità all'interno del software di simulazione, è stata utilizzata la costante C di visibilità pari a 3, ovvero ipotizzando segnaletica di esodo riflettente non illuminata. Al fine di migliorare la visibilità sarebbe opportuno utilizzare pannelli retroilluminati per indicare le vie di esodo, utilizzando un fattore di visibilità pari a 8.

4.6.3. Criterio ASET > RSET per lo scenario 1

Dalla simulazione condotta il tempo richiesto per l'esodo dal compartimento risulta essere pari a RSET=220 s. Avendo utilizzato un metodo di simulazione avanzato supportato da norme tecniche consolidate e dati di letteratura specifici, il margine di sicurezza può essere stimato pari al 10% di RSET. Essendo tale valore inferiore al valore minimo previsto da Codice, si assume un margine di sicurezza pari a $t_{\text{marg}}=30$ s.

Si riportano di seguito i risultati della simulazione condotta necessari a calcolare il tempo disponibile per l'esodo:

Prestazione	Soglia di prestazione	Piano terra	Piano primo	Piano secondo	Piano terzo
<i>Temperatura di esposizione [°C]</i>	60	< 60	< 60	<< 60	<< 60
<i>Irraggiamento termico [kW/m²]</i>	2,5	<2,5	<<2,5	<< 2,5	<< 2,5
<i>Visibilità [m]</i>	10	>10*	>10*	>> 30	>> 30
<i>FED [-]</i>	0,1	<< 0,1	<< 0,1	<< 0,1	<<0,1

* Il valore contrassegnato con asterisco risulta conforme alla soglia prestazionale prevista dalla normativa, ma necessita di alcune considerazioni specifiche legate allo scenario analizzato.

Dall'analisi presentata nel paragrafo precedente emerge un tempo disponibile per l'esodo superiore ad ASET=250 secondi. Inoltre, anche oltre questo intervallo temporale, alcuni percorsi di esodo mantengono condizioni pienamente compatibili con il rispetto delle soglie di prestazione previste dalla normativa. Per quanto riguarda i piani terzo e quarto, la propagazione dei prodotti della combustione non risulta essere preoccupante per l'esodo degli occupanti. In questo scenario, gli ultimi due piani non sono compromessi entro i tempi considerati per l'esodo, tanto da permettere un'evacuazione senza intercorrere negli effetti della combustione.

Sulla base di tali risultati risulta pertanto soddisfatto il criterio **ASET > RSET**, attestando il rispetto di tutte le condizioni prestazionali necessarie ai fini della salvaguardia della vita.

4.7. Scenario 2 – Incendio di cavi su passerella in controsoffitto

4.7.1. Caratterizzazione dell'incendio

L'incendio caratteristico preso in considerazione in questo scenario è l'incendio di cavi su passerella all'interno di un controsoffitto, con innesco di tipo elettrico. Il focolaio è ipotizzato coincidente con una passerella di larghezza d 45 cm altezza di 30 cm per una lunghezza di 2,5 m. La potenza termica rilasciata secondo la curva HRR dell'esperimento J4 10-13 di un incendio cavi su passerella trattato dal *Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests, Research financed by the Swedish Fire Research Board (BRANDFORSK)*.

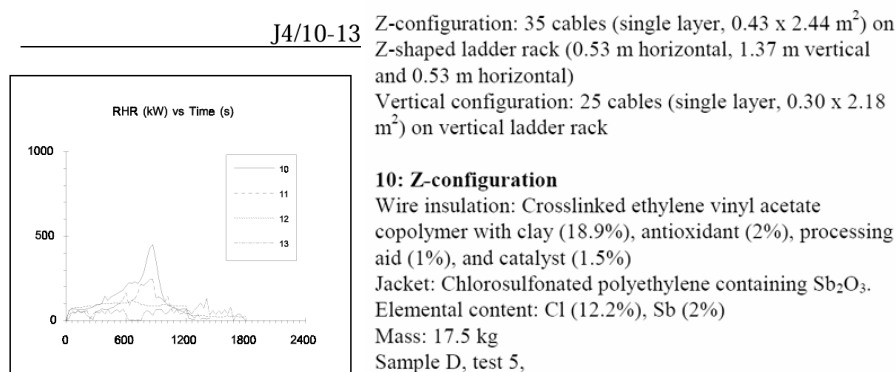


Figura 28: Curva sperimentale utilizzata nello scenario 2

Anche in questo caso si è scelto di caratterizzare l'incendio utilizzando il focolare delle prove di laboratorio come individuato ai paragrafi precedenti. Di seguito si riportano i parametri inseriti all'interno del software di simulazione per ricreare le condizioni sperimentali di riferimento.

Edit Surfaces

Surface ID: BURNER

Description:

Tags:

Color: ■ Appearance: X

Surface Type: Burner

Fuel Composition Geometry Particle Injection Advanced

Heat Release Thermal

Heat Release

☒ Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 212.0 kW/m²

☐ Mass Loss Rate: 0.0 kg/(m²·s)

Ramp-Up Time: Custom Edit Values...

Extinguishing Coefficient: 0.0 m²/(kg·s)

New...

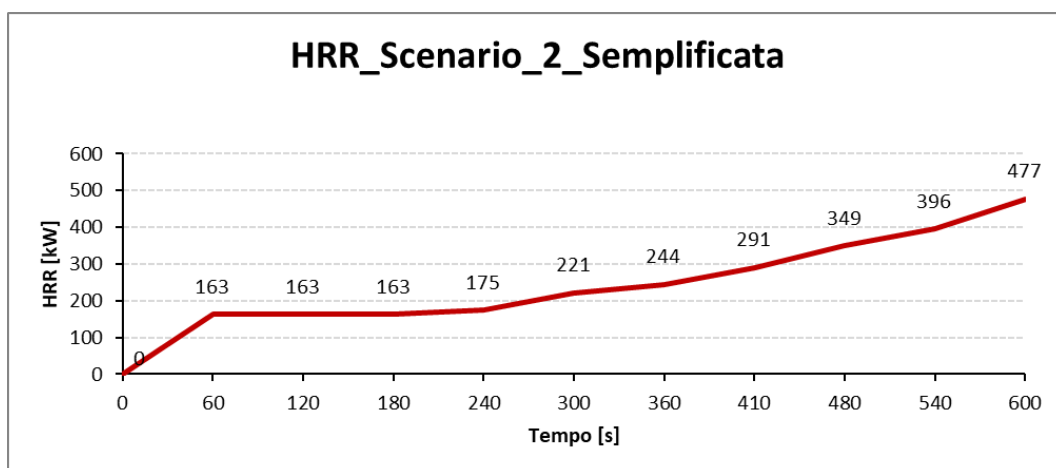
Add From Library...

Rename...

Delete...

Apply OK Cancel

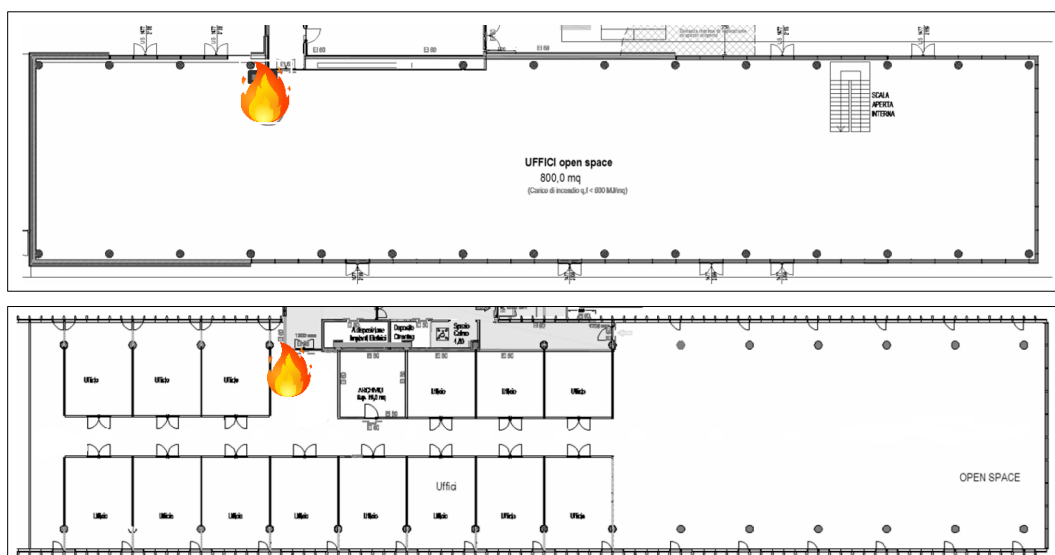
Tempo (s)	Frazione	HRR (kW)
0	0,00	0,00
60	0,14	162,89
120	0,14	162,89
180	0,14	162,89
240	0,15	174,52
300	0,19	221,06
360	0,21	244,33
410	0,25	290,87
480	0,30	349,04
540	0,34	395,58
600	0,41	477,02



Le altre caratteristiche del focolaio sono quelle dello scenario predefinito riportato in Tabella M.2-2, già utilizzate per lo scenario precedente:

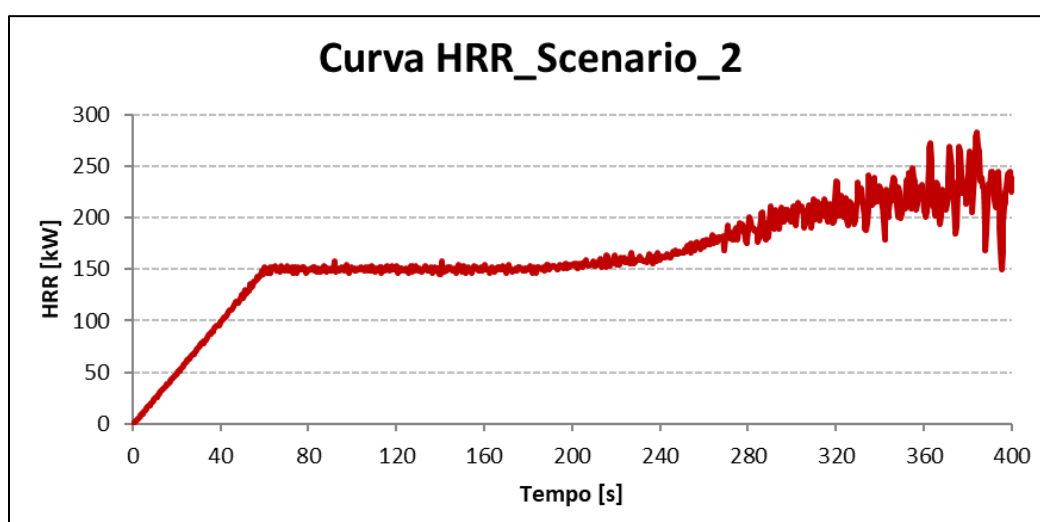
- Resa in particolato Y_{soot} : 0,07 kg/kg
- Resa in monossido di carbonio Y_{CO} : 0,10 kg/kg
- Calore di combustione 20 MJ/kg

L'area in cui è ubicato lo scenario è in prossimità dell'uscita di sicurezza che collega il compartimento multipiano con il blocco scale. L'incendio si sviluppa nella porzione di passaggio cavi tra controsoffitto e pavimento del piano uffici sovrastante



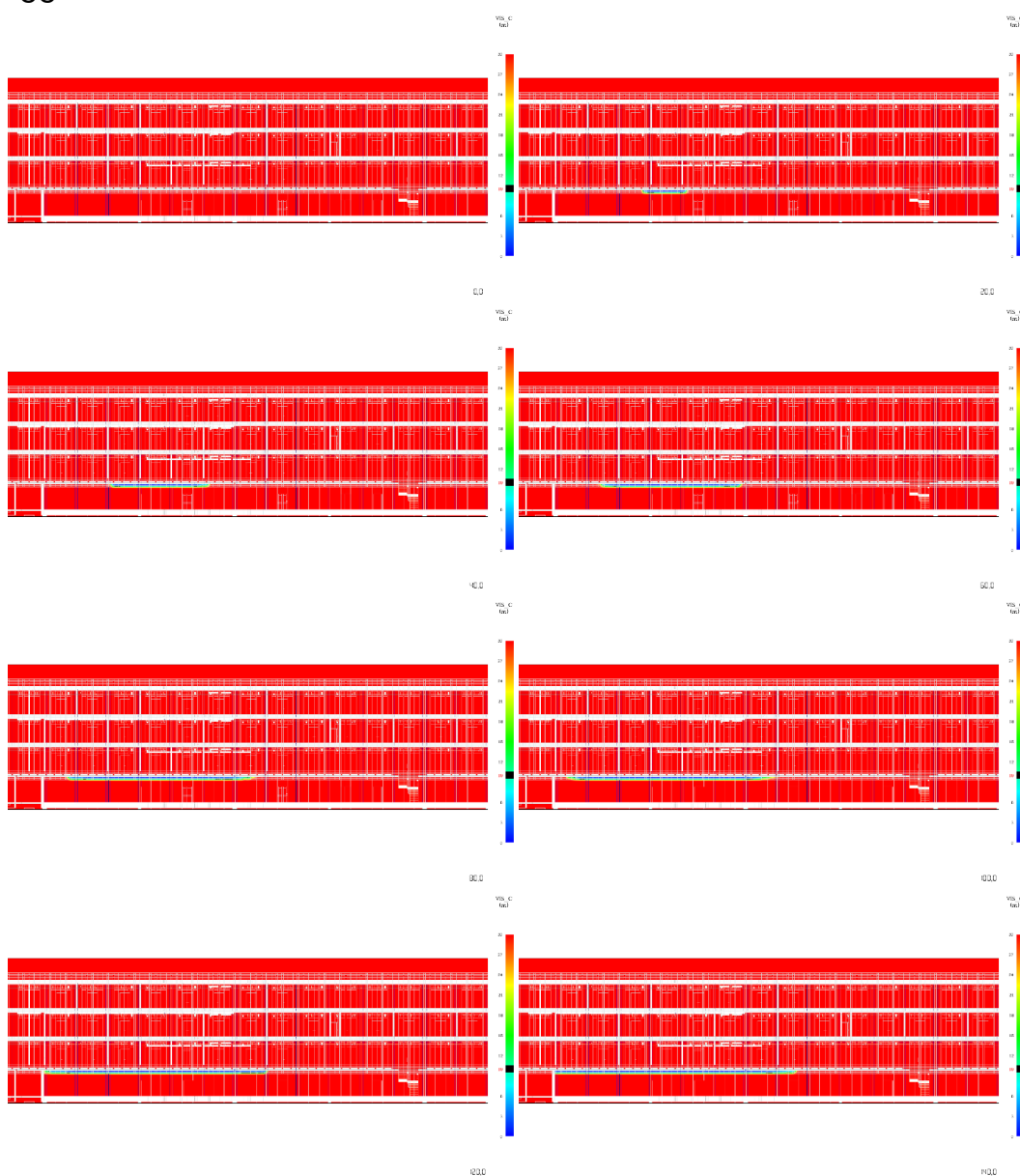
Per garantire le condizioni di una combustione completa l'incendio non è controllato dalla ventilazione. Esso è di tipo con fiamma e l'accensione di tutto il materiale coinvolto avviene al tempo $t=0$. Il combustibile considerato è quello generico proposto dalla tabella M.2-2 e caratterizzato dalla formula chimica $CH_2O_{0,5}$. Il focolare riproduce una passerella di larghezza di 45 cm altezza di 30 cm per una lunghezza di 2,5 m con caratteristiche HRR della curva sperimentale. La potenza termica è rilasciata dalla faccia superiore e da quella inferiore del parallelepipedo.

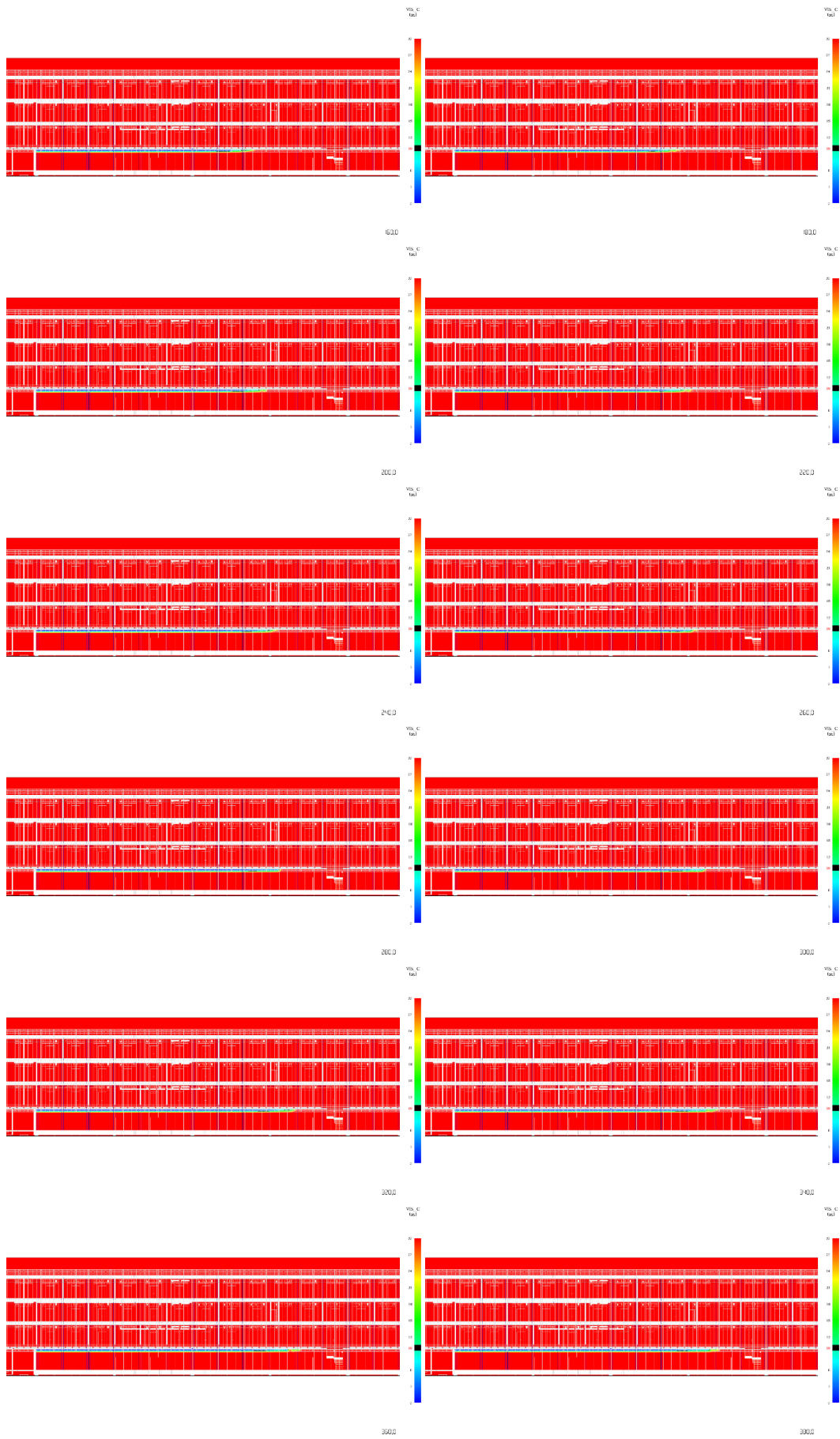
Si riporta di seguito la curva HRR calcolata dal software di simulazione:



4.7.2. Determinazione di ASET per lo scenario 2

Anche in questo scenario l'analisi dei risultati ottenuti è cominciata con una valutazione dei parametri effettuata tramite slice 2D. Tuttavia, in questo caso, dato la ridotta potenza del focolare e il confinamento dello stesso all'interno del controsoffitto, i prodotti della combustione non rappresentano criticità alla quota di 1,80 m indicata dal Codice, in quanto la propagazione degli stessi è limitato allo spazio confinato tra solaio e controsoffitto. Si riportano di seguito gli screen a sequenza di 20 secondi dei risultati della simulazione del secondo scenario rispetto a temperatura e visibilità. Anche in questo caso FED e irraggiamento termico sono trascurabili.





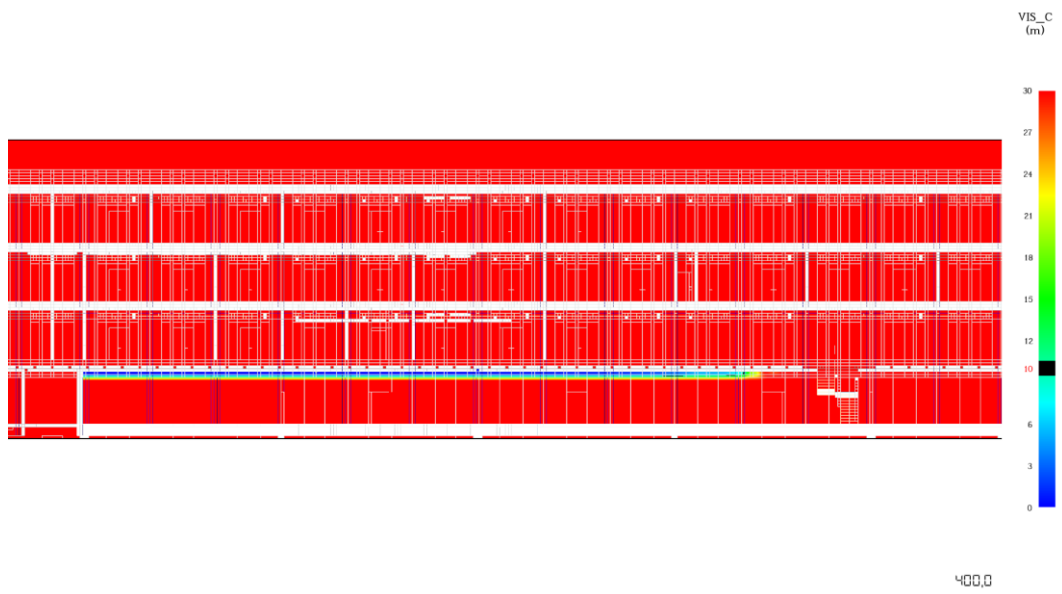
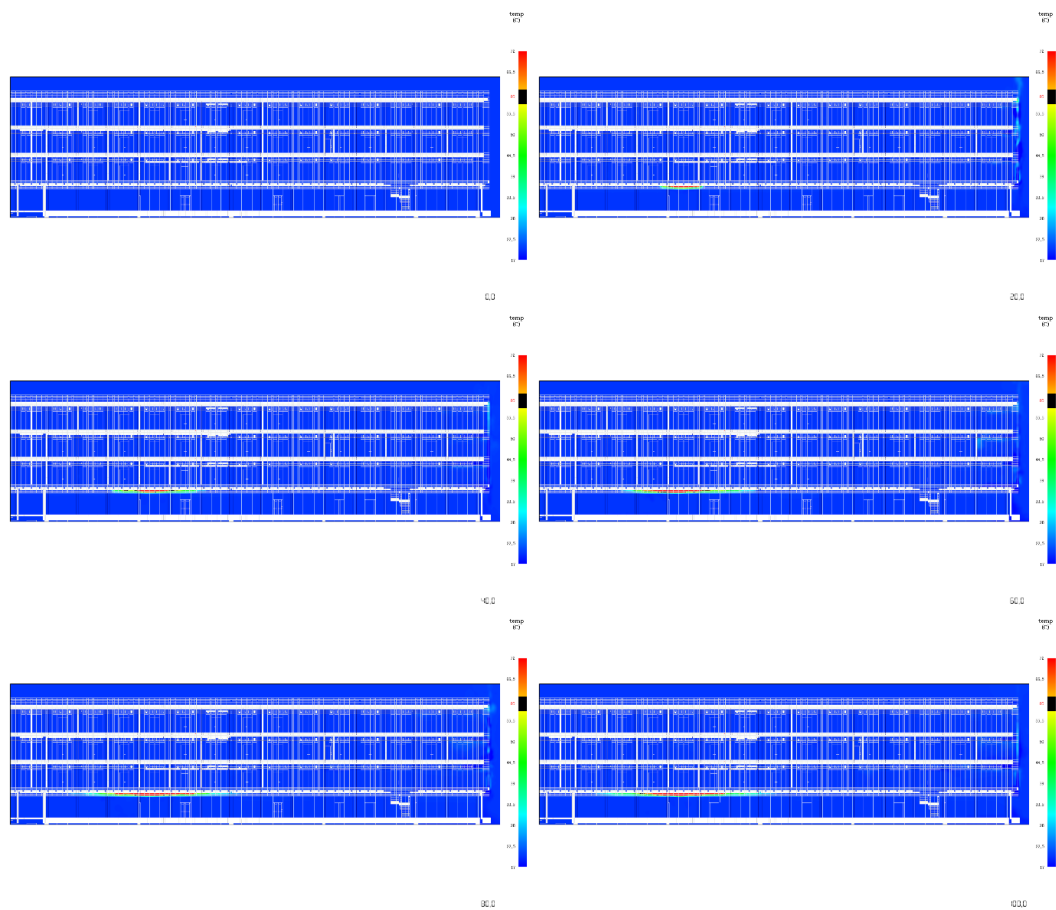
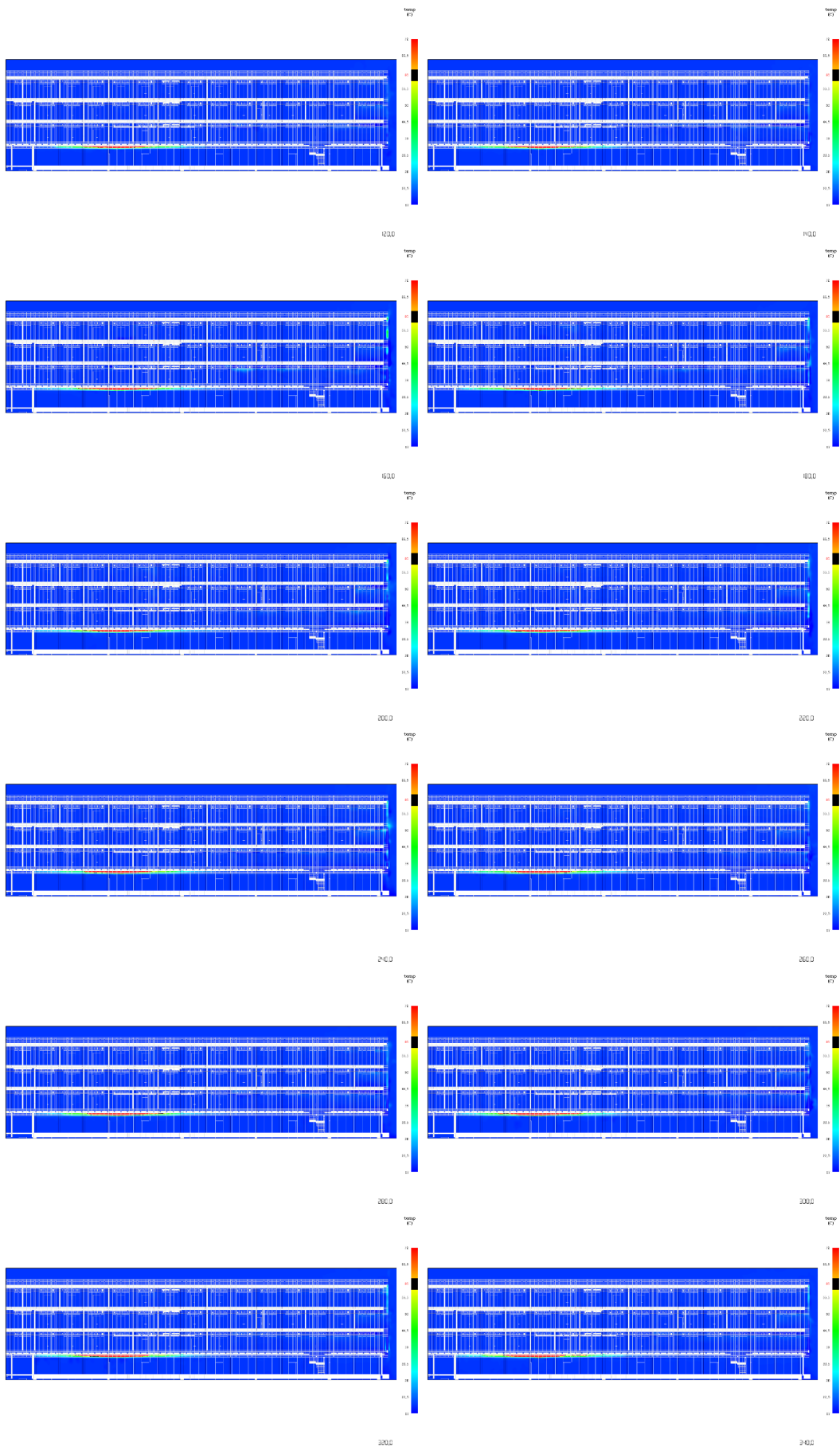


Figura 29: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. 2





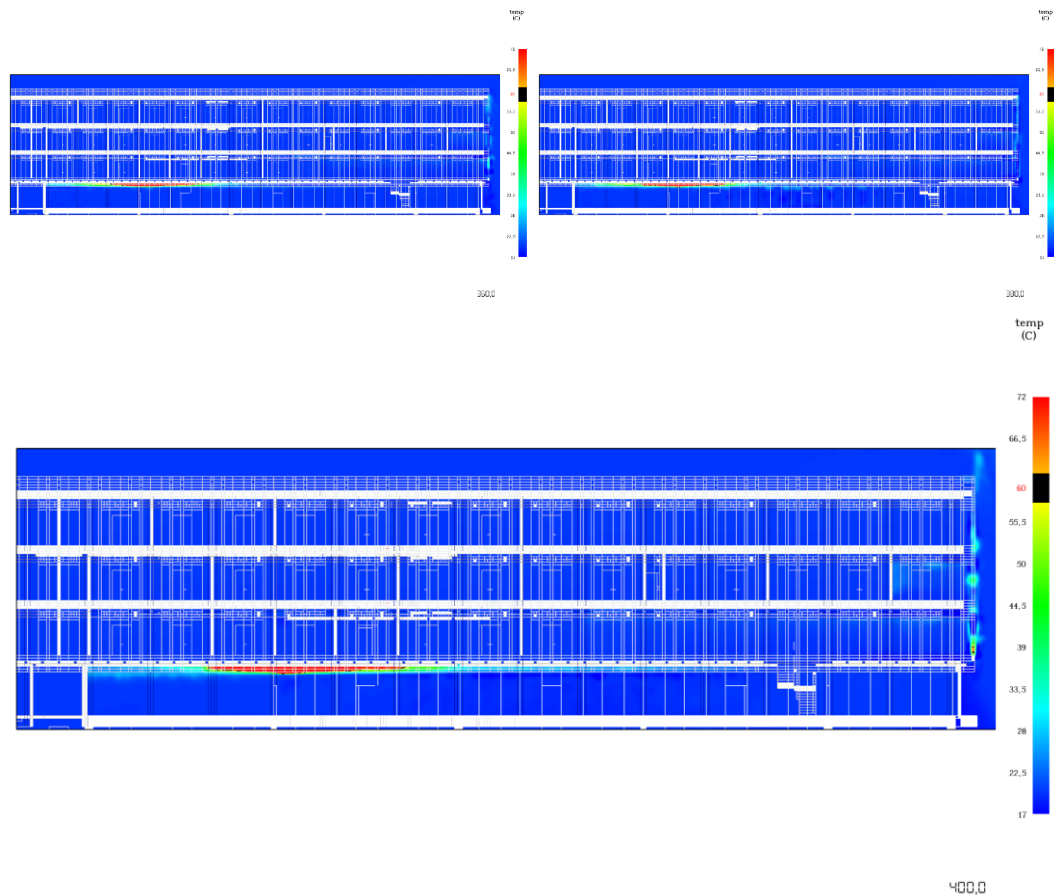


Figura 30: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura – Sezione – Scen. 2

4.7.3. Criterio ASET > RSET per lo scenario 2

Dalla simulazione condotta il tempo richiesto per l'esodo dal compartimento risulta essere pari a $RSET=220$ s. Avendo utilizzato un metodo di simulazione avanzato supportato da norme tecniche consolidate e dati di letteratura specifici, il margine di sicurezza può essere stimato pari al 10% di RSET. Essendo questo valore inferiore al valore minimo previsto da Codice, si potrebbe assumere un margine di sicurezza pari a $t_{\text{marg}}=30$ s. Tuttavia, le soglie di prestazione vengono verificate anche considerando un t_{marg} pari al 100% di RSET, valore molto più cautelativo indicato da normativa.

Si riportano di seguito i risultati della simulazione condotta necessari a calcolare il tempo disponibile per l'esodo:

Prestazione	Soglia di prestazione	Piano terra	Piano primo	Piano secondo	Piano terzo
<i>Temperatura di esposizione [°C]</i>	60	<< 60	<< 60	<< 60	<< 60
<i>Irraggiamento termico [kW/m²]</i>	2,5	<< 2,5	<< 2,5	<< 2,5	<< 2,5
<i>Visibilità [m]</i>	10	>> 30	>> 10	>> 30	>> 30
<i>FED [-]</i>	0,1	<< 0,1	<< 0,1	<< 0,1	<< 0,1

Dall'analisi presentata nel paragrafo precedente emerge un tempo disponibile per l'esodo superiore ad ASET=450 secondi.

Sulla base di tali risultati risulta pertanto soddisfatto il criterio **ASET > RSET**, attestando il rispetto di tutte le condizioni prestazionali necessarie ai fini della salvaguardia della vita. Inoltre, è possibile affermare che, visti i risultati forniti dalla simulazione, possa essere verificato anche il criterio ideale riportato al paragrafo M.3.2.1 del Codice di Prevenzione Incendi, il quale afferma che la progettazione ideale del sistema d'esodo dovrebbe garantire a tutti gli occupanti la possibilità di raggiungere un luogo sicuro senza mai incontrare gli effetti dell'incendio.

5. Scenari aggiuntivi per la formazione

5.1. *Mancata compartimentazione del filtro*

Utilizzando lo scenario d'incendio già definito per le verifiche prestazionali, è stata sviluppata una ulteriore simulazione mediante la modifica delle condizioni al contorno, con l'obiettivo di valutare la sensibilità delle soluzioni progettuali e gestionali al verificarsi di criticità riconducibili alla gestione della sicurezza antincendio. In particolare, lo scenario aggiuntivo è stato concepito per evidenziare come carenze o errori, sia nella fase di esercizio dell'attività sia durante la gestione dell'emergenza, possano compromettere l'efficacia delle misure previste dal Codice di prevenzione incendi e, al contempo, invalidare le assunzioni alla base dell'analisi prestazionale condotta secondo l'approccio prestazionale. Lo scenario simulato risulta del tutto analogo allo scenario di incendio di progetto n. 1 in termini di geometria, carico d'incendio e sviluppo del focolaio, differenziandosi esclusivamente per l'assenza della compartimentazione del comparto multipiano. Questa condizione è stata modellata ipotizzando la mancata chiusura delle porte di tipo REI poste a protezione del filtro, determinando la perdita di ermeticità del sistema di separazione e la conseguente invasione del compartimento filtro da parte dei fumi e dei prodotti della combustione. In questa configurazione, il filtro cessa di svolgere la propria funzione di elemento di protezione dei percorsi di esodo e degli eventuali spazi calmi, venendo progressivamente coinvolto nello scenario incidentale. La condizione di mancata compartimentazione è stata assimilata a situazioni realistiche riconducibili a una carente manutenzione dei presidi antincendio o a un uso improprio delle porte resistenti al fuoco e dei relativi dispositivi di ritenuta e sgancio. L'esperienza operativa mostra infatti come, in diversi contesti, porte percepite dagli occupanti come elementi di disturbo alla fruizione ordinaria degli spazi vengano mantenute stabilmente aperte mediante sistemi non idonei, quali cunei, ganci o oggetti di fortuna, vanificando di fatto la funzione di compartimentazione prevista in fase progettuale.

In condizioni di emergenza, tali comportamenti possono determinare una rapida propagazione dei prodotti della combustione lungo le vie di esodo, con effetti potenzialmente critici sulla sicurezza degli occupanti.

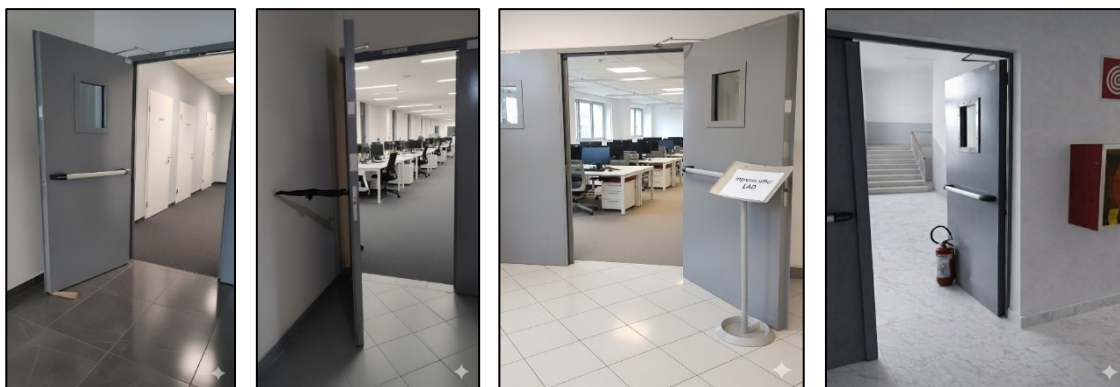
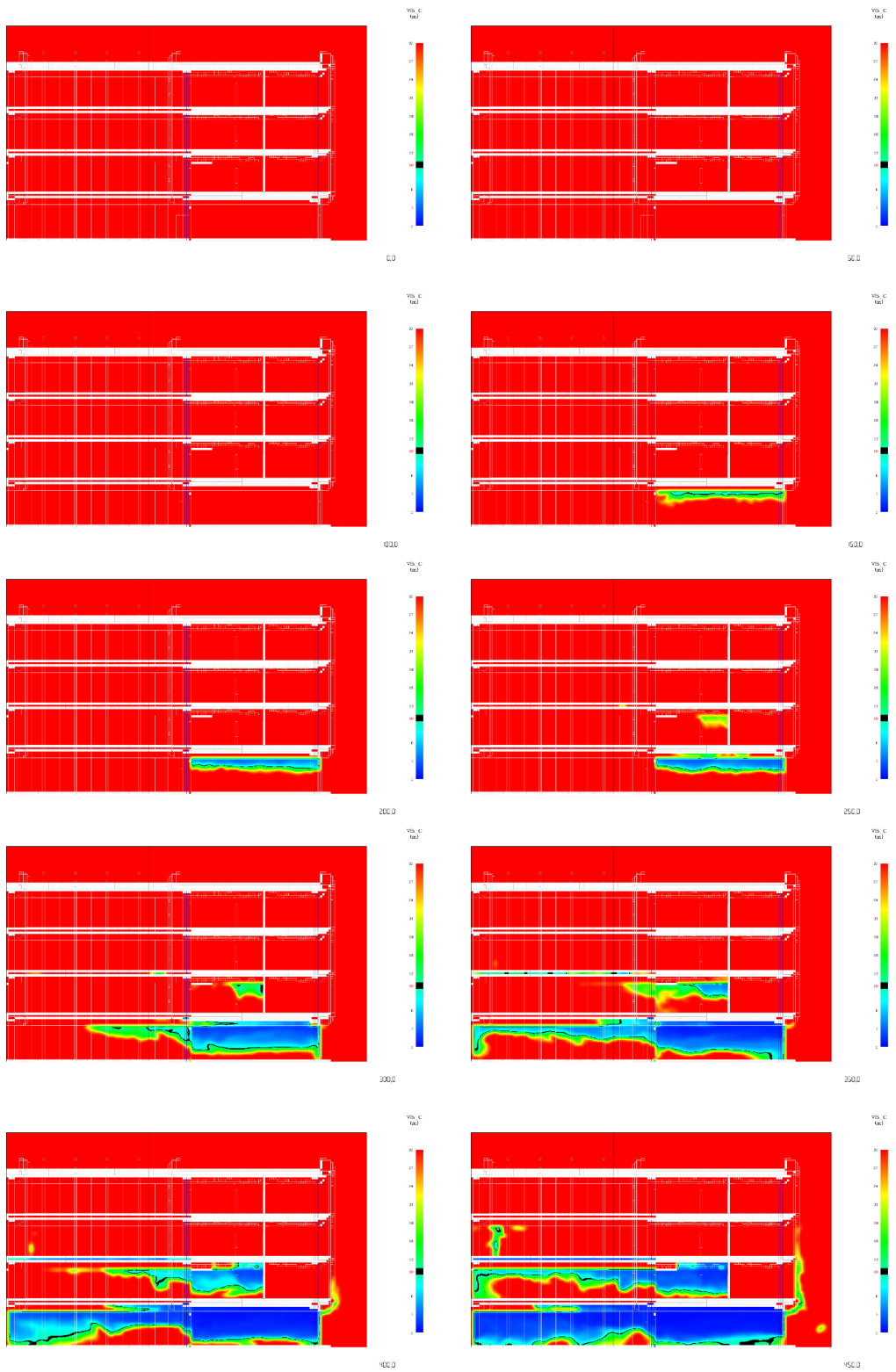


Figura 31: Esempi di mancata compartimentazione realizzati tramite AI

La simulazione ha evidenziato come il mancato contenimento dei fumi comporti un degrado significativo delle condizioni ambientali anche all'interno del locale filtro, con conseguente riduzione dell'utilizzabilità dei percorsi di esodo e compromissione delle condizioni di sicurezza negli spazi destinati alla protezione degli occupanti. I risultati ottenuti sono riportati sotto forma di elaborazioni grafiche, mediante slice 2D e grafici temporali dei principali parametri di interesse, al fine di rappresentare in modo chiaro e quantitativo l'estensione dell'invasione dei fumi e l'impatto della mancata compartimentazione sul compartimento filtro. Si può notare che, come prevedibile, il parametro critico, vista la posizione del focolare rispetto alle uscite che adducono al compartimento adiacente, risulta essere l'oscuramento della visibilità poiché raggiunge per primo le soglie di prestazioni minime da garantire per la salvaguardia della vita degli occupanti. A supporto di tali elaborazioni, l'analisi è stata ulteriormente integrata da video interattivi derivati dalle simulazioni, che consentono di visualizzare in modo dinamico l'evoluzione dello scenario incidentale e di confrontare direttamente le condizioni ambientali all'interno del locale filtro rispetto allo scenario di progetto, nel quale la compartimentazione risulta correttamente funzionante. Questi risultati confermano il ruolo determinante delle misure di gestione della sicurezza antincendio nel garantire l'efficacia complessiva del sistema di prevenzione e protezione, anche in presenza di soluzioni progettuali correttamente dimensionate secondo criteri prescrittivi e prestazionali.



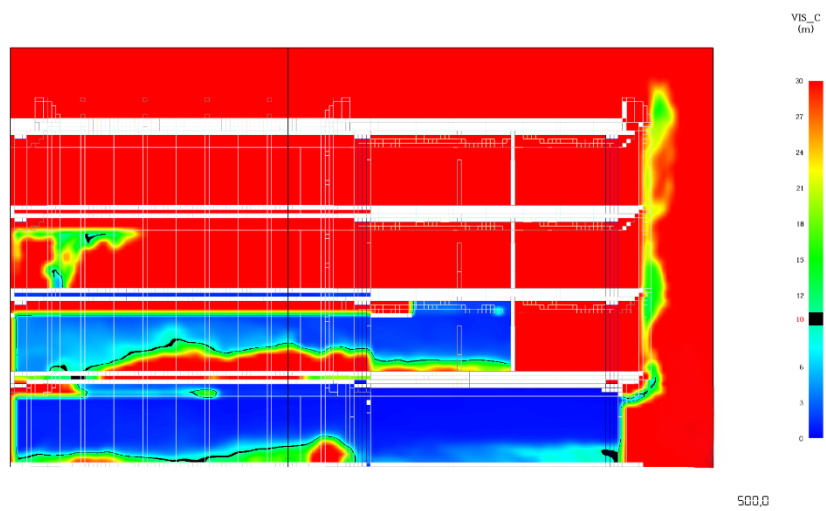
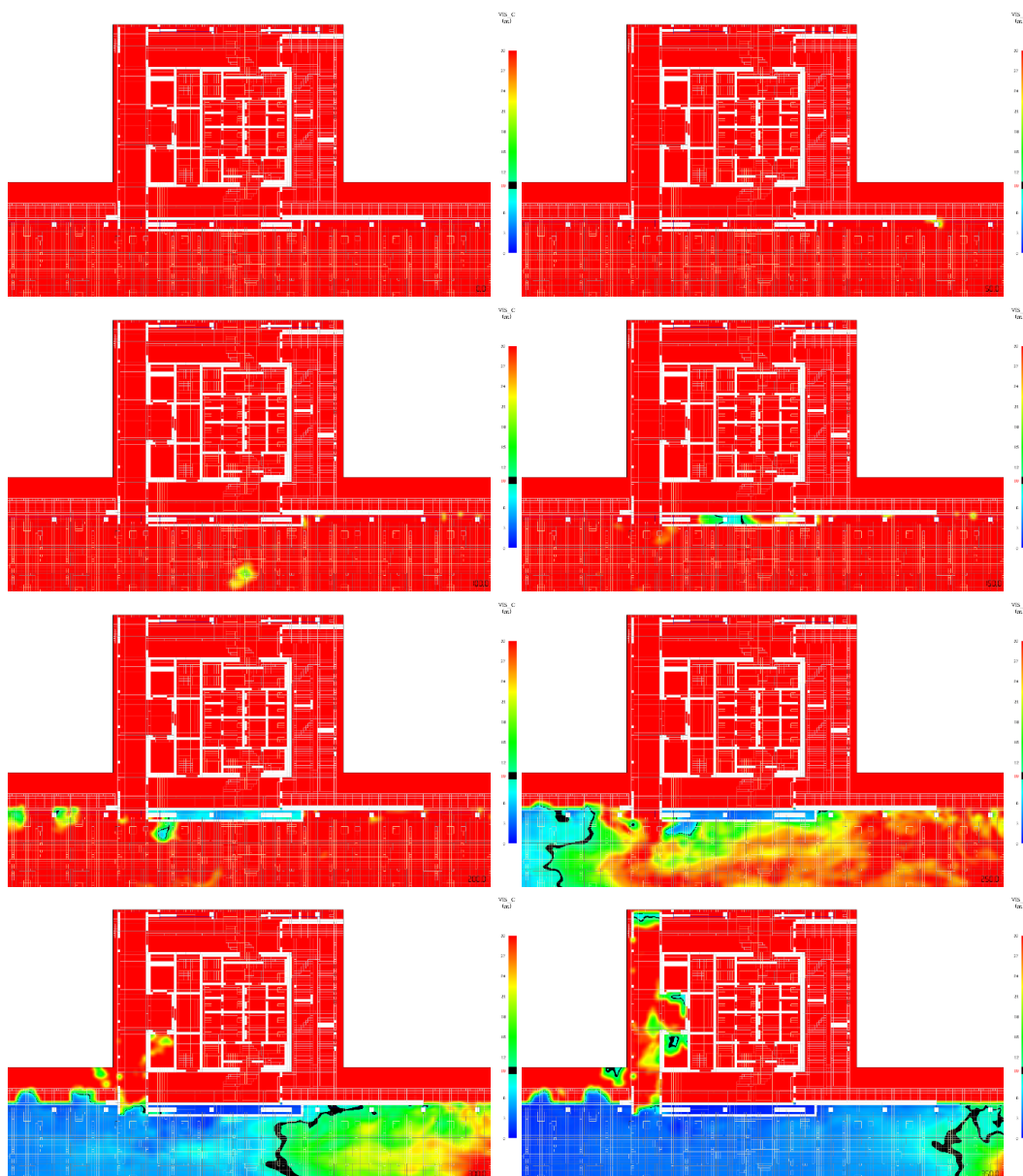


Figura 32: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. filtro compresso



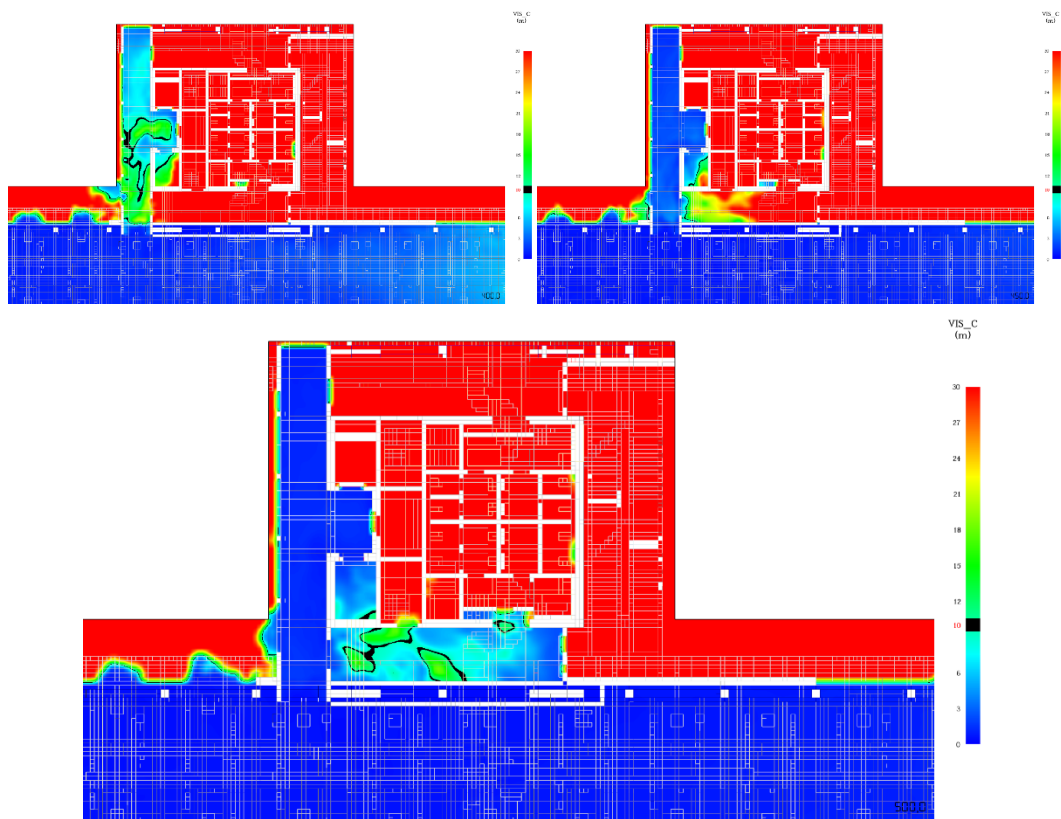
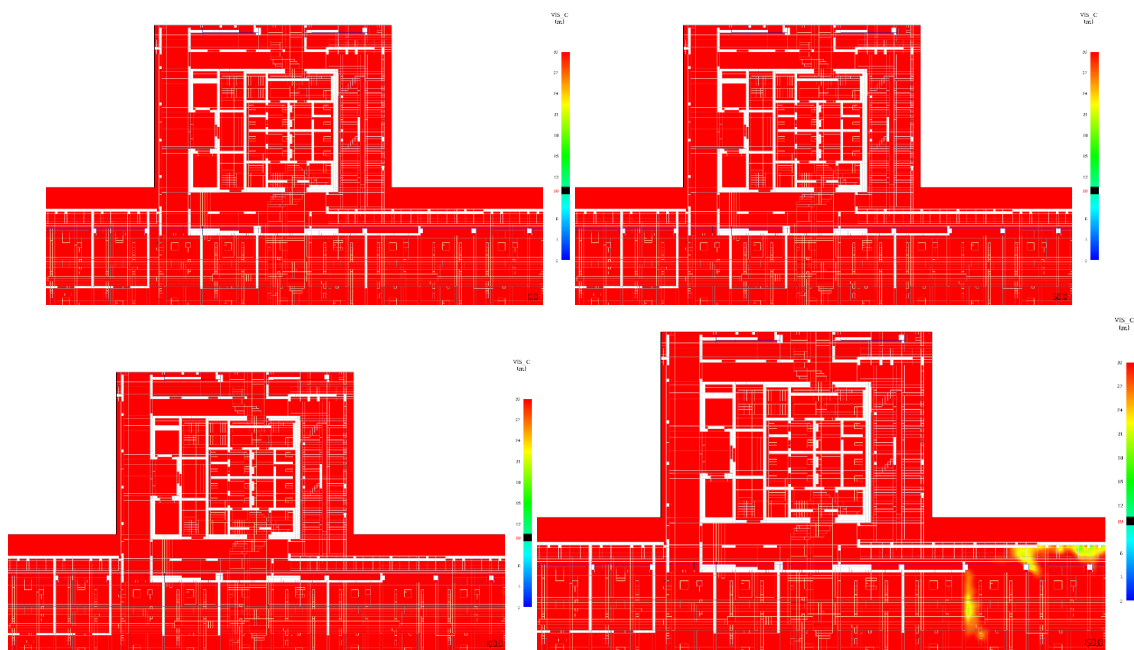


Figura 33: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Piano terra – Scen. filtro compromesso



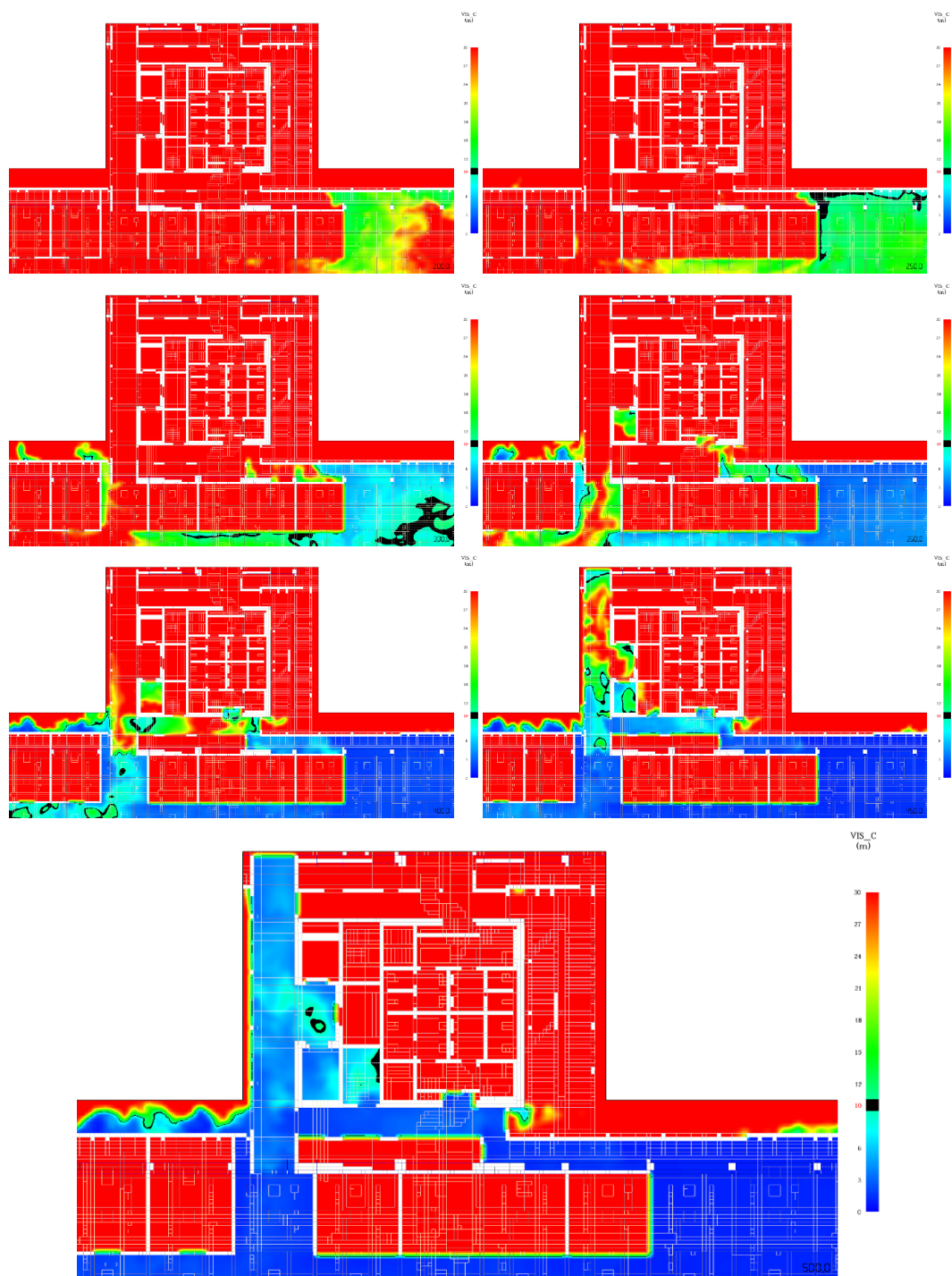
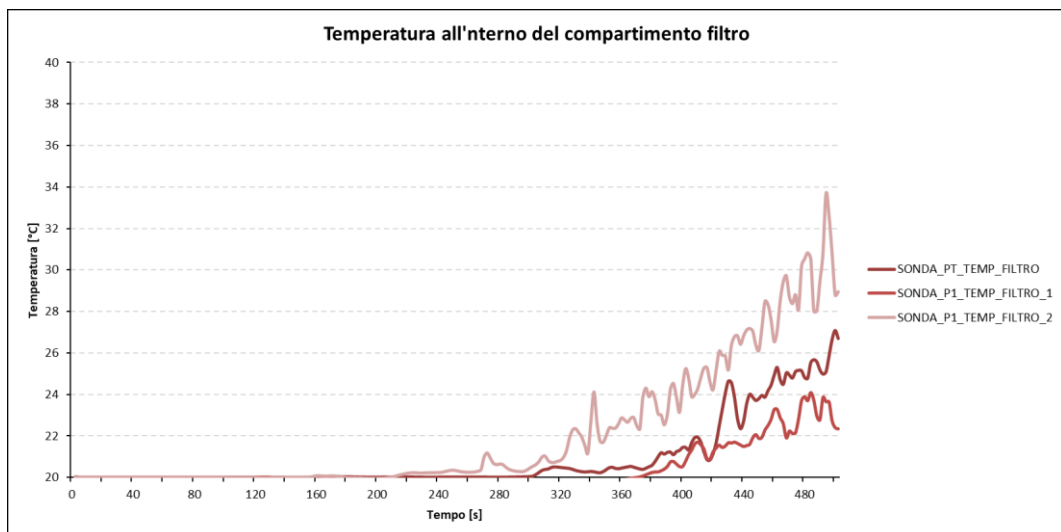
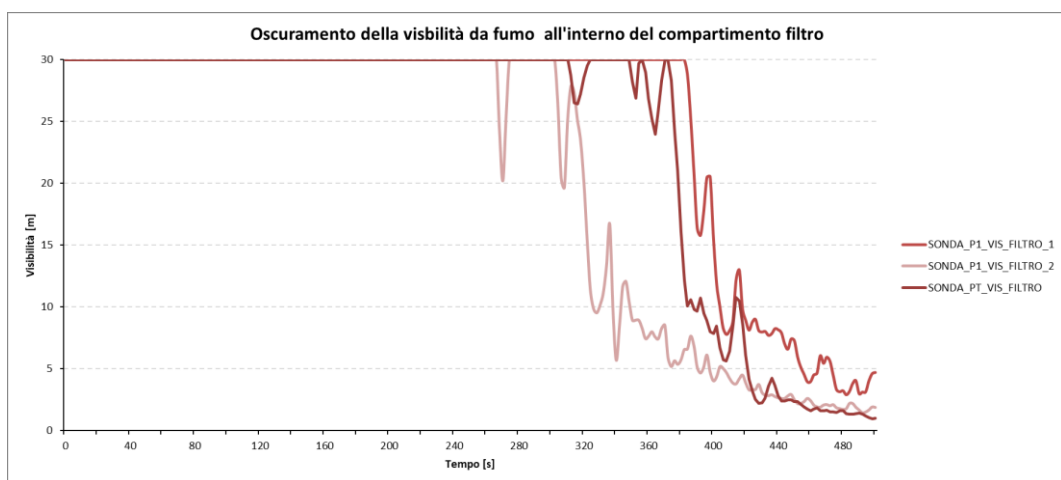
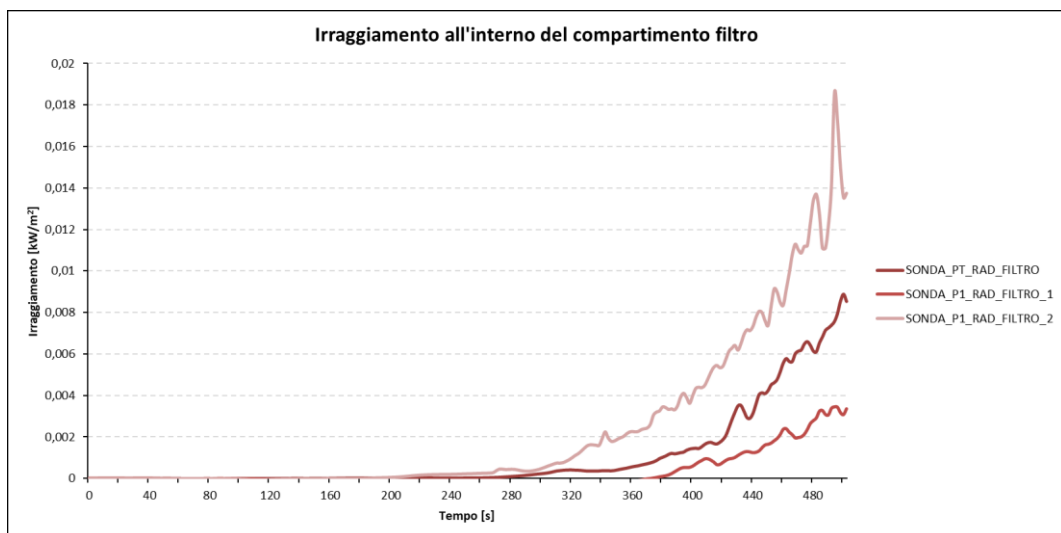
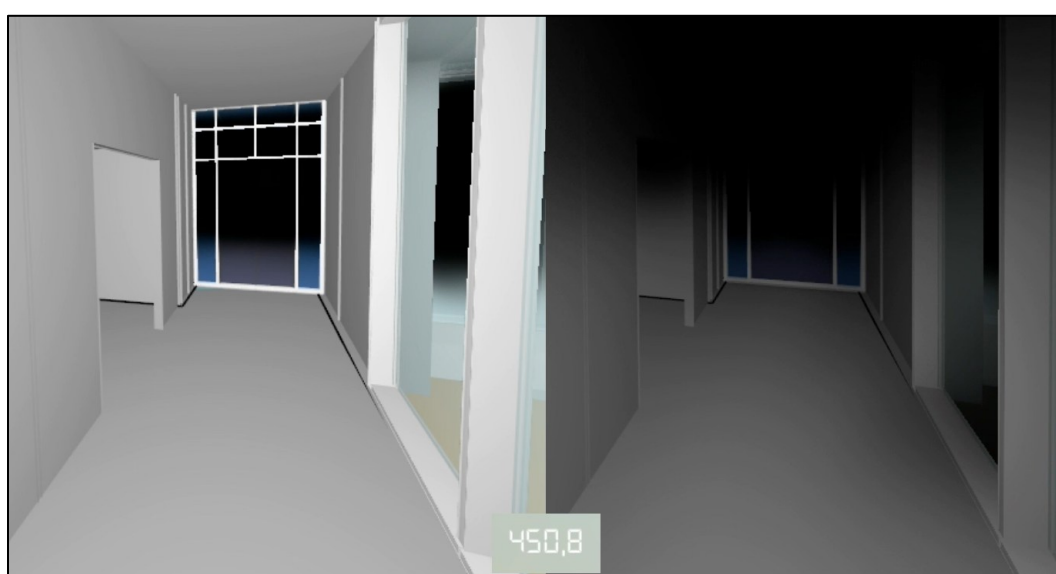
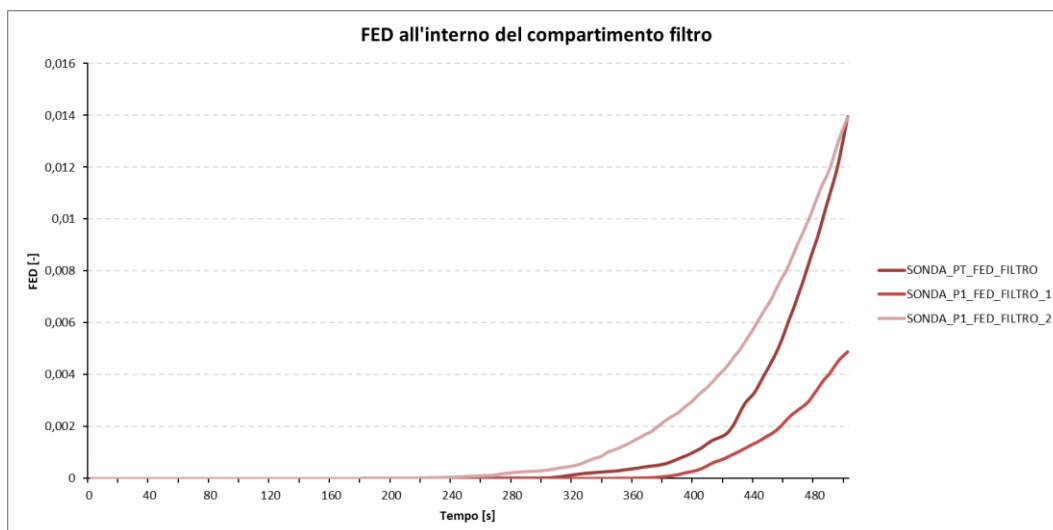
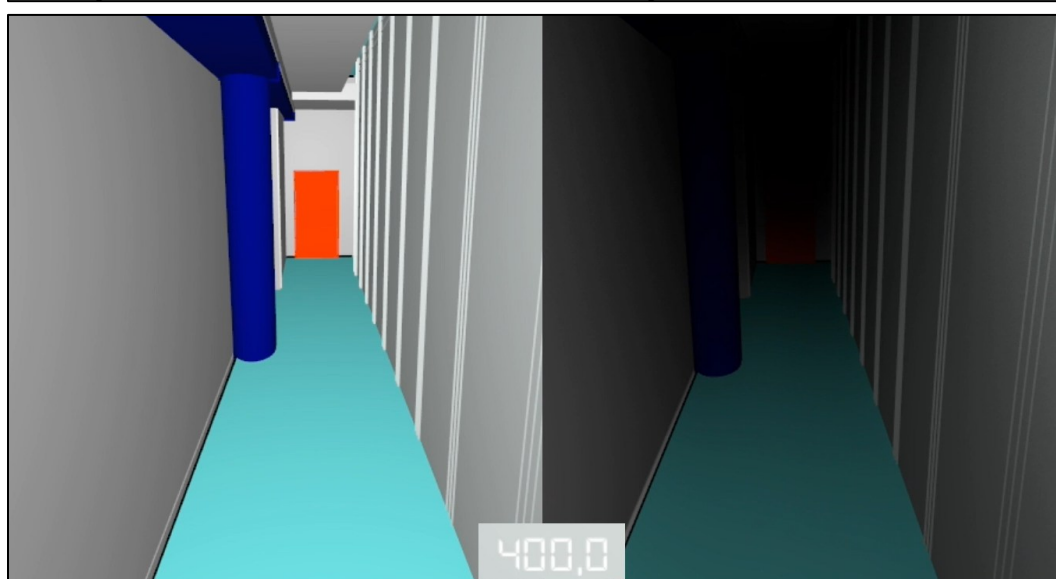


Figura 34: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Piano primo – Scen. filtro compromesso





Compartimentazione corretta Compartimentazione errata



Compartimentazione corretta Compartimentazione errata

Figura 35: Viste a confronto tra compartimentazione corretta ed errata

Vista la presenza di uno spazio calmo all'interno del locale filtro al piano primo, il degrado delle condizioni ambientali dovuto all'invasione dei fumi assume una criticità ancora maggiore, in quanto interessa direttamente aree destinate all'attesa dei soccorsi da parte di occupanti con ridotta capacità motoria. L'inquinamento da fumo di questi spazi compromette rapidamente le condizioni minime di sicurezza, annullando la funzione protettiva dello spazio calmo e generando una situazione di pericolo per le persone in attesa di assistenza. Contestualmente, queste condizioni risultano critiche anche per i soccorritori, chiamati a operare in un ambiente non controllato, con aumento dei tempi di intervento e dell'esposizione a rischi operativi. A supporto di queste valutazioni è stato realizzato un video di simulazione di un'operazione di soccorso in ambiente inquinato, supponendo che gli addetti riescano ad intervenire circa 8 minuti dopo l'inizio dell'incendio, che evidenzia in modo immediato i pericoli connessi alla mancata compartimentazione e le conseguenze operative sia per gli occupanti sia per le squadre di emergenza.

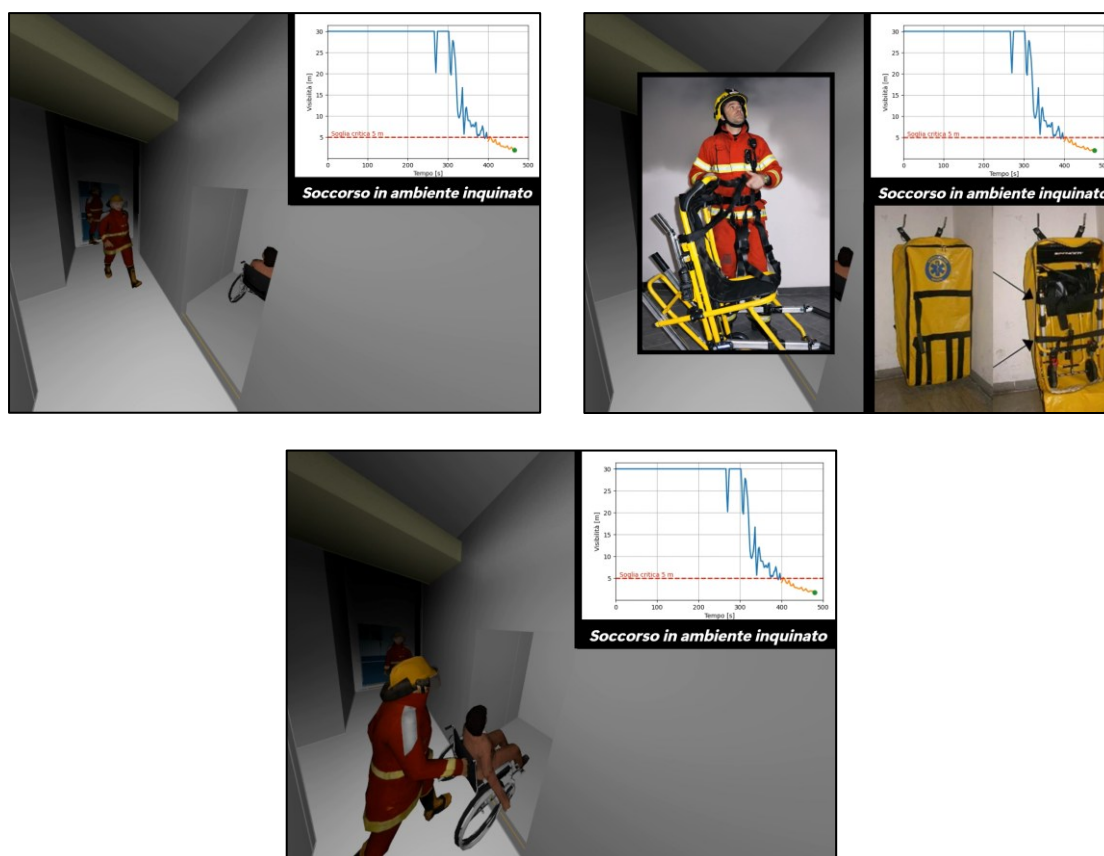


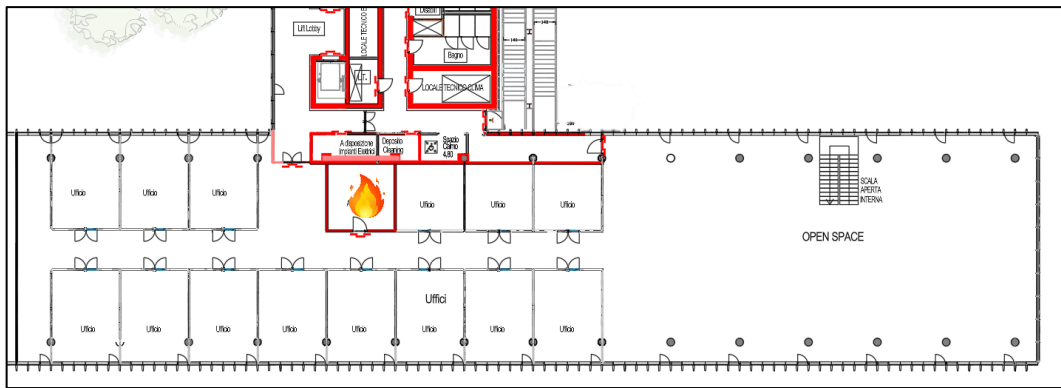
Figura 36: Sequenza di operazioni di soccorso in ambiente inquinato

5.2. Archivio non compartimentato

In questo paragrafo viene analizzato un ulteriore scenario d'incendio, localizzato in un compartimento diverso da quello oggetto della verifica prestazionale del compartimento multipiano. Sebbene il locale non rientri formalmente nel perimetro della valutazione FSE necessaria per la soluzione alternativa, si è ritenuto opportuno modellare un incendio all'interno dell'archivio situato al primo piano, in quanto rappresentativo di un possibile evento caratterizzato da una potenza termica rilasciata significativa. La simulazione non ha finalità di verifica normativa, ma assume rilevanza ai fini dell'addestramento delle squadre interne e della formazione del personale, consentendo di evidenziare, anche tramite visualizzazione immersiva in realtà virtuale, gli effetti che un'errata o mancata compartimentazione può determinare sull'evoluzione dell'incendio e sulla sicurezza degli occupanti. In condizioni di esercizio ordinarie, la porta REI dell'archivio garantirebbe un adeguato confinamento dell'incendio per l'intero tempo di resistenza al fuoco previsto, limitando la propagazione dei fumi e del calore agli ambienti adiacenti e impedendo l'interferenza con le condizioni di esodo del compartimento multipiano. Tuttavia, l'ipotesi di una mancata chiusura della porta, evenienza plausibile in caso di mancata sorveglianza, carenze manutentive, danneggiamenti o, più semplicemente, nel caso in cui essa venga indebitamente tenuta aperta tramite un cuneo o altro oggetto, modifica radicalmente lo scenario, consentendo la diffusione dei prodotti della combustione nei corridoi e creando potenziali criticità per la gestione dell'emergenza. Per questo motivo si sono sviluppate due simulazioni distinte, rispettivamente con porta chiusa e con porta aperta, così da rappresentare entrambi gli sviluppi incidentali.



Figura 37: Esempio di mancata compartimentazione di un archivio realizzato tramite AI



Il focolare è stato ipotizzato come risultato della combustione di scaffalature contenenti libri, giornali e materiale cartaceo, tipico contenuto di un archivio documentale. Nel locale non è prevista la presenza fissa di personale, ma sono installati sia l'impianto di rivelazione automatica sia i dispositivi manuali di allarme incendio. Per la definizione dell'andamento della potenza termica rilasciata (RHR) si è adottata la curva sperimentale riportata nello *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, quinta edizione (Fig. 26.61), relativa ai test a grande scala su magazine racks. In particolare, è stata selezionata la curva del Test 2, poiché maggiormente rappresentativa di condizioni gravose grazie al fenomeno di rinforzo radiativo indotto dall'ambiente di prova, che conduce a un picco di HRR superiore rispetto agli altri test. La curva è stata quindi implementata nel modello di incendio come riferimento realistico per uno scenario di combustione intensa di materiali cartacei in scaffalature. Si riportano di seguito le principali caratteristiche della curva utilizzata.

Tempo (s)	Frazione	HRR (kW)
0	0,00	0,00
250	0,00	0,00
300	0,26	2000,00
350	0,51	4000,00
400	0,77	6000,00
450	1,00	7800,00
500	0,90	7020,00
550	0,64	5000,00
650	0,32	2500,00
750	0,10	800,00

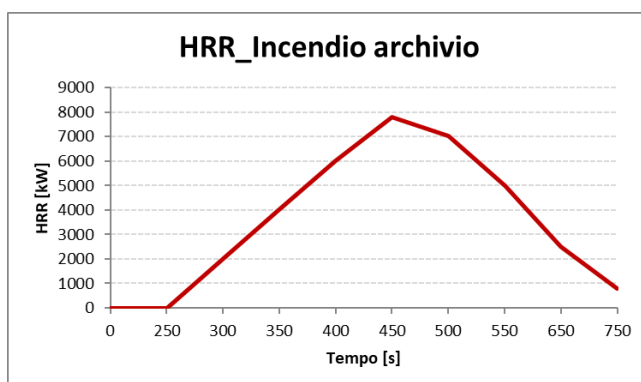
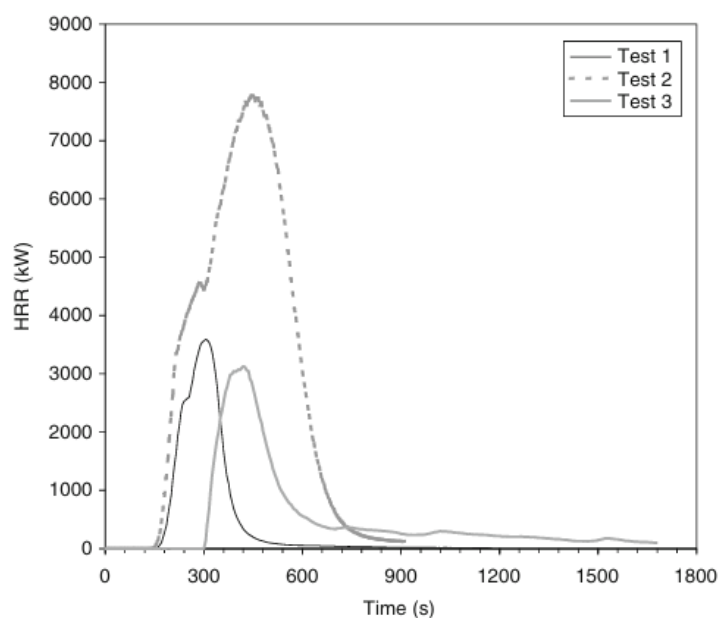
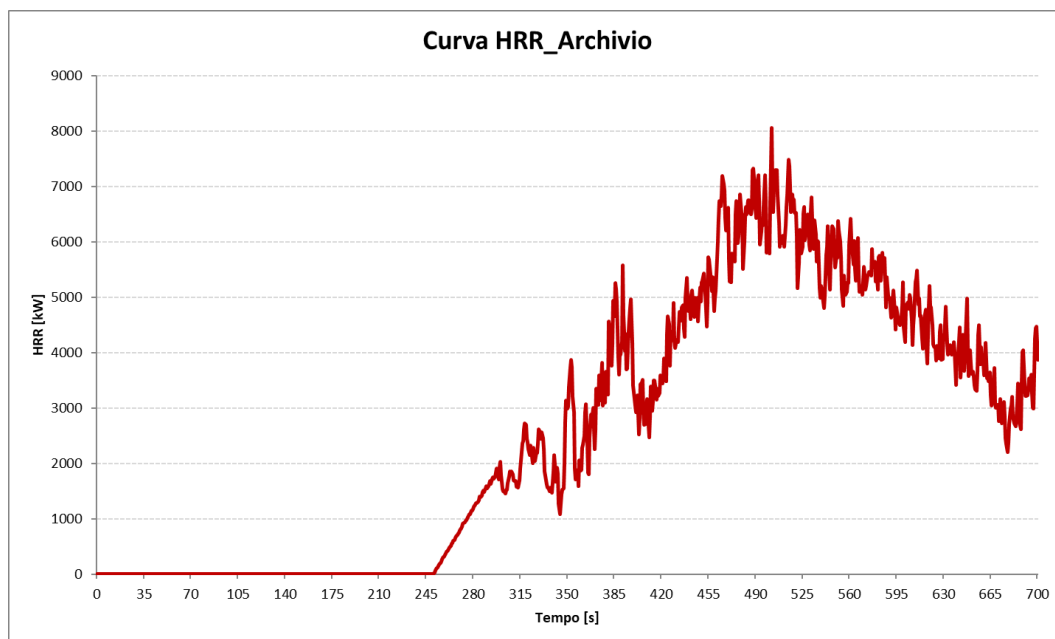


Table 26.14 Details of magazine rack tests

Test no.	Size of each rack (WxH), m	Location of racks in room	Mass of paper goods (kg)	Ignition source, quantity of gasoline (L)
1	1 × 2.2	Left, back	15	2
2	2 × 2.2	Back, right	60	15
3	2 × 2.2	Left, back, right	90 ^a	3

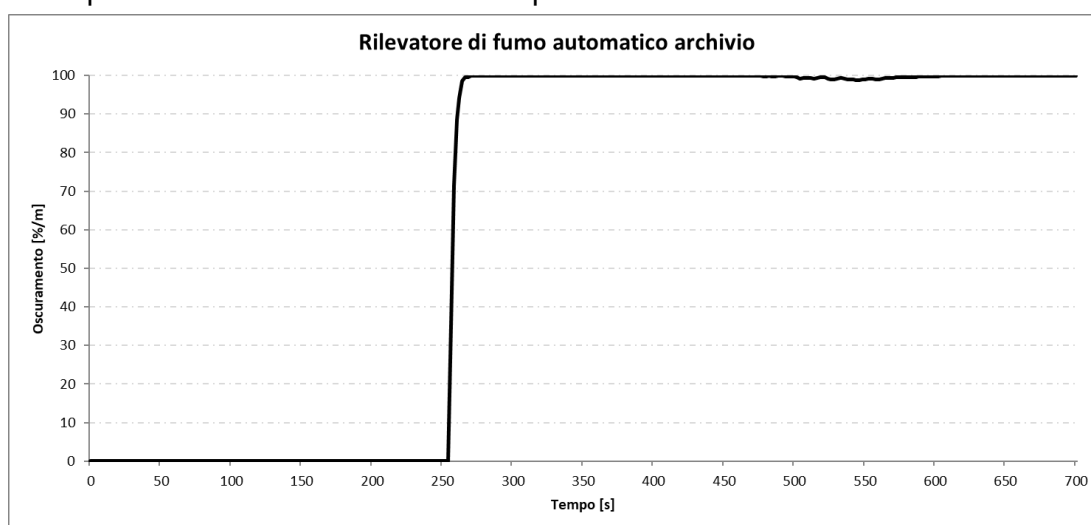
^aOf which 15 kg was placed on floor, in front of racks

Fig. 26.61 HRR of magazine racks loaded with magazines, newspapers, and books*Figura 40: Curva sperimentale utilizzata per la determinazione del focolare**Figura 41: Curva RHR restituita dal programma di simulazione*

Come nei casi precedenti realizzati per le verifiche prestazionali, le altre caratteristiche del focolaio sono quelle dello scenario predefinito riportato in Tabella M.2-2 del Codice Prevenzione Incendi:

- Resa in particolato Y_{soot} : 0,07 kg/kg
- Resa in monossido di carbonio Y_{CO} : 0,10 kg/kg
- Calore di combustione 20 MJ/kg

Anche per questo scenario i risultati della simulazione sono stati restituiti mediante slice bidimensionali, andamenti temporali dei principali parametri e visualizzazioni video. Le slice orizzontali sono state posizionate alla quota di 1,80 m dal piano di calpestio, rappresentativa dell'altezza media di respirazione degli occupanti, mentre le slice verticali sono state collocate in prossimità della porta dell'archivio e lungo il corridoio antistante, così da descrivere in modo efficace la propagazione dei prodotti della combustione verso gli spazi di esodo. All'esterno della porta dell'archivio sono state inoltre posizionate quattro sonde puntuali, finalizzate alla valutazione quantitativa dei parametri di prestazione rilevanti ai fini della sicurezza dell'esodo, in coerenza con quanto previsto dal Codice di prevenzione incendi. L'andamento della curva di potenza termica rilasciata adottata rende i primi istanti dell'incendio, fino a circa 250 s dall'innesco, sostanzialmente impercettibili per il sistema di rivelazione automatica installato nel locale, in quanto il rilascio di calore e di fumo risulta trascurabile. Pertanto, ai fini delle verifiche per l'esodo, non si tiene conto dei primi 250 s. La rilevazione dell'incendio da parte dell'impianto automatico avviene dopo circa 6 secondi.

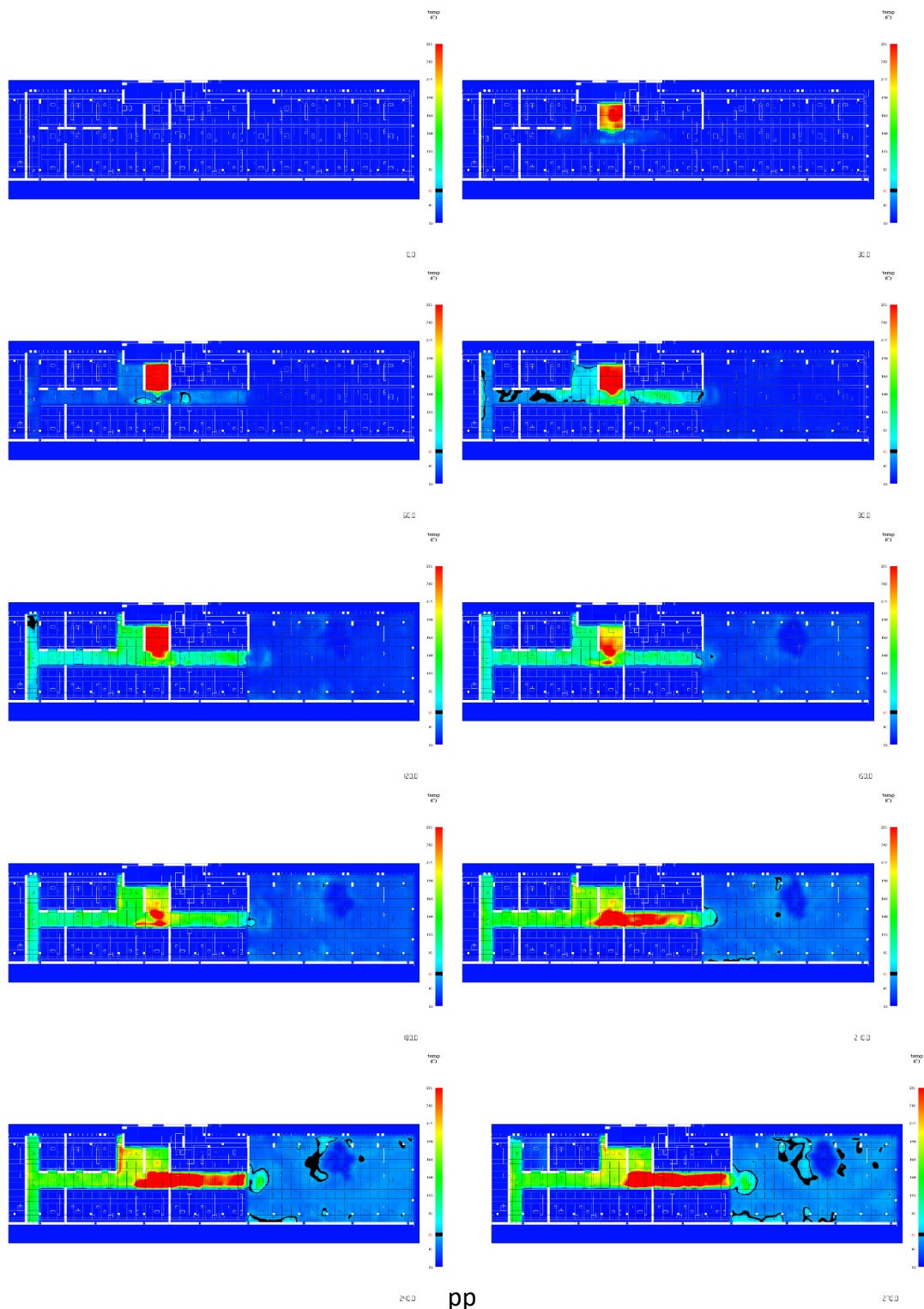


Superata la fase iniziale, l'incendio evolve invece con estrema rapidità, caratterizzato da un incremento repentino della HRR e da una produzione

significativa di fumi caldi. In condizioni di esercizio corrette, una progettazione adeguata unita a una gestione efficace della sicurezza antincendio consentirebbe alla compartimentazione dell'archivio, con porta REI 60 regolarmente chiusa, di garantire il confinamento dell'incendio per l'intero tempo di resistenza previsto, preservando le condizioni di esodo del compartimento e consentendo l'evacuazione in condizioni di sicurezza.

Il fine della simulazione non è tuttavia quello di dimostrare la bontà della soluzione progettuale e la precisione dei risultati, bensì di evidenziare i rischi connessi a una gestione non corretta in fase di esercizio. Per questo motivo, unito ad una velocità di elaborazione, si è scelto di condurre la simulazione con mesh più grandi e semplificate di lato 40 cm, a fronte di una minore accuratezza e precisione dei risultati. Come emerge chiaramente dai risultati, la presenza della porta REI aperta costituisce una criticità rilevante, in quanto compromette le condizioni di sicurezza del piano già dopo pochi istanti dall'inizio della fase di crescita dell'incendio. L'elevata potenza del focolare e la rapidità di propagazione dei prodotti della combustione rendono infatti impraticabile il corridoio del primo piano e determinano la perdita di utilizzabilità delle uscite di sicurezza presenti, con conseguenze potenzialmente gravi per la gestione dell'emergenza. In particolare, le ultime due immagini evidenziano la rapidità con la quale l'unica uscita di sicurezza disponibile, per determinati occupanti collocati in aree caratterizzate da un corridoio cieco, risulti indisponibile già dopo poche decine di secondi dalla rilevazione dell'incendio. Inoltre è necessario constatare che, vista la potenza e la rapidità del focolare, è cautelativo ipotizzare che nessun occupante possa, in condizioni di sicurezza, chiudere la porta REI rimuovendo eventuali ostacoli una volta accortosi dell'incendio, poiché la temperatura di esposizione e la visibilità già critiche dopo pochi secondi, rendono questa azione non effettuabile. A supporto dell'attività di informazione e formazione del personale interno, oltre alle consuete restituzioni grafiche e numeriche, sono stati realizzati video al fine di rendere immediatamente percepibili le differenze nello sviluppo dell'incendio e nelle condizioni ambientali lungo le vie di esodo. Sono stati inoltre prodotti filmati con punto di vista a telecamera fissa e video a 360 gradi, specificamente pensati per la visualizzazione immersiva in realtà virtuale, così da consentire una rappresentazione realistica e coinvolgente dello scenario incidentale più gravoso e favorire una

maggiore consapevolezza dei rischi associati a una cattiva gestione della compartimentazione.



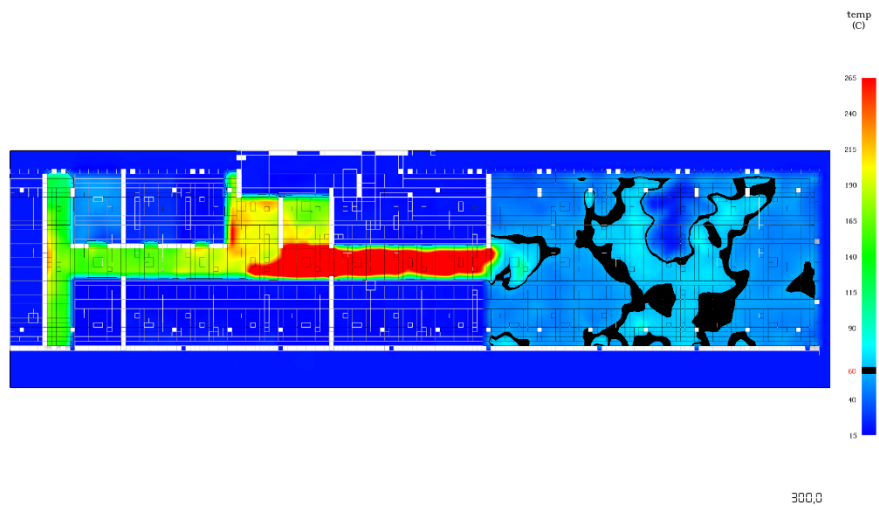
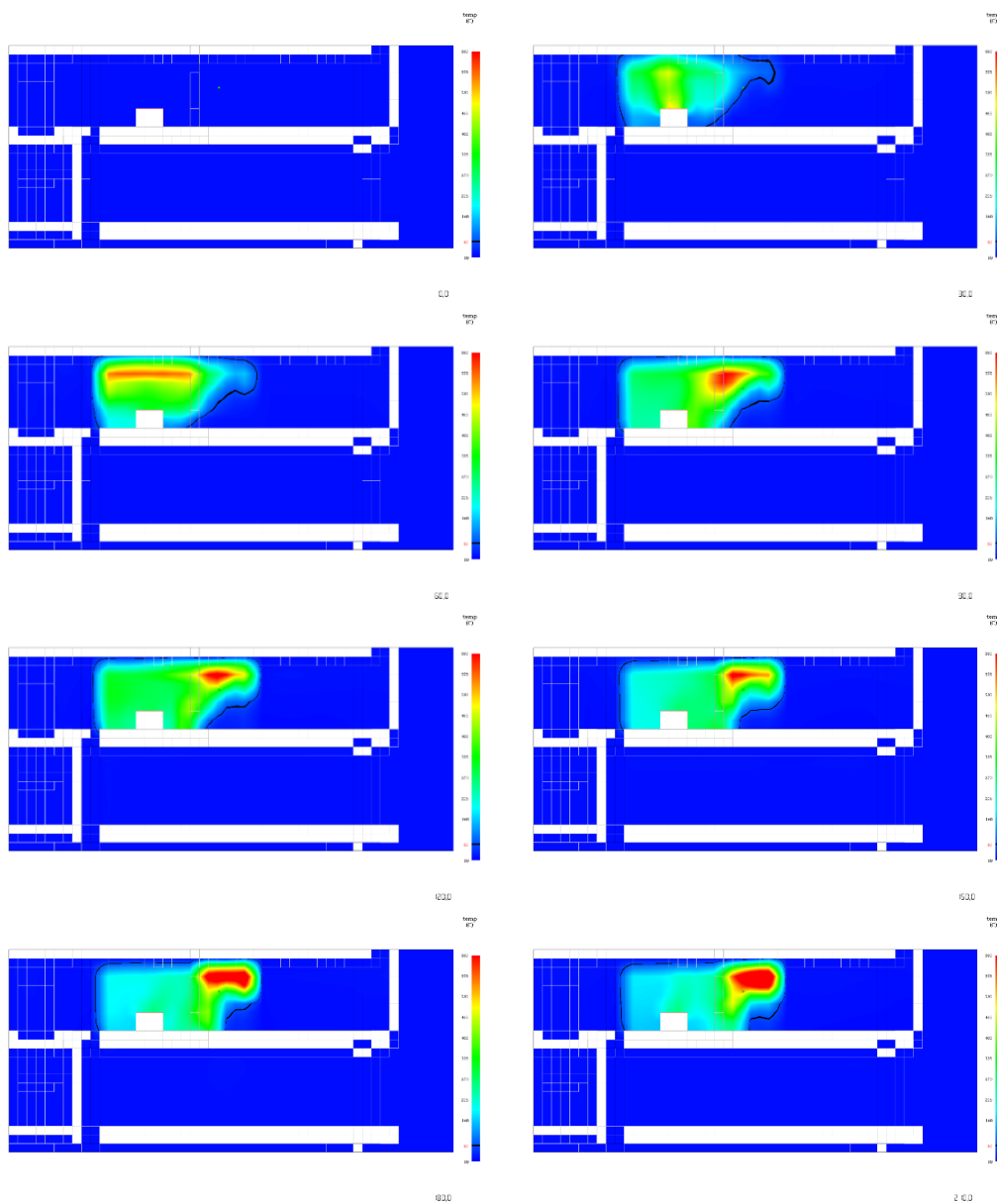


Figura 42: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura - Piano primo - Scen. archivio compresso



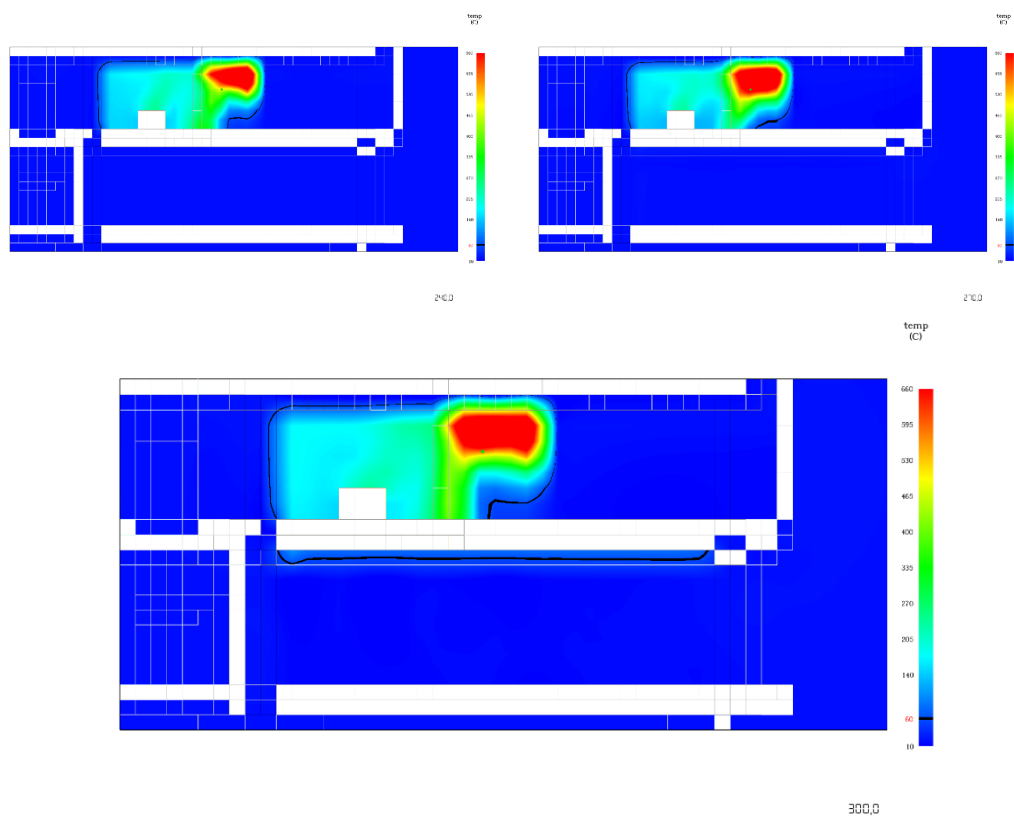
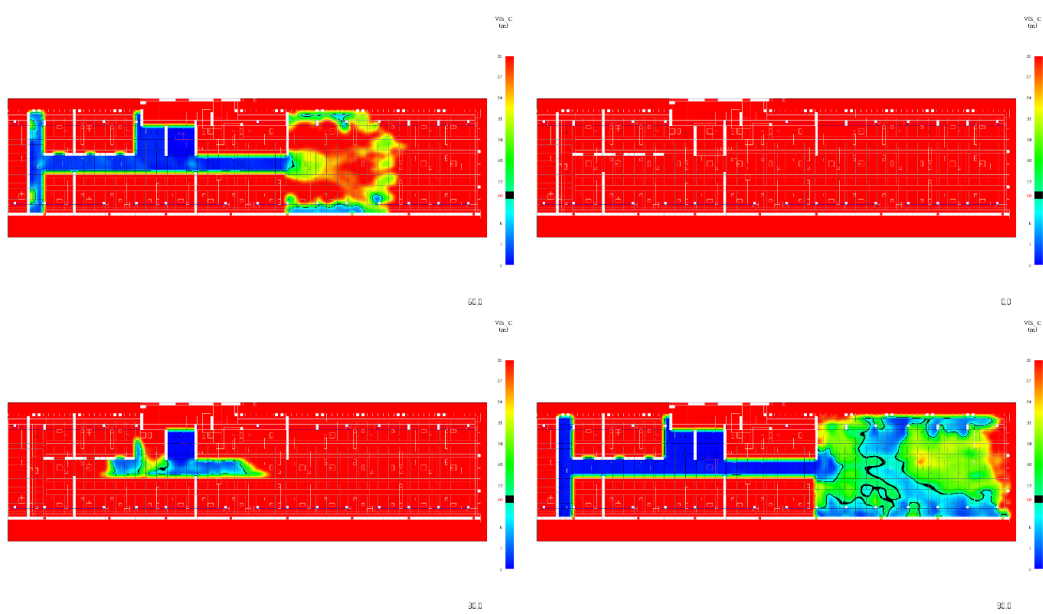


Figura 43: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura - Sezione - Scen. archivio compromesso



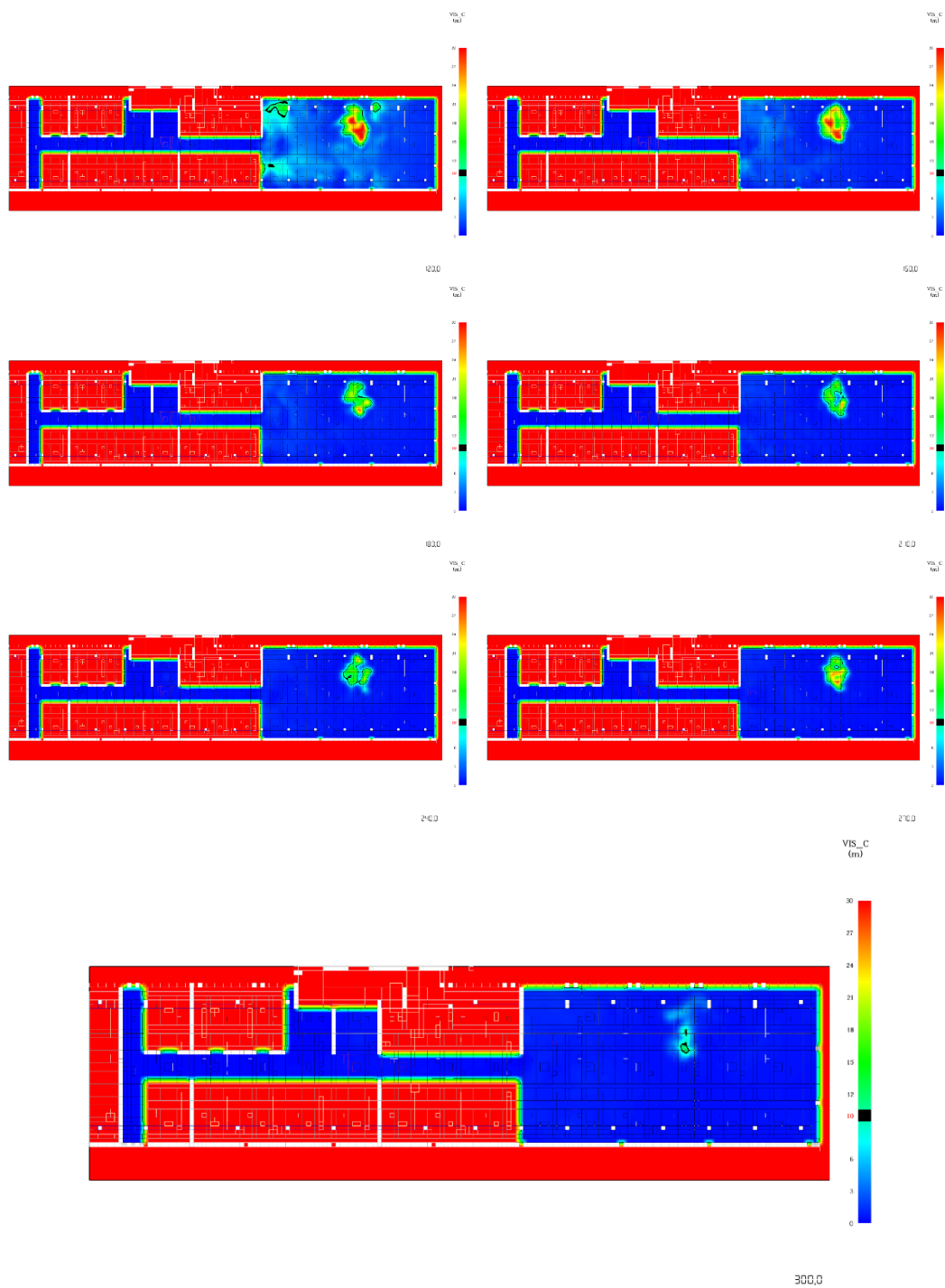


Figura 44: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m – Scen. archivio compromesso

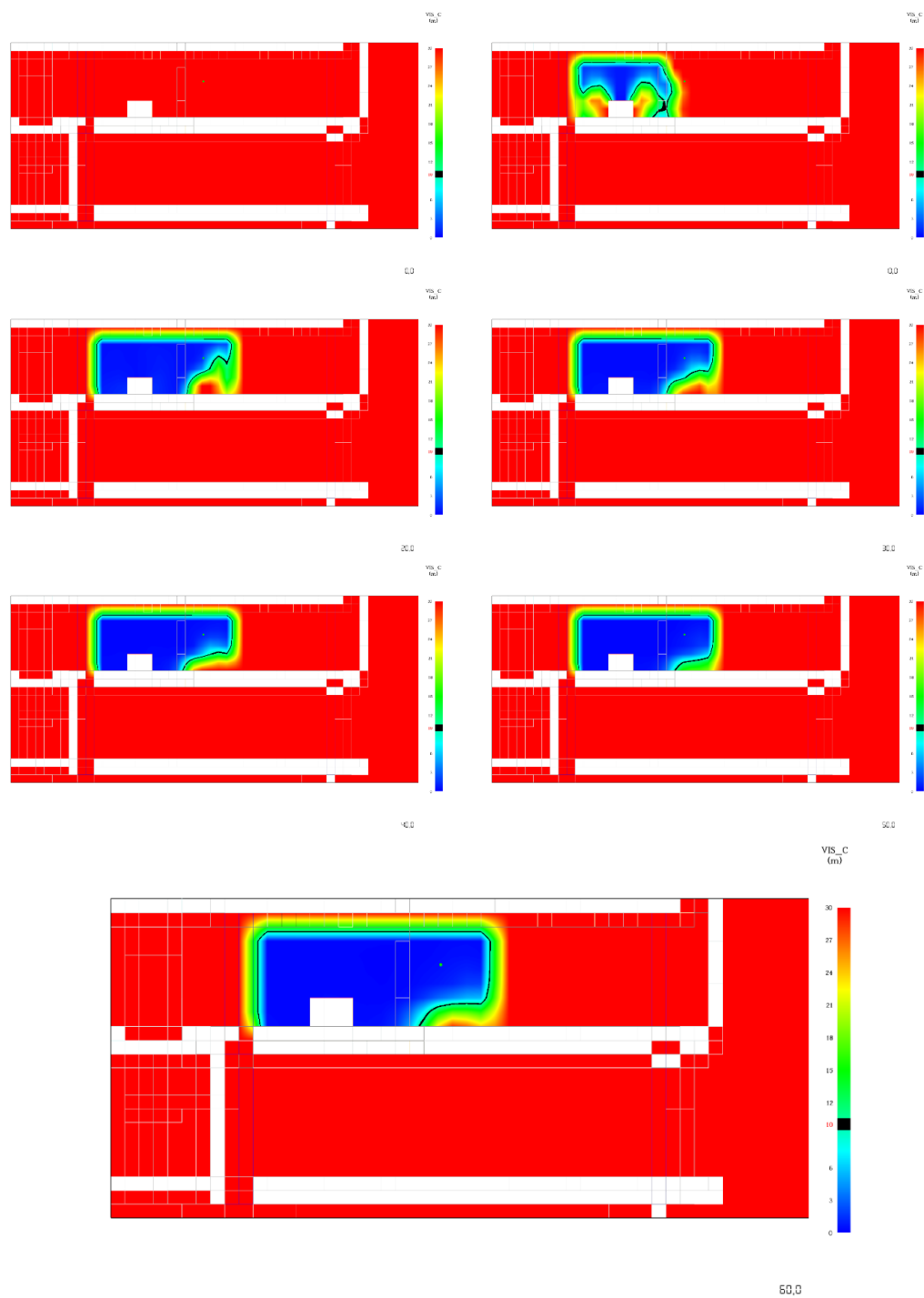
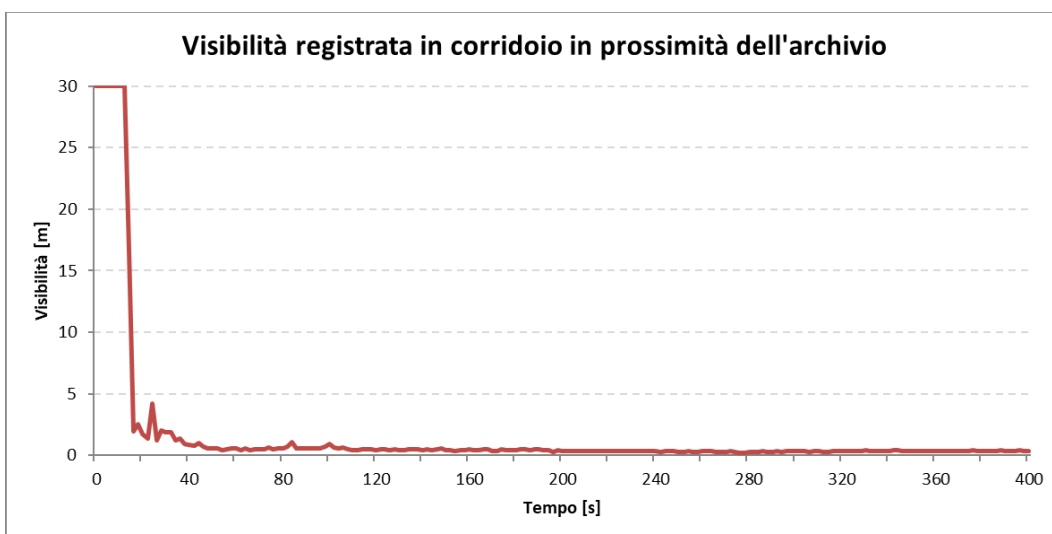
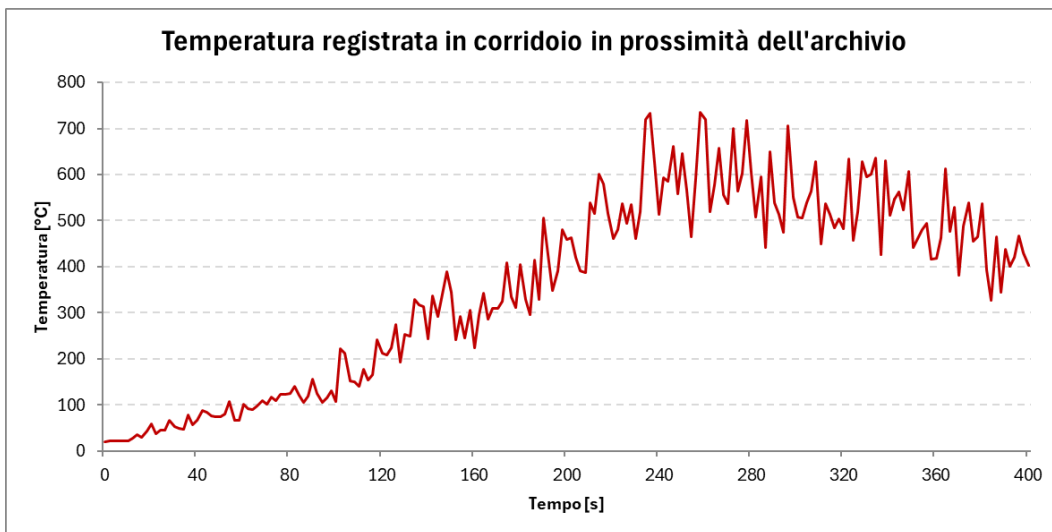
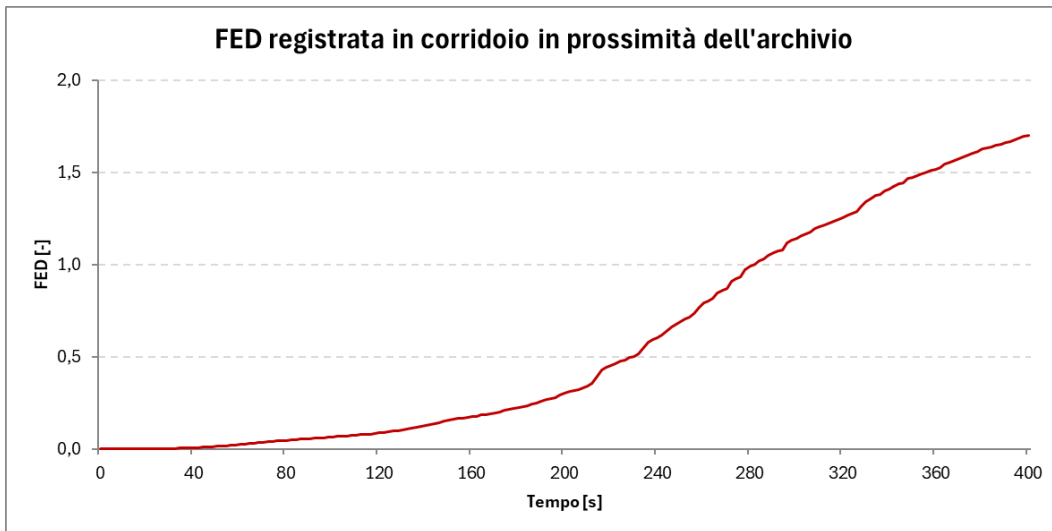


Figura 45: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. archivio compresso



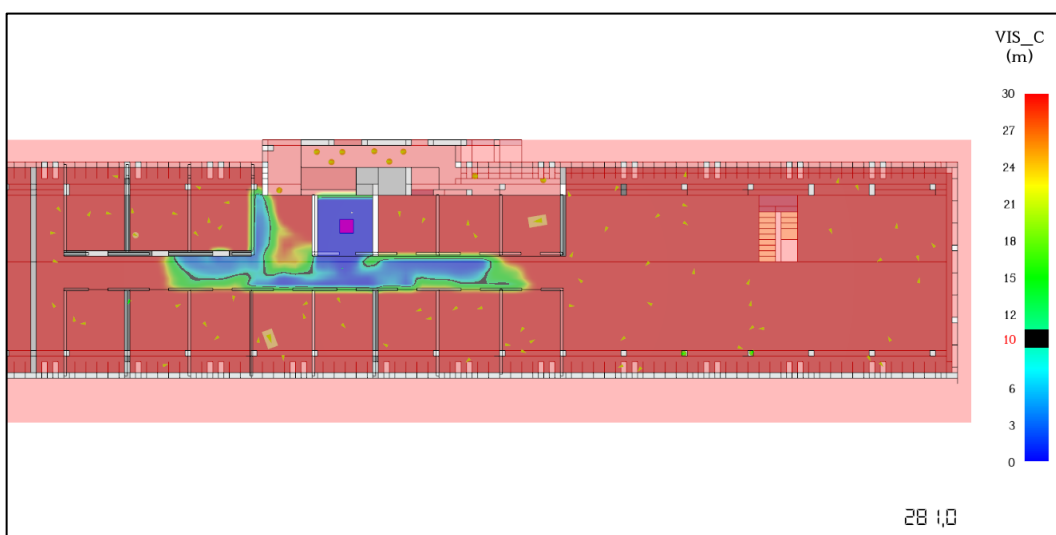
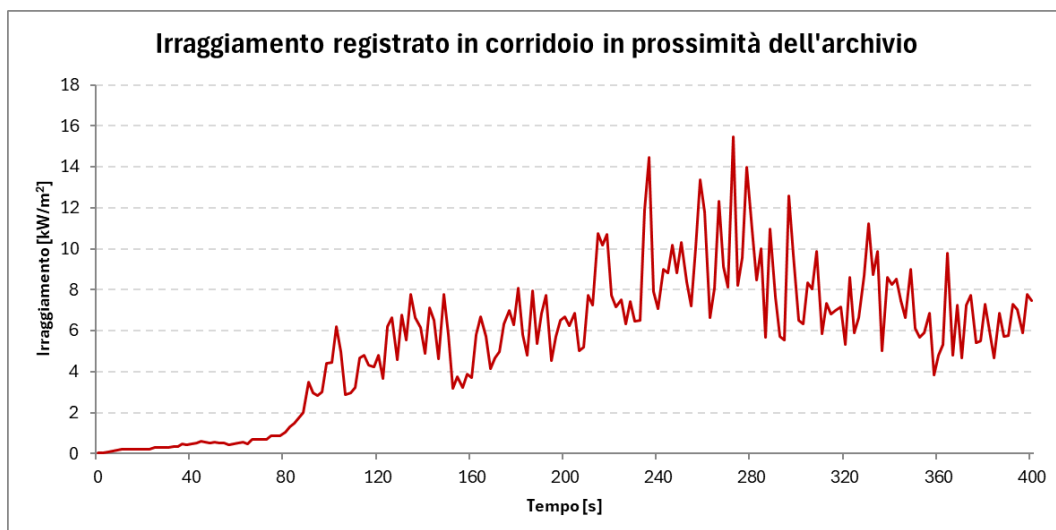


Figura 46: Soglia di visibilità non verificata dopo 31 secondi con occupanti intrappolati

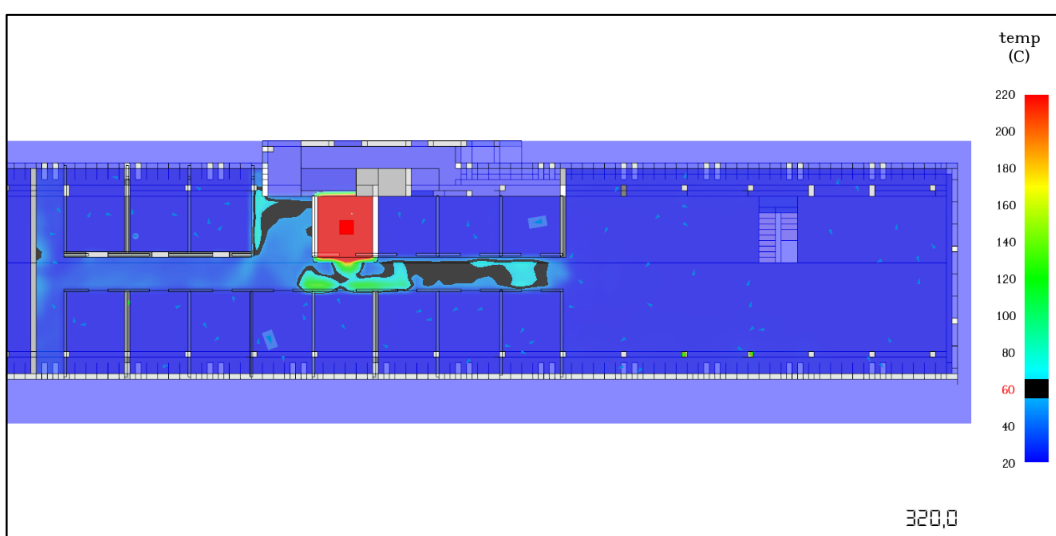


Figura 47: Soglia di temperatura di esposizione non verificata dopo 70 secondi con occupanti intrappolati



Figura 48: Fotogrammi estratti dalla simulazione relativa alla mancata compartimentazione

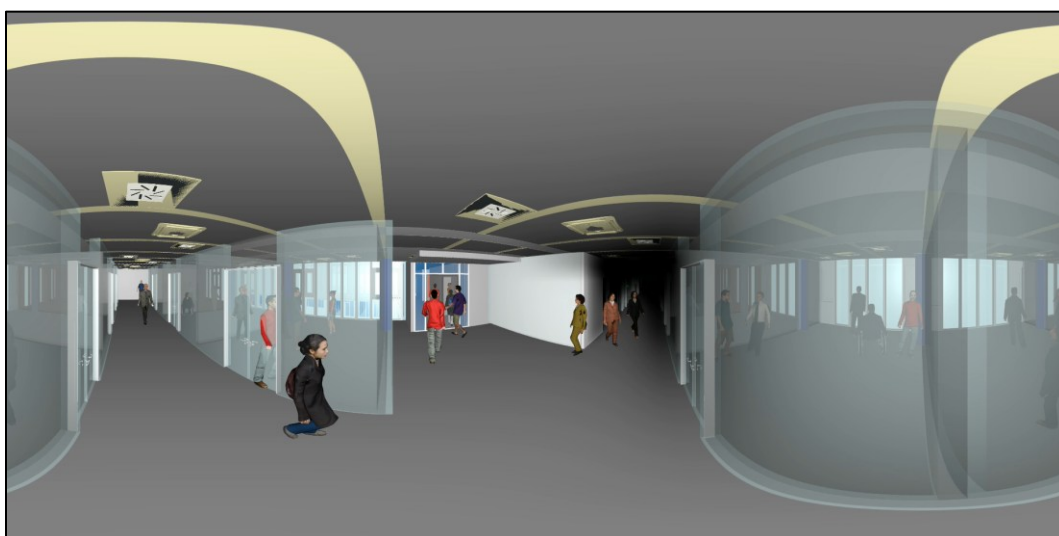


Figura 49: Fotogrammi estratti dalle simulazioni immersive VR

Dai risultati delle simulazioni analitiche effettuate, integrando i risultati FDS all'interno delle simulazioni di esodo, è possibile ottenere i parametri relativi alle soglie di esposizione di specifici occupanti.

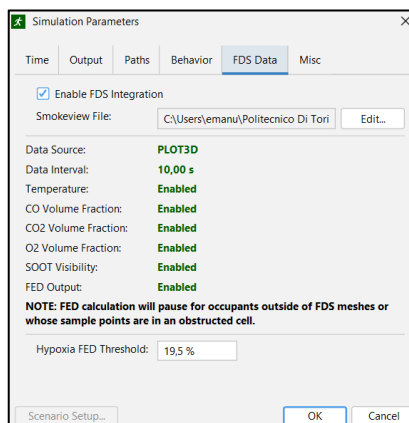
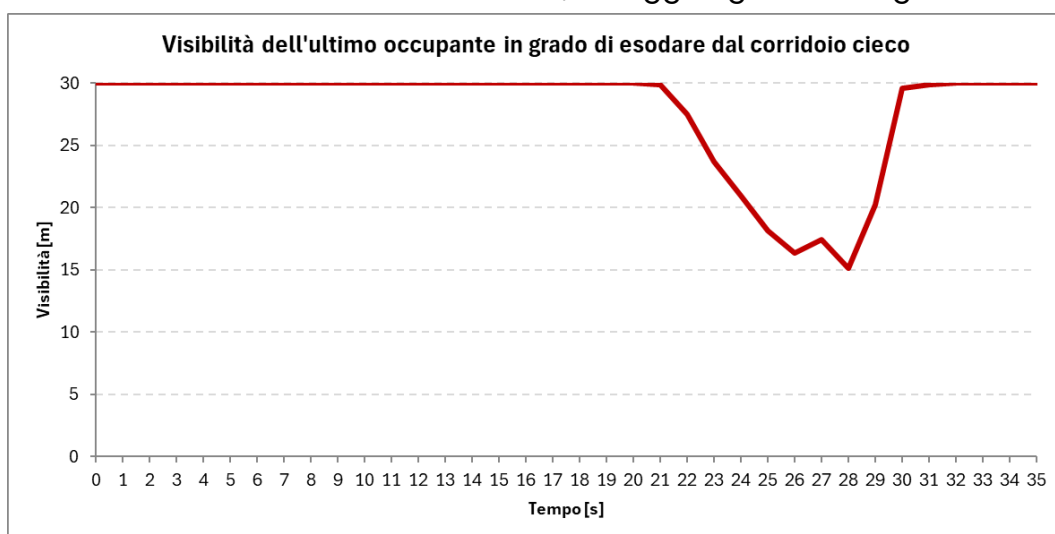


Figura 50: Abilitazione dei risultati FDS

A dimostrazione di quanto detto si riporta di seguito il grafico che descrive la variazione della visibilità dell'ultimo occupante in grado di evacuare dal corridoio cieco in questa simulazione. Si ipotizza che quest'ultimo occupante, vedendo direttamente i prodotti della combustione emessi all'interno del corridoio, inizia l'esodo in tempi rapidi riconoscendo il pericolo imminente. Come si può notare la visibilità, che, come abbiamo già detto, è spesso il primo parametro ad entrare in crisi, è ancora garantita in quanto non arriva mai alla soglia dei 10 metri. Tuttavia, dopo 30 secondi essa non è più garantita, impedendo così agli occupanti che non si sono accorti dell'incendio, o che non hanno ancora iniziato l'evacuazione, di raggiungere un luogo sicuro.



Infine, si evidenzia come l'incendio ipotizzato all'interno dell'archivio, in condizioni di compartimentazione integra e porta REI correttamente

mantenuta in posizione di chiusura, sia riconducibile a uno scenario tipico di incendio controllato dalla ventilazione. Il locale, non presentando aperture verso l'esterno, è caratterizzato da un volume d'aria limitato, tale da determinare una progressiva riduzione della disponibilità di ossigeno durante l'incendio. In queste condizioni, la combustione risulta fortemente condizionata dall'apporto di aria comburente e non esclusivamente dalla quantità di combustibile presente, con una conseguente limitazione della potenza termica massima rilasciata rispetto a scenari in ambienti ventilati. La riduzione della disponibilità di ossigeno all'interno del compartimento determina una progressiva attenuazione dell'intensità dell'incendio, fino a poter condurre, in assenza di apporti d'aria accidentali, a una estinzione spontanea del processo combustivo, in accordo con i modelli teorici e la letteratura tecnica sugli incendi in compartimenti chiusi. Ciò conferma l'efficacia della compartimentazione come misura fondamentale di protezione passiva. Il rispetto delle prescrizioni progettuali e delle misure previste in fase di esercizio, in particolare il corretto utilizzo e la manutenzione delle chiusure resistenti al fuoco, risulta pertanto essenziale affinché un eventuale incendio rimanga confinato e controllato dalla ventilazione, evitando l'evoluzione verso scenari più gravosi e il conseguente deterioramento delle condizioni di sicurezza per gli occupanti e le vie di esodo.



Figura 51: Fotogramma estratto dal video di confronto tra i due scenari

Al fine di supportare le attività di formazione e addestramento del personale destinatario, e di migliorare la comprensione degli effetti dell'incendio nel tempo, sono stati realizzati grafici dinamici sincronizzati con le simulazioni immersive. Queste rappresentazioni consentono di integrare nel video di simulazione anche l'andamento temporale dei principali parametri di sicurezza (temperatura, visibilità, FED e irraggiamento), evidenziando le relative soglie critiche di riferimento nel caso in cui si verificasse lo scenario con compartimentazione errata. I grafici sono stati generati mediante script dedicati in ambiente Python, in modo da garantire la coerenza temporale con lo scenario simulato e la riproducibilità del processo di elaborazione.

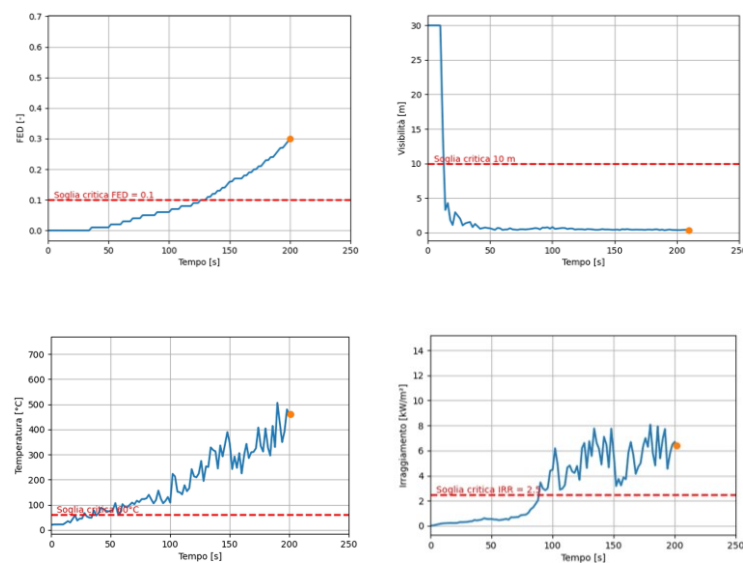


Figura 52: Grafici dinamici realizzati tramite script Python



Figura 53: Video formativo realizzato integrando simulazioni video con dati quantitativi

5.3. *Impianto di spegnimento automatico*

In questo capitolo viene presentato un ulteriore scenario di incendio nel quale è considerata l'attivazione dell'impianto automatico di controllo e spegnimento dell'incendio (sprinkler) previsto nel progetto. Questo scenario si affianca alle simulazioni precedentemente illustrate senza sostituirle e non rientra tra quelle utilizzate per la verifica della salvaguardia della vita umana. Come già discusso, infatti, le verifiche prestazionali principali sono state condotte ipotizzando l'assenza del contributo dell'impianto sprinkler, adottando un'impostazione volutamente cautelativa, finalizzata a dimostrare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza anche nello scenario più gravoso e indipendente dall'efficacia delle misure attive. La previsione dello sprinkler, tuttavia, deriva da una scelta consapevole e condivisa con la committenza: pur a fronte di un livello di prestazione che, sulla base della strategia S.6 del Codice di Prevenzione Incendi e in coerenza con la V.4, risulterebbe inquadrabile nel livello III, la necessità di ricorrere a una soluzione alternativa in relazione alla strategia S.3 per il comparto multipiano, unitamente al parere favorevole e alla disponibilità della committenza, ha orientato la scelta verso un livello di prestazione superiore, adottando un sistema automatico esteso all'intera attività. In questa prospettiva, l'impianto assume anche una funzione rilevante di tutela della proprietà e di limitazione dei danni, rafforzando la resilienza complessiva dell'attività rispetto all'evento incendio, senza essere utilizzato come misura compensativa indispensabile per le verifiche di esodo. Lo scenario qui presentato ha dunque finalità complementari rispetto alle simulazioni di verifica: l'obiettivo non è misurare quanto lo sprinkler sia necessario per il rispetto del criterio ASET/RSET, quanto piuttosto comprenderne il funzionamento, la sequenza di attivazione delle testine e la distribuzione spaziale degli interventi, così da poter rappresentare in modo chiaro e coerente il comportamento del sistema nell'ambito del Piano di Emergenza ed Evacuazione. Questo punto è centrale rispetto al fine della tesi, che mira a utilizzare le simulazioni FSE come strumento operativo di comunicazione e addestramento: la visualizzazione dell'attivazione delle testine, integrata in contenuti video e viste dedicate, consente agli operatori e alle squadre di emergenza di acquisire consapevolezza sui tempi di intervento dell'impianto, sulle aree inizialmente coinvolte e sugli effetti attesi, riducendo

fraintendimenti e aspettative non corrette durante la gestione dell'emergenza.

Nella simulazione considerata, le testine sono caratterizzate da temperatura nominale di attivazione pari a 68 °C. I risultati evidenziano l'attivazione della prima testina intorno ai 290 s dall'innescò, risultando la più prossima al focolare. Le successive attivazioni avvengono in tempi più avanzati, con valori dell'ordine dei 500 s, in funzione della propagazione del campo termico a soffitto. Nell'arco dei 10 minuti complessivi simulati si osserva l'attivazione di sei testine al piano terra e di una testina al piano primo; quest'ultima è localizzata in corrispondenza della scala dell'open space, evidenziando il trasferimento verticale del calore e la risalita dei gas caldi lungo i volumi comunicanti, aspetto particolarmente rilevante nei compartimenti multipiano.

Si riportano di seguito, la posizione in pianta delle testine dell'impianto posizionate ad una quota di 3,0 metri e i grafici rappresentativi dell'azione dell'impianto.

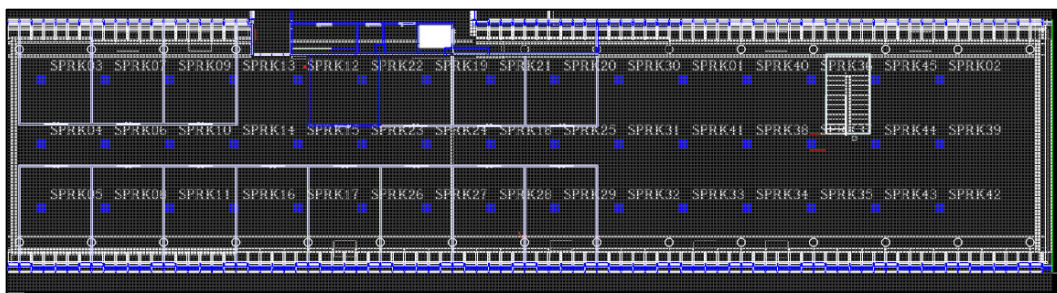
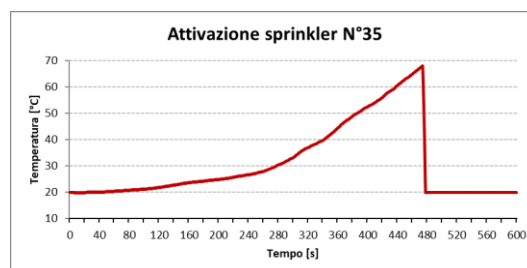
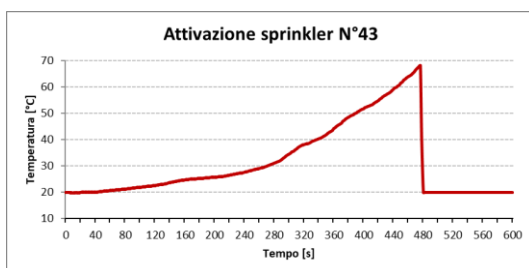
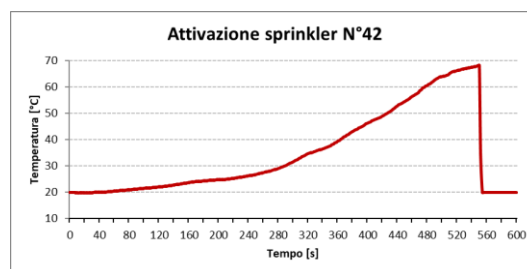
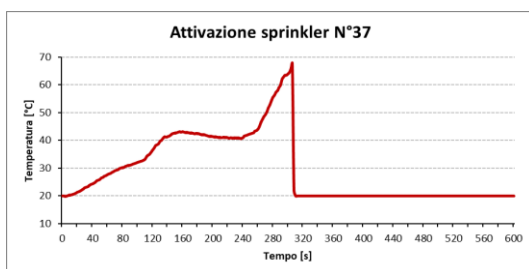


Figura 54: Posizionamento testine sprinkler piano terra



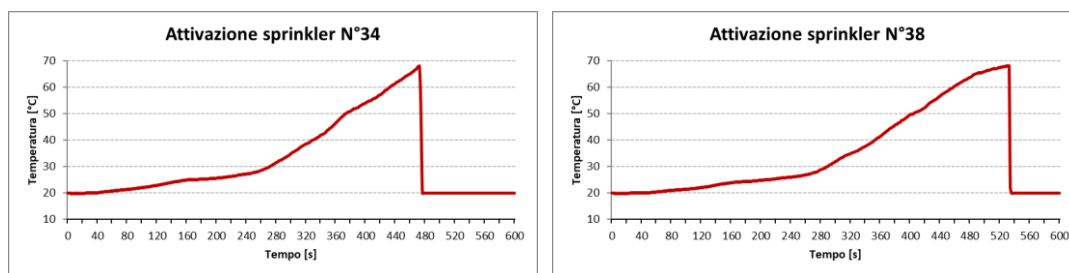


Figura 55: Grafici sprinkler piano terra

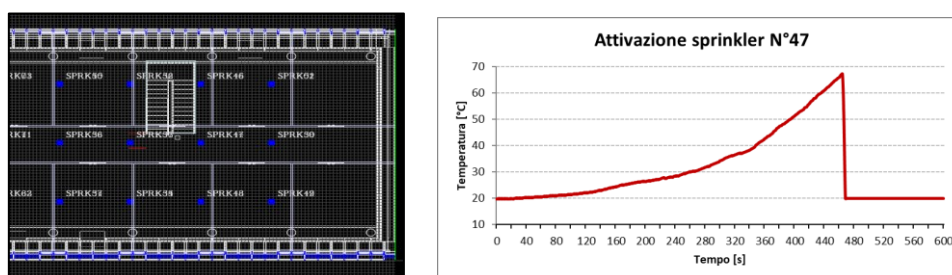


Figura 56: Testina sprinkler piano primo

Un elemento di rilievo riguarda la collocazione temporale dell'attivazione rispetto alle fasi dell'esodo: in questo scenario, le condizioni che determinano l'azionamento delle testine vengono raggiunte quando l'evacuazione risulta già conclusa. Ciò conferma la coerenza della scelta metodologica adottata nelle analisi principali, nelle quali si è voluto dimostrare la sicurezza dell'esodo anche senza l'intervento dello sprinkler, evitando che il soddisfacimento degli obiettivi per la vita umana dipendesse da una misura attiva.

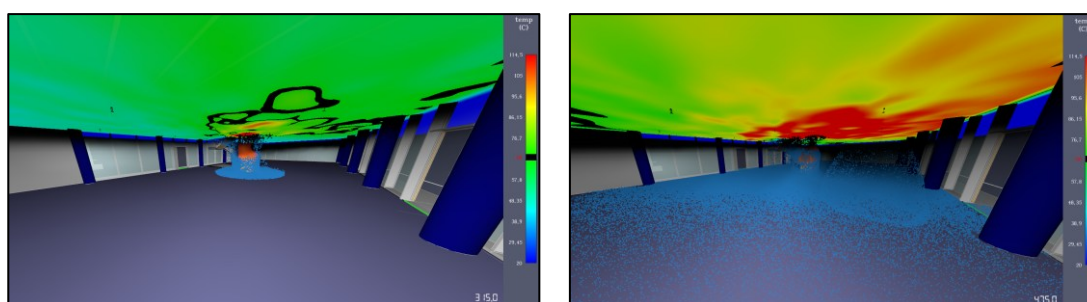


Figura 57: Simulazione delle temperature a soffitto alla quota delle testine

Al contempo, è opportuno sottolineare che l'interpretazione di questo scenario non esaurisce i potenziali benefici dell'impianto sprinkler rispetto alla salvaguardia della vita. In scenari differenti, caratterizzati da temperature locali a soffitto più elevate o da una crescita dell'incendio più rapida, l'attivazione anticipata e più estesa delle testine potrebbe contribuire in modo

significativo al miglioramento delle condizioni ambientali lungo le vie di esodo e nelle zone di permanenza, attraverso la riduzione delle temperature, la limitazione della potenza termica rilasciata e, conseguentemente, la diminuzione della produzione e dell'accumulo di fumi caldi. In queste condizioni, lo sprinkler può produrre effetti favorevoli sull'evacuazione e sulle operazioni di soccorso e spegnimento dell'incendio, aumentando i margini di sicurezza disponibili. Ne consegue che la simulazione aggiuntiva con sprinkler svolge un duplice ruolo: da un lato, rende esplicita e comunicabile la logica di funzionamento dell'impianto e la sua sequenza di attivazione nello scenario analizzato; dall'altro, consente di inquadrare, anche in chiave formativa, i benefici potenziali che il sistema può offrire in scenari più gravosi, mantenendo comunque la robustezza dell'impostazione cautelativa adottata per la dimostrazione degli obiettivi di sicurezza per gli occupanti.

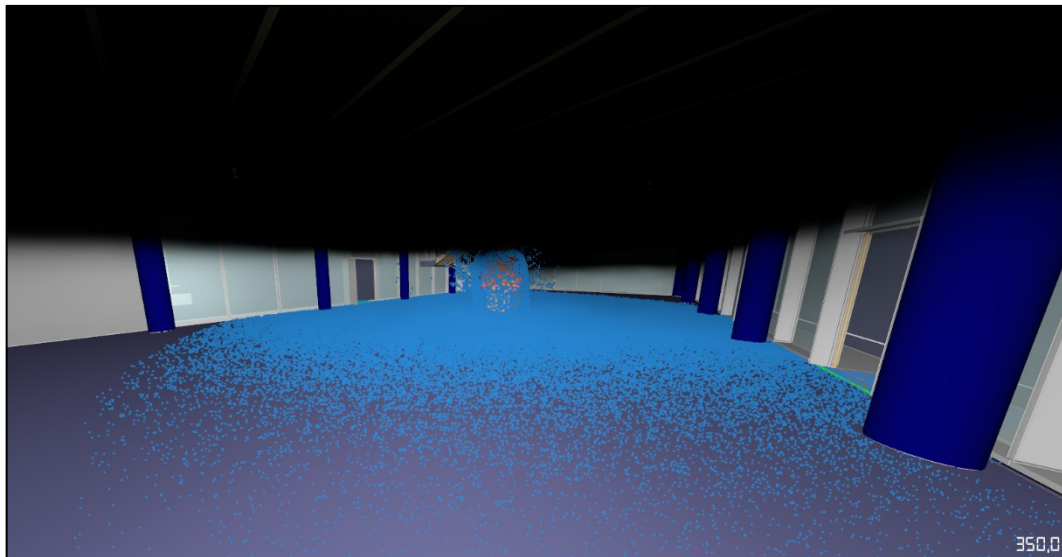


Figura 58: Rappresentazione dell'attivazione della prima testina in ambiente virtuale

5.4. Sovraffollamento ai piani

Nel presente capitolo viene analizzato uno scenario di esodo caratterizzato da una distribuzione dell'affollamento differente rispetto a quella assunta negli scenari precedentemente esaminati, sempre utilizzando i risultati della simulazione del primo scenario di incendio di progetto. L'obiettivo è valutare come una concentrazione anomala degli occupanti su un singolo piano possa costituire una condizione critica per la sicurezza, in quanto l'aumento della densità di affollamento comporta un allungamento dei tempi di esodo, principalmente dovuto alla formazione di code in prossimità delle uscite di sicurezza. A questi rallentamenti, tipici delle condizioni di sovraffollamento e dei restringimenti geometrici, si associano ulteriori fattori di rischio quali il panico e il degrado delle condizioni di visibilità. Nel caso in esame si ipotizza che i 352 occupanti complessivamente previsti dal responsabile dell'attività, normalmente distribuiti sui diversi livelli del compartimento multipiano, possano trovarsi, per esigenze temporanee o organizzative, tutti su uno stesso piano al momento dell'emergenza. Le simulazioni di esodo sono state pertanto condotte considerando questo affollamento sia al piano terra sia al piano primo, evidenziando variazioni significative del tempo richiesto per l'esodo (RSET) e, in alcuni casi, il mancato rispetto delle soglie di sicurezza previste.

La prima analisi riguarda il piano terra, assumendo che tutti gli occupanti siano presenti nell'area open space. In questa configurazione, grazie all'elevato numero di uscite di sicurezza disponibili e alla conformazione geometrica favorevole dell'ambiente, un eventuale sovraffollamento non comporta criticità significative dal punto di vista delle tempistiche di esodo. Le uscite risultano infatti in grado di smaltire l'intero flusso di occupanti senza generare congestioni rilevanti, mantenendo sostanzialmente invariato il valore del tempo RSET rispetto allo scenario di progetto.

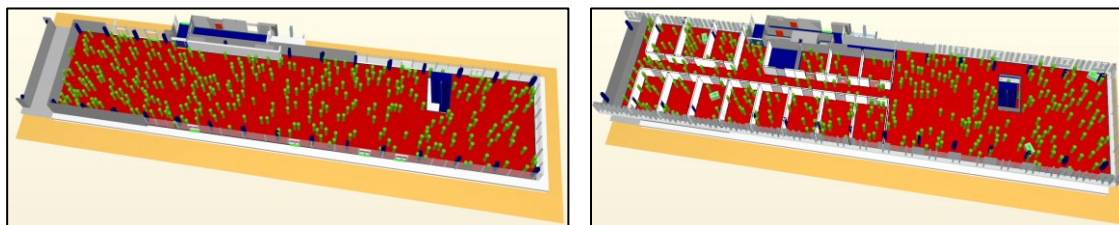
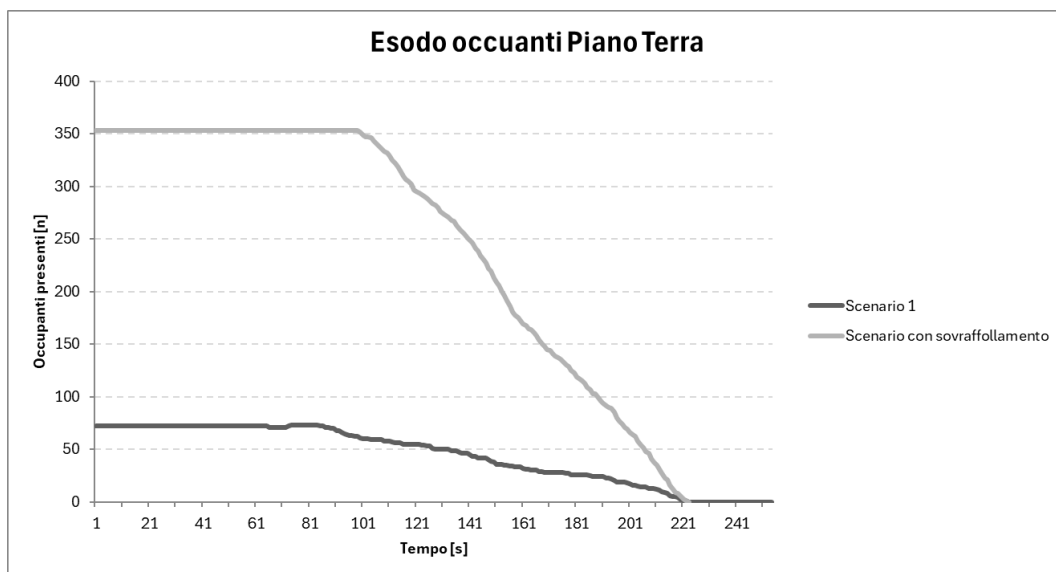
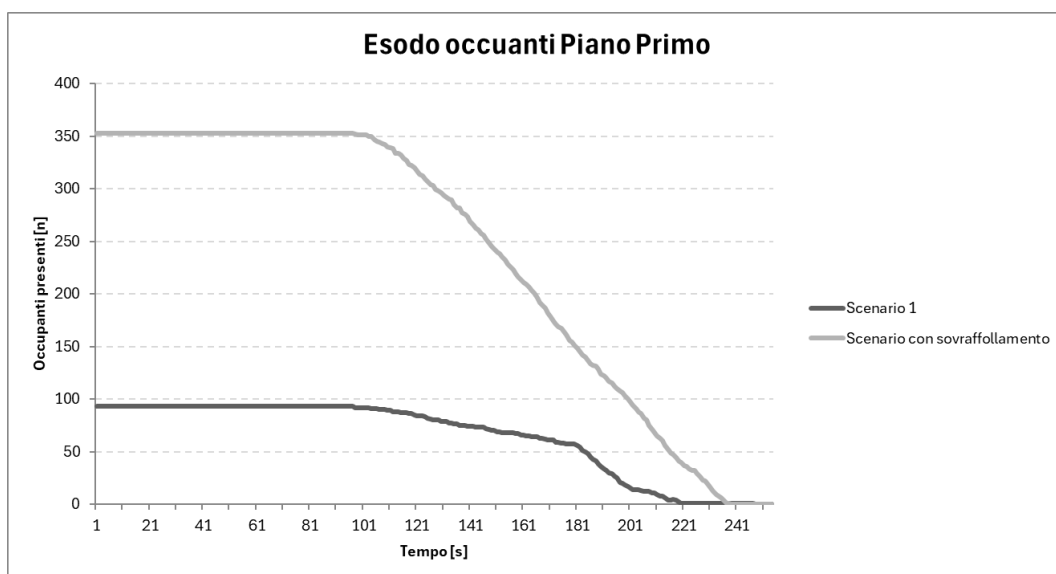


Figura 59: Rappresentazione del sovraffollamento ai piani terra e primo



La seconda analisi è stata invece condotta considerando la concentrazione di tutti gli occupanti al piano primo, caratterizzato dalla presenza di due sole uscite di sicurezza verso scale di emergenza esterne e da corridoi di larghezza ridotta. In questa configurazione il tempo di movimento, T_{tra} , risulta superiore a quello determinato per lo scenario di incendio di progetto, a causa della formazione di code in prossimità delle uscite, che determinano un incremento dei tempi di esodo di circa 20 secondi.



Nelle immagini che seguono viene rappresentato lo scenario di esodo con sovraffollamento del primo piano. Gli occupanti vengono caratterizzati in scala di colore in funzione della loro velocità di movimento istantanea. In blu è possibile notare la presenza di occupanti in coda fermi davanti all'uscita di sicurezza.

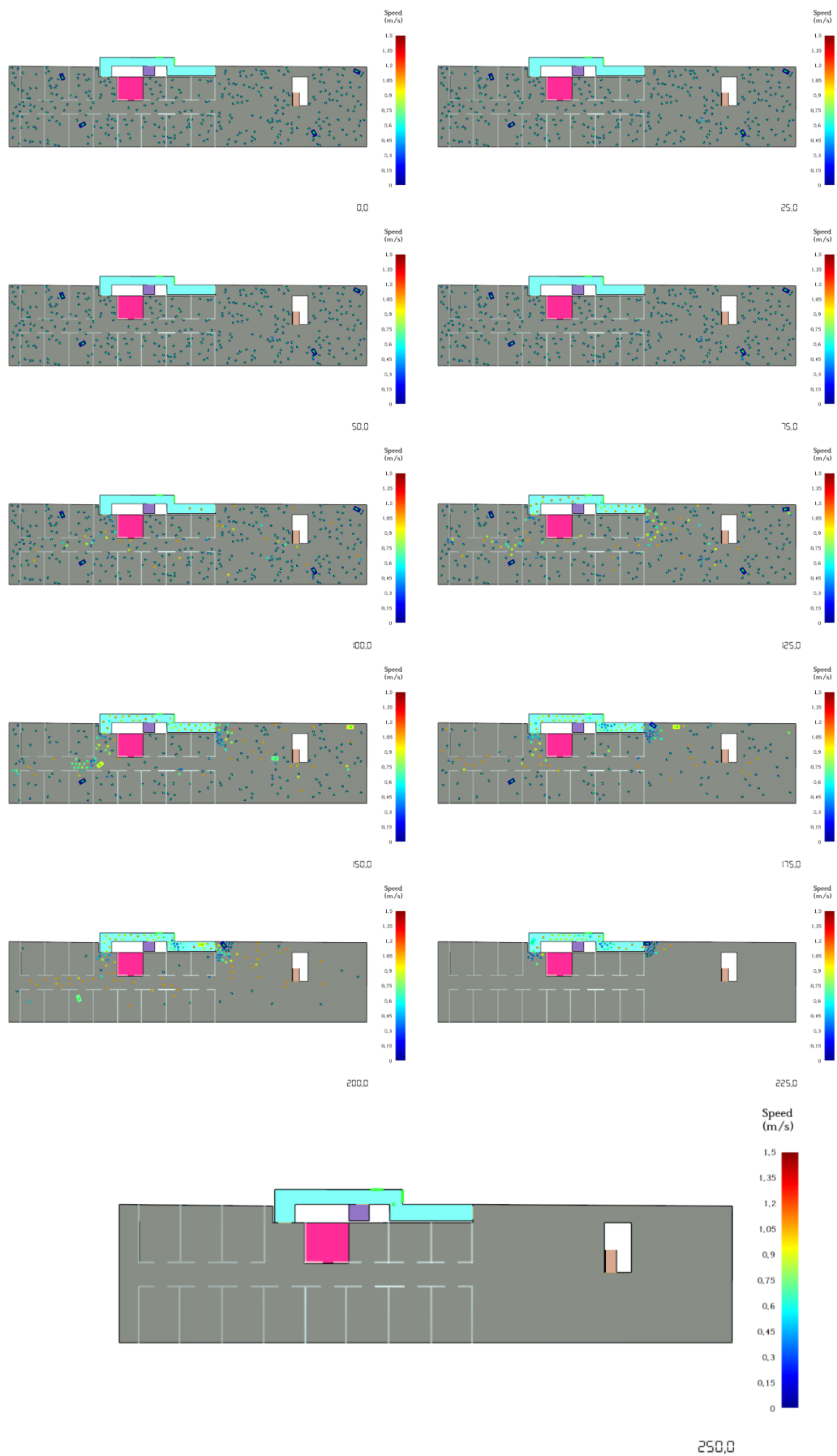


Figura 60: Sequenza temporale esodo dal piano primo con sovraffollamento

A questa condizione si associa un'ulteriore criticità legata al degrado delle condizioni di visibilità. Il ritardo nell'esodo comporta infatti che una parte degli occupanti in attesa presso l'uscita di sicurezza est permanga, seppur per un intervallo temporale limitato, in condizioni di visibilità inferiori a 10 m, valore minimo previsto dal Codice per la verifica delle prestazioni di sicurezza. Sebbene la posizione in prossimità della porta consenta comunque la percezione dell'uscita e la comprensione del percorso di esodo, una situazione di questo tipo potrebbe indurre alcuni occupanti, in particolare quelli conoscitori del luogo, a tentare di utilizzare l'uscita alternativa.

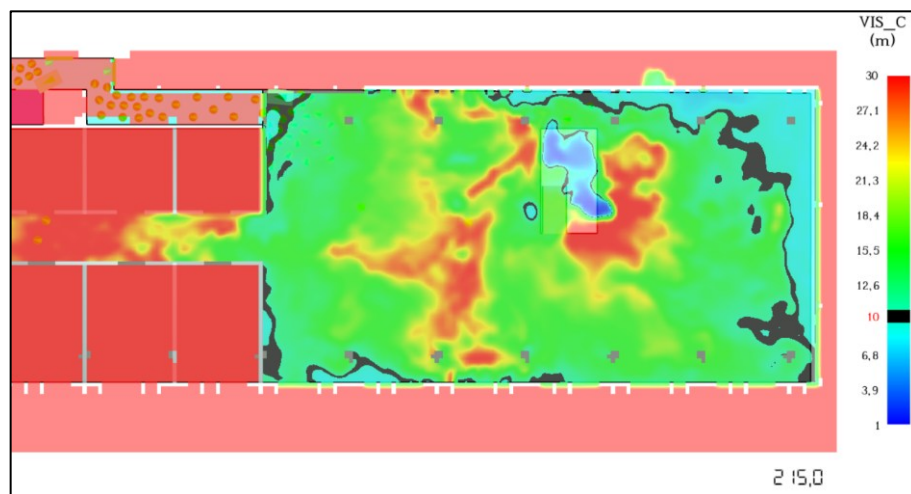


Figura 61: Visibilità non garantita in prossimità dell'U.S. PI_02

Al fine di garantire condizioni di sicurezza anche durante il tempo margine e di tenere conto di questa eventualità, è stata simulata l'indisponibilità dell'uscita est a partire da 215 secondi dall'innesco dell'emergenza.

	Time	Value
1	215,0 s	Closed
*		

Figura 62: Indisponibilità dell'U.S. dopo 215 s impostata su Pathfinder

Questa ipotesi determina un ulteriore rallentamento del processo di evacuazione e conduce a un tempo complessivo di esodo pari a $RSET = 260$ s, valore superiore di circa 40 secondi rispetto a quello previsto nello scenario di progetto.

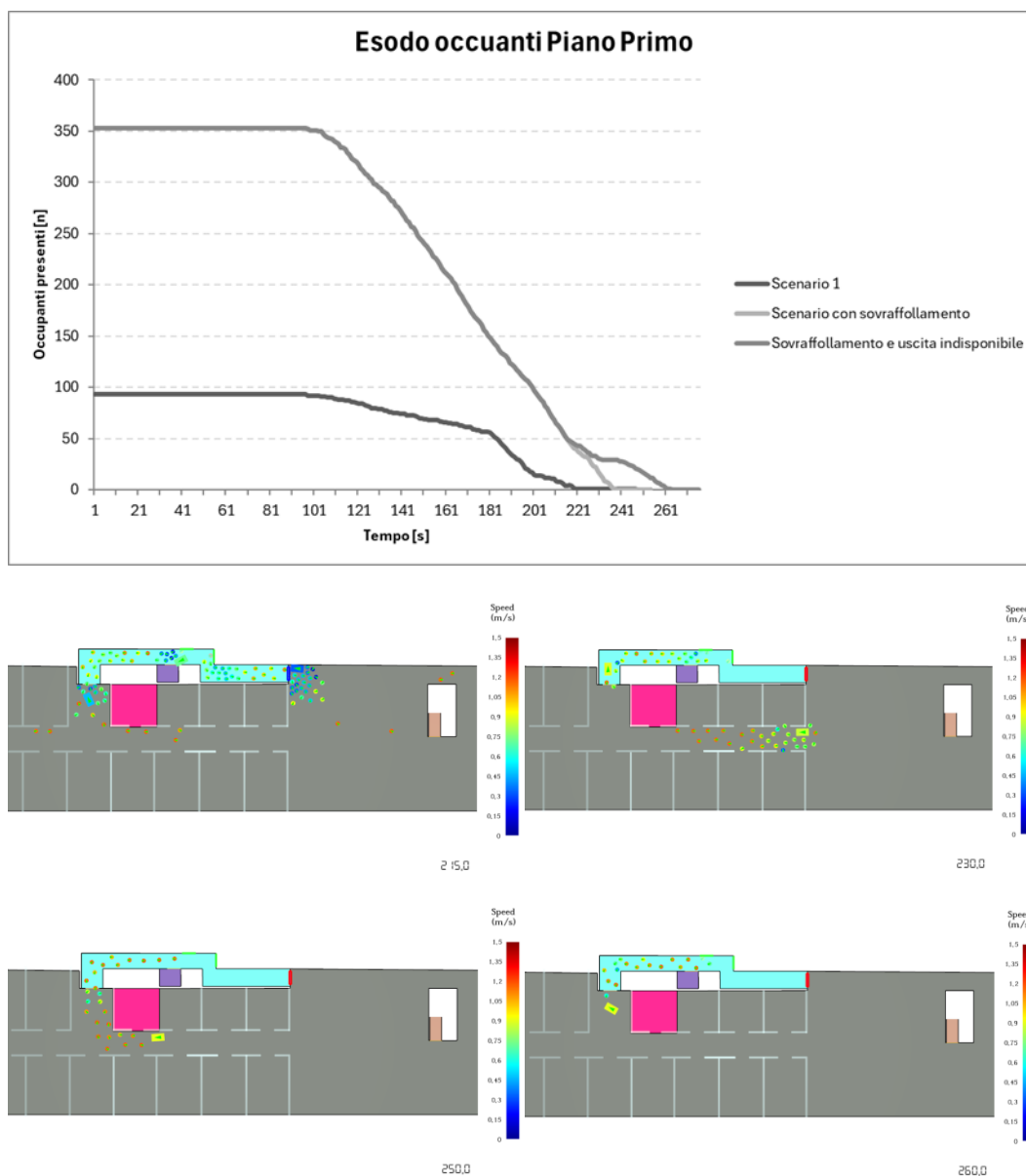


Figura 63: Sequenza temporale con ritardo dovuto all'indisponibilità

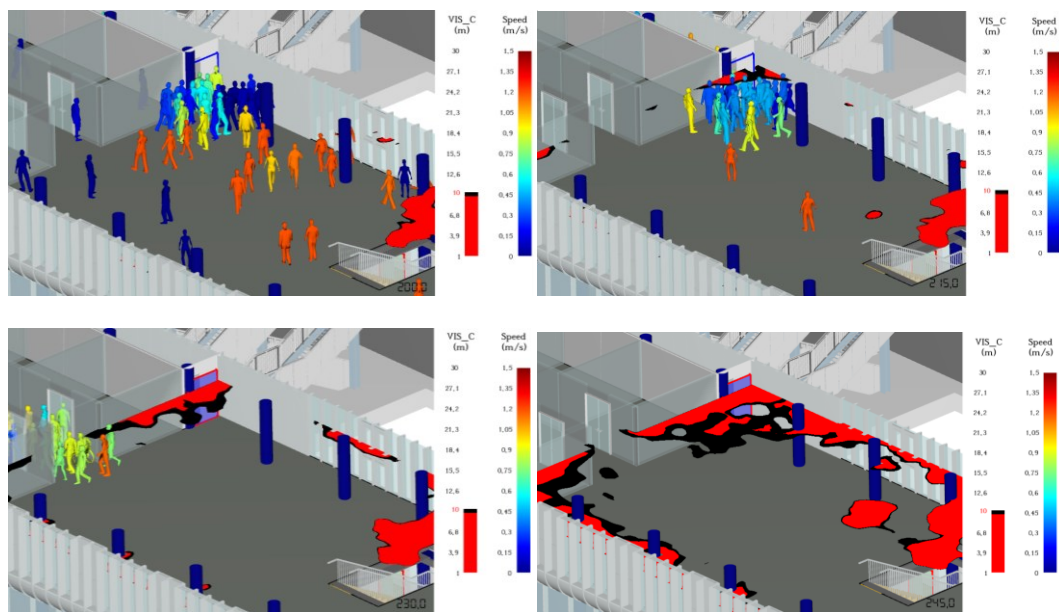


Figura 64: Rappresentazione della coda in prossimità dell'U.S. P1_02 in condizioni di visibilità critica



Figura 65: Rappresentazione del tempo di coda tramite video



Figura 66: Rappresentazione del tempo di coda in realtà virtuale tramite visore

A fronte delle criticità emerse per lo scenario di sovraffollamento del piano primo, nel quale non risulta verificato il criterio di sicurezza $ASET > RSET$, è stata condotta un'ulteriore analisi finalizzata alla determinazione del numero massimo di occupanti ammissibile su questo livello in condizioni di incendio. Diversamente da quanto osservato per il piano terra, dove la configurazione geometrica e la disponibilità di vie di esodo consentono di accogliere l'intero affollamento complessivo previsto (352 occupanti) senza compromettere le prestazioni di sicurezza, il piano primo presenta limitazioni significative legate alla ridotta capacità di deflusso, alla presenza di soli due percorsi di esodo verso scale esterne e alla maggiore vulnerabilità rispetto al degrado delle condizioni ambientali.

L'analisi è stata condotta adottando un approccio incrementale, partendo dal valore di affollamento dichiarato dal responsabile dell'attività per il piano primo, pari a 93 occupanti, e procedendo con incrementi progressivi del numero di occupanti fino all'individuazione della soglia massima compatibile con il rispetto delle condizioni di sicurezza. Per ciascun scenario simulato sono stati valutati i tempi di movimento e il tempo complessivo di esodo, verificandone la compatibilità con l'andamento temporale delle condizioni ambientali derivanti dallo scenario di incendio di riferimento, al fine di garantire il mantenimento del margine di sicurezza richiesto.

Questa procedura consente di determinare in modo prestazionale il limite massimo di affollamento del piano primo, superando una valutazione puramente prescrittiva e introducendo una quantificazione diretta delle prestazioni del sistema di esodo in relazione alle effettive caratteristiche geometriche e funzionali del compartimento. In questa ottica, l'analisi può essere interpretata come una soluzione alternativa alla strategia S.4 del Codice, basata su valutazioni quantitative dell'esodo, che tengono conto delle lunghezze dei percorsi, delle larghezze utili delle uscite e delle dinamiche di deflusso degli occupanti, piuttosto che su limiti di affollamento prefissati.

L'obiettivo dell'analisi è stato garantire il completamento dell'esodo entro il tempo di riferimento individuato nello scenario di esercizio, corrispondente alla configurazione con 93 occupanti, per la quale è stato determinato un valore di RSET pari a 220 s; dalle simulazioni effettuate, incrementando progressivamente l'affollamento di 5 occupanti per volta, è emerso che fino a 245 occupanti al piano primo il valore di RSET rimane sostanzialmente invariato, nonostante la presenza di rallentamenti locali e formazione di code

durante l'evacuazione, mentre per valori superiori il tempo complessivo di esodo risulta in aumento.

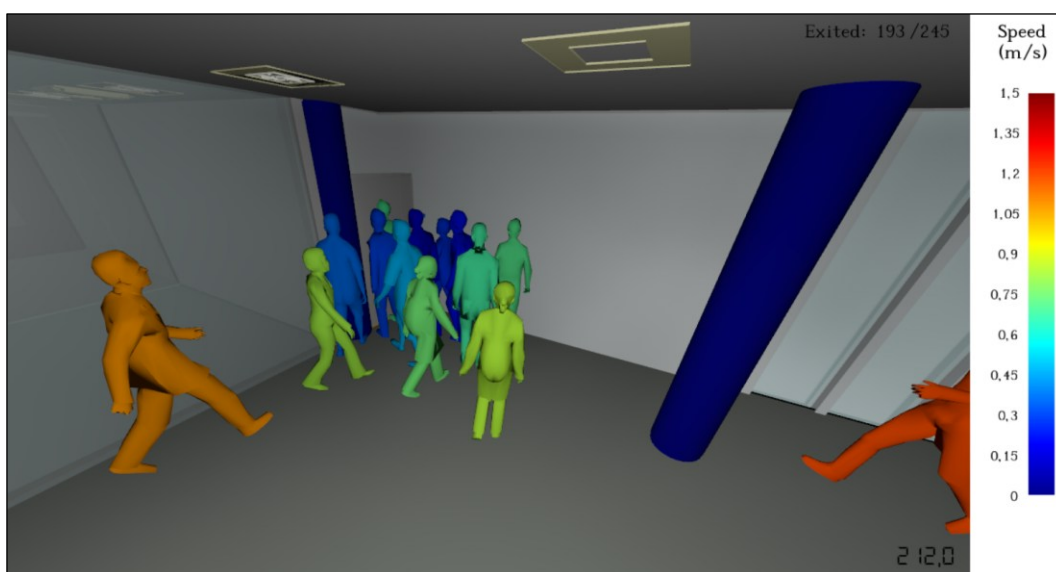
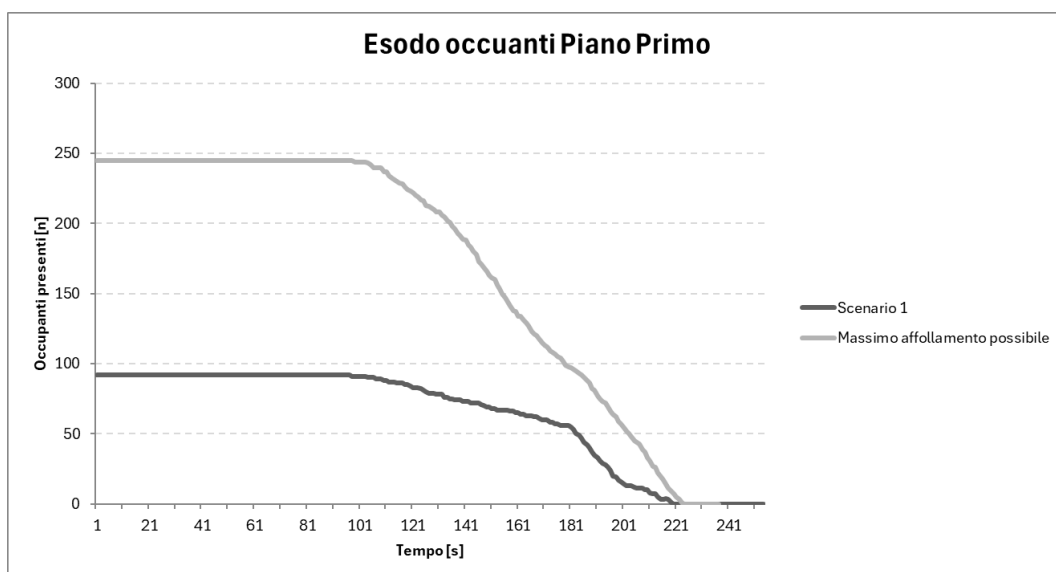


Figura 67: Formazione di code che tuttavia non influiscono su RSET

Si evidenzia che le valutazioni svolte sono riferite allo Scenario di incendio 1, caratterizzato da un incendio localizzato al piano terra. In questo contesto, una concentrazione di affollamento pari all'intero numero di occupanti complessivi risulta ammissibile al piano terra, al piano secondo e al piano terzo, senza compromettere il rispetto del criterio $ASET > RSET$. Per il piano primo, invece, un affollamento di 352 occupanti non risulta compatibile con le prestazioni di sicurezza richieste, risultando verificato con un massimo numero di occupanti pari a 245.

6. Attività della squadra di emergenza

6.1. Definizione dei compiti

La definizione e la modellazione delle azioni attribuite alla squadra di emergenza interna sono state affrontate in chiave sperimentale, con l'obiettivo di indagare le modalità di trasferimento dei contenuti tipicamente propri del Piano di Emergenza ed Evacuazione verso gli addetti alla gestione dell'emergenza e il personale delle diverse attività presenti. A tal fine, sono state ipotizzate e implementate all'interno delle simulazioni di esodo alcune azioni di natura organizzativa e gestionale tipiche di un PEE, allo scopo di valutarne la compatibilità temporale con le condizioni ambientali previste negli scenari di incendio analizzati. Per la verifica di queste azioni si è fatto riferimento alle soglie di prestazione per la salvaguardia della vita umana riportate nella Tabella M.3-2 del Codice di prevenzione incendi, in relazione alla visibilità, all'esposizione ai prodotti della combustione e alle sollecitazioni termiche, assumendo tali valori come criteri di accettabilità per la permanenza e l'operatività degli addetti.

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilità da fumo	Visibilità minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m ² : 5 m	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m ² : 2,5 m	[1]
Gas tossici	FED, <i>fractional effective dose</i> e FEC, <i>fractional effective concentration</i> per esposizione a gas tossici e gas irritanti, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 0,1	ISO 13571:2012, limitando a 1,1% la porzione di occupanti incapaci al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	-
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 80°C	[1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell'incendio, struttura) di esposizione degli occupanti	Occupanti: 2,5 kW/m ²	ISO 13571:2012, per esposizioni inferiori a 30 minuti
		Soccorritori: 3 kW/m ²	[1]

[1] Ai fini di questa tabella, per soccorritori si intendono i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, ad operare in condizioni di scarsa visibilità. Ulteriori indicazioni possono essere desunte ad esempio da documenti dell'Australian Fire Authorities Council (AFAC) per hazardous conditions.

Figura 68: Esempio soglie di prestazione per i soccorritori

Nell'ambito del modello adottato, gli addetti alla gestione dell'emergenza sono assunti come personale adeguatamente formato, informato e

addestrato, in coerenza con il quadro normativo vigente, al fine di rappresentare condizioni operative compatibili con l'esecuzione consapevole delle azioni ipotizzate entro i limiti prestazionali definiti dal progetto. Le azioni simulate includono il tentativo di contrasto del principio d'incendio in condizioni di sicurezza mediante i presidi disponibili, l'attivazione delle procedure di evacuazione e il supporto all'esodo degli occupanti, la chiamata e l'assistenza ai soccorsi esterni, nonché l'attuazione delle principali misure gestionali di emergenza, tra cui la chiusura delle porte resistenti al fuoco a tutela della compartimentazione e l'azionamento dei sistemi di smaltimento di fumi e calore da posizione protetta, previa verifica dell'avvenuto sgombero del compartimento. La simulazione mediante Pathfinder costituisce uno strumento di supporto metodologico finalizzato a rendere espliciti e verificabili i contenuti operativi dell'emergenza, favorendone la comprensione e la trasferibilità verso il personale coinvolto. Questa impostazione consente di evidenziare come i risultati dell'analisi FSE possano essere tradotti in indicazioni operative comprensibili e verificabili, rafforzando il legame tra progetto prestazionale, gestione dell'emergenza e diffusione della cultura della sicurezza.

Sulla base delle ipotesi adottate e delle verifiche prestazionali condotte, le azioni attribuite alla squadra di emergenza sono state organizzate secondo una sequenza logica e temporale coerente con le modalità di attivazione dei sistemi di rivelazione e con gli obiettivi di sicurezza assunti:

Alla segnalazione del primo rilevatore automatico, o dell'azionamento del primo pulsante manuale, è prevista una fase iniziale di verifica dell'evento, attivata mediante un allarme selettivo riservato agli addetti, finalizzato alla conferma della presenza dell'incendio e alla valutazione preliminare delle condizioni ambientali. Il segnale di allarme silenzioso riprodotto si ripeterà ogni 20 secondi fino alla verifica dell'operatore e l'annuncio conterrà le seguenti informazioni:

"Attenzione, comunicazione di servizio.

Si richiede la presenza di personale AEA

*in area * per codice giallo"*

Dove per * verrà annunciato il nome del compartimento, seguito dal blocco di riferimento e dal piano.

Il superamento della soglia di attivazione di un secondo rilevatore comporta invece l'innescio automatico dell'allarme di evacuazione, determinando

l'avvio delle procedure di esodo per gli occupanti. Il testo del segnale generale di allarme, alternato dal suono ripetuto per tre volte di una sirena, sarà invece il seguente:

"Attenzione, attenzione. Emergenza incendio.

Abbandonare immediatamente il compartimento

seguendo le vie di esodo segnalate. Non utilizzare l'ascensore.

Seguire le indicazioni del personale addetto all'emergenza"

Contestualmente alla fase di verifica, gli addetti provvedono ad indossare e prelevare i dispositivi di protezione individuale, garantendo un livello minimo di protezione compatibile con le azioni da svolgere. Viene quindi effettuata la comunicazione al centro di coordinamento del tenant e alla centrale di gestione delle emergenze, che procede all'attivazione dei Vigili del Fuoco e alla verifica dell'avvenuta chiusura delle serrande tagliafuoco previste. Qualora le condizioni ambientali risultino compatibili con le soglie di prestazione assunte e la squadra sia composta da almeno due addetti, è previsto il tentativo di contenimento e spegnimento del principio d'incendio mediante l'impiego dei presidi di lotta antincendio presenti in loco, quali estintori o idranti; in assenza di tali condizioni, o in caso di insuccesso, le azioni si orientano prioritariamente alla gestione dell'evacuazione. Nell'ambito del modello adottato, l'utilizzo della scala interna dell'open space è escluso dai percorsi di esodo degli occupanti ed è ammesso esclusivamente per gli addetti alla gestione dell'emergenza, al fine di consentire lo spostamento tra i diversi livelli del compartimento multipiano per lo svolgimento delle azioni ipotizzate. Il suo utilizzo è però subordinato a un limite temporale massimo dalla rilevazione dell'incendio, definito sulla base delle verifiche prestazionali condotte mediante simulazione FSE, che hanno evidenziato la compatibilità delle condizioni ambientali lungo la scala entro un intervallo di tempo dell'ordine di 250s.

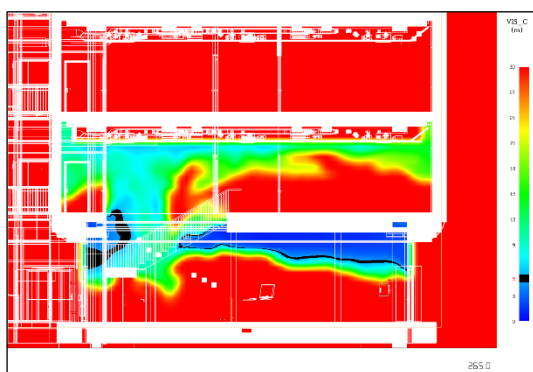


Figura 69: Visibilità non verificata dopo 265 s

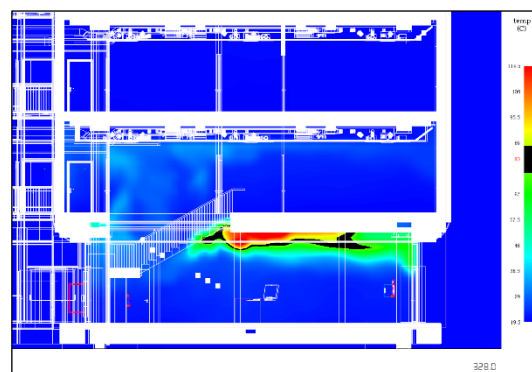


Figura 70: Temperatura non verificata dopo 320 s

In questa fase, gli addetti supportano l'esodo del personale presente, prestando particolare attenzione alle persone con mobilità ridotta, mediante l'attuazione di un esodo orizzontale o l'accompagnamento verso uno spazio calmo, secondo quanto ipotizzato nel modello. Tra le azioni gestionali rientra inoltre la chiusura delle porte resistenti al fuoco che mettono in comunicazione il corpo scale centrale con il compartimento multipiano, al fine di preservare la compartimentazione e limitare la propagazione di fumi e calore. Al piano terra è prevista l'apertura delle porte verso l'esterno per favorire lo smaltimento dei prodotti della combustione, unitamente all'azionamento delle finestre motorizzate destinate allo smaltimento di fumi e calore. Una volta completate le operazioni di evacuazione e di messa in sicurezza, gli addetti forniscono assistenza ai Vigili del Fuoco nelle operazioni di soccorso e spegnimento, supportando l'intervento mediante la trasmissione delle informazioni operative disponibili.

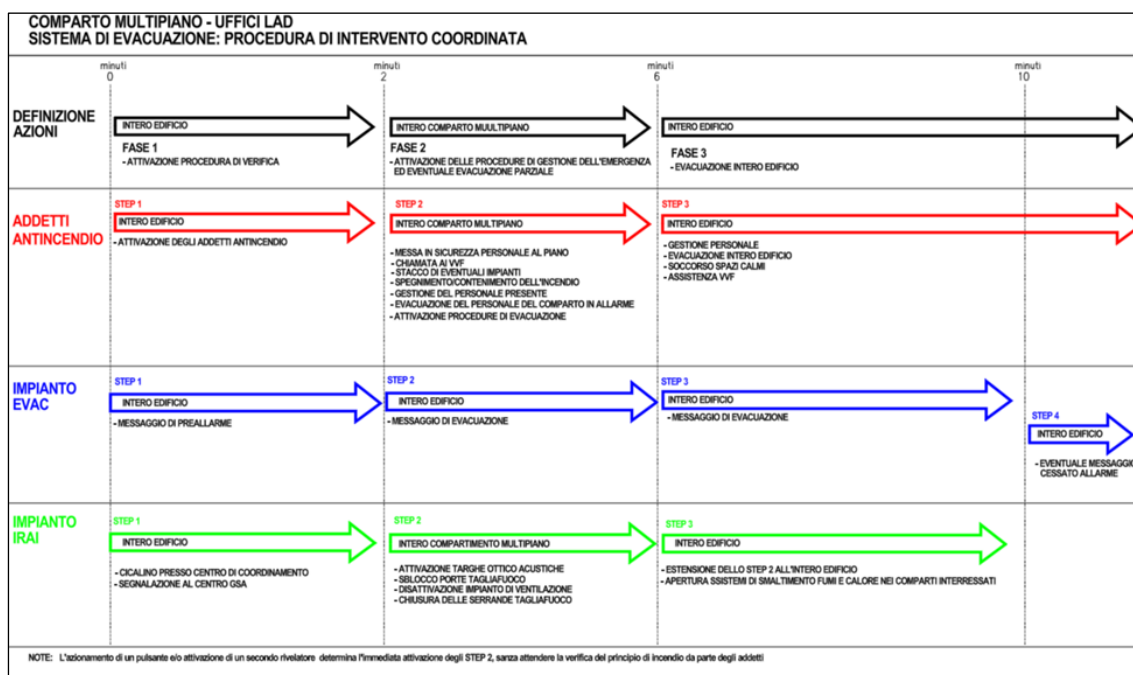


Figura 71: Procedura di intervento coordinata inserita nel P.E.E.

L'intera sequenza di azioni, modellata a fini sperimentali, è finalizzata a rendere espliciti e trasferibili i contenuti operativi tipicamente propri del Piano di Emergenza ed Evacuazione, consentendo di verificare e comunicare in modo strutturato le modalità di intervento agli addetti e al personale delle diverse attività presenti, in coerenza con i risultati dell'analisi FSE e con i criteri ASET/RSET. Si sottolinea che i video e le simulazioni sviluppati hanno esclusivamente funzione di supporto alla comprensione delle sequenze

decisionali, delle tempistiche di intervento e del corretto inquadramento delle azioni da intraprendere nelle diverse fasi dell'emergenza, ma non possono in alcun modo essere considerati sostitutivi dell'addestramento manuale e pratico, che rimane elemento essenziale e imprescindibile del percorso formativo degli addetti, necessario a garantire una reale padronanza dei dispositivi di lotta all'incendio e delle procedure operative da adottare in condizioni reali. Le rappresentazioni video consentono tuttavia di chiarire quando e in quale contesto determinate azioni devono essere eseguite, favorendo la coerenza tra le ipotesi progettuali, le verifiche prestazionali e l'organizzazione operativa dell'emergenza.

6.2. Modellazione delle azioni

Al fine di consentire un efficace trasferimento operativo delle azioni descritte nel paragrafo precedente alle squadre di emergenza, che costituisce l'obiettivo ultimo della presente tesi, le procedure individuate sono state implementate all'interno del modello di simulazione Pathfinder mediante l'attribuzione di specifici comportamenti agli addetti all'emergenza, così da ricostruire una sequenza logica e temporalmente coerente delle azioni previste. In questa fase sono stati inoltre inseriti nel modello quegli elementi non presenti nel modello BIM sviluppato in ambiente Revit, quali i presidi e gli apprestamenti di sicurezza antincendio, tra cui idranti, estintori, interfonie e cassette di emergenza, inizialmente importati in Pathfinder in formato tridimensionale (.obj e .fbx). Questa scelta appariva compatibile con l'esigenza di contenere i tempi di rilancio delle simulazioni, ma ha evidenziato criticità nella fase di visualizzazione dei risultati. In particolare, la compresenza di due modalità alternative di rappresentazione geometrica nel visualizzatore dei risultati, ovvero la Pathfinder Geometry e la PyroSim Geometry, ha mostrato limiti significativi.

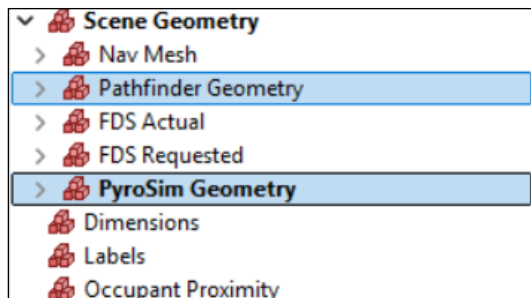


Figura 72: Visualizzazioni alternative possibili

La prima, basata su solidi semplificati, restituisce una rappresentazione fortemente approssimata dell'ambiente, poco aderente alla reale configurazione spaziale e geometrica del compartimento analizzato. La seconda, garantisce un livello di dettaglio e realismo decisamente superiore, ma comportava un rilancio della simulazione con tempi di calcolo nettamente superiore rispetto a quelle di Pathfinder. Al fine di assicurare una restituzione grafica più efficace e coerente con le finalità comunicative e formative del lavoro, si è pertanto scelto di rilanciare le simulazioni in ambiente PyroSim, disabilitando funzionalità quali Slice2D e devices per

contenere i tempi computazionali, mantenendo al contempo una qualità visiva adeguata alla successiva elaborazione dei contenuti.

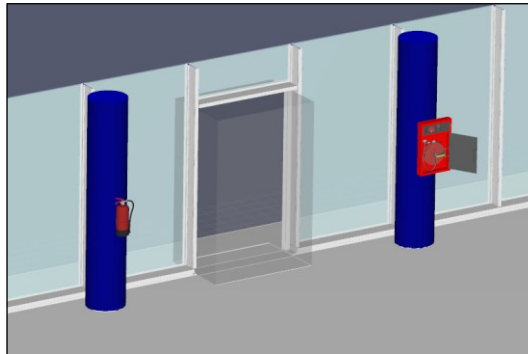


Figura 73: Esempio di attrezzatura inserita all'interno del modello

Ulteriori limiti di Pathfinder sono emersi nel momento in cui si è ricercata una rappresentazione esplicita delle azioni manuali da compiere durante l'emergenza. Essendo un software specificamente orientato alla simulazione dell'esodo e del movimento degli occupanti, Pathfinder non consente la programmazione diretta delle azioni manuali degli avatar, ma permette esclusivamente l'impostazione di tempi di stazionamento riconducibili, sulla base di riferimenti normativi, analisi tecniche o esperienza operativa, alla durata necessaria per compiere una determinata azione. Attività quali l'indossamento dei dispositivi di protezione individuale o l'utilizzo di un estintore per il contrasto di un principio d'incendio non risultano quindi direttamente modellabili, pur rappresentando azioni fondamentali ai fini dell'addestramento degli addetti. È emersa pertanto la necessità di ricorrere a strumenti complementari.

☐ Addetto_Antincendio_SE_1	☐ Addetto_Antincendio_SE_2
➤ Goto (106,0, 8,5, 0,0) m	⌚ Wait (40,0 s)
⌚ Wait (5,0 s)	➤ Goto (73,7, 14,7, 0,0) m
➤ Goto (73,7, 14,7, 0,0) m	⌚ Wait (5,0 s)
⌚ Wait (5,0 s)	➤ Goto (102,5, 8,5, 0,0) m
➤ Goto (76,5, 12,5, 0,0) m	➤ Goto (90,2, 2,2, 0,0) m
➤ Goto (102,5, 9,5, 0,0) m	⌚ Wait (15,0 s)
⚡ Look ahead	➤ Goto (102,0, 8,0, 0,0) m
⌚ Wait (5,0 s)	⚡ Look ahead
➤ Goto (102,5, 8,7, 0,0) m	⌚ Wait (45,0 s)
⚡ Look ahead	➤ Goto (118,5, 12,5, 0,0) m
👤 Assist <Squadra_Emergenza>	➤ Goto (118,0, 3,5, 0,0) m
➤ Goto (74,0, 10,5, 4,4) m	➤ Goto (63,5, 4,0, 0,0) m
➤ Goto (58,0, 8,2, 4,4) m	➤ Goto (64,5, 12,0, 0,0) m
➤ Goto (95,7, 10,6, 4,4) m	➤ Goto (87,0, 7,5, 0,0) m
EXIT Exit <any>	⌚ Wait (10,0 s)
	➤ Goto (73,5, 14,5, 0,0) m
	⌚ Wait (10,0 s)
	EXIT Exit <DoorPT_Filtro>

Figura 74: Comportamenti di due addetti modellati su Pathfinder

Una prima ipotesi ha previsto l'esportazione dei risultati verso ambienti di elaborazione grafica quali Unity o Unreal Engine, che avrebbero consentito la

programmazione di azioni manuali più articolate. Questa soluzione è stata tuttavia scartata in quanto presentava criticità rilevanti in termini di trasferibilità dei risultati e replicabilità del metodo. In particolare, i risultati delle simulazioni FSE non risultano direttamente integrabili in queste piattaforme senza ricorrere a complesse fasi di post-elaborazione, che tendono a eliminare o semplificare eccessivamente gli aspetti quantitativi e fisicamente significativi dell'analisi prestazionale. La propagazione dei fumi realizzata in questi ambienti risulta infatti prevalentemente di tipo "cinematografico" e non rappresentativa dei fenomeni fisici modellati, rendendo questo approccio non coerente con gli obiettivi del lavoro. Inoltre, la modellazione delle azioni degli addetti richiederebbe competenze avanzate di programmazione e animazione, spesso estranee al bagaglio professionale dei tecnici della sicurezza antincendio, compromettendo l'applicabilità della metodologia in contesti reali. La scelta è quindi ricaduta su una seconda ipotesi basata sull'utilizzo di strumenti di intelligenza artificiale generativa, tecnologia che negli ultimi anni ha trovato crescente diffusione anche in ambito professionale. Considerata la necessità di rappresentare azioni semplici ma essenziali da integrare alle simulazioni realizzate in Pathfinder, l'impiego dell'intelligenza artificiale per la generazione di contenuti video è risultato coerente con il raggiungimento dell'obiettivo finale. Questa soluzione si caratterizza per una maggiore facilità di utilizzo, controllo e replicabilità da parte dei professionisti della sicurezza. Attualmente sono disponibili numerosi sistemi di intelligenza artificiale generativa, quali GeminiAI, Runway e DeepAI, in grado di produrre brevi sequenze video a partire da immagini e comandi testuali strutturati. Le moderne piattaforme multimodali consentono infatti l'elaborazione di una o più immagini di input mediante processi di trasformazione controllata, permettendo la generazione di animazioni che descrivono azioni, movimenti e interazioni tra gli elementi della scena, nonché la gestione della transizione temporale tra stati iniziali e finali mantenendo coerenza spaziale e semantica. È inoltre possibile intervenire selettivamente sui contenuti visivi, modificando oggetti, illuminazione e punto di vista, garantendo la consistenza dei soggetti lungo l'intera sequenza generata, sebbene l'accesso a tali funzionalità avanzate sia spesso subordinato all'utilizzo di piani a pagamento.

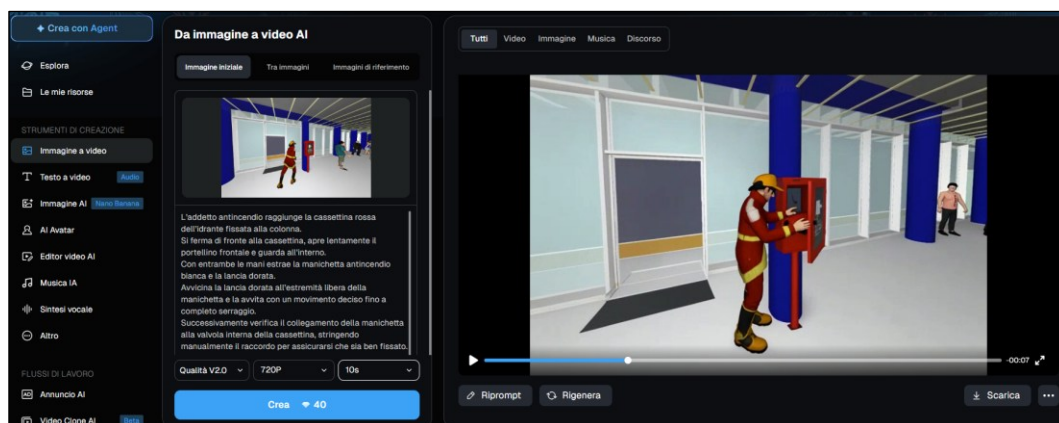


Figura 75: Esempio di prompt AI per animazione video

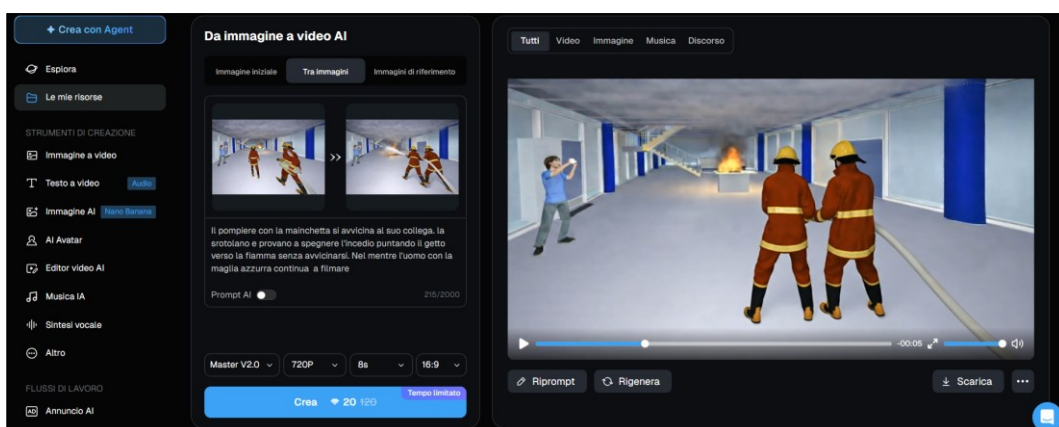


Figura 76: Esempio di generazione video AI tra due fotogrammi di riferimento

L'integrazione tra i video ottenuti dalle simulazioni Pathfinder e quelli generati mediante intelligenza artificiale a partire da fotogrammi estratti dallo stesso ambiente di simulazione ha consentito la realizzazione di contenuti video esplicativi, finalizzati al supporto della formazione degli addetti antincendio e alla comprensione delle sequenze operative previste dal Piano di Emergenza ed Evacuazione.

6.3. Restituzione grafica

Vengono di seguito riportati alcuni estratti significativi del video realizzato a partire dalla simulazione di esodo, selezionati con l'obiettivo di rappresentare i principali comportamenti operativi richiesti alle squadre di emergenza durante la gestione di un evento incendiario. Il video è stato costruito a partire da una ripresa in prima persona dell'operatore all'interno dell'ambiente di simulazione FSE, ottenuta mediante il software Pathfinder integrando i risultati della simulazione FDS, così da riprodurre in modo realistico il punto di vista dell'addetto durante le fasi di intervento e di supporto all'esodo. A questa base simulativa sono stati integrati i contributi video realizzati tramite strumenti di intelligenza artificiale, utilizzati per completare e rendere più esplicite alcune azioni operative non direttamente rappresentabili nella simulazione numerica. Le azioni mostrate derivano dalle procedure previste nel Piano di Emergenza ed Evacuazione dell'attività e sono state trasposte in forma visuale con finalità didattiche, al fine di agevolare il trasferimento dei contenuti operativi agli addetti.

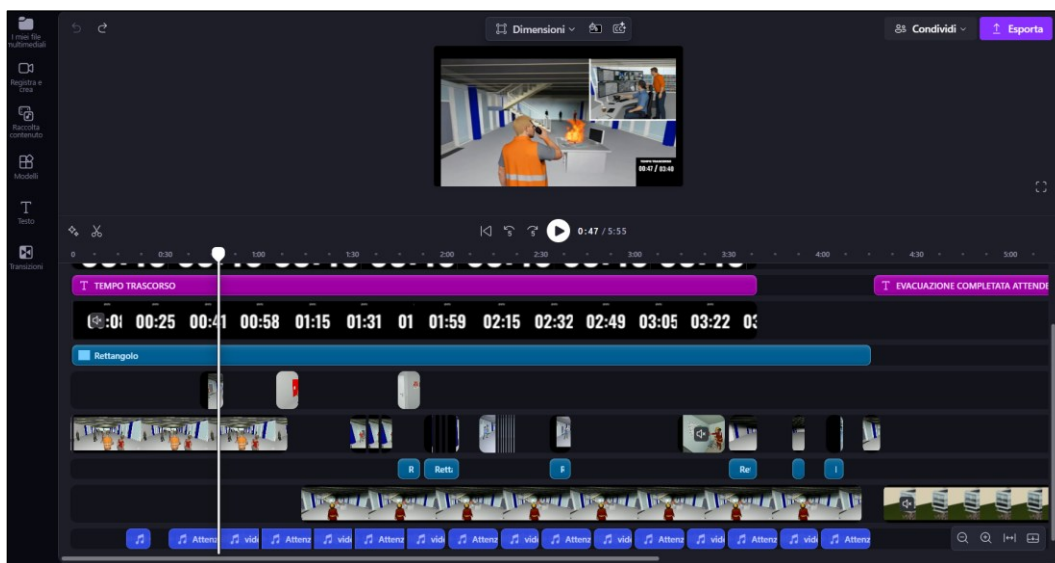


Figura 77: Montaggio video di addestramento tramite software open source

L'integrazione tra simulazione prestazionale, riprese immersive e contenuti generati tramite intelligenza artificiale risponde all'obiettivo della tesi di valutare l'efficacia delle simulazioni di incendio ed esodo come strumento di formazione e addestramento, consentendo agli operatori di riconoscere scenari, priorità di intervento e corrette modalità di azione in condizioni di emergenza.

- Al riconoscimento del segnale di allarme silenzioso, l'addetto all'emergenza si dirige verso il luogo indicato, attenendosi alle procedure operative previste dal PEE.



Figura 78: Risposta all'allarme silenzioso

- L'operatore incaricato procede alla verifica della presenza del principio di incendio e ne comunica tempestivamente l'esito al centro di gestione dell'emergenza



Figura 79: Verifica del principio di incendio

- A seguito della rilevazione del primo rilevatore di fumo, il centro di gestione delle emergenze richiede l'intervento degli addetti per la verifica del principio di incendio. In caso di conferma da parte dell'operatore, o al verificarsi della segnalazione di un secondo rilevatore, viene attivato l'allarme generale, informato il responsabile dell'attività e avviata la chiamata ai Vigili del Fuoco.



Figura 80: Attivazione della procedura di emergenza e allarme generale

- Prima di avviare qualsiasi attività di lotta all'incendio o di soccorso, gli addetti devono indossare i dispositivi di protezione individuale previsti. Le operazioni di spegnimento possono essere intraprese esclusivamente in presenza di almeno due operatori.



Figura 81: Utilizzo dei D.P.I.

- L'addetto all'emergenza interviene sul principio di incendio utilizzando gli estintori idonei disponibili nelle vicinanze, valutando preventivamente le condizioni di sicurezza e la possibilità di un'azione efficace.



Figura 82: Tentativo di spegnimento con estintori

- Un addetto sarà designato ad azionare il pulsante di sgancio elettrico di emergenza per interrompere l'alimentazione prima dell'utilizzo di idranti o naspi. Provvede inoltre a chiudere la valvola di intercettazione del gas e comunica l'effettuazione del compito ai colleghi

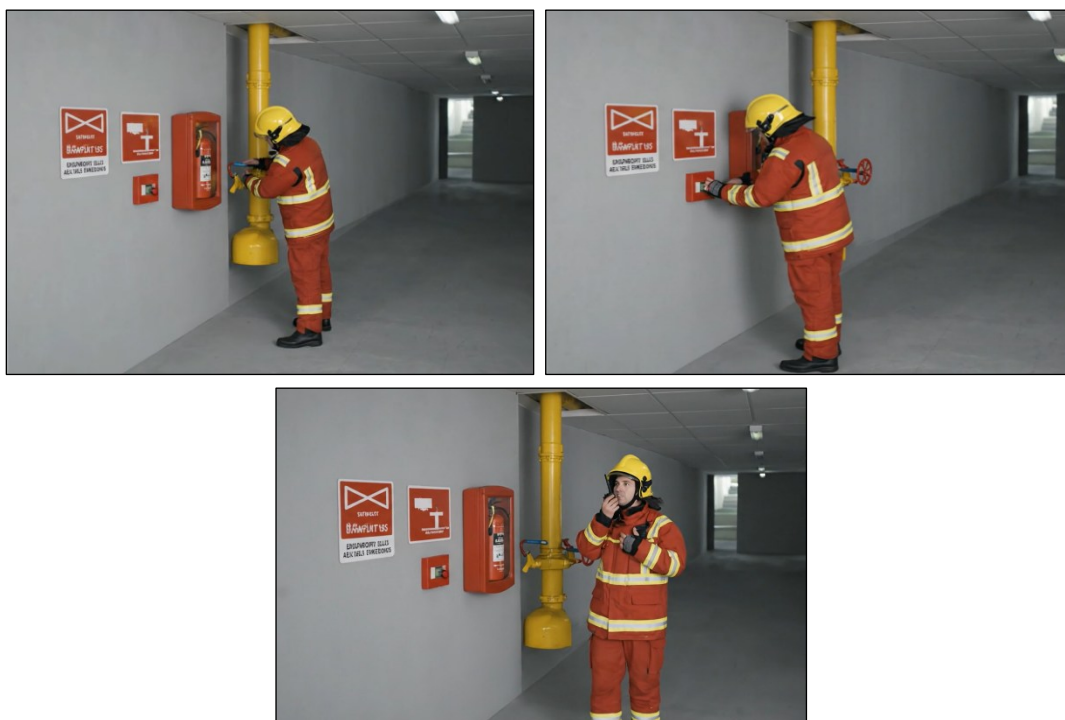


Figura 83: Operazione di sgancio degli impianti di servizio

- Qualora le condizioni lo consentano, gli addetti all'emergenza utilizzano gli idranti presenti, procedendo all'assemblaggio dei componenti, alla predisposizione della linea di spegnimento e assicurandosi del corretto collegamento posizionamento prima dell'utilizzo.

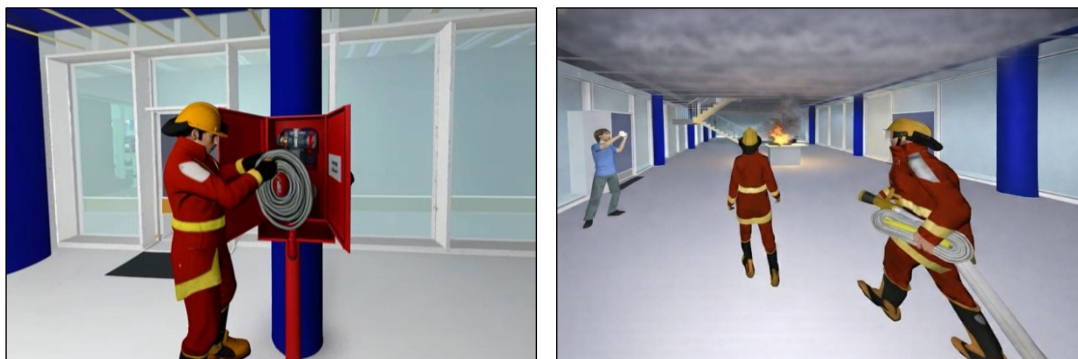


Figura 84: Utilizzo degli idranti interni e preparazione delle manichette

- La lotta all'incendio tramite idranti, considerata la complessità e l'impegno operativo richiesto, deve essere effettuata esclusivamente da personale esperto, formato e addestrato, e solo in condizioni di sicurezza adeguate.



Figura 85: Lotta all'incendio mediante idranti

- Le scale interne di collegamento non costituiscono percorsi di esodo verticali per gli occupanti; tuttavia, possono essere utilizzate dagli addetti all'emergenza per lo spostamento tra i piani, purché non presentino condizioni di rischio legate all'incendio. In alternativa devono essere utilizzate le scale esterne.



Figura 86: Utilizzo delle scale interne da parte degli addetti

- Nel caso in cui alcuni occupanti non rispondano ai messaggi di evacuazione, l'addetto all'emergenza interviene direttamente invitandoli ad abbandonare l'edificio e indirizzandoli verso le vie di esodo.



Figura 87: Supporto all'evacuazione degli occupanti

- Gli addetti all'emergenza forniscono assistenza durante l'esodo alle persone con ridotte capacità motorie che ne facciano richiesta, secondo quanto previsto dalle procedure di emergenza.



Figura 88: Assistenza all'esodo di persone con ridotte capacità motorie

- In presenza di persone con ridotte capacità motorie, l'addetto all'emergenza fornisce supporto diretto accompagnandole verso lo spazio calmo dedicato e fornendo indicazioni chiare sul comportamento da mantenere in attesa dei soccorsi.



Figura 89: Assistenza a persone con mobilità ridotta verso lo spazio calmo

- L'operatore deve accertarsi con un giro di ispezione che tutti gli occupanti siano esodati dall'ambiente interessato dall'emergenza.



Figura 90: Controllo del compartimento

- Accertata l'assenza di occupanti all'interno del compartimento, l'operatore provvede alla chiusura delle porte REI per il contenimento dell'incendio e all'attivazione dei sistemi di smaltimento di fumo e calore presenti.

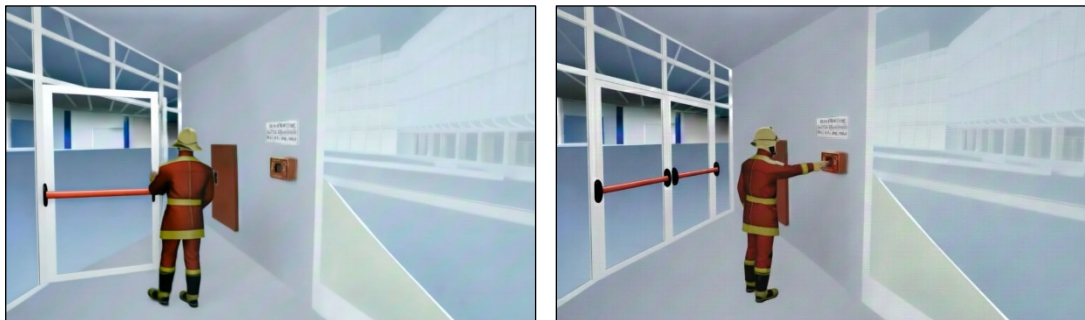


Figura 91: Chiusura delle porte REI e attivazione degli smaltitori di fumo e calore

- Tutti gli occupanti devono raggiungere il punto di ritrovo indicato nelle planimetrie di evacuazione affisse lungo i percorsi di esodo e attendere l'intervento dei soccorritori e il cessato allarme in condizioni di sicurezza



Figura 92: Occupanti raggiungono il punto di ritrovo esterno

- Un addetto raccoglie le planimetrie e i documenti da consegnare ai Vigili del Fuoco. Essi sono conservati e custoditi all'interno del centro di gestione dell'emergenza ubicato al piano terra.



Figura 93: Preso possesso dei documenti da consegnare ai VVF

- Utilizzando le sedie di evacuazione di emergenza, due addetti tornano all'interno dell'edificio per procedere all'esodo di eventuali occupanti che attendono soccorso negli spazi calmi dedicati adiacenti alle scale esterne.

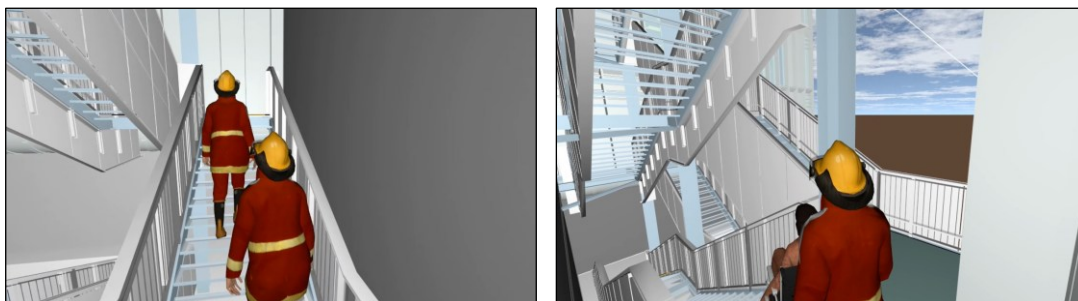


Figura 94: Soccorso degli occupanti nello spazio calmo

- All'arrivo dei Vigili del Fuoco, gli addetti all'emergenza consegnano il materiale previsto da PEE, rispondono ad eventuali domande e supportano l'intervento mediante la trasmissione delle informazioni operative disponibili nel limite della loro capacità.



Figura 95: Supporto ai VVF

7. Conclusione

Il lavoro ha sviluppato un percorso metodologico finalizzato ad estendere l'utilizzo della Fire Safety Engineering oltre la sola verifica progettuale, integrandola con la gestione della sicurezza e con la dimensione operativa dell'emergenza. L'obiettivo non è stato limitato alla dimostrazione del rispetto del criterio $ASET > RSET$, ma ha riguardato la trasformazione dei risultati della modellazione in strumenti utili al Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio e al Piano di Emergenza ed Evacuazione.

Sono stati definiti gli obiettivi di sicurezza e modellati degli scenari di incendio di progetto per i quali è stata effettuata la caratterizzazione dell'incendio, la simulazione dell'evoluzione termo-fluidodinamica e la determinazione del tempo disponibile per l'esodo in funzione del superamento delle soglie critiche di prestazione.

Parallelamente è stato modellato il processo di evacuazione, stimando il tempo richiesto per l'esodo sulla base della distribuzione degli occupanti, delle caratteristiche geometriche delle vie di fuga e delle ipotesi comportamentali assunte. Il confronto tra tempo disponibile e tempo richiesto ha consentito di verificare il soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza richiesti dalla normativa.

L'analisi è stata inoltre integrata con la realizzazione di scenari aggiuntivi, non finalizzati alla verifica del criterio prestazionale, ma sviluppati a scopo formativo, per evidenziare criticità di gestione e condizioni operative significative. Queste simulazioni hanno permesso di esplorare la sensibilità del sistema rispetto a variazioni di esercizio o configurazioni non ideali, rendendo esplicito il legame tra ipotesi progettuali e gestione reale dell'attività. Il lavoro si è esteso anche alla modellazione delle attività della squadra di emergenza, traducendo in termini dinamici le procedure previste dal Piano di Emergenza. L'integrazione tra scenari di incendio, condizioni ambientali e azioni operative ha consentito di rafforzare la coerenza tra dimensione progettuale e dimensione gestionale.

Un elemento qualificante della tesi è rappresentato dalla trasformazione dei risultati numerici in strumenti comunicativi e formativi. Le simulazioni sono state utilizzate non solo come verifica tecnica, ma come base per la costruzione di contenuti multimediali e scenari immersivi, finalizzati a rendere percepibili le conseguenze delle scelte operative. L'applicazione del principio

dell'apprendimento vicario ha consentito di impiegare la visualizzazione comparativa di comportamenti corretti e scorretti come supporto alla formazione e all'addestramento. L'integrazione tra modellazione FSE, gestione e strumenti digitali consente quindi di ridurre la distanza tra progetto e comportamento reale, trasformando la simulazione in uno strumento operativo a supporto della sicurezza in esercizio e in emergenza.

Permangono alcune criticità rilevate durante lo sviluppo del lavoro. In particolare possiamo affermare che l'uso di strumenti di AI generativa per la produzione di contenuti video, pur promettente, presenta ancora imprecisioni tecniche ed errori di output grafici che devono essere costantemente supervisionati da un professionista, oltre che limitazioni legate a piattaforme a pagamento e/o con limiti temporali. Inoltre, la complessità e i tempi computazionali delle simulazioni rendono impraticabile l'analisi esaustiva di tutti gli scenari possibili, che richiederebbe modelli più approssimativi con conseguente riduzione del dettaglio.

In prospettiva, la metodologia potrà essere consolidata attraverso la produzione di elaborati a supporto della committenza in ambito GSA, favorendo una maggiore integrazione tra analisi prestazionali e strumenti operativi di gestione dell'emergenza. Un ulteriore sviluppo riguarda la realizzazione di ambienti di addestramento interattivi, quali serious game basati sugli scenari di incendio simulati, finalizzati a migliorare l'apprendimento e la comprensione delle dinamiche emergenziali. Parallelamente, la metodologia potrà essere estesa a contesti caratterizzati da strategie di esodo più complesse, come l'esodo progressivo o la protezione sul posto, al fine di verificarne l'applicabilità anche in configurazioni organizzative e gestionali più complesse.



[Elaborati multimediali prodotti S328788](#)

8. Indice delle figure

Figura 1: Approccio prescrittivo e prestazionale.....	8
Figura 2: Localizzazione del sito di intervento – Immagine satellitare catturata da Google Earth.....	33
Figura 3: Inquadramento del progetto	34
Figura 4: Condizioni per la realizzazione di comparti multipiano secondo C.P.I.	38
Figura 5: Comparto multipiano – Piano terra.....	40
Figura 6: Comparto multipiano – Piano primo.....	40
Figura 7: Comparto multipiano – Piano secondo.....	40
Figura 8: Comparto multipiano – Piano terzo	41
Figura 9: Comparto multipiano – Sezione	41
Figura 10: Densità di affollamento per tipologia di attività – S.4-12.....	42
Figura 11: Profili e comportamenti inseriti in Pathfinder	45
Figura 12: Modalità progettuali per le soluzioni alternative	45
Figura 13: Esempio di soglie di prestazione impiegabili con il metodo di calcolo avanzato	46
Figura 14: Confronto tra ASET ed RSET – M.3-1.....	48
Figura 15: Tempi di pre-movimento indicati da norma ISO 116738.....	50
Figura 16: Ritardo inserito all'interno del software di simulazione ($t_{det} + t_{pre}$).....	51
Figura 17: Curva sperimentale utilizzata nello scenario 1	52
Figura 18: Prospetto E5 – UNI EN 1991-1-2.....	52
Figura 19: Focolari predefiniti – M.2-2.....	54
Figura 20: Reazione di combustione inserita su Pyrosim.....	54
Figura 21: Localizzazione del focolare per lo scenario 1	55
Figura 22: Collocazione delle sonde di rilevazione.....	56
Figura 23: Esempio di sonde inserite per la rilevazione dei parametri.....	56
Figura 24: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m – Piano terra	58
Figura 25: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m – Piano primo	59
Figura 26: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. 1	60
Figura 27: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura di esposizione – Sezione – Scen. 1	61
Figura 28: Curva sperimentale utilizzata nello scenario 2	66
Figura 29: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. 2	71
Figura 30: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura – Sezione – Scen. 2.....	73
Figura 31: Esempi di mancata compartimentazione realizzati tramite AI.....	76

Figura 32: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. filtro compromesso	78
Figura 33: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Piano terra – Scen. filtro compromesso	79
Figura 34: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Piano primo – Scen. filtro compromesso	80
Figura 35: Viste a confronto tra compartimentazione corretta ed errata	82
Figura 36: Sequenza di operazioni di soccorso in ambiente inquinato	83
Figura 37: Esempio di mancata compartimentazione di un archivio realizzato tramite AI	84
Figura 38: Localizzazione del focolare in archivio – Piano primo.....	85
Figura 39: Curva RHR inserita su Pyrosim.....	85
Figura 40: Curva sperimentale utilizzata per la determinazione del focolare	86
Figura 41: Curva RHR restituita dal programma di simulazione	86
Figura 42: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura – Piano primo – Scen. archivio compromesso	90
Figura 43: Sequenza temporale di screen relativi alla temperatura – Sezione – Scen. archivio compromesso.....	91
Figura 44: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità a quota 1,80 m – Scen. archivio compromesso.....	92
Figura 45: Sequenza temporale di screen relativi alla visibilità – Sezione – Scen. archivio compromesso.....	93
Figura 46: Soglia di visibilità non verificata dopo 31 secondi con occupanti intrappolati	95
Figura 47: Soglia di temperatura di esposizione non verificata dopo 70 secondi con occupanti intrappolati.....	95
Figura 48: Fotogrammi estratti dalla simulazione relativa alla mancata compartimentazione.....	96
Figura 49: Fotogrammi estratti dalle simulazioni immersive VR.....	97
Figura 50: Abilitazione dei risultati FDS	97
Figura 51: Fotogramma estratto dal video di confronto tra i due scenari.....	98
Figura 52: Grafici dinamici realizzati tramite script Python	99
Figura 53: Video formativo realizzato integrando simulazioni video con dati quantitativi.....	99
Figura 54: Posizionamento testine sprinkler piano terra	101
Figura 55: Grafici sprinkler piano terra	102
Figura 56: Testina sprinkler piano primo	102
Figura 57: Simulazione delle temperature a soffitto alla quota delle testine	102
Figura 58: Rappresentazione dell'attivazione della prima testina in ambiente virtuale	103
Figura 59: Rappresentazione del sovraffollamento ai piani terra e primo	104

Figura 60: Sequenza temporale esodo dal piano primo con sovraffollamento	106
Figura 61: Visibilità non garantita in prossimità dell'U.S. P1_02	107
Figura 62: Indisponibilità dell'U.S. dopo 215 s impostata su Pathfinder	107
Figura 63: Sequenza temporale con ritardo dovuto all'indisponibilità	108
Figura 64: Rappresentazione della coda in prossimità dell'U.S. P1_02 in condizioni di visibilità critica	109
Figura 65: Rappresentazione del tempo di coda tramite video	109
Figura 66: Rappresentazione del tempo di coda in realtà virtuale tramite visore	109
Figura 67: Formazione di code che tuttavia non influiscono su RSET	111
Figura 68: Esempio soglie di prestazione per i soccorritori	113
Figura 69: Visibilità non verificata dopo 265 s	115
Figura 70: Temperatura non verificata dopo 320 s	115
Figura 71: Procedura di intervento coordinata inserita nel P.E.E.	116
Figura 72: Visualizzazioni alternative possibili	118
Figura 73: Esempio di attrezzatura inserita all'interno del modello	119
Figura 74: Comportamenti di due addetti modellati su Pathfinder	119
Figura 75: Esempio di prompt AI per animazione video	121
Figura 76: Esempio di generazione video AI tra due fotogrammi di riferimento	121
Figura 77: Montaggio video di addestramento tramite software open source	122
Figura 78: Risposta all'allarme silenzioso	123
Figura 79: Verifica del principio di incendio	123
Figura 80: Attivazione della procedura di emergenza e allarme generale	124
Figura 81: Utilizzo dei D.P.I.	124
Figura 82: Tentativo di spegnimento con estintori	125
Figura 83: Operazione di sgancio degli impianti di servizio	125
Figura 84: Utilizzo degli idranti interni e preparazione delle manichette	126
Figura 85: Lotta all'incendio mediante idranti	126
Figura 86: Utilizzo delle scale interne da parte degli addetti	127
Figura 87: Supporto all'evacuazione degli occupanti	127
Figura 88: Assistenza all'esodo di persone con ridotte capacità motorie	128
Figura 89: Assistenza a persone con mobilità ridotta verso lo spazio calmo	128
Figura 90: Controllo del compartimento	129
Figura 91: Chiusura delle porte REI e attivazione degli smaltitori di fumo e calore	129
Figura 92: Occupanti raggiungono il punto di ritrovo esterno	130
Figura 93: Preso possesso dei documenti da consegnare ai VVF	130
Figura 94: Soccorso degli occupanti nello spazio calmo	131
Figura 95: Supporto ai VVF	131

9. Bibliografia

- [1] ISO/TR 13387 - Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio, 1999.
- [2] ISO/TR 16738 - Fire safety engineering, 2009.
- [3] A. La Malfa, G. Basile, e M. Antonelli, «FSE – Fire Safety Engineering», 2025.
- [4] D. Freda, M. Lombardi, R. Sabatino, e M. Caciolai, «Il codice di prevenzione incendi», 2018
- [5] S. Marsella e L. Nassi, «L'INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO E IL PROCESSO PRESTAZIONALE», 2010.
- [6] M. Pasquini, *Tecnica della prevenzione incendi*. 2020.
- [7] Dipartimento dei Vigili del fuoco, «Norme tecniche di prevenzione incendi», 2023.
- [8] D. Lgs. 9 aprile 2008 , n. 81.
- [9] Decreto GSA - D.M. 2 settembre 2021.
- [10] A. Bandura, «Social Learning Theory», 1971.
- [11] M. J. Burke, S. A. Sarpy, K. Smith-Crowe, S. Chan-Serafin, R. O. Salvador, e G. Islam, «Relative Effectiveness of Worker Safety and Health Training Methods», *Am. J. Public Health*, vol. 96, n. 2, pagg. 315–324, feb. 2006.
- [12] P. Wouters, C. van Nimwegen, H. van Oostendorp, e E. D. van Der Spek, «A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games», *J. Educ. Psychol.*, vol. 105, n. 2, pagg. 249–265, 2013.
- [13] A. Bernard, L. Rivest, D. Dutta, M. Yalcinkaya, e D. Arditi, «Building Information Modeling (BIM) and the Construction Management Body of Knowledge», 2013.
- [14] M. Kassem, N. Dawood, N. Iqbal, G. Kelly, e S. Lockley, «Building information modelling: protocols for collaborative design processes», 2014.
- [15] G. Amaro e M. Passalacqua, «Implementazioni BIM dello sviluppo della strategia antincendio nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione», *ingenio*, 2018.
- [16] M. Del Giudice, C. Boido, D. Dalmaso, e A. Osello, «BIM and interoperability», in *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, 2012.
- [17] G. Amaro e C. Amaro, «BIM E FIRE ENGINEERING implementazioni e caso studio», 2018.
- [18] G. G. Amaro e M. Passalacqua, «Fire Digital Check», 2021.
- [19] Dipartimento dei Vigili del Fuoco (CNVVF), «Progetto FIRE DIGITAL CHECK- Documentazione dei tavoli tecnici», 2022.
- [20] D. Oliva, B. Somerkoski, K. Tarkkanen, e A. Lehto, «Virtual Reality as a Communication Tool for Fire Safety-Experiences from the VirPa project», 2019.

- [21] K. Zhang, J. Suo, J. Chen, X. Liu, e L. Gao, «Design and implementation of fire safety education system on campus based on virtual reality technology», in *Proceedings of the 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., nov. 2017, pagg. 1297–1300.
- [22] E. Cereda e R. Vancetti, «Virtual Reality for Fire Safety Engineering», 2022.
- [23] M. Bellemans *et al.*, «Training Firefighters in Virtual Reality», in *2020 International Conference on 3D Immersion, IC3D 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., dic. 2020.
- [24] X. Long, X. Zhang, e B. Lou, «Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder», *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, vol. 40, n. 3, 2017.

