POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e ottimizzazione della sicurezza antincendio con approccio prestazionale nel caso di adeguamento di un Teatro

Relatore:

Prof. Roberto Vancetti

Candidato:

Alessandro Alacqua

Correlatore:

Ing. Filippo Cosi

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

Introduzione I

1. La Prevenzione Incendi 1

1.1. Codice di prevenzione incendi 4

1.1.1. Progettazione antincendio secondo D.M. 03 agosto 2015 – RTV 15 7

2. La Fire Safety Engineering 14

2.1. Sezione M del Codice: Metodi 20

3. L'analisi del comportamento umano durante le emergenze 24

3.1. Interazione occupanti – edificio 32

4. Caso studio 37

4.1. Metodologia progettuale 46

4.2. Modellazione di incendio 53

4.3. Modellazione di esodo 67

5. Analisi e verifiche dei risultati 78

5.1. Simulazioni di incendio - ASET 78

5.2. Simulazioni di esodo – RSET 110

5.3. Criterio ASET > RSET 128

Conclusioni 130

Bibliografia 131

Introduzione

In caso di incendio, l'incolumità delle persone, la tutela dei beni e la protezione dell'ambiente devono poter essere garantiti. Sulla base di questa premessa nasce la Prevenzione Incendi, con lo scopo di perseguire i cosiddetti obiettivi primari attraverso l'applicazione di strategie progettuali inserite all'interno del D.M. 03 agosto 2015, meglio conosciuto come Codice di Prevenzione Incendi.

Oggigiorno, grazie all'introduzione di tecnologie innovative e rivoluzionarie, si assiste sempre più spesso alla realizzazione di edifici molto complessi dal punto di vista geometrico e distributivo, oppure si tende alla riqualificazione dell'esistente, a partire dal concetto di Resilienza. Nella fase progettuale è importante che cooperino in sinergia tutte le figure chiamate ad intervenire, dagli architetti agli strutturisti e dagli impiantisti ai professionisti antincendio. Questi ultimi, nell'ottica di soddisfare le esigenze architettoniche, si trovano a dover elaborare delle soluzioni progettuali che a volte non sono conformi secondo quanto previsto dalle attuali normative prescrittive. Si assiste dunque ad un passaggio da metodi prevalentemente prescrittivi o semi-prescrittivi ad approcci prestazionali, dove è lo stesso professionista che governa la fase decisionale sulle misure antincendio da adottare con lo scopo di dimostrare il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Uno dei metodi utilizzati per dimostrare quantitativamente l'efficacia delle soluzioni è la Fire Safety Engineering (FSE) che, attraverso potenti metodi di calcolo, permette al progettista di elaborare simulazioni di incendio e di esodo, strumenti di supporto nel ricavare le migliori soluzioni, non solo dal punto di vista realizzativo, ma anche e soprattutto sotto l'aspetto economico.

I temi più complessi riguardo la progettazione antincendio sono rappresentati dalle Strategie S.4 e S.8, rispettivamente Esodo e Controllo di fumi e calore. In particolare, le soluzioni conformi legate alla seconda misura molto spesso non sono di immediata applicazione: edifici tutelati dal punto di vista storico o artistico, vincoli strutturali, distribuzione ed efficienza degli impianti di ventilazione (chiamati ad intervenire anche in caso di incendi) o soluzioni progettuali impattanti dal punto di vista architettonico, sono solo alcuni dei motivi per cui si fa ricorso all'ingegneria antincendio.

Il caso studio del presente elaborato è stato affrontato secondo le più recenti regole tecniche verticali entrate in vigore nel 2023 (RTV 15 - *Regola tecnica per le attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico*), elaborando per ciascuna delle dieci strategie presenti nel Codice delle soluzioni conformi, eccetto per la S.8 che ha richiesto lo sviluppo di una soluzione alternativa. Oltre a dimostrare l'efficacia del sistema di evacuazione e smaltimento fumi e calore, nell'ottica di soddisfare l'obiettivo della salvaguardia della vita degli occupanti e dei soccorritori, il Codice introduce il criterio ASET > RSET. È tutto basato sul calcolo dei due parametri, rispettivamente tempo disponibile per l'esodo e tempo richiesto per l'esodo: la progettazione prestazionale si traduce nel sistema di vie d'esodo, ovvero se il tempo in cui permangono condizioni ambientali non incapacitanti per gli occupanti è superiore al tempo necessario perché essi possano raggiungere un luogo sicuro, non soggetto a condizioni ambientali sfavorevoli dovute all'incendio, allora il sistema si potrà considerare efficace.

Con questa premessa è stato affrontato il caso studio riguardante un Teatro di un comune italiano su cui sono state elaborate simulazioni di incendio (per dimostrare l'efficacia delle soluzioni impiantistiche adottate e per ricavare il parametro ASET) e simulazioni di esodo (per ricavare il parametro RSET).
In merito al secondo parametro l'attenzione è stata focalizzata sugli occupanti: sebbene gli aspetti geometrici e fisici siano stati implementati all'interno dei modelli di calcolo, resta ancora molta aleatorietà riguardo gli aspetti comportamentali delle persone, che in condizioni di panico, associati a forti stati di stress e ansia, sfociano in situazioni che possono compromettere sia la propria vita che quella degli altri. Riguardo gli aspetti fisici e distribuzione geometrica degli occupanti, si è tenuto conto della presenza di tutti i possibili fruitori all'interno di un'attività di pubblico spettacolo, dall'adulto normodotato al bambino, dalla donna in gravidanza all'anziano con bastone e in ultimo al diversamente abile, nel rispetto del concetto di inclusione. Al termine delle simulazioni sono stati confrontati i due risultati per decretare il raggiungimento degli obiettivi legati alla salvaguardia degli occupanti.

Il presente elaborato è frutto del mio contributo fornito presso AiStudio, Associazione tra Professionisti con sede in Corso Francesco Ferrucci 112 - 10138 (TO). È solo una parte del lavoro che ha visto collaborare e impegnarsi diverse figure professionali. Io con il mio contributo ho supportato la progettazione prestazionale, che ovviamente non si limita a quanto verrà descritto nelle prossime pagine, ma può essere utilizzata per altri scopi, come valutare la resistenza strutturale di elementi soggetti ad un forte carico termico oppure dimostrare quantitativamente l'efficacia delle strategie adottate, anche nei casi in cui esse siano già conformi alle prescrizioni normative.

1. La Prevenzione Incendi

Per comprendere le responsabilità e le procedure che devono essere messe in pratica nell'ottica di svolgere un ruolo connesso con la "prevenzione incendi" è opportuno conoscerne il significato:
"*la prevenzione incendi è la funzione di preminente interesse pubblico diretta a conseguire, secondo criteri uniformi sul territorio nazionale, gli obiettivi di sicurezza della vita umana, di incolumità delle persone e dell'ambiente attraverso la promozione, lo studio, la predisposizione e la sperimentazione di norme, misure, provvedimenti, accorgimenti e modi di azione intesi ad evitare l'insorgenza di un incendio e degli eventi ad esso comunque connessi o a limitarne le conseguenze"*[1].
La prima definizione nasce contestualmente all'istituzione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, con il regio decreto legge del lontano 27 febbraio 1939, e necessita di molti anni prima di raggiungere una forma compiuta e definitiva, reperibile, al giorno d'oggi, all'interno del D.M. 3 agosto 2015, meglio conosciuto come Codice di Prevenzione Incendi (e successivi aggiornamenti: D.M. 12 aprile 2019. D.M. 18 ottobre 2019 e D.M. 24 novembre 2021). Questo nuovo documento nasce con l'intento di semplificare e ordinare l'ampio corpo normativo ancora vigente in Italia, unificandolo in un testo organico, sistematico, aperto alle più variegate forme del progresso tecnologico ma soprattutto aggiornato ai nuovi approcci metodologici di progettazione della sicurezza antincendio, ispirandosi agli standard internazionali, assumendo di fatto un carattere "rivoluzionario".
Dalla definizione fornita si deduce che la prevenzione incendi ha come obiettivo la sicurezza della vita umana, l'incolumità delle persone, la tutela dei beni e dell'ambiente dai rischi dell'incendio, dunque, si esplica in ogni ambito caratterizzato dall'esposizione al rischio di incendio e, in ragione della sua rilevanza interdisciplinare, anche nei settori della sicurezza nei luoghi di lavoro. In linea con questi obiettivi, la legislazione italiana impone la **valutazione del rischio incendio** per tutti gli ambienti identificati come luoghi di lavoro (D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 – *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*).
Per comprendere l'iter procedurale previsto dalla normativa italiana in merito alle valutazioni specifiche di ogni attività, si introduce una distinzione legata a questo panorama legislativo. Si parla di attività normate e non normate, soggette e non soggette: le attività normate, a differenza delle non normate, risultano assoggettate ad una normativa di tipo "verticale" che prescrive le modalità di intervento per consentire il raggiungimento del livello di sicurezza previsto dalla normativa stessa; le attività soggette o non soggette, invece, sono quelle che devono essere o meno sottoposte ai controlli di prevenzione incendi da parte del Corpo dei Vigili del Fuoco. In merito a quanto detto e secondo quanto previsto dal D.M. 12 aprile 2019, che apporta modifiche al D.M. 3 agosto 2015, si distinguono diverse casistiche. È possibile ricadere in attività soggette e normate: se sono presenti Regole Tecniche Verticali (RTV) all'interno del Codice e dei decreti prescrittivi antecedenti, il progettista può scegliere a quale normativa riferirsi (regime del doppio

[1] Ministero dell'Interno, D.M. 3 agosto 2015 - *Codice di Prevenzione Incendi*

binario); se non sono presenti RTV specifiche, si devono utilizzare i decreti antecedenti al Codice; oppure si possono presentare casi di attività soggette e non normate: il progettista in questo caso è obbligato ad utilizzare il Codice di Prevenzione Incendi; in ultimo, attività non soggette, normate e non normate: il Codice può essere applicato come linea guida con esonero dall'applicazione delle regole tradizionali, ma in ogni caso è obbligatorio eseguire la valutazione del rischio incendio.

Un importante riferimento in merito alle attività da sottoporre ai controlli si trovava nel D.M. 16 febbraio 1982 - *Elenco delle attività soggette alle visite ed ai controlli di Prevenzione Incendi* - ormai sostituito dall'attuale **D.P.R. n. 151/2011 - Allegato I**, il quale riporta le odierne 80 attività (precedentemente 97).

In passato, la realizzazione di una nuova attività o la modifica[2] della stessa, obbligava il responsabile a richiedere al Comando il parere di conformità sul progetto. All'acquisizione del parere positivo venivano avviati i lavori e una volta ultimati si raccoglieva tutta la documentazione con presentazione di DIA (dichiarazione inizio attività) e richiesta di sopralluogo. Avvenuto il sopralluogo da parte del Comando, se tutto fosse risultato conforme, questi avrebbero rilasciato il Certificato di Prevenzione Incendi (CPI) autorizzando l'esercizio dell'attività. In questo modo si verificava un grande ricorso all'avvio di nuovi procedimenti senza alcuna differenziazione, in contrasto con il principio di proporzionalità con riguardo all'entità delle modifiche, alla gravità del rischio, alla grandezza dell'attività e alla tipologia della stessa.

La nuova disciplina introdotta dal D.P.R. n. 151/2011 ha contribuito a semplificare la materia, nell'ottica di perseguire un equilibrio tra la salvaguardia delle fondamentali esigenze di sicurezza e quelle di semplificazione amministrativa nonché di ottimizzazione del lavoro dei funzionari dei Vigili del Fuoco, i quali, a partire da questo decreto, hanno potuto eseguire i controlli in tempi più brevi e concentrarli su quelle attività che veramente necessitano di un sistema di prevenzione incendi più complesso.

Con l'introduzione del decreto si è operata una sostanziale semplificazione relativamente agli adempimenti amministrativi, grazie all'introduzione di una distinzione della attività in tre Categorie (sulla base del livello di gravità del rischio incendio) e all'iter procedurale differente secondo cui vengono trattate: per le attività a basso rischio (categoria A) viene eliminato il parere di conformità sul progetto, mentre permane per le attività a medio e alto rischio (rispettivamente categorie B e C). Viene introdotto l'utilizzo della SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività) e il CPI non è più un provvedimento finale di un procedimento amministrativo, ma assume la valenza di "Attestato del Rispetto delle prescrizioni previste dalla normativa di prevenzione incendi e della sussistenza dei requisiti di sicurezza antincendio", rilasciato dal Comando a seguito dei controlli con sopralluogo obbligatorio solo per la categoria C, diversamente dalle prime due dove i controlli avvengono a campione e per le quali viene rilasciata copia del verbale della visita tecnica.

[2] Il D.P.R. 12 gennaio 1998, n. 37 inerente al vecchio regolamento sulla disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi, prevedeva all'art. 5, comma 3, che "*ogni modifica delle strutture o degli impianti ovvero delle condizioni di esercizio dell'attività, che comportano una alterazione delle preesistenti condizioni di sicurezza antincendio, obbliga il responsabile ad avviare nuovamente le procedure previste dagli articoli 2 e 3 del presente regolamento*".

Dopo aver contribuito a semplificare la materia riguardo i procedimenti amministrativi con l'entrata in vigore del D.P.R. n. 151/2011, si è voluto rivoluzionare anche l'aspetto delle norme tecniche di prevenzione incendi, con la volontà di accorparle in un unico testo. Nasce così il **D.M. 3 agosto 2015** *–Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi* - che attualmente fornisce il necessario appoggio normativo ai professionisti che operano a livello nazionale nel settore antincendio.

1.1. Codice di prevenzione incendi

L'esigenza di dare ai progettisti un unico strumento attraverso il quale applicare i metodi di prevenzione incendi ha portato alla nascita del D.M. 3 agosto 2015. Il concetto per l'elaborazione del documento è stato quello di disporre di un testo modulare e sempre aggiornato nel tempo in funzione dell'evoluzione delle tecnologie adottate nel settore. Da qui nasce l'idea del Codice come "testo unico" all'interno del quale sono riportate metodologie di progettazione della sicurezza antincendio finalizzate al raggiungimento dei cosiddetti *obiettivi primari* della prevenzione incendi. Le soluzioni progettuali previste dalle metodologie di progettazione della sicurezza antincendio allineano il panorama normativo italiano ai principi di prevenzione incendi internazionalmente riconosciuti.
Il Codice si articola in quattro sezioni che disciplinano, nel loro complesso, l'intera materia antincendio:

- Generalità (G): "*contiene i principi fondamentali per la progettazione della sicurezza antincendio applicabili indistintamente a tutte le attività";*
- Strategia antincendio (S): "*contiene le misure antincendio di prevenzione, protezione e gestionali applicabili a tutte le attività, per comporre la strategia antincendio al fine di mitigare il rischio di incendio";*
- Regole tecniche verticali (V): "*contiene le RTV, che completano, integrano o sostituiscono le misure della precedente sezione S per specifiche applicazioni tecniche o determinate tipologie di attività";*
- Metodi (M): "*contiene la descrizione di metodologie progettuali quantitative per la progettazione di misure antincendio, calibrate sulle particolari problematiche tecniche affrontate nella determinata attività"*[3].

La metodologia generale riportata all'interno del Codice è ben strutturata e costituita da diverse fasi: dopo aver descritto l'attività e il suo funzionamento, con il fine di chiarire lo scopo della progettazione, si procede con l'intenzione di raggiungere gli obiettivi di sicurezza effettuando preliminarmente una valutazione del rischio di incendio mediante i tre profili di rischio (R_{vita}, R_{beni}, $R_{ambiente}$), singolarmente connessi ai tre obiettivi della sicurezza antincendio, rispettivamente salvaguardia della vita umana, salvaguardia dei beni artistici e strategici e tutela dell'ambiente. Si prosegue dunque alla mitigazione del rischio valutato tramite misure preventive, protettive e gestionali che rimuovano i pericoli, riducano i rischi o proteggano dalle loro conseguenze. Tali misure sono riportate all'interno della sezione S, la quale si compone di dieci strategie e per ognuna di esse sono specificati i criteri per l'attribuzione dei livelli di prestazione (I, II, III, ...) e la conseguente individuazione delle soluzioni progettuali. L'applicazione di una delle soluzioni progettuali

[3] Ministero dell'Interno, D.M. 3 agosto 2015. Codice di Prevenzione Incendi

garantisce il raggiungimento del livello di prestazione richiesto. Le soluzioni progettuali riportate all'interno del Codice si distinguono in tre tipologie:

- soluzioni conformi
- soluzioni alternative
- soluzioni in deroga.

Se il progettista fa ricorso alle soluzioni conformi significa che è riuscito a dimostrare il raggiungimento del livello di prestazione richiesto e non è tenuto a fornire ulteriori valutazioni tecniche poiché sono di immediata applicazione e non sono oggetto di discussione. Se il progettista ricorre alle soluzioni alternative significa che non è riuscito a dimostrare il raggiungimento del livello di prestazione richiesto con le soluzioni conformi, per cui è chiamato ad usare un approccio alternativo, dimostrando l'efficacia delle soluzioni alternative proposte impiegando uno dei metodi progettuali previsti: utilizzo di normative o documenti tecnici di organismi europei o internazionali, applicazione di prodotti o di tecnologie innovative oppure i metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio seguendo le procedure contenute nella sezione M del Codice. Infine, le soluzioni in deroga si applicano qualora non possano essere efficacemente applicate né le soluzioni conformi né quelle alternative. In questo caso il progettista dovrà avvalersi di un'analisi secondo un giudizio esperto coadiuvata dai medesimi metodi di progettazione delle soluzioni alternative.

Alla luce delle indicazioni fornite, le sezioni G, S e V possono essere utilizzate per affrontare la progettazione con un *approccio semi-prescrittivo*: il progettista esegue la valutazione del rischio ed individua le soluzioni conformi tra quelle proposte nel Codice.

Ci si distacca da tale approccio nel momento in cui ci si trova a dover affrontare problematiche particolari, dettate, per esempio, da attività caratterizzate da geometrie complesse. La necessità di raggiungere soluzioni alternative atte al soddisfacimento dei livelli di prestazione della corrispondente soluzione conforme induce il progettista ad affrontare la progettazione mediante l'*approccio prestazionale*: in questo caso si vanno a definire delle prestazioni che la struttura deve essere in grado di raggiungere. Il metodo suggerisce di fissare lo scopo del progetto e gli obiettivi da perseguire, dopodiché si effettua la verifica sulla rispondenza dei requisiti stabiliti. La valutazione del livello di sicurezza è di tipo quantitativo; infatti, si quantificano gli effetti causati dall'incendio e poi viene valutato il livello di sicurezza rispetto a delle soglie di prestazione prefissate: le soglie riguardano parametri caratteristici quali, per esempio, il grado di visibilità e la temperatura. L'impostazione di tale approccio è riportata nella sezione M del Codice: è un metodo sicuramente più flessibile ma al contempo più complesso, sia nelle metodologie che negli strumenti poiché il progettista deve fare uso di opportuni modelli di calcolo in grado di prevedere gli effetti di un determinato evento e delle rispettive misure adottate.

Ciò si traduce nell'applicazione della Fire Safety Engineering, che sempre più si sta dimostrando uno strumento imprescindibile per la progettazione della sicurezza antincendio, non solo per lo studio delle soluzioni alternative e in deroga, ma anche per dimostrare quantitativamente l'efficacia delle strategie

adottate, anche nei casi in cui esse siano già conformi alle prescrizioni normative adottate dal progettista o, ancora, per scegliere la soluzione migliore tra diverse configurazioni possibili.

Prima di illustrare i concetti e le potenzialità della FSE, applicati anche ad un caso studio, si introducono aspetti tecnici e di dettaglio riguardanti la nuova Regola Tecnica Verticale (RTV 15), introdotta all'interno del Codice di Prevenzione Incendi nell'anno corrente.

1.1.1. Progettazione antincendio secondo D.M. 03 agosto 2015 – RTV 15

Con il D.M. 20 novembre 2022 pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del 02 dicembre 2022, è stata emanata la nuova regola tecnica verticale per i locali di pubblico spettacolo. Tale regola, come tutte quelle pubblicate nel Codice di Prevenzione Incendi dopo il 03 agosto 2015, si inserisce nel nutrito elenco delle regole tecniche verticali. La V.15, identificata come *"Regola tecnica per le attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico"* rappresenta un'innovazione per le attività di interesse in quanto rende le misure di sicurezza più attuali e flessibili nei confronti dei progettisti e gestori delle attività, permettendo, per esempio, una totale possibilità di comunicazione tra le varie tipologie di attività di spettacolo e trattenimento.

In occasione del 40° anniversario dell'incendio del Cinema Statuto di Torino, il Comando Provinciale del capoluogo piemontese ha organizzato il *Convegno sulla sicurezza antincendio nei locali di pubblico spettacolo*, rivolto a professionisti e operatori del settore, a cui io stesso ho preso parte. L'obiettivo dell'evento è stato quello di illustrare e approfondire concetti innovativi legati alla nuova RTV 15, oltre a ribadire l'importanza e l'efficacia che ha acquisito negli anni la Prevenzione Incendi, in virtù di studi, ricerche e applicazioni che hanno evitato il ripresentarsi di tragedie simili a quella accaduta nel 1983.

Prima di entrare nel merito della nuova regola tecnica, bisogna evidenziare gli aspetti che creano i maggiori dubbi interpretativi e applicativi nei progettisti, negli organizzatori, nei componenti delle Commissioni di Vigilanza per i Locali di Pubblico Spettacolo e negli uffici delle Amministrazioni Locali (deputati al rilascio delle autorizzazioni o della ricezione della SCIA), in particolare per le manifestazioni temporanee. Dopo le circolari emanate a seguito degli incidenti accaduti in Piazza San Carlo a Torino nel 2017, si sono sovrapposti ulteriori indicazioni che hanno contribuito ad incrementare le incertezze. Un'applicazione delle stesse in modo indiscriminato, a volte poco razionale, ha creato incombenze e costi aggiuntivi senza migliorare il livello di sicurezza durante le manifestazioni. Molto spesso ci si focalizza su aspetti numerici e tipologici, come il livello di rischio collegato alla manifestazione o il numero degli addetti alla sicurezza, piuttosto che approfondire qualitativamente i vari fattori che contribuiscono alla corretta gestione dell'evento. Bisognerebbe invece concentrarsi su aspetti che davvero necessitano di approfondimenti e valutazioni concrete, come la tipologia e il livello di formazione e informazione specifica degli addetti, l'efficacia del livello organizzativo, l'appropriatezza dei piani di gestione della sicurezza e la specificità dei piani di emergenza per l'evento in questione (ogni piano deve essere calibrato sul particolare contesto in funzione del rischio e delle criticità che si possono presentare).

L'incertezza molto spesso è rappresentata dal considerare o meno l'attività come **pubblico spettacolo**, legata all'individuazione dell'evento e all'ambiente in cui si svolge la manifestazione. Nel tempo si sono presentati molti quesiti al riguardo e le risposte non hanno dato i caratteri della certezza auspicati da molti. "*Purtroppo, la molteplicità della tipologia di eventi e di ambientazioni non sempre consentono una chiara identificazione, lasciando quei confini di indeterminatezza che solo a livello locale, con l'analisi ragionata*

della situazione, possono trovare adeguata risposta"[4]. Per trovare una possibile risposta è necessario far riferimento al Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza (T.U.L.P.S.) il quale regolamenta una serie di attività e autorizzazioni svolgibili e ottenibili da parte dei privati. Tale testo risale all'inizio del XX secolo, quando le leggi sulla pubblica sicurezza vennero raccolte nella forma del testo unico con il R.D. 6 novembre 1926 n. 1848, poi approvato con regio decreto 18 giugno 1931 n. 773. Con il testo lo Stato ha cercato di effettuare un riordino normativo disciplinando una serie di attività effettuabili dai privati e le relative autorizzazioni necessarie, nel tentativo di consolidare le attività di polizia e controllo del regime. Ovviamente, dopo la nascita della Repubblica Italiana, l'atto normativo è rimasto vigente, sebbene abbia subito numerose modifiche e mutilato di molti articoli per ripetuti interventi della Corte costituzionale e del Legislatore, al fine di garantirne compatibilità con il nuovo ordinamento repubblicano.

Gli articoli in vigore ancora oggi sono il 68 e 69, secondo i quali è necessario ottenere la licenza dell'Autorità di pubblica sicurezza, e l'articolo 80 che prescrive che il "locale" deve essere controllato da una commissione tecnica per verificare la sicurezza e solidità dell'edificio. Da una parte vi è quindi il potere di controllare (autorizzare o negare), con i primi articoli che si riferiscono all'aspetto soggettivo dello spettacolo o trattenimento e all'obbligo per l'organizzatore di ottenere la licenza, dall'altra il dovere di garantire la sicurezza del pubblico, per cui vi è un riferimento oggettivo all'edificio, applicabile solo quando si concretizza l'ambiente fisico, ovvero dove si possono verificare le condizioni di sicurezza e stabilità delle strutture, e la presenza e idoneità delle uscite di emergenza. Appare chiaro che quando l'evento si svolge in un ambito completamente aperto, privo di strutture per il pubblico e senza delimitazioni, quindi senza uscite finali, misurabili e verificabili, manca l'oggetto della verifica e pertanto il contesto non rientra nelle prescrizioni dell'articolo 80.

Sulla base degli elementi sopra esposti si può concludere che per pubblico spettacolo si definiscono locali o spazi in genere, attrezzati ed organizzati, in cui si svolge un'attività (permanente o temporanea) con presenza di pubblico che assiste (spettacolo) o partecipa direttamente (trattenimento), in possesso di alcune caratteristiche peculiari: *regime autorizzativo* previsto negli articoli 68, 69 e 80; *caratteristiche architettoniche degli spazi*, quindi l'individuazione della zona in cui si svolge uno spettacolo e/o trattenimento, e della zona per il pubblico e strutture, impianti e/o apparecchiature di cui sia possibile verificare il grado di rispondenza alle misure tecniche di sicurezza; *caratteristiche organizzative* con cui si svolge l'iniziativa, in cui sono previsti il pagamento del biglietto d'ingresso, la pubblicità, le caratteristiche imprenditoriali e il rilevante numero di persone coinvolte; *caratteristiche temporali* in cui si svolge l'attività: locali fissi, locali ad utilizzo polifunzionale, manifestazioni temporanee. A titolo esemplificativo si indica di seguito un elenco di alcuni luoghi che rientrano o meno nelle attività di pubblico spettacolo:

[4] Muneretto P. – *Nuove prospettive per le attività di pubblico spettacolo*

Attività considerabili come pubblico spettacolo

- Locali/luoghi definiti dall'art. 1 comma 1 del D.M. 19 agosto 1996:
    - teatri;
    - cinematografi;
    - cinema-teatri;
    - auditorium e sale convegno;
    - sale da ballo e discoteche;
    - circhi;
    - luoghi destinati a spettacoli viaggianti;
    - luoghi all'aperto, ovvero ubicati in delimitati spazi attrezzati con impianti appositamente destinati a spettacolo e con strutture apposite per lo stazionamento del pubblico;
- Impianti sportivi in genere dotati di attrezzature per lo stazionamento di spettatori;
- Piscine, pubbliche o private, anche prive di strutture per il pubblico, a condizione che sia possibile l'accesso libero a qualsiasi persona con o senza pagamento del biglietto;
- Locali destinati a riprese cinematografiche e/o televisive con presenza di pubblico.

Attività non considerabili come pubblico spettacolo

- Locali/luoghi definiti dall'art. 1 comma 1 del D.M. 19 agosto 1996:
    - luoghi all'aperto, quali piazze e aree urbane prive di strutture specificatamente destinate allo stazionamento e/o contenimento del pubblico (recinzioni, transenne, panche, ecc.) per assistere a spettacoli e manifestazioni varie occasionali;
    - i pubblici esercizi dove sono impiegati strumenti musicali in assenza dell'aspetto danzante e di spettacolo;
    - i pubblici esercizi dove sono installati apparecchi di divertimento, automatici e non, in cui gli avventori sostano senza assistere a manifestazioni di spettacolo (sale giochi);
- Manifestazioni fieristiche, sagre, gallerie, mostre, esposizioni all'aperto o al chiuso, attività finalizzate alla raccolta di fondi per beneficienza nel cui ambito non siano previste manifestazioni di trattenimento o spettacolo;
- Impianti sportivi, palestra, scuole di danza o simili privi di strutture per lo stazionamento del pubblico.

Entrando adesso nel merito del quadro tecnico normativo, si descrivono le novità che introduce la nuova norma rispetto alla precedente, ovvero il D.M. 19 agosto 1996 (che ha costituito la precedente norma tecnica di prevenzione incendi specifica per i locali di pubblico spettacolo), analizzando dapprima l'articolato D.M. 22 novembre 2022 e successivamente i vari paragrafi della regola tecnica verticale 15.
L'articolo 1 specifica che si tratta di "norme tecniche di prevenzione incendi per le attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico" e approva le norme dell'allegato 1 (capitolo V.15 del Codice di Prevenzione Incendi). Tale regola, pertanto, non si applica agli eventi e locali a carattere privato.

Art. 1

Norme tecniche di prevenzione incendi per le attivita'
di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico

1. Sono approvate le norme tecniche di prevenzione incendi per le attivita' di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico di cui all'allegato 1, che costituisce parte integrante del presente decreto.

Figura 1. Art. 1 D.M. 22 novembre 2022
(Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana)

Nell'articolo 2 si trova il "campo di applicazione", che è individuato nelle attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico, svolte al chiuso o all'aperto, rientranti al punto 65 dell'Allegato I del D.P.R. n. 151 del 2011, e in quelle temporanee, che sono però escluse dai procedimenti del D.P.R. n. 151 del 2011.

Art. 2

Campo di applicazione

1. Le norme tecniche di cui all'art. 1 si possono applicare alle attivita' di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico, svolte al chiuso o all'aperto, di cui all'allegato I del decreto del Presidente della Repubblica 1° agosto 2011, n. 151, ivi individuate con il numero 65, esistenti alla data di entrata in vigore del presente decreto ovvero a quelle di nuova realizzazione.
2. Le norme tecniche di cui all'art. 1 si possono applicare alle attivita' di cui al comma 1 in alternativa alle specifiche norme tecniche di prevenzione incendi di cui al decreto del Ministro dell'interno 19 agosto 1996.
3. Le norme tecniche di cui all'art. 1 si possono applicare anche alle attivita' di cui al comma 1 a carattere temporaneo.

Figura 2. Art. 2 D.M. 22 novembre 2022

Particolare attenzione va posta al comma 2 del presente articolo, secondo cui la V.15 può essere applicata in alternativa al D.M. 19 agosto 1996, realizzando il cosiddetto **doppio binario**.

Con l'articolo 3 vengono apportate modifiche all'articolato del D.M. 03 agosto 2015, inserendo, tra le attività rientranti nel campo di applicazione dello stesso, la numero 65, con la dicitura "limitatamente ai locali di spettacolo e trattenimento". Vengono quindi esclusi, per esempio, gli impianti sportivi che, come descritto precedentemente, sono attività considerabili come pubblico spettacolo se hanno spazi o strutture per gli spettatori.

Art. 3

Modifiche al decreto del Ministro dell'interno
3 agosto 2015

1. All'art. 2, comma 1, del decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, dopo il numero «64;» e' aggiunto il seguente: «65, limitatamente ai locali di spettacolo e di trattenimento;».

2. All'art. 2-bis, comma 1 del decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, prima della lettera a) e' aggiunta la seguente «0a) 65, limitatamente ai locali di spettacolo e di trattenimento;».

3. All'art. 5, comma 1-bis del decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, dopo la lettera aa), e' aggiunta la seguente: «bb) decreto del Ministro dell'interno 19 agosto 1996, recante "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo"».

4. All'allegato 1 del decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, nella sezione V «Regole tecniche verticali», e' aggiunto il seguente capitolo «V.15 - Attivita' di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico», contenente le norme tecniche di prevenzione incendi per le attivita' di cui all'art. 1.

Figura 3. Art. 3 D.M. 22 novembre 2022

Attività 65

65	1	B	Locali di spettacolo e di trattenimento in genere, impianti e centri sportivi, palestre, sia a carattere pubblico che privato, con capienza superiore a 100 persone, ovvero di superficie lorda in pianta al chiuso superiore a 200 m^2. Sono escluse le manifestazioni temporanee, di qualsiasi genere, che si effettuano in locali o luoghi aperti al pubblico.	Fino a 200 persone
	2	C	Locali di spettacolo e di trattenimento in genere, impianti e centri sportivi, palestre, sia a carattere pubblico che privato, con capienza superiore a 100 persone, ovvero di superficie lorda in pianta al chiuso superiore a 200 m^2. Sono escluse le manifestazioni temporanee, di qualsiasi genere, che si effettuano in locali o luoghi aperti al pubblico.	Oltre 200 persone

Figura 4. Attività 65 D.P.R. n. 151 del 2011

(Elenco delle attività soggette ai controlli del Corpo dei Vigili del Fuoco)

All'interno delle attività 65 soggette ai controlli di prevenzione incendi, rientrano i locali sia a carattere pubblico che privato: per quelli a carattere pubblico si può applicare alternativamente la RTV 15 o il D.M. 19 agosto 1996. Per i locali di pubblico spettacolo e trattenimento sottosoglia di assoggettabilità, risulta cogente il Decreto Ministeriale del 1996, ma è comunque possibile applicare la nuova regola tecnica, con esonero dell'applicazione della normativa tradizionale.

Passando alla RTV 15 si trova come primo paragrafo il campo di applicazione, dove vengono confermate le disposizioni di prevenzione incendi riguardanti le attività di intrattenimento e di spettacolo in genere, a carattere pubblico, effettuate al chiuso o all'aperto, anche a carattere temporaneo. Sono esclusi sia i luoghi non delimitati che gli esercizi pubblici dove sono impiegati strumenti o apparecchi musicali, in assenza di attività danzanti o di spazi ed allestimenti specifici per gli spettatori. Sono escluse anche le attrazioni di spettacolo viaggiante. Nel secondo paragrafo, al comma 1, si trova la definizione di attività di intrattenimento e di spettacolo: attività destinate a intrattenimenti e attrazioni a carattere pubblico soggette alla disciplina del regio decreto 18 giugno 1931 n. 773 (T.U.L.P.S.), riportando nella nota esplicativa anche locali che, secondo precedenti chiarimenti del Dipartimento di Pubblica Sicurezza e del Dipartimento dei VVF, sono da considerarsi esercizi pubblici e non locali di pubblico spettacolo, come le sale bingo, le sale giochi e le agenzie di scommesse. Si ricorda che queste attività erano escluse dal campo di applicazione del D.M. 19 agosto 1996. Una novità importante riguarda i **complessi multisala**, definiti come quelle attività comprendenti ambiti di intrattenimento e di spettacolo con attività diverse che ora possono comunicare tra loro con minori vincoli rispetto al passato: ad esempio, una sala conferenze inserita in una biblioteca o con essa comunicante. Analizzando il paragrafo dedicato alle classificazioni si nota che le attività OA sono quelle fino a 200 occupanti; quindi, la norma è stata pensata anche per le attività di livello minore e che il numero di persone utilizzato è quello degli occupanti, intesi come persone ad ogni titolo (pubblico, artisti, addetti, ecc.). Sulla classificazione delle aree è da notare la differenza tra TA1, non aperte al pubblico ma frequentabili da persone che possono non conoscere l'attività, come gli artisti esterni, e la TA3, utilizzate solo da personale che conosce l'ambiente. Ci sono inoltre le aree TO1 che sono in ambito chiuso ed accessibili al pubblico e le TO2 che sono gli ambiti accessibili al pubblico e all'aperto, così come definite al capitolo G.1, comprensivi delle relative vie di esodo. Un importante aspetto è costituito dalla possibilità di classificare diversamente le diverse sale dell'attività qualora siano funzionalmente indipendenti tra loro, compartimentate e abbiano vie di esodo indipendenti, permettendo quindi una migliore graduazione delle misure tecniche in funzione del proprio livello di rischio. La valutazione del livello di rischio di incendio è esplicitata al paragrafo V.15.4 secondo cui la progettazione della sicurezza antincendio deve essere effettuata applicando la metodologia di cui al capitolo G.2, quindi con la valutazione del rischio obbligatoriamente da effettuare.

In ultimo, la RTV 15, così come per le altre regole tecniche verticali, riporta al quinto paragrafo la strategia progettuale da seguire, ricordando che le misure della RTV sono complementari o sostitutive di quelle della RTO, ma l'applicazione deve essere sempre effettuata tenendo in considerazione entrambe le regole: la RTV non può essere applicata senza RTO.

Analizzando a cascata le misure tecniche, si parte dalla reazione al fuoco dove si trova una riproposizione delle classi previste dal D.M. 19 agosto 1996, anche se le indicazioni per i prodotti da costruzione sono aggiornate al sistema di classificazione europeo. Facendo riferimento ai gruppi di classificazione del Codice, le sedute fisse non imbottite vengono richieste di classe 1 di reazione al fuoco, mentre per i materiali di scena diversi dalle quinte (velari e tendaggi) non è richiesta la classificazione. Si procede con la classe minima di resistenza al fuoco in funzione della quota dei piani. È ovvio che, se dalla RTO dovesse emergere una richiesta di prestazioni maggiori, si dovrà fare riferimento alla soluzione più conservativa. Per le compartimentazioni, separazione e comunicazioni con altre attività, la RTV offre soluzioni e possibilità per soddisfare le esigenze più moderne di realizzazioni di contenitori multifunzione o ambienti in cui insistono diverse attività. Per l'esodo, la regola tecnica reca solo alcune restrizioni per le aree al chiuso e/o all'aperto accessibili al pubblico secondo cui, per esempio, il sistema d'esodo non può prevedere tornelli. È riportata una novità importante riguardo l'ammissione di soluzioni alternative o in deroga al calcolo dell'affollamento effettuato secondo le densità e i criteri del capitolo S.4. Questa possibilità deve essere supportata da studi, valutazioni e modellazioni di tipo ingegneristico. Al quinto paragrafo emerge la gestione della sicurezza antincendio: la GSA in esercizio deve prevedere la verifica delle condizioni di sicurezza prima dell'apertura al pubblico dell'attività e la successiva sorveglianza durante l'esercizio, con particolare riguardo ai locali e alle vie d'esodo, ai sistemi di protezione attiva ed agli impianti rilevanti ai fini della sicurezza antincendio. Al paragrafo V.15.5.6 vengono riportati i livelli di prestazioni per il controllo dell'incendio dove si nota che man mano che il livello di complessità dell'attività aumenta (in relazione al numero di occupanti e alla quota dei piani accessibili al pubblico), si devono predisporre presidi antincendio proporzionati al grado di complessità. Per esempio, per attività semplici è sufficiente predisporre solo gli estintori. Passando alla rivelazione ed allarme, come nel caso delle altre RTV, anche in questo caso è più frequente la richiesta di un sistema IRAI (impianto di rivelazione e segnalazione allarme incendio). Per la strategia S.8 controllo di fumi e calore, si conferma l'importante impostazione, ormai consolidata nel campo della prevenzione antincendio, di prevedere aperture e sistemi che possano favorire lo smaltimento/evacuazione del fumo e del calore, al fine di facilitare le operazione delle squadre di soccorso, ma soprattutto permettere la salvaguardia degli occupanti e la protezione dei beni, se richiesta.

Si anticipa che l'oggetto del presente elaborato si configura come un complesso multisala e, per la complessità dal punto di vista della prevenzione incendi, la scelta è ricaduta sulla nuova RTV 15, in alternativa alla norma di tipo prescrittivo del D.M. 19 agosto 1996, facendo anche uso di apposite soluzioni alternative attraverso l'utilizzo della **Fire Safety Engineering**.

2. La Fire Safety Engineering

L'attuale quadro normativo italiano riguardante la valutazione della sicurezza antincendio trova un importante strumento di approfondimento in una disciplina che si è affermata in Italia negli ultimi decenni: "Ingegneria della sicurezza antincendio" o "Fire Safety Engineering" (spesso indicata con l'acronimo FSE).

Dal punto di vista storico la letteratura internazionale fa risalire al 1999 la prima definizione di FSE, riportata all'interno del rapporto tecnico ISO/TR 13387: *"applicazione di principi ingegneristici, di regole e di giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzati alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell'ambiente, alla quantificazione dei rischi di incendio e dei relativi effetti ed alla valutazione analitica delle misure antincendio ottimali, necessarie a limitare entro livelli prestabiliti le conseguenze dell'incendio"*[5].

In Italia si inizia a parlare di Fire Safety Engineering con l'art. 1 del D.M. 9 maggio 2007 – *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*. Il presente decreto definiva gli aspetti procedurali e i criteri da adottare per valutare il livello di rischio e progettare le conseguenti misure compensative, utilizzando l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, al fine di soddisfare gli obiettivi della prevenzione incendi. Purtroppo, non conteneva alcuna indicazione riguardo al numero di scenari di incendio da prevedere e tra i quali scegliere come più gravosi, nessuna informazione sui valori numerici dei livelli di prestazione ed infine non forniva alcuna indicazione riguardo la progettazione dell'esodo. Per colmare queste lacune il documento rimandava alla consultazione della letteratura tecnica internazionale, tra cui la ISO/TR 13387 e la British Standard 7974. Tutto questo comportò inevitabilmente uno scarso utilizzo da parte dei progettisti, i quali, ancora poco esperti, si trovavano ad affrontare delle grosse problematiche dettate dal fatto che la direttiva era molto laboriosa.

La svolta è avvenuta grazie all'entrata in vigore del Codice di prevenzione incendi, il quale ne riprende i concetti del D.M. del 2007 e della normativa tecnica internazionale nell'ambito della definizione di soluzioni alternative. Il progettista per raggiungere gli obiettivi progettuali deve definire soluzioni idonee mediante analisi di tipo **quantitativo**: prospettati scenari di incendio di progetto, gli effetti dell'incendio vengono quantificati e il livello di sicurezza antincendio valutato rispetto a prefissate soglie di prestazione (temperatura, visibilità, altezza dello strato libero da fumi, ecc.). Questo è il "principio" che sta alla base dell'approccio *performance based*, ovvero un percorso progettuale basato sulle prestazioni dell'edificio. Tale approccio mostra potenzialità in tutti quei sistemi complessi (edifici storici o innovativi dal punto di vista geometrico-tecnologico nei quali possono essere insediate diverse attività e diverse tipologie di occupanti) per i quali un approccio tradizionale rigido risulterebbe non applicabile.

[5] ISO/TR 13387-1:1999 FSE – *Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives*

Introdotti i concetti fondamentali alla base del principio ingegneristico è possibile descrivere le applicazioni svolte mediante la Fire Safety Engineering.

Applicazioni: Life Safety e Structural Safety

I metodi della Fire Safety Engineering possono essere rivolti alla Life Safety, ovvero alla salvaguardia della vita umana, o alla Structural Safety che riguarda invece l'analisi dell'incendio dopo la fase di flashover e lo studio del livello di sicurezza delle strutture. Il passaggio da uno studio all'altro è caratterizzato dal raggiungimento o meno del cosiddetto "flashover".
Introducendo il *fenomeno incendio* si possono distinguere quattro fasi ben identificate in funzione della temperatura nella zona interessata e del trascorrere del tempo (figura 1):

- ignizione: inizia il processo di combustione;
- propagazione: crescita dell'incendio, associata ad un rapido aumento della temperatura ambientale;
- incendio pienamente sviluppato (flashover): tutto il materiale combustibile presente nel locale investito dall'incendio prende fuoco contemporaneamente;
- decadimento (estinzione): progressivo esaurimento del combustibile.

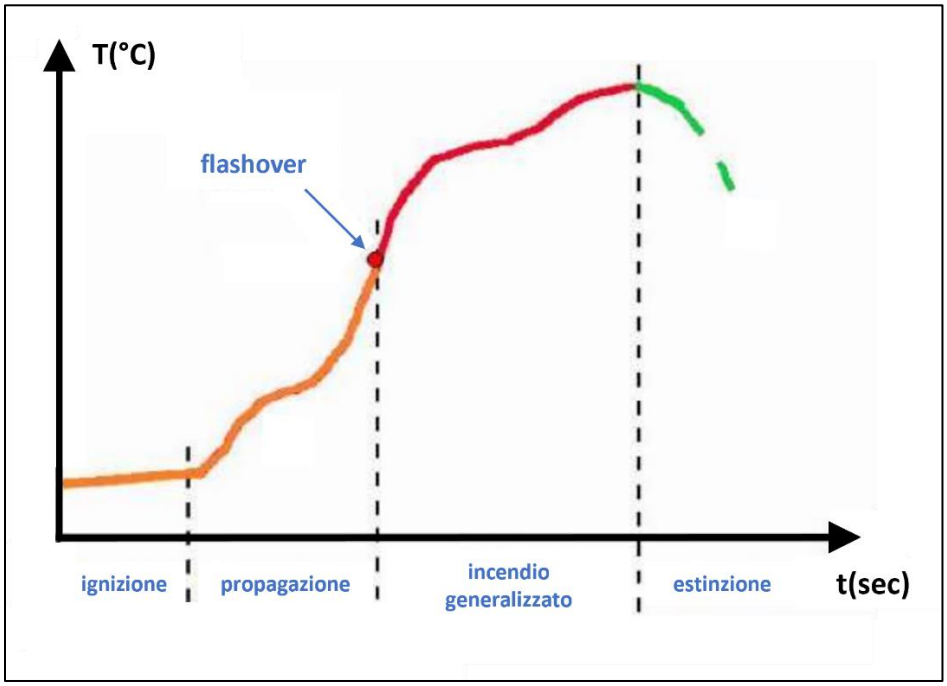


Figura 5. Schematizzazione qualitativa curva di incendio naturale
(materiale didattico del corso di Prevenzione per la sicurezza antincendio, Vancetti R., a.a. 2021)

La curva temperatura – tempo (o di incendio) rappresenta l'andamento, in funzione del tempo, della temperatura dei gas di combustione della superficie degli elementi strutturali. La normativa europea ammette curve di incendio temperatura – tempo di tipo nominale: per gli elementi strutturali, la verifica di

resistenza al fuoco viene eseguita controllando che la resistenza meccanica venga mantenuta per il tempo corrispondente alla classe di resistenza al fuoco della struttura con riferimento alla curva nominale di incendio. Essa rappresenta essenzialmente la fase post-flashover.

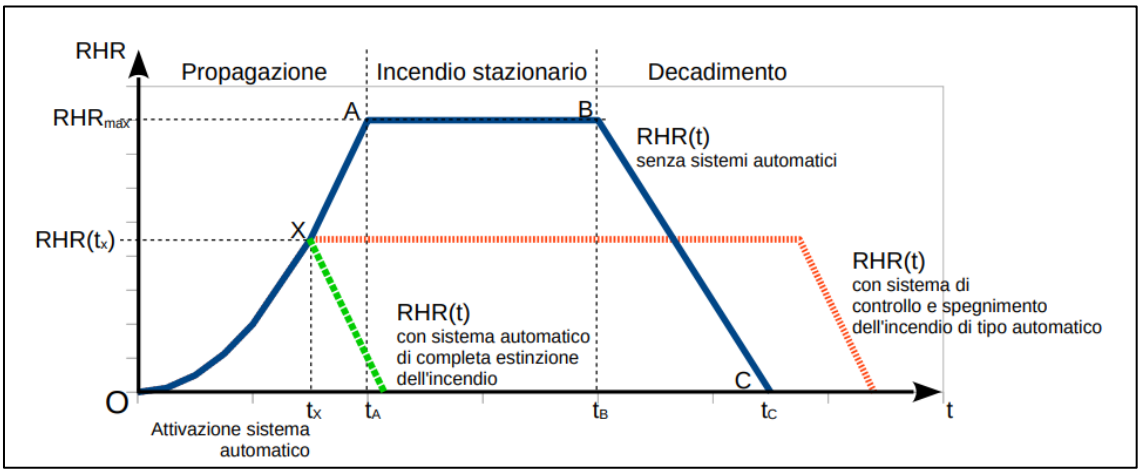


Figura 6. Schematizzazione qualitativa curva potenza – tempo
(Codice di Prevenzione Incendi)

La curva potenza – tempo o RHR – Rate of Heat Release fornisce invece una schematizzazione matematica sufficientemente semplice dell'incendio naturale: è una funzione che esprime l'andamento temporale della potenza termica rilasciata dall'incendio. Tramite il grafico in figura 2 si possono distinguere le diverse condizioni fisiche prevedibili: si ha una crescita di tipo quadratico nella fase di *propagazione* con un andamento che va dal momento dell'innesco fino al punto di massima potenza (A), in corrispondenza del quale si raggiunge il flashover. Superato questo punto l'incendio si mantiene costante nel tempo in quella che è la fase di *incendio stazionario*: la potenza sprigionata dall'incendio non cresce più allo scorrere del tempo (B). Infine, vi è un *decadimento* lineare dovuto ad un progressivo esaurimento del combustibile e/o del comburente presente nel locale investito dal fenomeno incendio (C).
Se sono installati dei sistemi di **protezione attiva**: "*insieme delle misure atte a ridurre le conseguenze di un incendio, che richiedono l'azione dell'uomo o l'attivazione di un impianto*", è possibile ridurre gli effetti dell'incendio. Raggiunto il punto (X), si può ottenere una completa estinzione dell'incendio senza che si propaghi nel tempo mediante l'ausilio di un sistema automatico; utilizzando invece un sistema di controllo e successivamente di spegnimento, si tende a non farlo progredire finché non si esaurisce completamente il materiale combustibile presente in ambiente.
La definizione delle curve temperatura - tempo e potenza - tempo è fondamentale nell'approccio ingegneristico perché permette di quantificare gli effetti dell'incendio, sia per tutelare la vita umana che per monitorare lo stato delle strutture. In particolare, la curva RHR rappresenta la "carte di identità" dell'incendio ed è il parametro di input principale per i software di simulazione degli incendi.

Le simulazioni di incendio, così come quelle di esodo, rappresentano gli strumenti che più si prestano nell'ottica della progettazione antincendio mediante un approccio prestazionale e il professionista, al fine di poterle elaborare, può optare tra diversi modelli di calcolo in base ai risultati che intende ottenere.

Modelli e Codici di calcolo

L'elaborazione delle **simulazioni di incendio** richiede particolare competenza e conoscenza di fondamenti teorici e di dinamica dell'incendio. Gioca un ruolo fondamentale anche l'esperienza del professionista antincendio perché, una volta fissati gli obiettivi da perseguire, può scegliere tra i *modelli di calcolo* ad oggi più frequentemente utilizzati:

- modelli analitici che garantiscono stime accurate degli effetti dell'incendio (es. tempo di flashover);
- modelli numerici per risolvere analisi più complesse con interazioni dipendenti dal tempo di più processi fisici e chimici.

Tra i più utilizzati rientrano i modelli numerici che sono basati sui principi della chimica e fisica dell'incendio risolvendo equazioni di conservazione della massa e dell'energia attraverso i metodi degli elementi finiti.
In letteratura si ritrovano due tipi di modelli numerici: il primo, utilizzato per effettuare analisi preliminari in ambienti con geometrie semplici, è il cosiddetto *modello a zone* che simula la dinamica di un incendio in un ambiente confinato, risolvendo le equazioni di conservazione di massa e di energia relativamente ad un numero basso di zone macroscopiche, di norma due zone omogenee: la zona superiore dove sono presenti i prodotti della combustione, quindi fumi e gas caldi, e la zona inferiore che è libera dai fumi dunque più fresca.

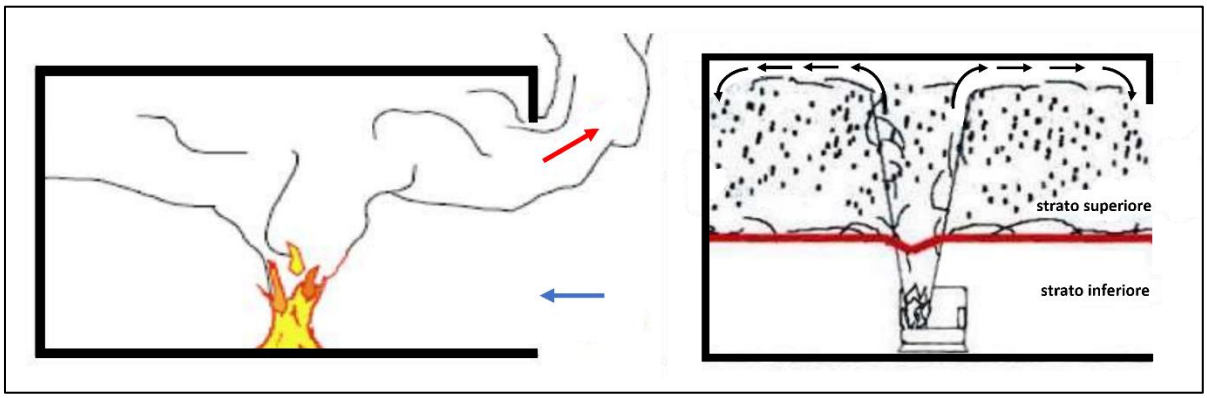


Figura 7. Schematizzazione del modello a zone
(materiale didattico del corso di FSE, Vancetti R., a.a. 2022)

I modelli a zone stimano in funzione del tempo diversi parametri: temperature medie dello strato inferiore e superiore, concentrazione di ossigeno e ossido di carbonio, flusso in entrata e in uscita da aperture verso l'esterno o altri locali, visibilità, ecc. Questi modelli però risultano non idonei per sistemi complessi poiché non dotati di modello di combustione e turbolenza (fenomeni che possono condizionare scambi termici convettivi e radianti, propagazione di fumi e gas, interazione fluidodinamica con le pareti, ecc.).
Allora, per fronteggiare sistemi più complessi, si ricorre ai *modelli di campo,* i quali rappresentano l'ambiente nel modo più adeguato e vicino alla realtà. Tali modelli consentono di stimare l'incendio per via numerica, grazie alla suddivisone dello spazio in un numero elevato di celle: all'interno di ciascuna di esse vengono risolte le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia.

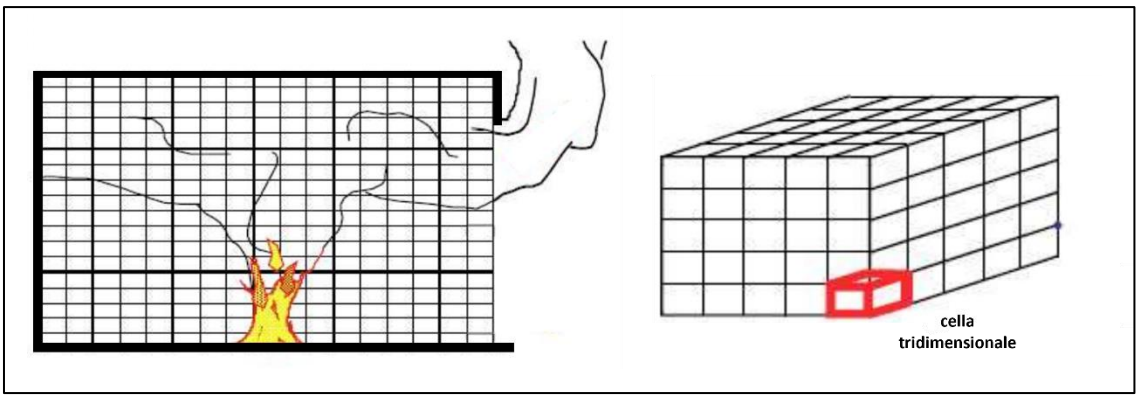


Figura 8. Schematizzazione del modello di campo
(materiale didattico del corso di FSE, Vancetti R., a.a. 2022)

Con la definizione delle celle tridimensionali si possono studiare geometrie diverse e più complesse dei semplici parallelepipedi, considerando anche la presenza di elementi architettonici particolari. Per risultati accurati le celle devono essere di dimensioni ridotte (20 – 50 cm) e molto numerose (centinaia di migliaia). I risultati conseguibili mediante l'utilizzo di questo modello sono molto più dettagliati dei modelli a zone perché forniscono i valori di tutti i parametri (temperatura, velocità di gas e fumi, visibilità, ecc.) calcolati in ciascuna cella del dominio. È ovvio che richiedono un elevato onere computazionale, ma al tempo stesso risultano tra i più utilizzati perché forniscono risultati accurati e accettabili, validati anche da prove effettuate in scala reale.

Per quanto riguarda i modelli di **simulazioni di esodo**, effettuate con lo scopo di quantificare il tempo necessario agli occupanti per evacuare verso luogo sicuro, sono basati sul movimento e sul comportamento degli occupanti. In particolare, i primi sono *modelli idraulici* con cui si assimila il singolo individuo ad una particella di fluido e trattano l'argomento con le leggi della fluidodinamica (risoluzione delle equazioni sulla regolazione dei fluidi di Navier-Stokes), invece i secondi sono *modelli comportamentali,* i quali permettono al progettista di imporre specifiche leggi per regolare le relazioni tra occupanti e ambiente circostante. La difficoltà principale nell'utilizzo di questo modello è legata ad aspetti del comportamento

della persona (familiarità con l'edificio, interazioni persona-persona, effetto del fumo sul movimento, ecc.) poiché difficili da prevedere in quanto del tutto probabilistici ed irrazionali. A tal proposito è necessario uno studio molto approfondito e dettagliato per poter ritenere i risultati delle simulazioni il più possibile coerenti con il reale comportamento umano. Pertanto, i risultati devono essere valutati con cautela.

In sintesi, grazie agli strumenti di modellazione analitici o numerici (incendio), idraulici o comportamentali (esodo), il progettista può sviluppare soluzioni alternative con lo scopo di soddisfare gli obiettivi primari della prevenzione incendi. Tutti gli aspetti progettuali sono riportati all'interno della sezione M del Codice.

2.1. Sezione M del Codice: Metodi

Il Codice di prevenzione incendi riporta la sezione M con lo scopo di descrivere le metodologie progettuali quantitative per la progettazione antincendio. Nello specifico, la sezione si articola in tre capitoli:

- M.1 Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio
- M.2 Scenari di incendio per la progettazione prestazionale
- M.3 Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale

Il **Capitolo M.1** fornisce in dettaglio la metodologia di progettazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio per definire soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali specifici. Si divide in due fasi:

I. analisi preliminare
II. analisi quantitativa

Nella fase I sono descritti i passaggi per individuare le condizioni più rappresentative del rischio al quale l'attività è esposta e quali sono le soglie di prestazione cui riferirsi in relazione agli obiettivi di sicurezza da perseguire. La fase di analisi preliminare si compone delle seguenti sottofasi:

- *Definizione del progetto*: si definisce lo scopo della progettazione e la finalità per cui si utilizza l'approccio prestazionale, con riferimento all'attività e tutto ciò a essa connesso (destinazione d'uso, eventuali vincoli progettuali, pericoli di incendio, condizioni al contorno, occupanti);
- *Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio*: si riferiscono ad aspetti legati all'attività in esercizio (per esempio salvaguardia della vita degli occupanti, tutela dei beni, minimizzare danni a impianti o macchinari, ecc.);
- *Definizione delle soglie di prestazione*: si tratta di soglie di tipo quantitativo e qualitativo. Focalizzandosi per esempio sulla salvaguardia della vita, i parametri significativi sono quelli che agiscono sull'incapacitazione degli occupanti esposti ad effetti termici (temperatura massima di esposizione e irraggiamento termico ammissibile), tossicità dei gas e propagazione dei fumi (visibilità minima);
- *Individuazione degli scenari di incendio di progetto*: rappresentano la schematizzazione degli eventi che ragionevolmente possono verificarsi nell'attività. L'identificazione, la selezione e la quantificazione degli scenari è descritta in dettaglio nel capitolo M.2.

La fase II fornisce al professionista antincendio delle linee guida per effettuare le verifiche di sicurezza degli scenari individuati nella fase precedente. Anche questa fase si compone di sottofasi, in particolare:

- *Elaborazione delle soluzioni progettuali*: sulla base dell'esperienza o mediante fonti autorevoli attendibili il professionista elabora una o più soluzioni progettuali per l'attività in esame, da sottoporre alla successiva verifica di soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza antincendio;
- *Valutazione delle soluzioni progettuali*: tramite i modelli di calcolo (analitici o numerici) si quantificano gli effetti dei singoli scenari su strutture, occupanti e ambiente per ogni soluzione progettuale elaborata nella fase precedente;
- *Selezione delle soluzioni progettuali idonee*: si seleziona la soluzione progettuale finale tra quelle che sono state verificate confrontando i risultati con le soglie di prestazione.

All'interno del **Capitolo M.2** è descritta la procedura per identificare, selezionare e quantificare gli scenari di incendio di progetto.
Il primo passo si basa sulla selezione di tutti i possibili *scenari di incendio*. Attraverso un'analisi qualitativa basata sull'esperienza e sulla ricerca di fonti storiche attendibili si individuano degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi. Per tenere conto dei molteplici aspetti che interagiscono tra di loro è buona prassi sviluppare un albero degli eventi che guida il professionista nella scelta tra le varie opzioni. Ogni scenario di incendio identificato deve essere descritto in maniera univoca in relazione a tre aspetti fondamentali:

Attività – Occupanti – Incendio

Il secondo passo consiste nella riduzione motivata degli eventi ipotizzati al minimo ragionevole così da analizzare quantitativamente gli *scenari di incendio di progetto.* La descrizione qualitativa effettuata in precedenza si traduce in dati numerici di input appropriati per la metodologia di calcolo scelta per la verifica delle ipotesi progettuali. I dati di input riguardano le tre caratteristiche della FSE:

1. Attività: si descrive in tutte le sue peculiarità (architettura, struttura, impianti, aspetti gestionali e operativi) perché influenzano lo sviluppo dell'incendio e la diffusione dei prodotti della combustione, oltre che l'esodo degli occupanti;
2. Occupanti: si definisce un massimo affollamento tenendo conto di tutte le categorie di persone che contemporaneamente potrebbero trovarsi all'interno dell'attività (lavoratori, visitatori, studenti, anziani, malati, disabili, ecc.), senza trascurare il grado di familiarità con l'ambiente e se sono in uno stato di veglia piuttosto che di sonno;
3. Incendio: si definisce la localizzazione, la quantità, qualità e distribuzione spaziale del combustibile, prodotti della combustione e la stima della curva RHR, mediante dati di letteratura o impiegando i focolari predefiniti forniti dal Codice.

Un ultimo input da definire è la durata degli scenari di incendio di progetto. Si considera un intervallo di tempo compreso tra la fase di innesco e l'obiettivo di sicurezza da raggiungere: la durata sarà minore se l'obiettivo è la salvaguardia della vita degli occupanti, maggiore se si valuta la salvaguardia della vita dei soccorritori o il mantenimento della capacità portante della struttura in caso di incendio.

Nell'ambito della FSE uno degli aspetti fondamentali è quello della salvaguardia della vita umana.
Il Codice, al **Capitolo M.3**, fornisce il modus operandi all'interno di quest'ottica: definisce regole basate sulla valutazione dell'esodo delle persone e sulle capacità dell'edificio di rendere le misure possibili. Il tema dell'esodo è molto complesso perché governato dall'interazione dell'occupante con l'edificio e l'incendio. Le stesse regole tecniche prescrittive di prevenzione incendi trascurano le componenti comportamentali e le modalità con cui le persone prendono decisioni, percepiscono il rischio, ecc. trattando l'esodo soltanto in funzione di elementi fisico-geometrici (layout, moduli d'uscita, ecc.). Al contrario, la progettazione prestazionale tiene conto degli aspetti comportamentali, fisico-geometrici e ambientali. Secondo il Codice, "*la progettazione ideale di un sistema d'esodo dovrebbe assicurare agli occupanti la possibilità di raggiungere un luogo sicuro in sicurezza o di permanervi, senza mai incontrare gli effetti dell'incendio"*. Questo è il primo criterio della progettazione prestazionale, definito **ideale**, proprio perché esistono situazioni ove non è applicabile, per esempio per gli occupanti che si trovano nel compartimento di primo innesco dell'incendio.

Per risolvere questa problematica la normativa introduce un criterio basato sul calcolo e sul confronto tra due intervalli di tempo così definiti:

- ASET, tempo disponibile per l'esodo (Available Safe Escape Time): tempo tra innesco e momento in cui le condizioni nell'attività diventano tali da rendere gli occupanti incapaci di porsi in salvo;
- RSET, tempo richiesto per l'esodo (Required Safe Escape Time): tempo tra innesco e momento in cui gli occupanti raggiungono un luogo sicuro.

Si delinea così il criterio di **ASET > RSET** secondo cui si considera efficace il sistema di esodo se il primo termine è maggiore del secondo, cioè se il tempo in cui permangono condizioni ambientali non incapacitanti per gli occupanti è superiore al tempo necessario perché essi possano raggiungere un luogo sicuro, non soggetto a condizioni ambientali sfavorevoli dovute all'incendio. Al fine di soddisfare l'obiettivo prefissato si calcola la differenza tra ASET e RSET che rappresenta il *margine di sicurezza*:

t_{marg} = ASET - RSET

Il professionista antincendio, nel confrontare le diverse soluzioni progettuali, tende a massimizzare il margine di sicurezza t_{marg} in relazione alle ipotesi assunte, al fine di far fronte ad eventuali incertezze nel calcolo dei due tempi.

In generale si assume $t_{marg} \geq 100\% \cdot RSET$. Se i dati di input impiegati nella progettazione prestazionale sono affidabili (valutazioni supportate da dati di letteratura o da normative tecniche consolidate), è consentito assumere $t_{marg} \geq 10\% \cdot RSET$. In ogni caso, t_{marg} non deve essere mai inferiore di 30 secondi.

Il parametro ASET dipende strettamente dalle interazioni tra attività – occupanti – incendio: il progettista, per tenere conto di tale complessità nel calcolo di ASET, può ricorrere ad analisi fluidodinamiche elaborate tramite due possibili *metodi di calcolo*, entrambi ammessi dalle norme: metodo di calcolo avanzato e metodo di calcolo semplificato.
Nel primo caso, poiché il calcolo di ASET richiede la stima delle concentrazioni di prodotti tossici, delle temperature e della densità del fumo negli ambienti a seguito di un incendio e la loro variazione nel tempo, la valutazione quantitativa di questi parametri attraverso le simulazioni di incendio può essere ragionevolmente elaborata con metodi numerici avanzati. La norma ISO 13571 è il riferimento più autorevole per il calcolo ASET e prevede l'analisi attraverso i modelli dei gas tossici, dei gas irritanti, del calore e della visibilità: ASET globale risulta essere il minore tra i tempi ottenuti dai quattro modelli citati.
Nel secondo caso, il professionista antincendio, invece di procedere alla verifica dei quattro modelli, impiega due soglie molto conservative: altezza minima dei fumi stratificati dal piano di calpestio pari a 2 m e la temperatura media dello strato di fumi caldi $\leq 200°C$. Il rispetto di tali soglie consente l'esodo in ambiente non inquinato dai fumi e con un valore dell'irraggiamento dai fumi $< 2{,}5\ kW/m^2$. La norma di riferimento è la ISO/TR 16738 la quale, offrendo la possibilità di utilizzare queste ipotesi molto semplificate, definisce il concetto della esposizione zero (*zero exposure*). Risulta quindi sufficiente valutare analiticamente o con modelli numerici a zone l'altezza dello strato dei fumi pre-flashover nell'edificio.

Anche il parametro RSET dipende strettamente dalle interazioni tra attività – occupanti – incendio e viene determinato mediante l'utilizzo di appositi software di simulazione di esodo. La sua valutazione però non risulta facile a causa dei molteplici aspetti comportamentali delle persone che entrano in gioco nel momento in cui scatta una situazione di emergenza. In genere gli occupanti, anche a seguito di allarmi, percezione di fumo, comunicazioni di altre persone, ecc., impiegano parte del tempo in attività non immediatamente rivolte all'evacuazione. Si attiva un processo di validazione continuo di ricezione, riconoscimento, interpretazione e di decisione in risposta agli indizi. Ciò può costituire una parte non trascurabile del tempo per raggiungere un luogo sicuro. Per questi ed altri motivi, la modalità di calcolo del parametro RSET si rimanda al capitolo successivo, parallelamente ad aspetti legati al comportamento umano durante le emergenze.

3. L'analisi del comportamento umano durante le emergenze

Il comportamento umano, tanto più in condizioni di pericolo reale o percepito come tale, a causa della propria aleatorietà, rientra nel novero degli studi di ricerca internazionale più avanzati attualmente in corso che necessita di un orientamento multidisciplinare. Pertanto, un approccio sistematico che possa fornire indicazioni specifiche al riguardo va ricercato in ambiti specifici della prevenzione incendi, correlati principalmente a temi di ricerca specialistica applicata alla comprensione, interpretazione, classificazione, modellazione e gestione dei comportamenti umani.
La riflessione sulla quale si vuole richiamare l'attenzione attraverso questo capitolo è come il tempo di evacuazione, ed in particolare il parametro RSET, sia strettamente dipendente dal comportamento umano e come l'efficacia dell'azione preventiva sia quindi correlata a tale valutazione.

Considerando il fenomeno incendio come fattore scatenante l'emergenza, dal momento in cui si innesca e per tutta la sua propagazione, è accompagnato dall'emissione dei suoi prodotti (fumi e gas) che minacciano l'ambiente e i relativi occupanti. In questi casi la variabile che gioca un ruolo fondamentale è il **tempo**: nella sua progressione scandisce le diverse modalità di risposta e i comportamenti delle persone prima che si manifestino condizioni incompatibili con la loro presenza. Dall'analisi di casi reali sono state osservate una serie di attività riassumibili come di seguito: prima che l'incendio sia rivelato (*tempo di rivelazione*) e segnalato (*tempo di allarme*) passerà del tempo; da qui ne trascorrerà dell'altro prima che ogni occupante se ne renda effettivamente conto sulla base delle informazioni acquisite (*tempo di riconoscimento*) e, una volta valutata la situazione, reagisca cominciando a muoversi (*tempo di risposta*). La somma di questi termini rappresenta il *tempo di pre-movimento*. Infine, passerà altro tempo prima che sia raggiunto il luogo sicuro (*tempo di movimento*). Tale sequenza temporale può essere schematizzata dalla seguente illustrazione:

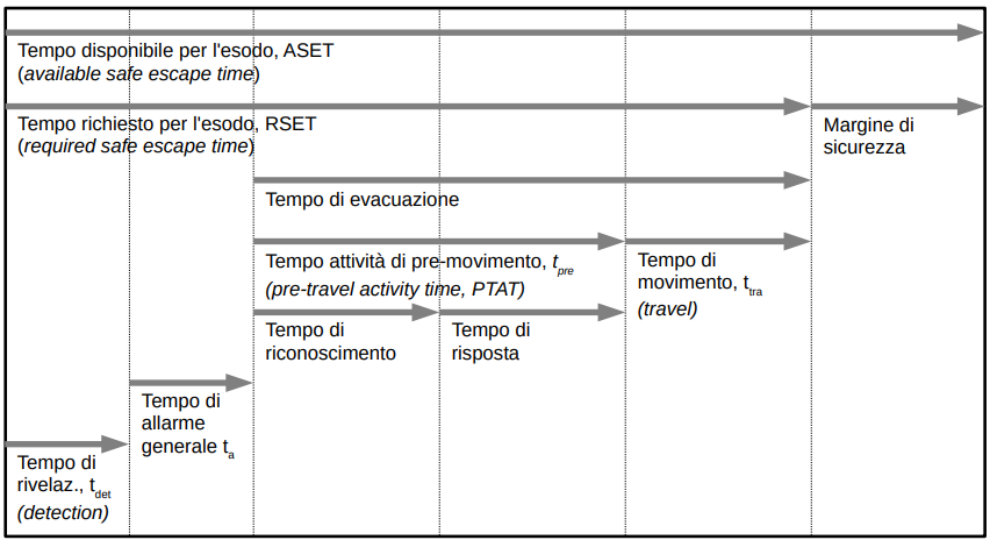


Figura 9. Confronto tra ASET ed RSET (Codice di Prevenzione Incendi)

L'illustrazione precedente evidenzia chiaramente le componenti che incidono sul calcolo di RSET:

$RSET = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra}$

Dove:

- t_{det} è il tempo di rivelazione (*detection*)
- t_a è il tempo di allarme generale
- t_{pre} è il tempo di pre-movimento
- t_{tra} è il tempo di movimento

Il t_{det} è il tempo che intercorre fra l'inizio della processo di ignizione ed il momento nel quale l'incendio viene rivelato. Tale tempo può diminuire se negli ambienti è installato un impianto di rivelazione automatica del fumo: in questo caso il t_{det} è il tempo necessario al sistema di rivelazione automatico per accorgersi dell'incendio. In generale, l'incendio in un ambiente può essere rivelato sia direttamente dalle persone presenti sia da un apposito impianto di rivelazione automatica di incendio. Nel primo caso avrà una forte influenza la vicinanza delle persone al luogo in cui si sviluppa l'incendio e dalle condizioni in cui esse si trovano, mentre nel caso in cui vi sia un sistema automatico, il t_{det} è influenzato da: condizioni delle persone nel locale dove viene inviata la segnalazione di allarme, tipologie di rivelatori (fumo, calore, temperatura, puntiformi, lineari, ecc.) e posizione, criteri utilizzati per riconoscere la situazione di allarme (centrale di controllo) e condizioni di manutenzione dell'impianto. Per determinarne il valore si procede al calcolo analitico o con apposita modellazione numerica degli scenari d'incendio e del sistema di rivelazione.
Il t_a è il tempo compreso tra la rivelazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti dell'allarme generale. Il tempo di allarme sarà pari a zero, se la rivelazione attiva direttamente l'allarme in tutti i punti dell'edificio, altrimenti pari al ritardo valutato dal professionista antincendio, se la rivelazione allerta una centrale di gestione dell'emergenza che verifica l'evento ed attiva poi l'allarme manuale.
Il t_{pre} è il tempo necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività che precedono il movimento vero e proprio verso luogo sicuro. È composto dal tempo di riconoscimento (*recognition*) e dal tempo di risposta (*response*): questo comporta una complicazione nel calcolo in quanto si dovranno determinare i due differenti tipi di tempo. Il primo tempo è caratterizzato dalle attività che gli occupanti stavano svolgendo, finché riconoscono l'esigenza di rispondere all'allarme, mentre nel secondo gli occupanti cessano ciò per cui erano impegnati dedicandosi ad attività legate all'emergenza. Il processo che anticipa l'evacuazione può essere sintetizzato in questo modo: raccolta di informazioni sull'evento, arresto e messa in sicurezza delle apparecchiature, raggruppamento del proprio gruppo (lavorativo o familiare), lotta all'incendio, ricerca e determinazione della via d'esodo appropriata (*wayfinding*) ed altre attività a volte anche errate ed inappropriate. A seconda dello scenario comportamentale di progetto, questi tempi possono durare anche alcune decine di minuti.

Per avere un'idea sull'ordine di grandezza da adottare durante la modellazione, il professionista antincendio, nella definizione del t_{det}, può impiegare valori tabellari dedotti dalla norma ISO/TR 16738 (di cui si riportano alcuni esempi di valutazione) oppure valori diversi da quelli indicati in letteratura purché adeguatamente giustificati, anche in riferimento a prove di evacuazione riportate nel registro dei controlli.

Parametri di descrizione dell'attività tratto da ISO/TR 16738	**Tempi di attività di pre-movimento ISO/TR 16738**	
	$\Delta t_{pre\ (1st)}$ primi occupanti in fuga	**$\Delta t_{pre\ (99th)}$ ultimi occupanti in fuga**
Esempio 1: albergo di media complessità • occupanti: *Ciii, sleeping and unfamiliar;* • sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti; • complessità geometrica edificio: *edificio multipiano e layout semplice;* • gestione della sicurezza: *ordinaria.*	20'	40'
Esempio 2: grande attività produttiva • occupanti: *A, awake and familiar;* • sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti; • complessità geometrica edificio: *edificio multipiano e layout complesso;* • gestione della sicurezza: *ordinaria.*	1' 30"	3' 30"
Esempio 3: residenza sanitaria assistenziale • occupanti: *D, sleeping and unfamiliar;* • sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti; • complessità geometrica edificio: *edificio multipiano e layout semplice;* • gestione della sicurezza: *ordinaria;* • presenza di addetti in quantità sufficiente a gestire l'evacuazione dei diversamente abili.	5'	10'

Figura 10. Esempi di valutazione del tempo di pre-movimento, tratto da ISO/TR 16738 (Codice di Prevenzione Incendi)

Spesso questa fase occupa la maggior parte del tempo totale di esodo ed è considerata la più impattante: la causa principale di decessi durante un incendio è legata proprio al ritardo con il quale le persone riconoscono e reagiscono all'emergenza. Per poter "ridurre" questi ritardi occorre intervenire sui tempi di risposta e di riconoscimento, applicando efficaci sistemi organizzativi e di informazione, come ad esempio l'impianto EVAC (sistemi di allarme vocale antincendio, *Emergency Voice and Communication*).

Infine, il t_{tra} (tempo di movimento) è il tempo impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro dal termine delle attività di pre-movimento appena descritte. È calcolato in riferimento ad alcune variabili: distanza degli occupanti o gruppi di essi dalle vie d'esodo, velocità d'esodo (che dipendono dalla tipologia degli occupanti e dalle loro interazioni con l'ambiente e gli effetti dell'incendio) e vie d'esodo (geometria, dimensioni, ostacoli, ecc.). Attualmente per il calcolo si impiegano simulatori d'esodo.

Nella sequenza di tempi precedentemente descritti si realizza una continua interazione tra le persone, l'edificio e le condizioni ambientali, i cui risultati possono tradursi nel raggiungimento dell'obiettivo "evacuare in sicurezza".

Per assicurare un esodo efficace è importante comprendere i fattori e le condizioni che possono influenzarne l'esito. In una situazione di minaccia, le persone percepiscono il problema ed interpretano le informazioni che ricevono in vari modi. Questo processo cognitivo appartiene a quello che in inglese viene chiamato *problem solving*, cioè, analizzare la situazione problematica ed escogitare una soluzione.

Caratteristiche del singolo individuo

Gli individui di fronte ad una situazione di emergenza assumono un comportamento molto variabile, ad esempio: possono ignorare la situazione, continuando a svolgere le ordinarie attività in cui sono coinvolte, oppure prendono delle decisioni che molto spesso cambiano a seconda dell'individuo, ecc. I fattori in gioco risultano molti, articolati e complessi, oltre che variabili in funzione di circostanze non sempre prevedibili. Per avere indicazioni è necessario attingere agli esiti di sperimentazioni condotte sul campo o all'analisi di eventi reali disponibili nell'ambito di una bibliografia prevalentemente redatta in lingua inglese. Di seguito si propone un elenco delle caratteristiche principali che definiscono il comportamento dei singoli occupanti:

- Genere: dallo studio di numerosi incendi, sono state riscontrate delle differenze comportamentali tra uomo e donna. I primi sono più propensi a cercare di spegnere il fuoco, mentre le donne preferiscono raggiungere la famiglia e scappare;
- Età: secondo alcuni studi, è possibile valutare le prestazioni dei singoli individui in base all'età, considerando tre aspetti: abilità sensoriali, decisionali e di azione. È immediato intuire come le persone anziane possano avere una scarsa resistenza all'effetto debilitante dei prodotti dell'incendio. Inoltre, rientrando tra le categorie più fragili, sono quelle più esposte al rischio;
- Capacità fisiche e sensoriali: durante una situazione di emergenza, possono essere presenti persone con disabilità fisiche o sensoriali, che possono quindi rallentare sia la propria evacuazione che quella degli altri occupanti presenti;
- Familiarità: in caso di emergenza gli individui tendono a muoversi verso luoghi o persone a loro familiari. Il concetto di familiarità può essere inteso anche come la conoscenza che gli individui hanno di un edificio: è così che le persone riescono ad acquisire una certa capacità ad orientarsi e muoversi anche in situazioni complesse come un'emergenza, quando alcune abilità cognitive potrebbero essere compromesse;

- Stato di veglia/sonno: nel caso di un incendio che si sviluppa nel cuore della notte il tempo di risposta sarà indubbiamente più lungo perché coglierà le persone addormentate. In questi casi i tempi in gioco risulteranno essere due, quello necessario per svegliarsi e quello connesso con la presa di coscienza dell'evento e, quindi, con l'elaborazione della conseguente risposta, entrambi alterati dalla condizione psicofisica del risveglio;
- Reattività: le persone coinvolte in una situazione di emergenza possono essere sotto l'effetto di medicinali, alcool o droghe, sostanze che alterano la percezione del pericolo e che possono ostacolare una corretta evacuazione;
- Attaccamento sociale: durante una situazione di emergenza, se da un lato le persone con legami sociali o affettivi possono aiutarsi reciprocamente, dall'altro, sono proprio questi legami che riducono la percezione di pericolo e rallentano l'evacuazione;
- Attaccamento agli oggetti: molte persone, prima di evacuare, si preoccupano di recuperare oggetti personali o animali, anche se ciò rallenta la loro fuga. Per esempio, quando l'incendio avviene nella propria abitazione, le persone ritardano l'evacuazione poiché vi è un maggiore attaccamento verso la proprietà o al maggiore senso di sicurezza e protezione che si percepisce in casa propria;
- Cultura, ruolo e società: gli occupanti caratterizzati da una posizione gerarchica superiore si comportano in maniera differente rispetto a quelli privi di una certa responsabilità. Essi possono anche influenzare il comportamento dei loro sottoposti.

È bene ribadire che i processi decisionali nelle situazioni di emergenza sono diversi da quelli ordinari per due ragioni: in primo luogo la decisione riguarda la sopravvivenza della persona e dei suoi cari, in secondo luogo vi è un'urgenza e scarsità di tempo a disposizione per fare scelte prima che siano perse delle opzioni cruciali. Inoltre, tali processi diventano più fallaci perché l'informazione, come un allarme sonoro, potrebbe confondersi con altro o essere poco travisato perché allerta senza informare precisamente sulle azioni da intraprendere, ci si focalizza su pochi elementi o ci si lascia influenzare dalle interazioni sociali. Su quest'ultimo aspetto sono state condotte numerose ricerche dalla psicologia sociale basate sui processi di *influenza sociale nella percezione di un pericolo* e nella decisione di evacuare, così come verrà illustrato nel prossimo paragrafo.

Caratteristiche collettive

"L'evoluzione di una situazione di emergenza è l'esito di un confronto sociale in cui si osservano e si interpretano le risposte altrui al fine di prendere una decisione"[6]. L'attività di un individuo molto spesso è influenzata dagli atteggiamenti dei suoi vicini così, quello che prima era il comportamento del singolo, si trasforma nel comportamento di "tutti" verso uno schema comune. Risulta allora necessario conoscere le tipologie di comportamento che un gruppo di persone può assumere:

- Comportamenti gregari: durante la fuga, le persone possono avere comportamenti individualistici o gregari. Se si pensa ad una situazione ordinaria, come l'uscita da un centro commerciale o da un Teatro, si nota come il deflusso sia influenzato dalle differenze dei comportamenti individuali e dall'interazione tra le persone. Questa situazione inevitabilmente tende ad alterarsi in caso di emergenza: le persone, sotto uno stato di ansia e preoccupazione per la sopravvivenza, si muoveranno con una velocità maggiore, inizieranno a spingere e ad ostacolarsi reciprocamente, con il risultato della creazione di code in corrispondenza delle uscite e con la formazione delle cosiddette *strutture ad arco* (figura 11). L'aumento della velocità provoca un effetto paradossale in corrispondenza dei colli di bottiglia: più le persone si dirigono velocemente verso le uscite, più rallentano a causa dell'accalcamento che si genera. Tutto questo può provocare la caduta di alcuni individui, i quali possono essere feriti e calpestati, oltre a diventare dei veri e propri ostacoli;

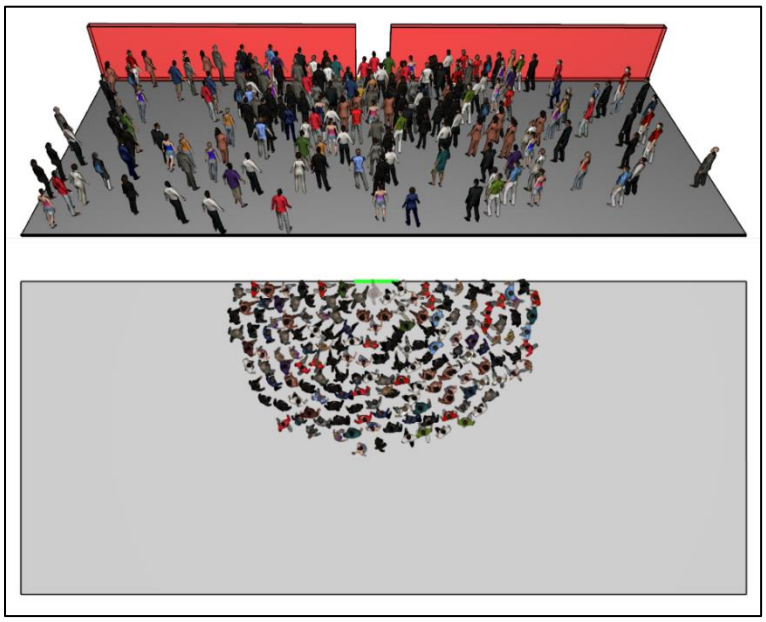


Figura 11. Formazioni di code - Strutture ad arco
(Immagine modellata con il software Pathfinder®)

[6] Bontempi F., Caira L., Mangione M. – *Il comportamento umano in caso di incendio: i modelli di evacuazione*

- Comportamenti pro-sociali: in caso di emergenza, è stato riscontrato che le persone coinvolte diventano cooperative, altruiste ed alcune tendono a mostrare capacità di leadership. Gli individui che adottano questo atteggiamento assumano un ruolo da protagonisti durante l'evacuazione;
- Panico: questo concetto nel corso degli anni ha subito notevoli modifiche, fino alla definizione più attuale, secondo cui il panico di massa è quel "*comportamento collettivo in cui le capacità di giudizio e ragionamento sono deteriorate, in cui vi sono emozioni forti di paura e in cui vi è un comportamento (solitamente fuga) che può risultare in azioni autodistruttive"*[7]. Gli studi hanno evidenziato che il panico collettivo può essere suscitato dalla presenza simultanea di alcune condizioni. Innanzitutto, vi è un'ansietà diffusa precedente al disastro, per esempio sotto forma di previsione che possa manifestarsi un pericolo reale; dopo vi è una mancanza di una leadership riconoscibile e che sappia dare istruzioni chiare (per esempio quali comportamenti protettivi assumere), a cui va aggiunta la percezione di rimanere intrappolati per lo sbarramento dell'unica via di fuga; infine, vi è la comparsa di un fattore precipitante dell'ansia. Dal momento che la combinazione di questi elementi è estremamente rara, la reazione collettiva di panico lo è altrettanto e quando avviene si manifesta per poco tempo coinvolgendo solo una piccola minoranza di persone;
- Comportamento affiliativo: questo modello si basa sulla natura gregaria e affiliativa dell'essere umano. La fuga può essere considerata l'altra faccia della medaglia del comportamento affiliativo, ovvero un aspetto di una generale risposta che include il movimento lontano dal pericolo e un avvicinamento verso luoghi o persone familiari. È quindi un movimento "verso e non solo via da". Secondo la teoria dell'attaccamento le persone sin da bambini tendono a rivolgersi alle figure di attaccamento affettivo nelle situazioni di stress e pericolo. Analogamente nei disastri collettivi, prevale una risposta "fuggi e affiliati" che dipende non solo dalla percezione del pericolo ma anche dal contesto sociale, cioè dall'accesso agli elementi familiari. La stessa presenza di persone familiari influenza la percezione e la risposta, soprattutto, al pericolo. In linea con queste premesse è stato riscontrato come i legami di gruppo in alcuni casi contribuiscono sui tassi di mortalità e ferimento. Su 500 persone intervistate, sopravvissute ad un incendio di un grande complesso turistico, il 73% dei soggetti coinvolti è fuggito con una o più persone del proprio gruppo (nella maggioranza dei casi si trattava di nuclei familiari). Tutte le persone decedute in una particolare area della residenza erano insieme al loro gruppo quando sono state allertate ma probabilmente hanno deciso di andare via insieme, con un ritardo che è risultato fatale. Le persone che non avevano legami sociali, invece, sono state più rapide nella risposta all'emergenza senza riportare nessuna conseguenza. Altri studi evidenziano come i gruppi di occupanti assumono la velocità del membro più lento, come anziani o bambini, con il risultato di un netto ritardo nell'evacuazione;

[7] Pietrantoni L., Prati G. - *I comportamenti collettivi durante l'evacuazione nelle emergenze*

- Cluster di convergenza: spesso i gruppi di persone convergono verso un punto comune, da loro percepito come un luogo sicuro. In genere tale luogo è una zona caratterizzata da migliori condizioni, come l’assenza di fumo e una maggiore visibilità, oppure la presenza di un balcone che facilita la ventilazione. Riunendosi in gruppi, anche tra loro sconosciuti, gli occupanti percepiscono una riduzione dell’ansia e della tensione provocate dall’evento in atto;
- Tendenza al rientro: numerosi studi passati hanno permesso di focalizzare l’attenzione su alcune scelte delle persone sfuggite da un incendio. Alcune di loro scelgono di rientrare all’interno della struttura con la volontà di salvare le persone care o di recuperare gli effetti personali. Le statistiche hanno mostrato che solitamente sono gli individui di sesso maschile ad assumere questo comportamento, decisione che prendono in maniera razionale, intenzionale e senza ansia emotiva.

Questa analisi ha avuto l’obiettivo di indagare la fuga e l’evacuazione di una persona in un contesto pericoloso come un incendio, prendendo in prestito costrutti che vanno dalla psicologia cognitiva alla psicologia sociale. È noto che gli occupanti, di fronte ad un pericolo d’incendio, reagiscono diversamente in funzione delle caratteristiche personali e condizioni socio-ambientali che incoraggiano (o scoraggiano) determinate azioni. Conoscere le persone attraverso i comportamenti reali in emergenza e non soltanto come entità numeriche, può sostenere il professionista antincendio durante la progettazione, al quale è chiesto un contributo qualitativo che sappia andare oltre il semplice rispetto normativo, ma ovviamente a partire da questo. È così che gli aspetti di cui si è proposto una lettura possono avere, se correttamente gestiti, riscontri positivi nelle scelte progettuali con la finalità sia di garantire la sicurezza dei soggetti coinvolti sia a migliorare l’azione di soccorso da parte dei soccorritori, ovvero le persone chiamate a prestare un aiuto.

3.1. Interazione occupanti – edificio

La sicurezza degli occupanti non è da ascrivere solo ed esclusivamente alle loro caratteristiche durante una situazione di emergenza, ma vi sono altri fattori che incidono e che possono influenzare lo sviluppo dell'esodo. Mettendo in relazione una persona con l'ambiente circostante il risultato è semplificabile in questo modo: *"più barriere meno abilità; più facilitatori più abilità"*[8]. Per ambiente si intende sia l'ambiente fisico, con tutto ciò che lo definisce (geometria, strutture, spazi, vie di esodo, attrezzature, impianti, tecnologie, dispositivi, supporti per la comunicazione, ecc.) che l'ambiente sociale (relazioni, atteggiamenti, ecc.). In questo sistema di relazioni è possibile affermare che il livello di abilità di ciascun occupante, oltre a variare per cause soggettive, individuali e fisiologiche, come già descritto al paragrafo precedente, varia a seconda del contesto in cui ci si trova e alle caratteristiche dell'edificio. Se quest'ultimo non è progettato in conformità alle regole tecniche prescrittive per garantire un'adeguata sicurezza delle persone che vi interagiscono, può insorgere una condizione di "disabilità situazionale", ovvero la condizione di non poter agire nell'ordinario o rispondere ad una situazione di emergenza. I fattori da considerare si possono quindi attribuire all'edificio, non inteso solo come modello fisico ma come complesso in cui si configurano e si delineano diversi aspetti:

- Geometria: dimensioni, altezza dell'edificio, altezze interne dei locali, distribuzione interna, complessità, compartimentazioni, suddivisione in spazi interni, interconnessione degli spazi, lunghezze e larghezze di corridoi, porte e scale, percorsi ordinari, arredamento fisso e mobile. Le modalità con cui lo spazio è organizzato (**layout**) influenzano la possibilità che le persone riescano a costruirsi una mappa mentale che permetta loro di muoversi agevolmente. Questo aspetto, ovvero la facilità con cui gli occupanti sono in grado di acquisire informazioni ambientali o di elaborare le risposte più corrette, rappresenta un aspetto importante per la salvaguardia della vita umana;
- Vie di esodo: visibilità dei percorsi, lunghezza, presenza di percorsi verticali, l'accessibilità, l'utilizzo durante i normali flussi nell'edificio, uscite finali (numero e distribuzione). Secondo la definizione fornita dal Codice di Prevenzione Incendi, la via di esodo è: "*percorso senza ostacoli al deflusso, appartenente al sistema d'esodo, che consente agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro dal luogo in cui si trovano"*. È essenziale che la percorrenza degli spazi interni (mobilità orizzontale e verticale) e il transito attraverso le porte di ingresso/uscita, siano privi di ostacoli o altri impedimenti per garantire anche alle persone che si muovono con difficoltà di allontanarsi in sicurezza e autonomia. Per esempio, il superamento di dislivelli mediante rampa, se opportunamente progettate, possono essere utilizzate autonomamente da persone in sedia a ruote. Il Codice considera una pendenza del 5% come il valore massimo affrontabile autonomamente, altrimenti è necessario l'ausilio di una persona che spinge. Un altro aspetto da non sottovalutare è

[8] Schiavone E. – *Progettare la sicurezza inclusiva: da dove iniziare?*

la qualità delle pavimentazioni dei percorsi, poiché scivolosità ed eventuali asperità potrebbero causare cadute tali da compromettere l'esodo. In merito alle lunghezze dei percorsi, la variabile che incide di più è la **velocità** con cui si muovono le persone: bisogna essere consapevoli che questa cambia in funzione delle capacità motorie di ciascuno e dalla presenza di folla, oltre che dagli ausili impiegati. Il tema dei percorsi si intreccia con quello del **wayfinding** e della riconoscibilità di luoghi e presidi per garantire alle persone la possibilità di spostarsi da un punto all'altro di un percorso, avendo durante lo stesso arco di tempo la consapevolezza della direzione intrapresa verso un luogo sicuro;

- Attività: utilizzi e attività svolte all'interno dell'edificio possono avere un impatto sulle risposte comportamentali e sull'uso delle vie di fuga. Un ambiente di lavoro, ad esempio, rappresenta un luogo ben conosciuto per quanto concerne il percorso di esodo da intraprendere, mentre così non è nel caso di ambienti sconosciuti perché meno frequentati, come teatri, cinema, alberghi, ecc.;
- Strategie per la salvaguardia della vita: strategie di evacuazione degli occupanti, sistemi passivi/attivi di controllo degli incendi, sistemi di rilevamento, allarme e comunicazione, segnaletica e illuminazione. Per quanto riguarda il **sistema di allarme**, molto spesso ci si riferisce ad una fonte sonora (sirena o campanello), senza considerarne il contenuto informativo in relazione alle necessità da soddisfare. È chiaro che in una situazione fuori dall'ordinario, soprattutto in un ambiente meno conosciuto, come al punto precedente, non basta che un segnale sia semplicemente percepito perché deve avere anche un contenuto informativo adeguato alla risposta da attuare: l'uso di un sistema integrato di comunicazione sonora e vocale rappresenta la modalità con maggior efficacia informativa durante una situazione di emergenza. Il puro segnale sonoro ha il compito di stimolare un'attenzione e di provocare degli interrogativi sul suo significato, però se non è supportato da altre informazioni, la persona si baserà sulla sua esperienza e sul contesto nel quale si trova per ottenere una risposta di ciò che sta accadendo. È quindi importante che il segnale sonoro sia associato a messaggi informativi che possono essere preregistrati o proposti in tempo reale da operatori specificamente formati in merito a questo compito. Quest'ultima modalità, in particolare, è un'ottima alleata contro i **falsi allarmi**: il numero di falsi allarmi in un edificio è un aspetto che può avere una certa ricaduta nell'ambito degli ambienti di lavoro o altri dove sono presenti persone con continuità. Come già evidenziato, un segnale di allarme antincendio, se non è conosciuto come tale dagli occupanti e/o non è accompagnato da un contenuto informativo, raramente innesca il movimento di evacuazione. Inoltre, se il numero di falsi allarmi risulta importante, non è difficile immaginare quanto il sistema possa perdere credibilità in chi lo ascolta, aumentando l'incertezza nell'interpretazione e soprattutto il tempo necessario per iniziare a muoversi. Infine, volgendo lo sguardo al contributo fornito dalla **segnaletica** e dall'**illuminazione di emergenza**, è stato messo in evidenza dall'analisi di casi reali come in emergenza solo il 7-8% delle persone coinvolte abbia notato la presenza di segnaletica durante la fuga. È vero che tali presidi aiutano a muoversi e a orientarsi all'interno di un edificio, ma non bisogna trascurare le

condizioni emotive, unite a paura, che riducono la gamma di informazioni che le persone sono capaci di utilizzare, congiuntamente alla restrizione del campo percettivo che si verifica in situazioni critiche. Con questo non si vuole certo sottovalutare il ruolo della segnaletica, ma invitare a riflettere sul suo utilizzo considerandola come una delle risorse da affiancare ad altri indicatori ambientali, come le strisce luminescenti, le luci segnapasso e simili;

- Sistema di gestione della sicurezza antincendio: gestione dell'edificio, gestione del personale e degli occupanti dell'edificio, formazione del personale e formazione degli occupanti, procedure di emergenza. Un aspetto molto importante del sistema di gestione della sicurezza antincendio è legato alla **formazione** e all'**addestramento**. In generale questa è una modalità riferita ai soggetti che conoscono un ambiente rispetto al quale vi è un rapporto funzionale (luoghi di lavoro, scuole, ecc.). La formazione del personale rappresenta una risorsa importante nel momento in cui si manifesta un'emergenza e le persone incaricate di tale funzione devono essere facilmente riconoscibili (indossando abiti o uniformi adeguati) oltre che ben addestrate in merito ai comportamenti da tenere ed alle informazioni da fornire alle persone presenti. Il ritardo con cui un'evacuazione può avvenire potrebbe essere drasticamente ridotto dal comportamento e dalle istruzioni fornite dal personale.

  Focalizzando invece l'attenzione sulle **procedure di emergenza**, la normativa italiana (D. Lgs. n. 81/2008 e D.M. 3 agosto 2015) richiede a tutte le attività in cui vi è la presenza di pubblico che siano presenti il Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) e il Piano di emergenza ed evacuazione (PEE).

> *"In generale una procedura di evacuazione si attiva in caso di emergenza, ovvero quando una o più strategie antincendio falliscono mettendo a repentaglio la sicurezza delle persone presenti, la tutela dei beni e dell'ambiente. Non sempre questa misura è sufficiente a limitare l'esposizione alla fonte di pericolo, quindi è importante conoscere le soluzioni alternative e capire come metterle in atto attraverso la predisposizione di un piano di emergenza formulato per gestire la molteplicità di situazioni che possono manifestarsi".*[9]

Sulla base di questa premessa è necessario evidenziare che non esistono modelli di piani di emergenza dalla validità universale, ogni piano e di conseguenza le procedure da attuare in caso di pericolo, devono essere calibrate sul particolare contesto e costantemente aggiornate per non creare ulteriori pericoli in situazioni già critiche;

[9] Vancetti R., Zanut S., Minoia M. – *Simulazioni di esodo per il progetto dei piani di evacuazione in emergenza nelle attività scolastiche*

- Protezione attiva: impianto di rivelazione e segnalazione allarme incendio, impianto di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio di tipo automatico o manuale ed impianto di controllo del fumo e del calore. Queste sono solo alcune delle misure antincendio atte a ridurre le conseguenze di un incendio, le quali richiedono l'azione dell'uomo o l'attivazione di un impianto;
- Spazi calmi e luoghi sicuri temporanei: gli **spazi calmi** e l'organizzazione degli ambienti rappresentano due modalità per favorire l'esodo delle persone, soprattutto per quelle che non sono in grado di affrontare autonomamente i percorsi verticali tra piani differenti. Lo spazio calmo è definito come un "luogo sicuro temporaneo" dove gli occupanti possono attendere assistenza per completare l'esodo verso luogo sicuro. Solitamente questo spazio è destinato "esclusivamente" alle persone disabili e non come risorsa per tutte le persone dell'edificio. È chiaro che in situazioni di emergenza, non è difficile incorrere in casi in cui una persona "non dichiaratamente disabile", secondo una concezione diffusa che assimila un disabile a una persona con evidenti difficoltà (ad esempio una persona in sedia a ruote o una non vedente), ha problemi ad utilizzare le scale anche solo per la condizione connessa con l'evento. Ecco che la progettazione di tali spazi rappresenta una risorsa importante da non sottovalutare. Al riguardo occorre anche tenere presente le persone anziane, le donne in stato di gravidanza o semplicemente persone con arti fratturati ed i bambini. All'interno di questi ambienti dovranno essere presenti presidi destinati ad agevolare la permanenza sul posto e l'interazione tra la persona che si ferma e la gestione dell'emergenza, ad esempio: indicazioni sui comportamenti da tenere in attesa dell'arrivo dell'assistenza, eventuali attrezzature da impiegare per l'assistenza e un sistema di comunicazione bidirezionale che consenta agli occupanti di segnalare la loro presenza e richiedere assistenza.

Riepilogando, tutti gli aspetti fin qui descritti, legati prevalentemente agli occupanti e all’edificio, entrano in gioco nel momento in cui scatta una situazione di emergenza connessa allo sviluppo di un incendio. In particolare, la **caratterizzazione degli occupanti** (in termini di numero, di distribuzione all’interno dell’edificio in istanti diversi, la loro familiarità con l’edificio, le loro abilità, il loro comportamento) e la **caratterizzazione dell’edificio** (incluso il suo uso, la disposizione e i servizi, la diffusione degli avvisi, la distribuzione delle vie di esodo e la strategia di gestione dell’emergenza), sono tutte informazioni necessarie per il calcolo del parametro RSET (*required safe escape time*), ovvero il tempo richiesto per l’esodo. Questo intervallo di tempo verrà confrontato con il parametro ASET (*available safe escape time*), ovvero il tempo disponibile per l’esodo e se la disuguaglianza ASET > RSET è rispettata, il sistema di esodo si potrà considerare efficace.

Come già descritto nelle fasi iniziali del presente elaborato e qui di seguito riportato, i tempi sopra citati vengono calcolati con strumenti differenti. I valori di ASET si determinano in funzione di analisi fluidodinamiche, ovvero si indagano l’evoluzione dell’incendio ed i parametri rappresentativi quali temperatura, visibilità e concentrazione di agenti tossici; RSET viene in parte determinato mediante l’utilizzo di appositi software di simulazione di esodo. L’efficacia e l’affidabilità di questi metodi sono fortemente correlate con la variabilità ed incertezza dei parametri di input richiesti dalla modellazione.

Al fine di comprendere i concetti che sono stati trattati e illustrare le potenzialità delle simulazioni come ausilio alla progettazione antincendio, verrà analizzato un caso studio che richiede delle valutazioni specifiche ai fini della prevenzione incendi.

4. Caso studio

Il caso studio riguarda il progetto di rifunzionalizzazione di un Teatro comunale sito in Italia, ad Hub della Cultura e del Turismo del territorio, per creare un polo adeguato alle esigenze e a un nuovo modello funzionale e gestionale nell'ambito delle proposte di sostegno allo sviluppo turistico del territorio. L'obiettivo è quello di dare alla struttura funzioni diverse da quella specifica di polo teatrale, ampliando quanto più possibile l'utilizzo temporale dell'edificio fruendo dello stesso in modo omogeneo, utilizzando tutti gli spazi presenti, attribuendo loro un valore culturale, di svago e di lavoro.

L'edificio oggetto di intervento si trova all'interno di un'area contraddistinta da verde pubblico, giardini pubblici attrezzati per attività ludiche e a ridosso di un'immensa piazza porticata, quindi un'area fortemente urbanizzata e di impianto ottocentesco. In particolare, è ubicato in posizione centrale tra la stazione ferroviaria e la piazza, all'interno dell'ampio settore a verde pubblico.

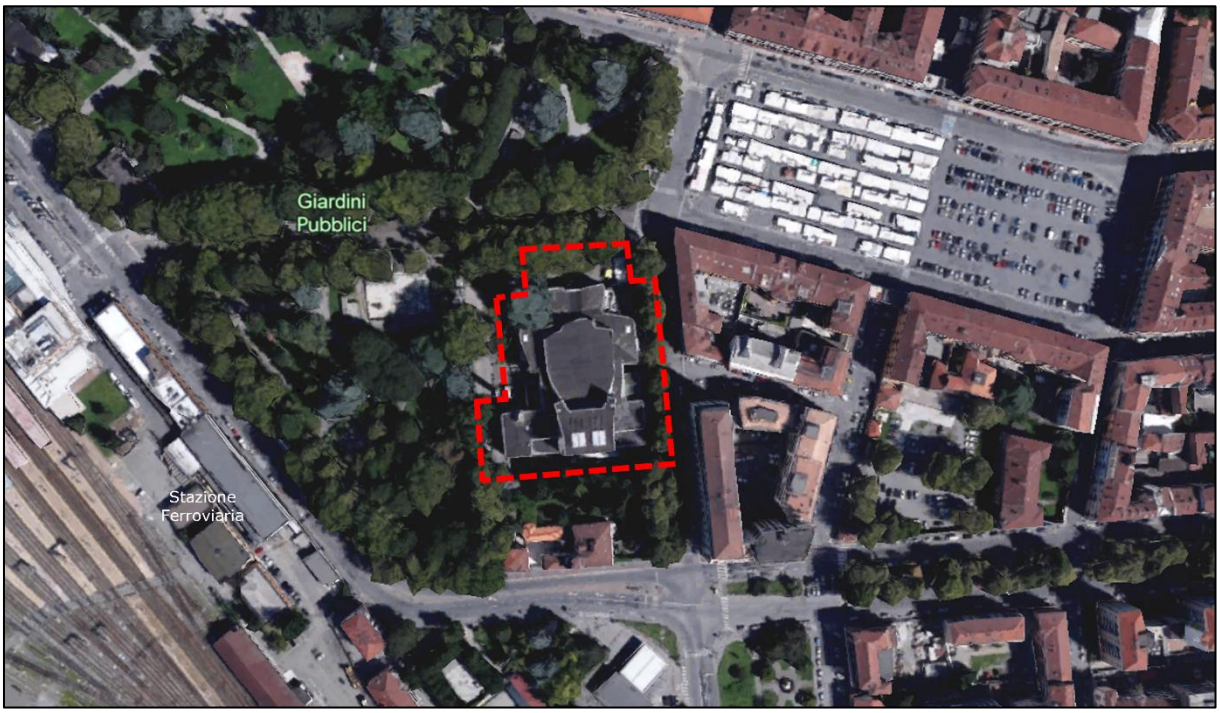


Figura 12. Inquadramento contesto
(Google Earth 2023)

L'edificio attuale ha preso il posto del vecchio Teatro, il quale, danneggiato dai bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale, non rispondeva alle necessità della città in evoluzione, e dopo lunghe discussioni sul progetto da realizzare, venne demolito nel 1965 per ricostruire l'attuale edificio.

Il Teatro Comunale in oggetto è un edificio di grandi dimensioni ormai inserito nel contesto con gli spazi principali disposti su quattro livelli: un piano interrato e tre piani fuori terra.

L'intervento

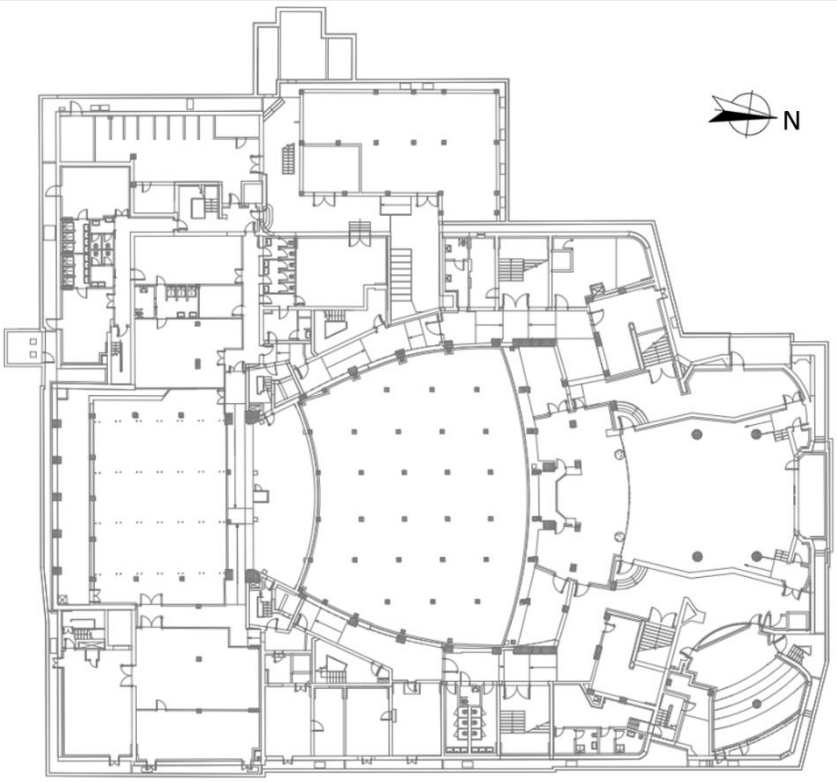
In accordo con il Documento di Indirizzo alla Progettazione alla base del concorso di progettazione emanato dal Comune, si è prevista la conservazione dell'edificio esistente, con interventi mirati alla rifunzionalizzazione degli spazi prettamente teatrali e dei restanti spazi collettivi. Per la rigenerazione del Teatro senza stravolgere l'aspetto esterno, ormai consolidato, si sono previste diverse azioni.
All'interno l'odierno edificio, costruito per il Teatro, dispone di una molteplicità di spazi molto generosi e, data l'esigenza di rivitalizzare questa struttura anche attraverso l'inserimento di una serie di nuove funzioni, la prima strategia è stata quella di individuare **tre poli funzionali** separati in modo da facilitare la gestione dell'organismo generale, la contemporaneità d'uso degli spazi e di conseguenza la sua fruibilità permanente. La seconda strategia riguarda il sistema distributivo principale, riorganizzato con formazione di nuovi percorsi orizzontali e verticali oltre all'inserimento di nuovi ascensori al fine di ottimizzare la distribuzione verticale.
Gli spazi sono stati quindi suddivisi in tre macroaree, quali:

1. polo teatrale/cinematografico;
2. polo didattico/ludico/espositivo;
3. polo dei servizi.

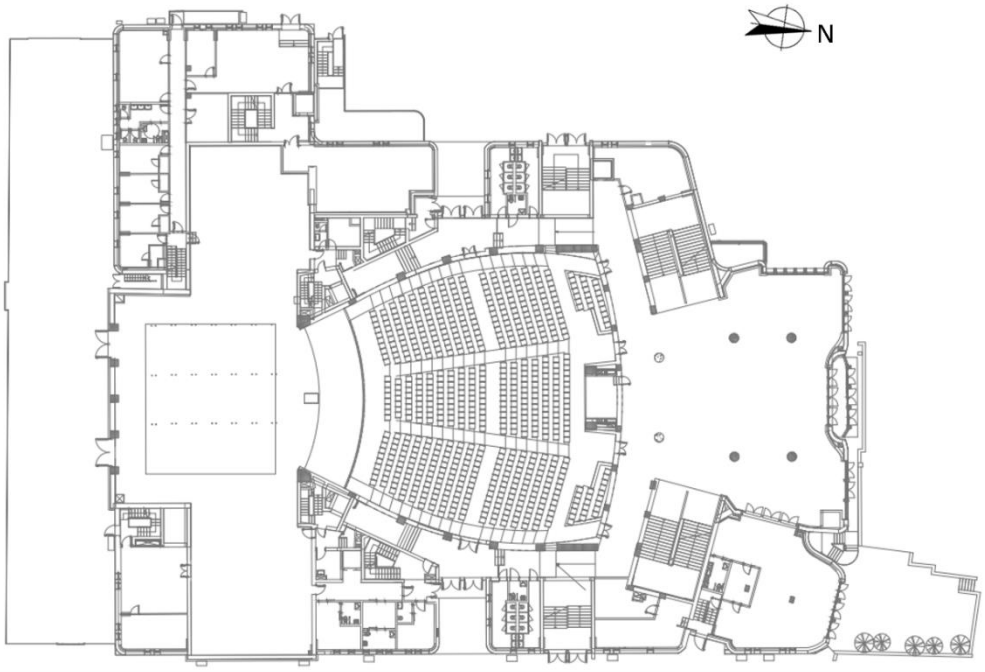
La suddivisione degli spazi a disposizione in tre poli separati garantisce, oltre alla facilità di gestione, una serie di ambienti e percorsi separati in cui non ci sono quasi mai sovrapposizione tra i vari flussi. I tre poli hanno accessi separati, tutti accessibili da persone diversamente abili.

Schema distributivo

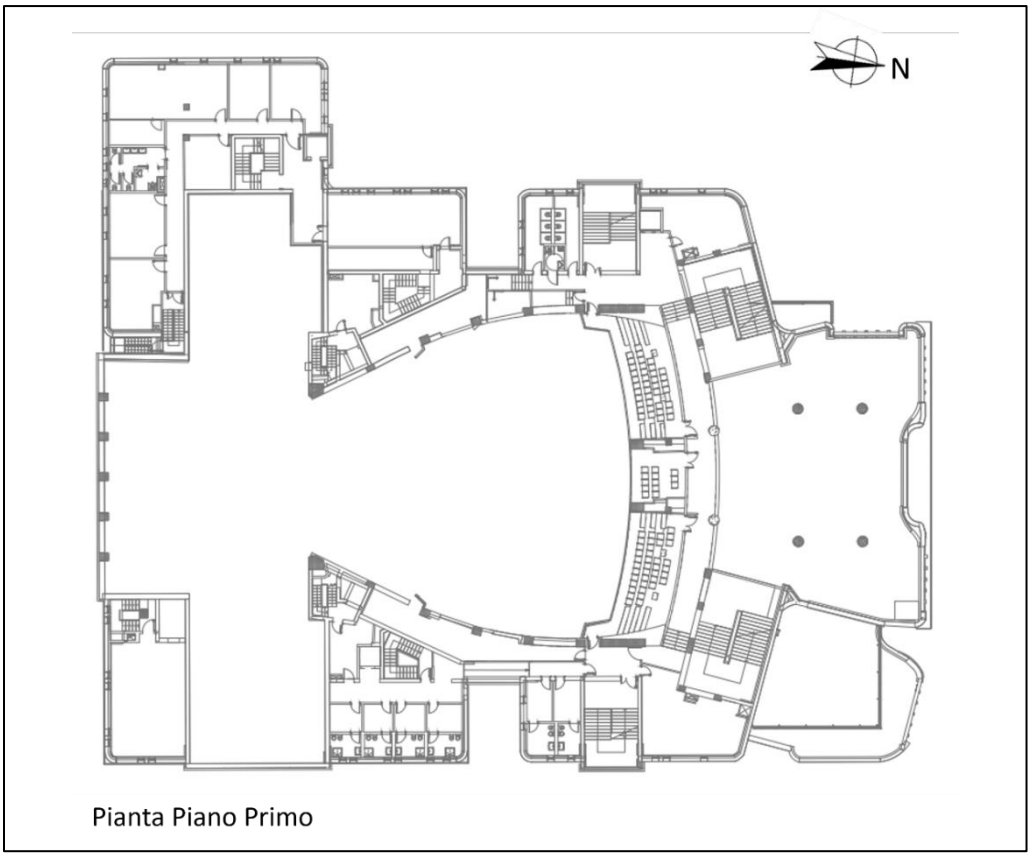
L'edificio, come detto, si sviluppa su tre livelli fuori terra e uno interrato. Nello specifico, al piano interrato ci sono due sale cinematografiche, una sala conferenza, magazzino costumi, cameroni e servizi igienici, archivi, aree adibite a locali per impianti e spogliatoio addetti al ristorante. Al piano terra, nel corpo centrale della struttura, è stata riconfigurata la Sala Rossa da 800 posti, composta da una platea (a quota variabile, compresa tra ±0,95 m) e due gallerie (prima galleria gradonata da 105 posti e seconda galleria gradonata da 382 posti, ubicate rispettivamente a quote comprese tra +3,91 m e +4,82 m e tra +7,16 m e +11,86 m); sul fronte Sud si trovano fossa d'orchestra, palcoscenico e torre scenica, con annessi camerini e servizi igienici, mentre sul fronte Nord ci sono foyer/atrio/biglietteria (ambiti che si sviluppano tra i piani terra e primo a tutta altezza), ristorante, bar e cucina con deposito annesso. Su ogni lato lungo del fabbricato sono stati preservati i corpi scala per consentire l'esodo in sicurezza degli occupanti della Sala Rossa, i quali potranno recarsi in luogo sicuro tramite un numero di uscite pari a due per lato, sui lati Est e Ovest. Il tutto verrà dettagliato e illustrato nei paragrafi successivi.
Il complesso, oltre al polo teatrale, ospita un polo didattico i cui volumi sono ubicati nella manica sud-ovest su tre livelli fuori terra. Tale polo costituisce un'attività secondaria all'interno del progetto e non sarà oggetto di discussione del presente elaborato.



Pianta Piano Interrato



Pianta Piano Terra



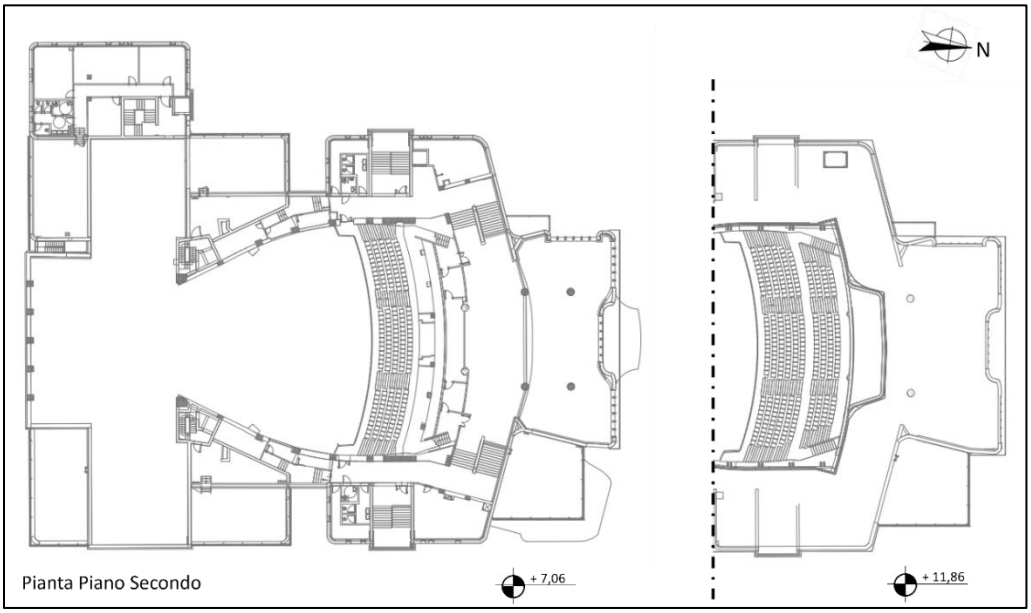


Figura 13. Piante edificio

Progettazione attività di pubblico spettacolo – RTV 15

L'edificio si configura come un Complesso Multisala costituito da un polo teatrale/cinematografico, un polo didattico/ludico/espositivo ed un polo dei servizi. L'oggetto di studio del presente elaborato è il solo polo teatrale, che è stato analizzato in fase di progettazione definitiva per individuare le più adeguate soluzioni per ognuna delle strategie antincendio indicate nel Codice di Prevenzione Incendi, utilizzando le sezioni G + S e la RTV 15 per le attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico.
In relazione alla tipologia di attività, alla capienza e alla superficie lorda in pianta, il nuovo Teatro è classificabile ai sensi dell'Allegato I del D.P.R. 151 del 2011, come:

- **Attività 65.2.C -** Locali di spettacolo e di trattenimento in genere, ~~impianti e centri sportivi, palestre~~, sia a carattere pubblico che privato, con capienza superiore a 100 persone, ovvero di superficie lorda in pianta al chiuso superiore a 200 mq.

Per quanto riguarda la determinazione dei profili di rischio per l'attività, l'edificio è classificato secondo un R_{vita} B2 considerando che gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con gli ambienti, un R_{beni} pari a 1 essendo l'edificio non classificato come "opera da costruzione vincolata" e neanche "strategica" e infine un $R_{ambiente}$ Non significativo. Di seguito si riporta una tabella di sintesi dei livelli di prestazione e tipologia di soluzione adottati per l'attività di pubblico spettacolo:

ATTIVITÀ 65.2.C - ATTIVITÀ DI PUBBLICO SPETTACOLO - RTO + RTV 15		
MISURA	LIVELLO DI PRESTAZIONE	TIPO DI SOLUZIONE
S.1. Reazione al fuoco	**III**	Conforme
S.2. Resistenza al fuoco	**III**	Conforme
S.3. Compartimentazione	**II**	Conforme
S.4. Esodo	**I**	Conforme
S.5. G.S.A.	**III**	Conforme
S.6. Controllo dell'incendio altri locali/aree TM2	**III/IV**	Conforme
S.7. Rivelazione e allarme	**IV**	Conforme
S.8. Controllo di fumi e calore	**III**	Alternativa
S.9. Operatività antincendio	**IV**	Conforme
S.10. Sicurezza impianti tecnologici	**I**	Conforme

Tabella 1. Livelli di prestazione

Per quanto riguarda la strategia S.3 si è scelto di compartimentare la Sala Rossa, il Foyer e i camerini nonostante la norma non richiedesse nessun requisito. Si è preferito adottare una separazione della sala verso gli spazi distributivi adiacenti con una compartimentazione multipiano, ammessa dal capitolo specifico, indipendentemente dalle quote dei piani accessibili al pubblico. Tutte le altre aree, come i camerini, magazzini, deposito locandine, control room e locali tecnici, sono di tipo protetto. Facendo un salto alla strategia S.6, la soluzione conforme per il livello di prestazione III prevede l'installazione di estintori e rete idranti a protezione dell'intera attività, eccetto il deposito locandine, il quale è classificato come area TM2 (area a rischio specifico), e per la quale la soluzione progettuale conforme per il livello di prestazione IV, oltre all'installazione dei presidi di protezione attiva appena elencati, prevede un impianto automatico di estinzione incendi che nel caso in esame è stato ipotizzato ad aerosol. In merito alla S.7 si è optato per un sistema di rivelazione incendi automatico esteso a tutta l'attività, adottando per le aree TO1 e TA1 (rispettivamente Sala Rossa - Foyer e camerini), anche la diffusione sonora EVAC.
Per quanto riguarda la **strategia S.8** l'obiettivo è normalmente quello di garantire il controllo, l'evacuazione o lo smaltimento dei prodotti della combustione in caso di incendio. Nel caso in questione si è previsto, in base al requisito minimo indicato dalla RTV 15, non solo lo smaltimento quanto piuttosto l'evacuazione di fumo e calore. Si specifica che nella tabella a pagina precedente è stato riportato il livello di prestazione III in soluzione alternativa riferito all'ambiente Sala Rossa, e verificata con simulazioni CFD, come si spiegherà nel seguito. Non essendo tecnicamente possibile garantire l'evacuazione fumo e calore in emergenza secondo la soluzione conforme, l'area di cui sopra, essendo la stessa parzialmente al di fuori del campo di applicazione delle UNI 9494:2017[10], è stata oggetto di soluzione alternativa tramite l'impiego dei metodi dell'Ingegneria Antincendio. In particolare:

- per la Sala Rossa è stato installato un impianto SENFC ibrido naturale/forzato con immissione aria di riscontro forzata.

I presidi per il controllo di fumo e calore si distinguono in base al livello di prestazione: per il Livello II si prevedono delle aperture di **smaltimento** di fumo e calore d'emergenza, mentre per il Livello III si richiedono dei sistemi (impianti) per l'**evacuazione** di fumo e calore (SEFC). Nel primo caso la funzione è quella di allontanamento (smaltimento) dei fumi e del calore durante le operazioni di estinzione dell'incendio da parte delle squadre di soccorso; invece, nel secondo caso la funzione è quella di garantire la formazione di un adeguato strato di aria indisturbata e libera dai fumi durante lo sviluppo dell'incendio. Così facendo mantengono le vie di esodo libere dai fumi, ritardano o impediscono il flashover, riducono gli effetti termici sulle strutture e le persone. Anche le modalità con cui i presidi si configurano all'interno del progetto/edificio si differenziano, infatti le aperture di smaltimento generalmente sono coincidenti con

[10] La UNI 9494:2017 si può usare sia per evacuazione (parte generale della norma) che per smaltimento (appendice G se si fa riferimento alla 9494-1:2017, appendice H se si fa riferimento alla 9494-2:2017).

quelle già ordinariamente disponibili per la funzionalità dell'attività (finestre, porte, lucernari apribili, ecc.) mentre nel caso in cui si ricade all'interno del livello di prestazione III, i sistemi (impianti) devono essere adeguatamente progettati secondo le norme di settore. Questi sistemi possono essere di tipo naturale (SENFC) o forzato (SEFFC).

L'evacuazione di fumo e calore per la Sala Rossa è stata progettata (ovvero configurata e dimensionata) mediante i metodi dell'ingegneria antincendio (FSE) perché la norma UNI 9494-1:2017 – *Sistemi per il controllo di fumo e calore – Parte 1: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Naturale di Fumo e Calore (SENFC)* avrebbe richiesto la realizzazione di "serbatoi di fumo" (compartimento a soffitto) confinati da velette fisse o mobili, che nel caso in esame risultava tecnicamente difficile data la presenza di impianti all'interno del controsoffitto con cui ci sarebbe creata interferenza.

Schema di un serbatoio di fumo (compartimento a soffitto) con le grandezze di riferimento per il calcolo

Legenda

1	Strato libero da fumo
2	Colonna di fumo
3	Strato di fumo
y	Altezza dello strato di aria libera da fumo in metri
h	Altezza del locale da proteggere in metri
h_b	Altezza della barriera al fumo in metri
z	Altezza dello strato di fumo (h – y) in metri

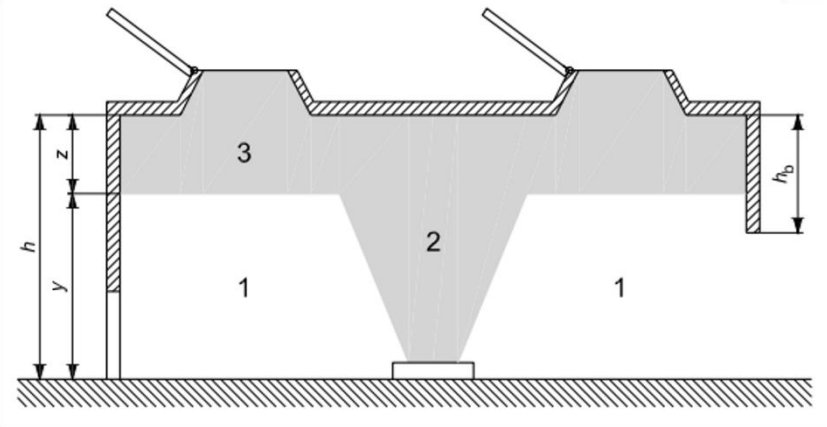


Figura 14. Schema di un serbatoio di fumo con compartimento a soffitto (UNI 9494:1-2017)

Dopo aver eseguito questa analisi preliminare è stato predisposto un sistema di evacuazione fumi e calore SENFC **ibrido** (naturale/forzato) costituito da serramenti apribili in copertura e immissori d'aria forzati installati in corrispondenza della platea. Si è quindi fatto ricorso agli strumenti della Fire Safety Engineering per dimostrare l'efficacia del sistema progettato e il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza per gli occupanti ed i soccorritori impiegando i metodi di cui al capitolo M.3.

Il resto dell'attività, ad esclusione del piano interrato non oggetto di discussione del presente elaborato, è stato progettato in soluzione conforme tramite dimensionamento delle aperture di smaltimento, selezionando gli infissi già presenti, secondo una modalità SEb e SEc da Codice di Prevenzione Incendi.

Per la progettazione del sistema di esodo si è fatto riferimento al capitolo S.4 del D.M. 3 agosto 2015, considerato che la RTV 15 non ha introdotto prescrizioni aggiuntive per le soluzioni conformi. Tra le procedure ammesse per l'esodo del Teatro, si è ritenuto adatto l'esodo simultaneo, livello di prestazione I, che prevede lo spostamento contemporaneo degli occupanti (autonomo o assistito) verso luogo sicuro. Il dimensionamento del sistema d'esodo dell'attività è stato svolto in funzione del profilo di rischio R_{vita} e dell'affollamento massimo teorico, il cui calcolo è riportato successivamente. Per un profilo di rischio R_{vita} pari a B2, il Codice indica la massima lunghezza di esodo percorribile non maggiore di 50 m mentre le larghezze minime delle vie orizzontali e verticali sono state verificate tenendo conto della larghezza unitaria (sempre in funzione del R_{vita}) e del numero di occupanti, assumendo in entrambi i casi una larghezza non inferiore a 1200 mm. Nell'ambito della progettazione del sistema d'esodo è stato dimensionato uno spazio calmo ove gli occupanti possano attendere e ricevere assistenza per completare l'esodo verso luogo sicuro: in progetto è stato previsto al secondo piano, nella zona antistante il vano scala, compartimentato rispetto agli ambiti adiacenti, di capienza tale da ospitare due occupanti su sedia a ruote. Il sistema d'esodo, come anticipato, è stato dimensionato tenendo in considerazione i dati principali indicati dal Codice: affollamento massimo teorico ed R_{vita}. Il calcolo dell'affollamento in un'attività dotata di un tale livello di complessità non è semplice: le commistioni di flussi di differente natura (pubblica, personale artistico/di scena, personale di servizio della struttura e personale ristorazione), nonché la complessità distributiva del Teatro, hanno reso complesso quantificare l'effettivo numero di occupanti, soprattutto in relazione alle aree effettivamente popolate dalla categoria di occupanti considerata. È proprio da questa considerazione che è stato determinato l'effettivo affollamento in relazione alla categoria di occupanti e agli ambienti popolati ai singoli piani della struttura. Di seguito si riportano le categorie di occupanti considerate durante la progettazione:

- CAT 1) Occupanti di sala e ambiti TO1 secondo la RTV 15;
- CAT 2) Personale di servizio del Teatro;
- CAT 3) Addetti di scena e personale artistico.

Si riportano, per completezza di informazione, i riferimenti utilizzati per il calcolo dell'affollamento:

- Sala: effettivi posti a sedere;
- Magazzini e depositi: ipotesi;
- Guardaroba: ipotesi;
- Camerini: 1,6 mq/p da Regolamento Comunale di Igiene;
- Cameroni, uffici, sala prove, studio registrazione: 0,4 p/mq da tabella S.4-12 del Codice.

In questo modo le presenze complessive, dettagliate in tabella, ammontano ad un totale di 1233 occupanti.

Ambito	Piano	Superficie locale [mq]	Densità di affollamento (Codice)	Riferimento esterno al Codice	Uscite/scale dedicate	Affollamento Massimo
SALE E ALTRE AREE TO1						
SALA ROSSA	P0	642,34	-	-	US 01 ÷ 08 US 16 - 17 US 27 - 28	693
	P1	124,64	-	-	SC 3 – 4	103
	P2	267,5	-	-	SC 3 - 4	382
AFFOLLAMENTO TOTALE						**1178**
PERSONALE DI SERVIZIO DEL TEATRO						
DEPOSITO LOCANDINE	P1	52,46	-	-	SC 4 - 5	2
UFFICIO	P2	48,9	0,4	-	SC 3	20
AFFOLLAMENTO TOTALE						**22**
ADDETTI DI SCENA E PERSONALE ARTISTICO						
LABORATORIO SARTORIA	P0	66,00	-	-	US 9	5
CAMERINI		15,07	-	1,6	US 18	9
GUARDAROBA		36,00	-	-	US 01 ÷ 08 US 27 - 28	2
AFFOLLAMENTO TOTALE						**16**
DEPOSITO	P1	67,83	-	-	SC 9	5
CAMERINI		16,46	-	1,6	SC 4 - 5	10
AFFOLLAMENTO TOTALE						**15**
GUARDAROBA	P2	36,00	-	-	SC 3	2
AFFOLLAMENTO TOTALE						**2**

Tabella 2. Calcolo affollamento massimo teorico per ambito

	CALCOLO COMPLESSIVO DEGLI OCCUPANTI				
	Sala Rossa	Personale di servizio del Teatro	Addetti di scena e personale artistico	Occupanti totali per piano	Occupanti totali
P0	693	-	16	709	1233
P1	103	2	15	120	
P2	382	20	2	404	

Tabella 3. Affollamento complessivo Teatro

Il lavoro di Tesi è stato quindi impostato per il passo successivo, ossia l'utilizzo dei modelli di calcolo.

4.1. Metodologia progettuale

Si è scelto di risolvere le criticità della strategia S.8 – Controllo di fumi e calore attraverso l'utilizzo di **soluzioni alternative** dimostrate per mezzo degli strumenti della Fire Safety Engineering. L'obiettivo è verificare il soddisfacimento delle soglie di prestazione equivalenti alle corrispondenti soluzioni conformi per la sicurezza degli occupanti e dei soccorritori.
Per questo, nei paragrafi che seguono, verrà percorsa la sezione M del Codice, per descrivere le soluzioni alternative selezionate e le loro modalità di verifica con gli strumenti di modellazione e i relativi software di simulazione fluidodinamica, specificando i dati di input utilizzati ed analizzando i risultati ottenuti relativamente a diversi scenari. Infine, verrà proposta una sovrapposizione dei dati di output dei modelli di incendio e di esodo, per comprendere i criteri con cui si riterranno soddisfatte le verifiche di sicurezza degli occupanti e dei soccorritori.

L'intera progettazione (architettonica, impiantistica e strutturale) è stata sviluppata completamente mediante la metodologia BIM per mezzo del software Autodesk Revit®. Questo ha permesso di ottenere un modello tridimensionale ricco di informazioni geometrico-spaziali di supporto alle simulazioni di incendio e di esodo, sviluppate con specifici modelli di calcolo tra loro interoperabili.

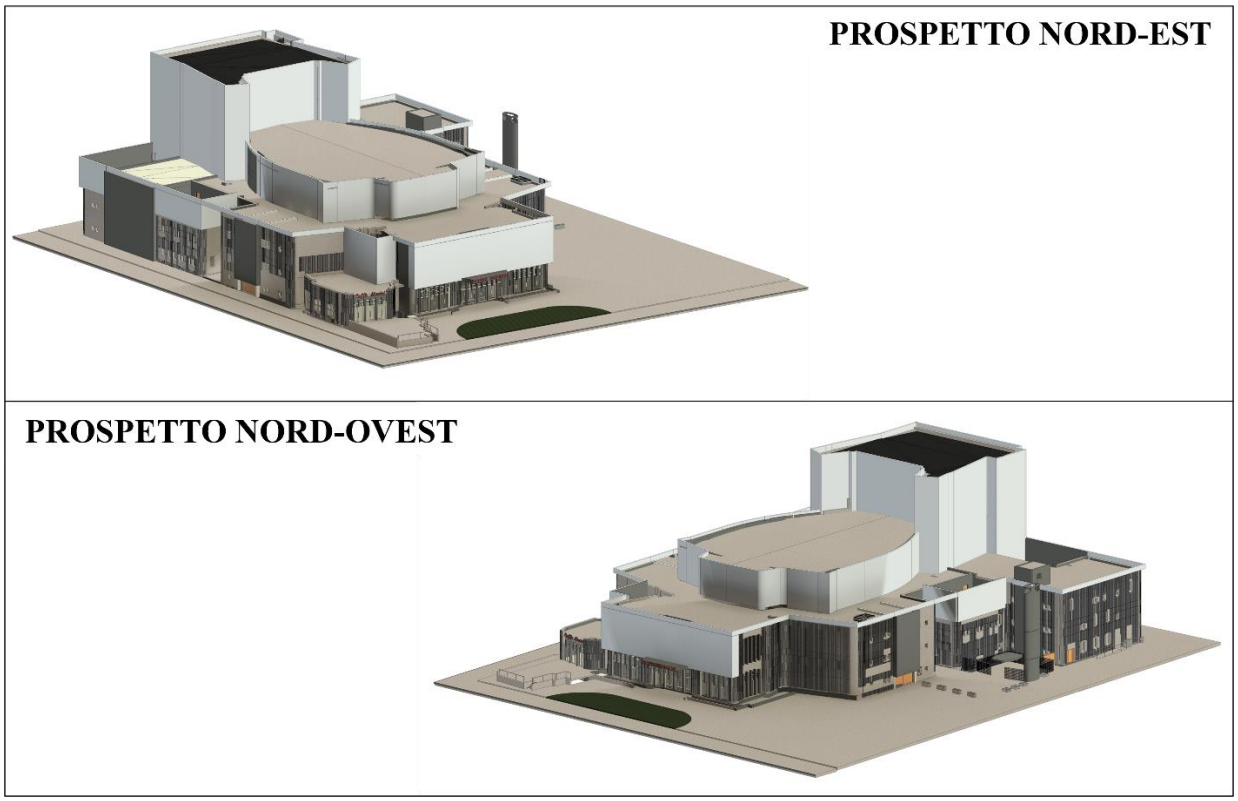


Figura 15. Modello 3D - Autodesk Revit®

In particolare, per lo sviluppo delle simulazioni di incendio è stato utilizzato un modello di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD), il Fire Dynamics Simulator (FDS), elaborato dai ricercatori del National Institute of Standards and Technology (NIST). Il software PyroSim® della Thunderhead Engineering è l'interfaccia grafica per FDS. Attraverso questi modelli è possibile prevedere la presenza e la movimentazione dei fumi, quantificare la temperatura raggiunta, valutare l'esposizione ad agenti tossici o nocivi, ecc. Si dimostrano supporti validi alla progettazione nell'ottica della prevenzione incendi: i risultati delle simulazioni vengono utilizzati per validare la sicurezza degli edifici prima ancora che essi siano costruiti o se siano già esistenti, oppure permettono di ricostruire le dinamiche di un incendio avvenuto per le indagini successive agli incidenti. Per quanto riguarda le simulazioni di esodo sono state condotte attraverso il software Pathfinder® della Thunderhead Engineering, il quale utilizza un modello agent-based (ABM). È costituito principalmente da tre moduli: un'interfaccia grafica, un simulatore e un visualizzatore tridimensionale per gli output. Con il software è possibile simulare il movimento degli occupanti, oltre a valutare comportamenti complessi e interazioni tra gli stessi. Anche in questo caso la modellazione si rivela uno strumento potente di pianificazione delle dinamiche di evacuazione di un ambiente, permettendo ai progettisti di valutare la progettazione dell'esodo tramite i tempi di uscita nei diversi scenari ipotizzati.

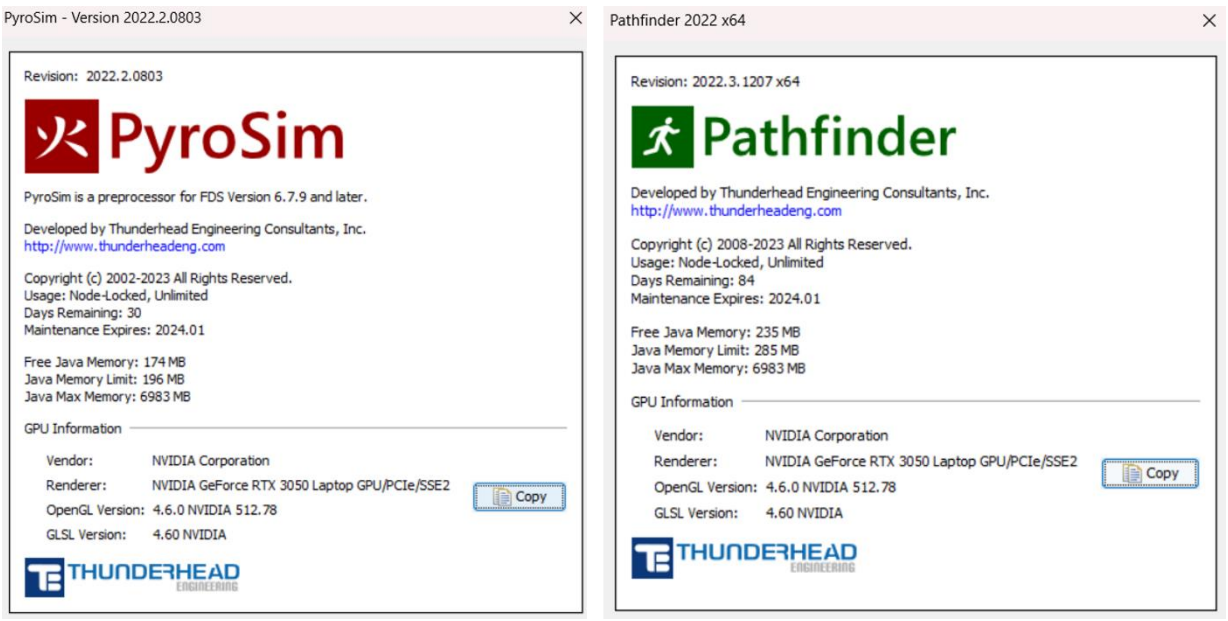


Figura 16. Software utilizzati per le modellazioni di incendio e di esodo

Prima fase: analisi preliminare

Nella prima fase di progetto sono state individuate le condizioni di rischio più rappresentative per l'attività, individuando gli scenari di incendio e le soglie di prestazione rispetto alle quali sono state eseguite le verifiche con riferimento agli obiettivi di sicurezza prefissati.

Definizione del progetto

Il caso in esame è relativo al locale di pubblico spettacolo sin qui trattato in soluzione conforme con l'approccio semi-prescrittivo. Aspetti che necessitano di ulteriore dettaglio hanno riguardato i sistemi di evacuazione fumo e calore. La soluzione alternativa è nata dall'impossibilità di disporre compartimenti a soffitto e dalla necessità di disporre aperture di smaltimento collocate a soffitto uniformemente distribuite. Per quanto riguarda i pericoli di incendio, le caratteristiche dell'attività e degli occupanti, resta valido quanto detto nei paragrafi iniziali del presente documento. Nello specifico, rimandando ad ulteriori specificazioni nei paragrafi che seguono, sono stati considerati utenti standard e utenti con disabilità motoria nel rispetto del principio dell'inclusività e per tener conto della variabilità umana che può essere riscontrata soprattutto in un'attività aperta al pubblico.

Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio

Nella definizione del progetto, ci si è posti come obiettivi primari la salvaguardia della vita degli occupanti e dei soccorritori.

Definizione delle soglie di prestazione

Con l'obiettivo primario definito al punto precedente, i parametri significativi sono quelli che agiscono sull'incapacitazione, ossia sull'impossibilità degli occupanti di mettersi in salvo autonomamente; pertanto, si sono identificate come soglie di prestazione quelle relative alla sicurezza degli occupanti e dei soccorritori, ovvero la **visibilità**, la **tossicità** e gli **effetti termici**. Queste soglie sono state utili nel seguito perché hanno permesso di verificare l'efficacia delle soluzioni progettuali individuate in quanto utilizzate come valori target che i dati di output non avrebbero dovuto superare (in eccesso o in difetto in base al parametro analizzato).

Le soglie di prestazione per la sicurezza degli occupanti sono state verificate al tempo RSET + t_{marg}, ai fini della verifica ASET > RSET + t_{marg}.

Per quanto riguarda i soccorritori si intendono sia gli operatori VVF che i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree e ad operare in condizioni di scarsa visibilità. Avendo considerato l'annuario statistico dei VVF del 2022 (dati del 2021), il tempo medio di arrivo delle squadre di soccorso per la provincia

considerata è pari a 13,8 minuti e le verifiche sono state condotte a 18 minuti, considerando 5 minuti dopo il termine delle operazioni previste per i soccorritori o l'arrivo delle squadre dei VVF presso l'attività.
Si riportano di seguito due estratti dal Codice di Prevenzione Incendi, rispettivamente ai paragrafi M.3.5 e M.2.5: un esempio di soglie di prestazioni impiegabili con il metodo di calcolo avanzato e la durata minima degli scenari di incendio.

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, *fractional effective dose* e FEC, *fractional effective concentration* 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.			

Obiettivo di sicurezza antincendio	Durata minima degli scenari di incendio di progetto
Salvaguardia della vita degli occupanti	Dall'evento iniziatore fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'attività raggiungono o permangono in un luogo sicuro. Se il luogo sicuro è prossimo o interno all'opera da costruzione, devono essere valutate eventuali interazioni tra il mantenimento della capacità portante dell'opera da costruzione ed il luogo sicuro.
Salvaguardia della vita dei soccorritori	Dall'evento iniziatore fino a 5 minuti dopo il termine delle operazioni previste per i soccorritori o l'arrivo delle squadre dei Vigili del fuoco presso l'attività. Il tempo di riferimento per l'arrivo dei Vigili del fuoco può essere assunto pari alla media dei tempi d'arrivo desunti dall'*Annuario statistico dei Vigili del fuoco* (http://www.vigilfuoco.it), considerando i dati dell'ultimo anno disponibile, riferiti all'ambito provinciale.
Mantenimento della capacità portante in caso d'incendio	Dall'evento iniziatore fino all'arresto dell'analisi strutturale, in fase di raffreddamento, al momento in cui gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti

Figura 17. Esempio di soglie di prestazioni impiegabili con il metodo di calcolo avanzato
Durata minima degli scenari di incendio
(Codice di Prevenzione Incendi)

Individuazione degli scenari di incendio di progetto

Secondo la definizione del Codice, gli scenari di incendio *rappresentano la schematizzazione dei più gravosi eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività*. La modalità di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari, pur se inserita nella fase preliminare, è in realtà trattata nel capitolo M.2. La procedura, che verrà affrontata nei paragrafi che seguono, prevede di identificare gli scenari di incendio che possono verificarsi nelle condizioni di esercizio dell'attività e tra questi scegliere i più gravosi (in termini di effetti) e i più probabili. Tale operazione, che porta alla selezione degli scenari di incendio di progetto, ha avuto l'obiettivo di ridurre al minimo il numero di situazioni da analizzare nella successiva fase di quantificazione, così da ottimizzare tempi e costi della progettazione. Sulla base di questi scenari di progetto sono state valutate le soluzioni progettuali elaborate per eseguire le verifiche delle soglie di prestazione.

Seconda fase: analisi quantitativa

Terminata la fase preliminare, è stata avviata la fase successiva che consiste nella quantificazione degli effetti dell'incendio in relazione agli obiettivi assunti per mezzo dei modelli di calcolo selezionati, già anticipati al paragrafo precedente. Al termine si sono confrontati i risultati con le soglie di prestazione individuate e si sono selezionate le soluzioni progettuali che rispettano tali soglie.

Scenari di incendio per la progettazione prestazionale

Prima di elaborare qualsiasi soluzione progettuale, è stata effettuata una simulazione di incendio con il focolare localizzato in una posizione sfavorita dal punto di vista dello smaltimento dei fumi, ossia nella mezzeria della fossa d'orchestra. Tale scenario è stato codificato TEATRO - 1 ed è risultato utile per comprendere l'andamento dei fumi (maggiori responsabili dell'incapacitazione degli occupanti e ovviamente connessi con la progettazione dei sistemi di smaltimento) e quindi individuare le posizioni dei serramenti apribili in copertura.

Dalle analisi effettuate è emerso in particolare che i fumi si diffondessero nella parte superiore della sala, lambendo la superficie della copertura, fino ad occupare la parte alta del volume interno e localizzarsi soprattutto nelle zone della seconda galleria gradonata per poi propagarsi, in alcuni scenari, all'interno della torre scenica.

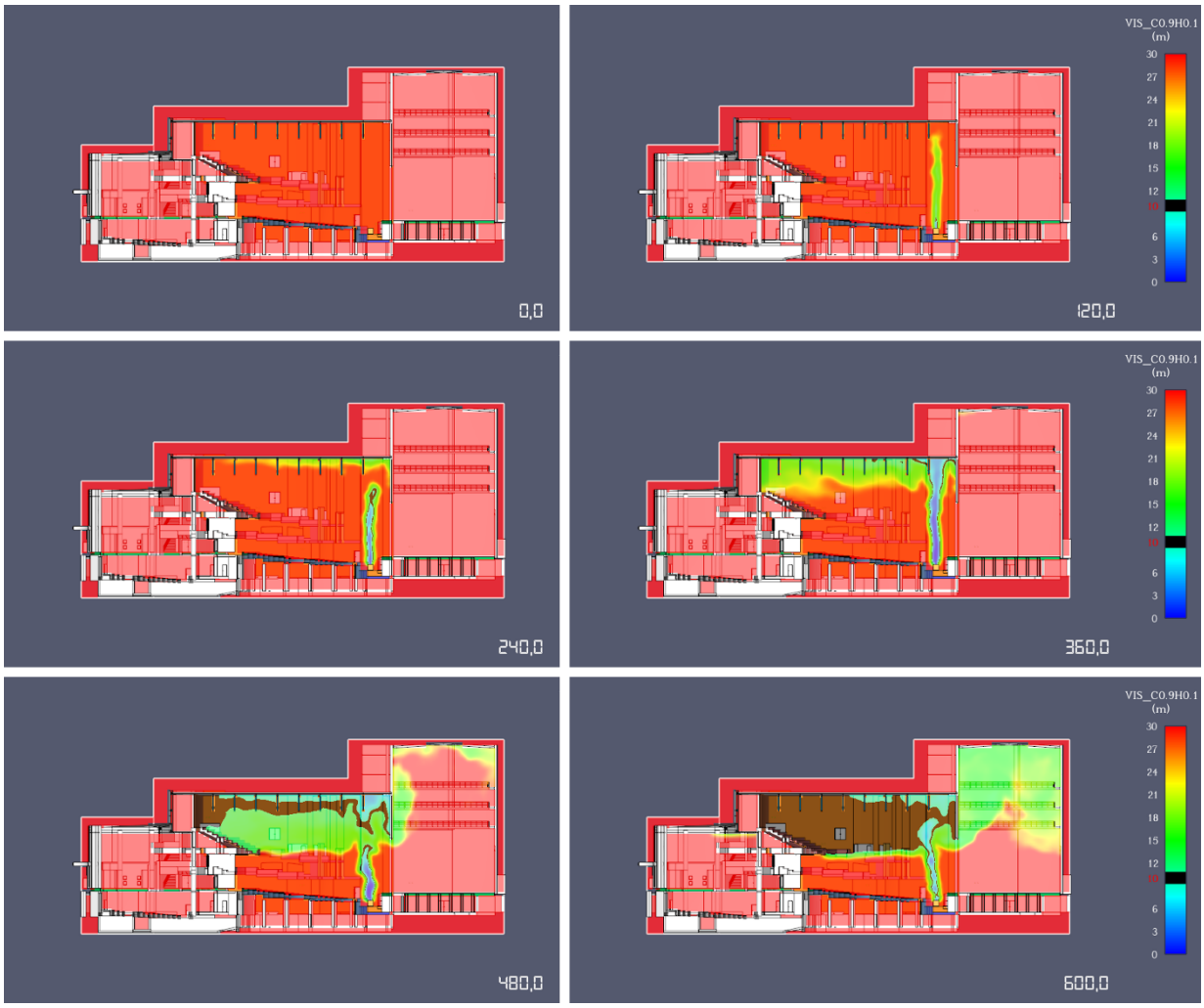


Figura 18. Distribuzione della visibilità lungo il focolaio – Prima configurazione TEATRO - 1

Dalle evidenze delle analisi ed in base ai vincoli architettonici dovuti all'attività teatrale, ovvero l'esigenza di realizzare forometrie che non interferissero con le luci interne della sala, si è scelto di optare inizialmente per n. 10 evacuatori naturali di fumo e calore (ENFC) da 1 m^2, disposti simmetricamente lungo l'asse longitudinale della copertura, con una concentrazione maggiore dei lucernari in prossimità della zona interessata dai prodotti della combustione, ovvero la seconda galleria gradonata. Con questa soluzione progettuale è stato riproposto lo stesso scenario con focolare al centro della fossa d'orchestra (codificato come TEATRO - X1) e i risultati ottenuti sono risultati analoghi al caso precedente sia per direzione che per rapidità di propagazione dei fumi.

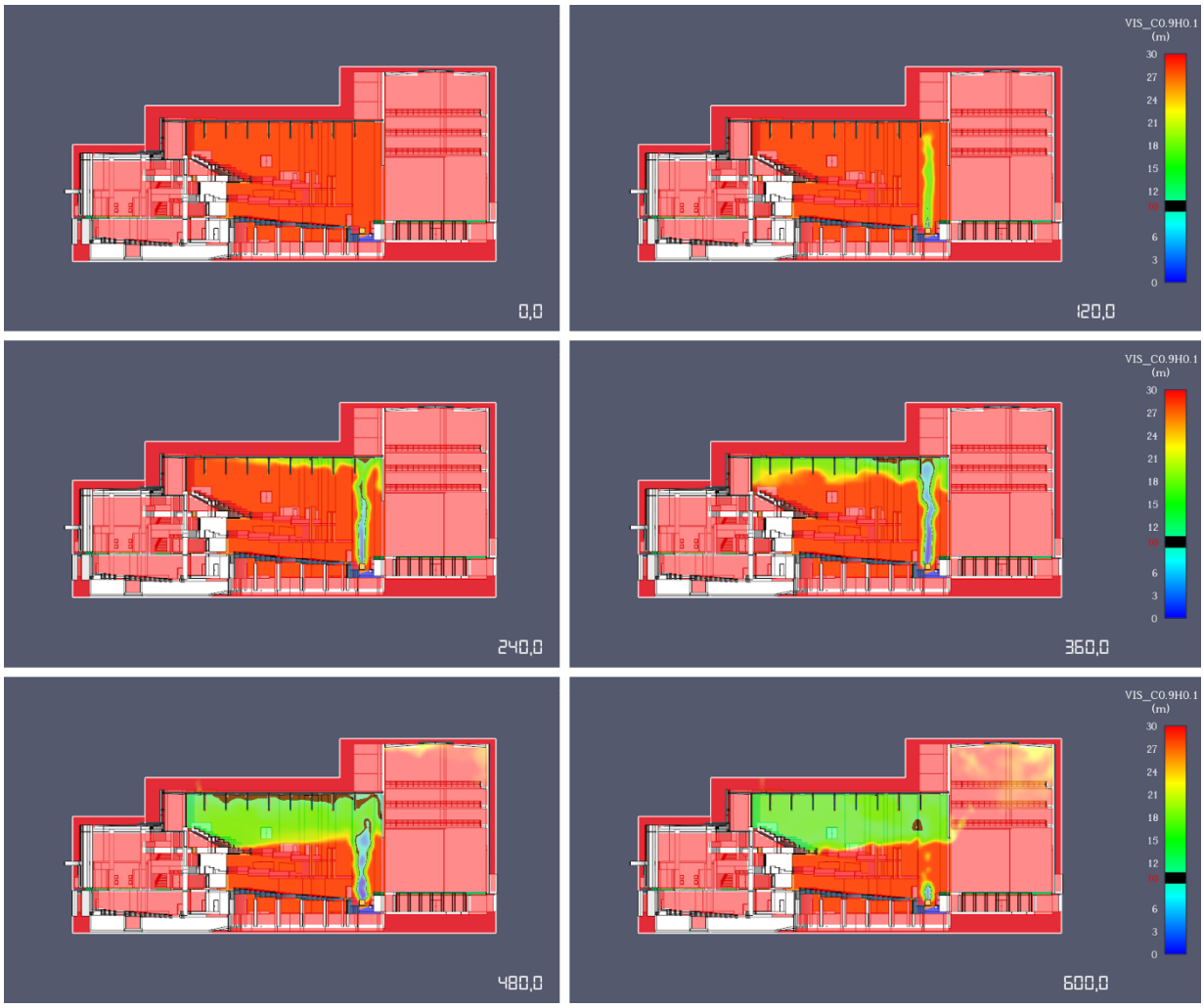


Figura 19. Distribuzione della visibilità lungo il focolaio – seconda configurazione TEATRO - X1

Il confronto dei risultati grafici delle due simulazioni mette in chiaro un leggero miglioramento a partire da 360 s circa, istante in cui lo strato libero dai fumi è di poco superiore rispetto alla configurazione iniziale, con una successiva, ma meno impattante, propagazione degli stessi verso la seconda galleria gradonata.

Alla luce dei risultati poco positivi ottenuti dalle simulazioni precedenti, si è proceduto analizzando ulteriormente le zone di concentrazione dei fumi per poter elaborare altre soluzioni progettuali ed individuare scenari differenti ma ugualmente gravosi per la sicurezza sia degli occupanti che dei soccorritori. Infatti, sono state scelte le vie di esodo, le zone antistanti le uscite di sicurezza e le gallerie gradonate. In particolare, sono stati individuati cinque scenari di incendio la cui analisi è risultata importante per dimostrare il raggiungimento degli obiettivi primari. Allo stesso tempo, avendo verificato che le due soluzioni progettuali inizialmente scelte non erano idonee a soddisfare gli obiettivi di sicurezza, è stato scelto di incrementare il numero degli evacuatori presenti in copertura, dimensionati allo stesso modo e concentrati al di sopra della seconda galleria gradonata, per un totale di 16 ENFC da 1 m^2. Si è prevista anche l'installazione di un impianto di immissione forzata aria, con n. 4 bocchette da 1 m^2 e vel. 1 m/s ovvero una portata di 14.400 m^3/h. Queste soluzioni progettuali sono state verificate per gli scenari di progetto illustrati ai paragrafi successivi.

4.2. Modellazione di incendio

Per procedere con le modellazioni di incendio sono stati individuati cinque scenari seguendo le indicazioni del capitolo M.2 del Codice, ipotizzando, tramite un'attenta valutazione del rischio, le configurazioni più critiche del focolaio. A supporto di questa fase preliminare è stato consultato un report[11] elaborato da un gruppo studio e ricerca, il quale si è proposto come finalità quello di analizzare gli incendi di grande rilevanza nelle *attività civili* che si sono verificati per il periodo 1990-2001. In particolare, si è riscontrato che gli incendi avvenuti all'interno dei teatri sono pari 14%, numero che si può attribuire alle principali cause d'innesco, ovvero: dolosa (presunta da un primo accertamento), elettrica, altre cause (accidentali, incendi dovuti ad impianti, ad esplosioni, ecc.), non determinata. I dati sono stati elaborati in tabelle e diagrammi, di seguito riportati, estratti dal medesimo documento:

1991	Bari	Teatro "Petruzzelli"	Incendio doloso*	
	Arezzo	Discoteca "Principe"	Esplosione per fuga gas	28 feriti 1 morto
1992	Milano	Fiera	Incendio cabina elettrica	2 intossicati
1993	Foggia	Discoteca "Divina Club"	Incendio	1 Morto
	Forlì	Ex Discoteca	Incendio	1 Morto
1996	Caserta	Discoteca dell' "Hotel Reggia Palace"	Incendio	Personale VV.F. intossicato
	Taranto	Auditorium presso Parrocchia S. Antonio	Incendio	1 Ferito
	Milano	Teatro "Angelicum"	Incendio deposito	1 Vigile ferito lievemente
	Venezia	Teatro "La Fenice"	Incendio doloso *	
1999	Biella	Locale notturno	Incendio	1 Morto

Figura 20. Elenco incendi di grande rilevanza nei locali di pubblico spettacolo

[11] D'Addato M. – Dirigente del progetto di ricerca: *Studio degli incendi di grande rilevanza verificatisi nelle scuole, centri commerciali, attività alberghiere e di pubblico spettacolo finalizzato all'individuazione delle cause e degli effetti*

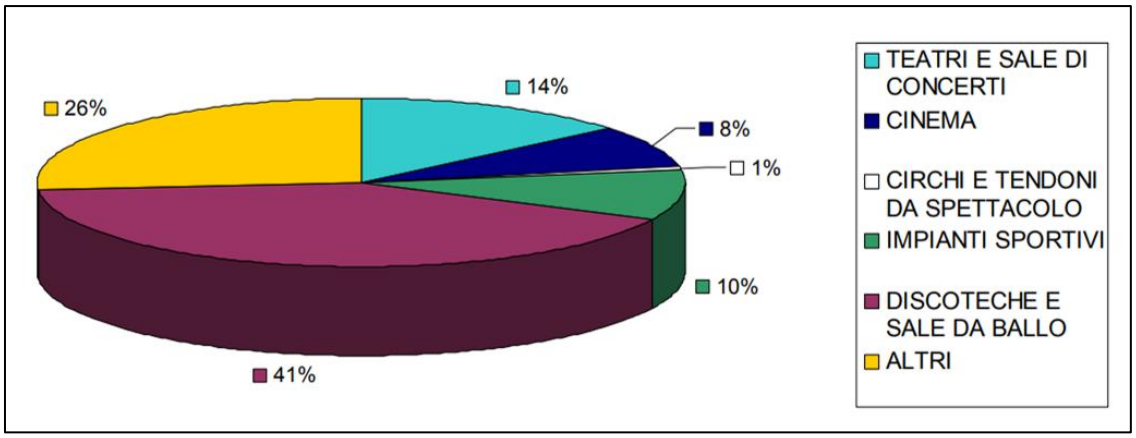


Figura 21. Andamento degli incendi di grande rilevanza nei locali di pubblico spettacolo

Per individuare l'**area di innesco** dell'incendio, è stata considerata come plausibile quella delle "aree comuni". La posizione del focolaio, dettagliata successivamente, è stata pertanto individuata in base alle peggiori conseguenze che si possono ipotizzare per ciascuna posizione, per cui sono stati modellati i seguenti scenari:

- in corrispondenza delle vie di esodo;
- in corrispondenza delle posizioni laterali del compartimento;
- a varie quote altimetriche della Sala Rossa multipiano;

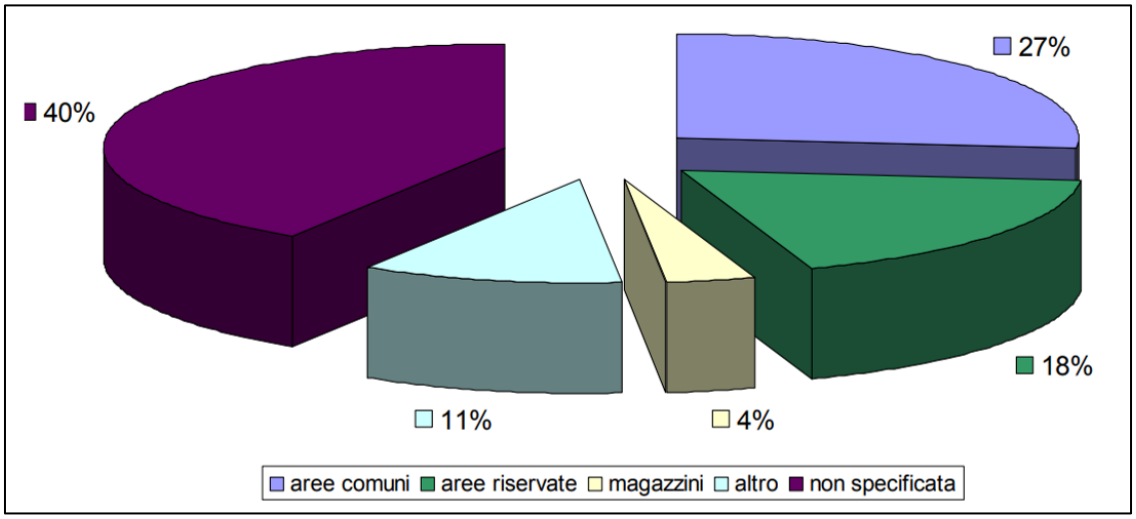


Figura 22. Aree d'innesco degli incendi di grande rilevanza nei locali di pubblico spettacolo

Per quanto riguarda la **causa di innesco**, sebbene quella che presenta una percentuale maggiore è imputabile ad "atti dolosi", la scelta è ricaduta su *incendi di natura elettrica* con conseguente propagazione al resto dei materiali combustibili presenti, come elementi di allestimento o di arredo.

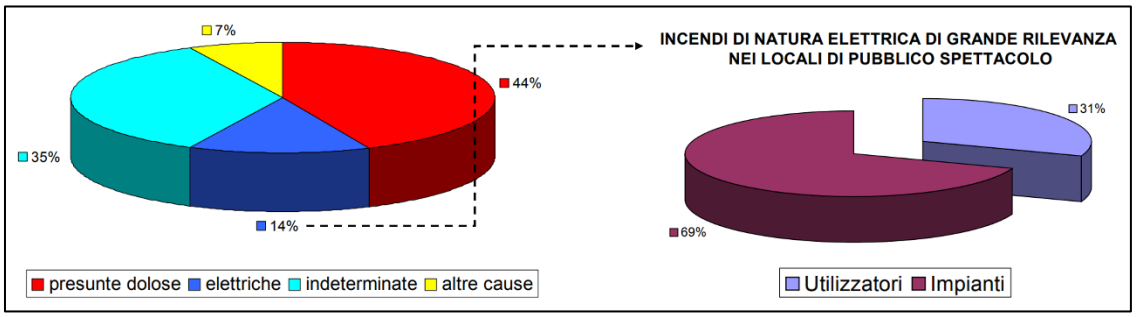


Figura 23. Cause degli incendi di grande rilevanza nei locali di pubblico spettacolo

Terminate le indagini, sono stati definiti i seguenti scenari di incendio, così richiamati all'interno dell'elaborato:

1. Scenario TEATRO - A1
2. Scenario TEATRO - B1
3. Scenario TEATRO - D1
4. Scenario TEATRO - F1
5. Scenario TEATRO - G1

È stato quindi avviato il processo di esportazione del modello BIM dal software Autodesk Revit® e successiva importazione in PyroSim®. Il tutto grazie al formato di scambio IFC fondamentale per lo sviluppo della simulazione. Questa procedura ha permesso di rispettare lo stato attuale del progetto, riportando tutti gli elementi strutturali principali e secondari, le divisioni interne e le volumetrie.

Figura 24. Interoperabilità BIM – FDS - PyroSim®

Una volta avviata l'interfaccia grafica PyroSim® per FDS, si è definito un dominio di calcolo. Il dominio di calcolo racchiude l'intera attività analizzata dalla specifica simulazione di incendio. Viene quindi realizzata una **mesh**, dove l'ambiente viene suddiviso in un numero elevato di celle tridimensionali di forma parallelepipeda: l'evoluzione di una simulazione si traduce nella risoluzione all'interno di ciascuna di esse delle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. In generale, le analisi di sensibilità per definire la corretta dimensione della cella consistono nel creare un file di input in FDS usando una mesh relativamente grossolana, e quindi affinarla gradualmente finché non si notano differenze apprezzabili nei risultati. Il punto di equilibrio si raggiunge quando i risultati dell'ultimo calcolo sono molto vicini con quelli del calcolo precedente, ottenuti con la mesh leggermente più grande, e il costo del calcolo, in termini di tempo, si ritiene accettabile. Risulta chiaro che la definizione delle celle è una fase delicata e dovrà essere calibrata sui risultati che il progettista intende raggiungere. È ovvio che l'infittimento delle celle richiede un elevato onere computazionale, ma al tempo stesso offre risultati più accurati e dettagliati. È quindi fondamentale trovare il giusto compromesso tra i tempi e la precisione, in funzione degli obiettivi.

Il progetto in esame, per via delle altezze variabili, ha dettato la necessità di realizzare cinque mesh multiple estese allo spazio strettamente necessario ad includere l'ingombro del polo teatrale. Le mesh sono state allineate secondo un *criterio ideale* per evitare l'insorgere di errori o approssimazioni che avrebbero potuto compromettere l'attendibilità dei risultati. Le griglie sono state realizzate con celle di dimensioni medie, pari a 0,5 x 0,5 x 0,5 m, tenendo conto della configurazione degli spazi e degli obiettivi di sicurezza degli occupanti, i quali richiedono una discretizzazione importante per la valutazione degli effetti termici e visibilità. Si specifica che le mesh utilizzate sono identiche per tutti gli scenari.

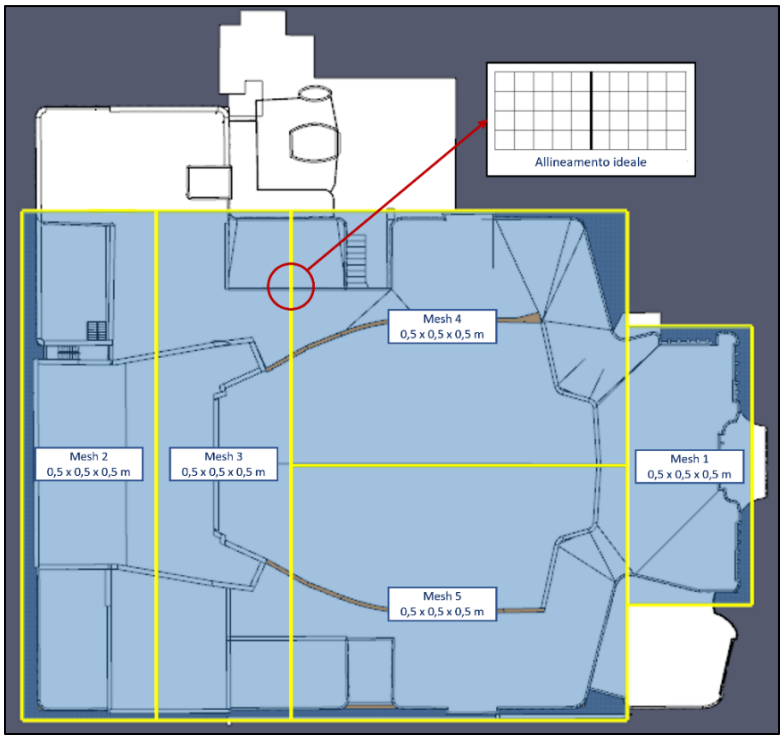


Figura 25. Definizione mesh

Nella definizione della mesh di calcolo è importante il comando *Open Mesh Boundaries* attraverso il quale si creano delle superfici di ventilazione sul confine esterno della mesh (ad eccezione della superficie di base che rappresenta il piano di calpestio) per simulare gli scambi di energia e massa con l'esterno: il tutto per rendere la simulazione il più realistica possibile. Nella seguente immagine le superfici "Vents", relative alla mesh 04, sono raffigurate tramite un retino puntinato.

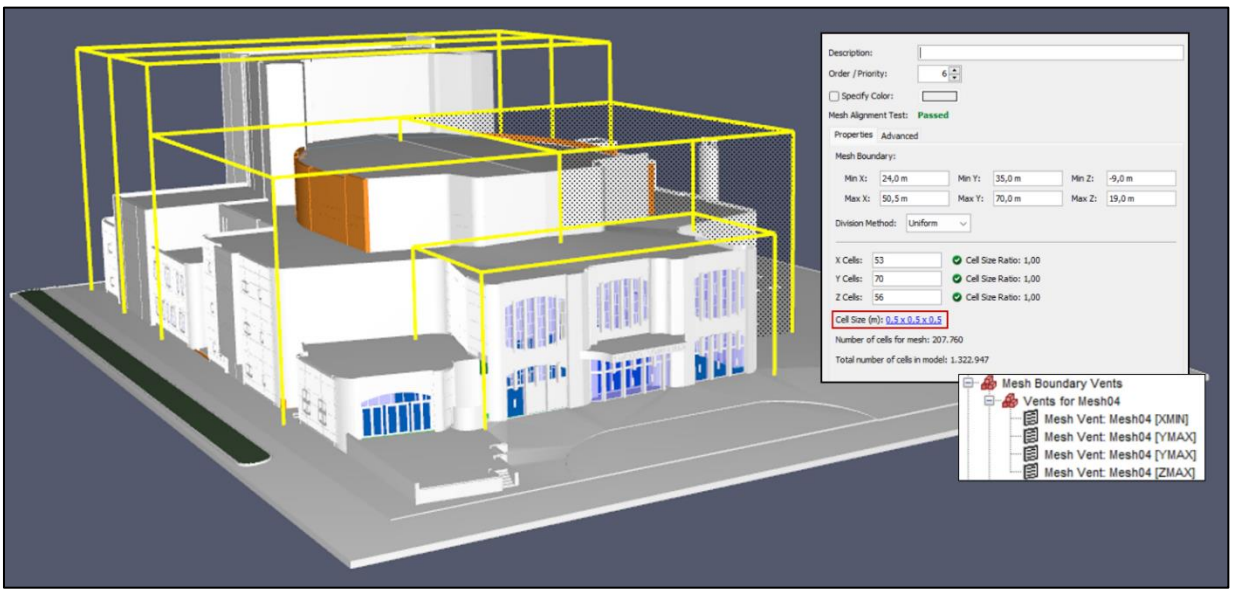


Figura 26. Rappresentazione tridimensionale delle mesh di calcolo di FDS

Il passo successivo consiste nella definizione delle geometrie di dettaglio che nel caso in esame sono rappresentate dalle **aperture di smaltimento a soffitto**. Queste sono state realizzate con il comando *Draw a Block Hole*, dimensionandole come definito nei paragrafi precedenti. Aspetto importante riguarda il posizionamento delle forometrie: queste devono essere il più possibile concordi con le celle della mesh e non devono attraversarle lungo il perimetro. Infatti, durante la simulazione il software approssima le geometrie alle celle più vicine e le riposiziona per agevolare i calcoli, di conseguenza una collocazione poco attenta delle aperture, avrebbe potuto compromettere o falsare i risultati.

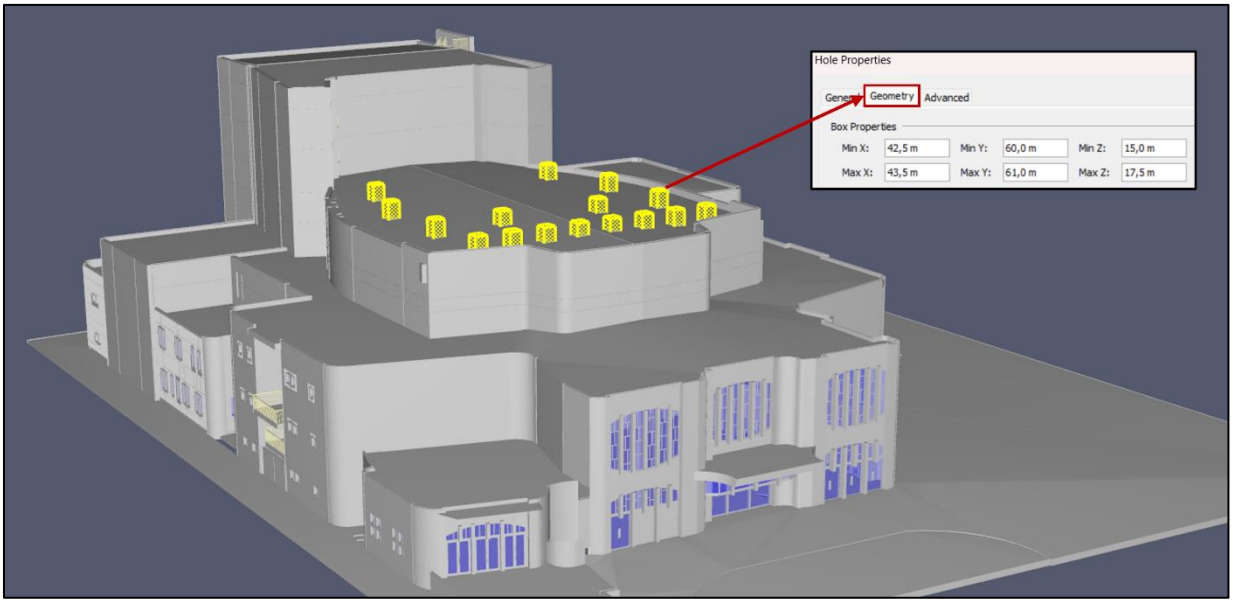


Figura 27. Posizionamento delle aperture di smaltimento a soffitto

La fase successiva è rappresentata dalla caratterizzazione dei focolari in termini di reazione, combustione, prodotti e potenza sprigionata. Come anticipato precedentemente, la causa d'innesco degli incendi simulati all'interno del presente caso studio è associata a fenomeni di natura elettrica. Per comprendere meglio le dinamiche con cui si sviluppa un evento di questa tipologia è stato consultato un documento predisposto dal Nucleo Investigativo Antincendi Nazionale dei Vigili del Fuoco, secondo cui è stato riscontrato che il movimento dell'elettricità all'interno di un circuito elettrico o attraverso un materiale conduttivo genera calore provocando un aumento della temperatura dei componenti. Alla luce di questa premessa, la definizione di "incendio di natura o di origine elettrica" mutuata dal mondo anglosassone, è impropria e, talvolta, può risultare fuorviante: la dicitura più corretta è quella di "**incendio innescato da fenomeni termici associati all'energia elettrica**", pertanto, quando si verifica un evento di questo tipo, si dovrebbe fare riferimento ai casi in cui avarie o malfunzionamenti dei componenti elettrici generano dei fenomeni di surriscaldamento con la conseguente accensione e combustione del materiale isolante presente negli impianti. Tra le cause principali potenzialmente in grado di creare le condizioni per l'innesco elettrico di un incendio, solo per citarne alcune, rientrano: il sovraccarico (condizione anomala di funzionamento che si verifica in un circuito elettricamente sano e che può portare, nel tempo, a cortocircuiti e dispersioni); i

guasti di isolamento (degrado del materiale isolante, dovuto ad abrasioni, effetti ambientali, danni meccanici, surriscaldamento, ecc.); i guasti ai terminali di collegamento e i guasti ai conduttori (le rotture sono imputabili per lo più a vibrazioni, tipiche al di sopra di un palcoscenico, per esempio; a eccessive sollecitazioni meccaniche o all'impiego di materiale per la loro produzione qualitativamente al di sotto dello standard previsto).

Definite le cause principali, sono state individuate le sorgenti di pericolo, come gli impianti elettrici utilizzatori, quindi l'insieme di tutti i circuiti di alimentazione e gli apparecchi elettrici utilizzatori, ossia qualsiasi tipo di apparecchio alimentato elettricamente, come i cavi e le spine di alimentazione e i dispositivi di illuminazione dei corridoi, delle scale e del pavimento (fossa d'orchestra, vie di esodo e platea).

Sono state allora effettuate alcune ricerche circa i materiali che più frequentemente vengono utilizzati per la realizzazione dell'isolante di cui è rivestito il conduttore e dei fari di illuminazione, come i faretti segnapassi. In particolare, è stato riscontrato che per il primo vi sono combinazioni di cloruro di polivinile (PVC) e polietilene (PE); per i fari, classificati IP20 (grado di protezione per interni), viene impiegato il polimetilmetacrilato (PMMA). Si è fatto quindi ricorso al SFPE Handbook of Fire Protection Engineering per valutare quale materiale scegliere come rappresentativo delle reazioni di combustione, sulla base della quantità di prodotti rilasciati. Tra tutti è stato quindi selezionato il polimetilmetacrilato, con produzione (Y_{soot}) pari a 0,06 (valore superiore rispetto al corrispettivo del materiale, utile per ottenere risultati a favore di sicurezza). Individuati il materiale principale e i prodotti, è stata impostata la corrispondente reazione di combustione nel software.

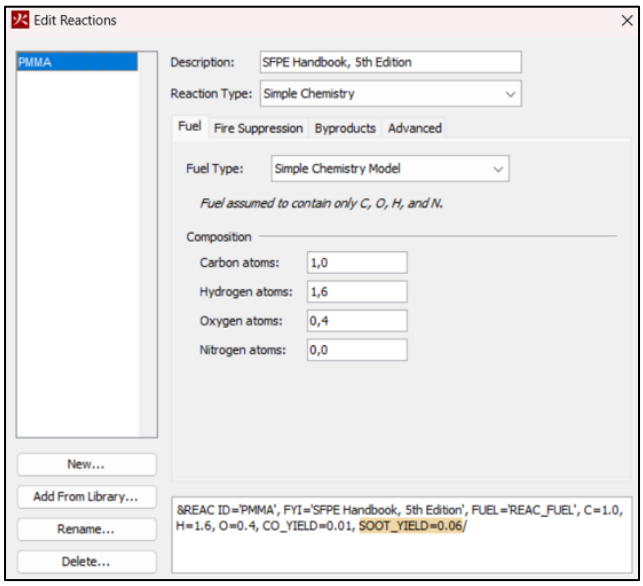


Figura 28. Reazione di combustione - PyroSim®

Table A.39 Yields of fire products and chemical, convective, and radiative heats of combustion for well-ventilated fires[a] [15]

Material	ΔH_T (kJ/g)	y_{CO_2} (g/g)	y_{CO} (g/g)	y_{ch} (g/g)	y_S (g/g)	ΔH_{ch} (kJ/g)	ΔH_{con} (kJ/g)	ΔH_{rad} (kJ/g)
PMMA	25.2	2.12	0.010	0.001	0.022	24.2	16.6	7.6
PE	43.6	2.76	0.024	0.007	0.060	38.4	21.8	16.6

Table A.39 (continued)

Material	ΔH_T (kJ/g)	y_{CO_2} (g/g)	y_{CO} (g/g)	y_{ch} (g/g)	y_S (g/g)	ΔH_{ch} (kJ/g)	ΔH_{con} (kJ/g)	ΔH_{rad} (kJ/g)
Phenolic foams								
1[b]	–	–	–	–	0.002	10.0	–	–
2[b]	–	–	–	–	–	10.0	–	–
Halogenated materials (abbreviations/names in the nomenclature)								
Polyethylene with								
25 % chlorine	31.6	1.71	0.042	0.016	0.115	22.6	10.0	12.6
36 % chlorine	26.3	0.83	0.051	0.017	0.139	10.6	6.4	4.2
48 % chlorine	20.6	0.59	0.049	0.015	0.134	7.2	3.9	3.3
PVC	16.4	0.46	0.063	0.023	0.172	5.7	3.1	2.6
PVC-1[b] (LOI = 0.50)	–	–	–	–	0.098	7.7	–	–
PVC-2[b] (LOI = 0.50)	–	–	–	–	0.076	8.3	–	–

Figura 29. Prodotti della combustione - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

L'ultimo parametro necessario per definire completamente le reazioni è rappresentato dalla curva potenza-tempo (curva RHR – Rate Heat Release). Per tutti gli scenari è stata desunta dal Codice, utilizzando come riferimento la *Tabella G.3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio*, rielaborata per l'importazione nel modello di incendio. La curva utilizzata tiene conto del caso peggiore in riferimento ai materiali presenti all'interno del compartimento in analisi, infatti, nella definizione del focolaio sono ricompresi tutti quei materiali combustibili presenti nella sala e coinvolti nella combustione dopo il primo innesco di incendio. La combustione concatenata di questi elementi è stata schematizzata da una curva di rilascio termico medio RHR con velocità di crescita **media**, ovvero un rilascio termico pari a 1 MW dopo circa 300 secondi. Sono stati quindi importati in PyroSim® i dati numerici elaborati dalla ricostruzione della curva per attribuirli alla superficie creata ad hoc da associare al focolaio. Per il focolaio è stato inserito il valore del Heat Release Rate Per Area (HRRPUA) tenendo conto del successivo dimensionamento. Il software, infatti, richiede che la potenza di picco venga rapportata all'area della superficie del focolaio che verrà utilizzata come *burner* e di rapportare tutte le altre potenze che rappresentano l'andamento nel tempo, alla potenza massima. Nel caso studio analizzato, la potenza di picco pari a 2000 kW è stata rapportata ad una superficie di 1 m^2.

Il successivo punto ha riguardato la creazione di un elemento di forma cubica per riprodurre i focolari. La superficie superiore è stata realizzata con il comando *Draw a Block Obstruction* e dimensionata secondo quanto detto prima: ad ogni superficie *burner* è stata quindi associata la curva RHR. Tutte le altre superfici sono state caratterizzate come inerti, in quanto si è voluta indagare la dinamica dell'incendio e la diffusione dei prodotti della combustione, non l'irraggiamento orizzontale verso altri bersagli (aspetto che si sarebbe potuto analizzare associando il *burner* a tutte le superfici dell'elemento).

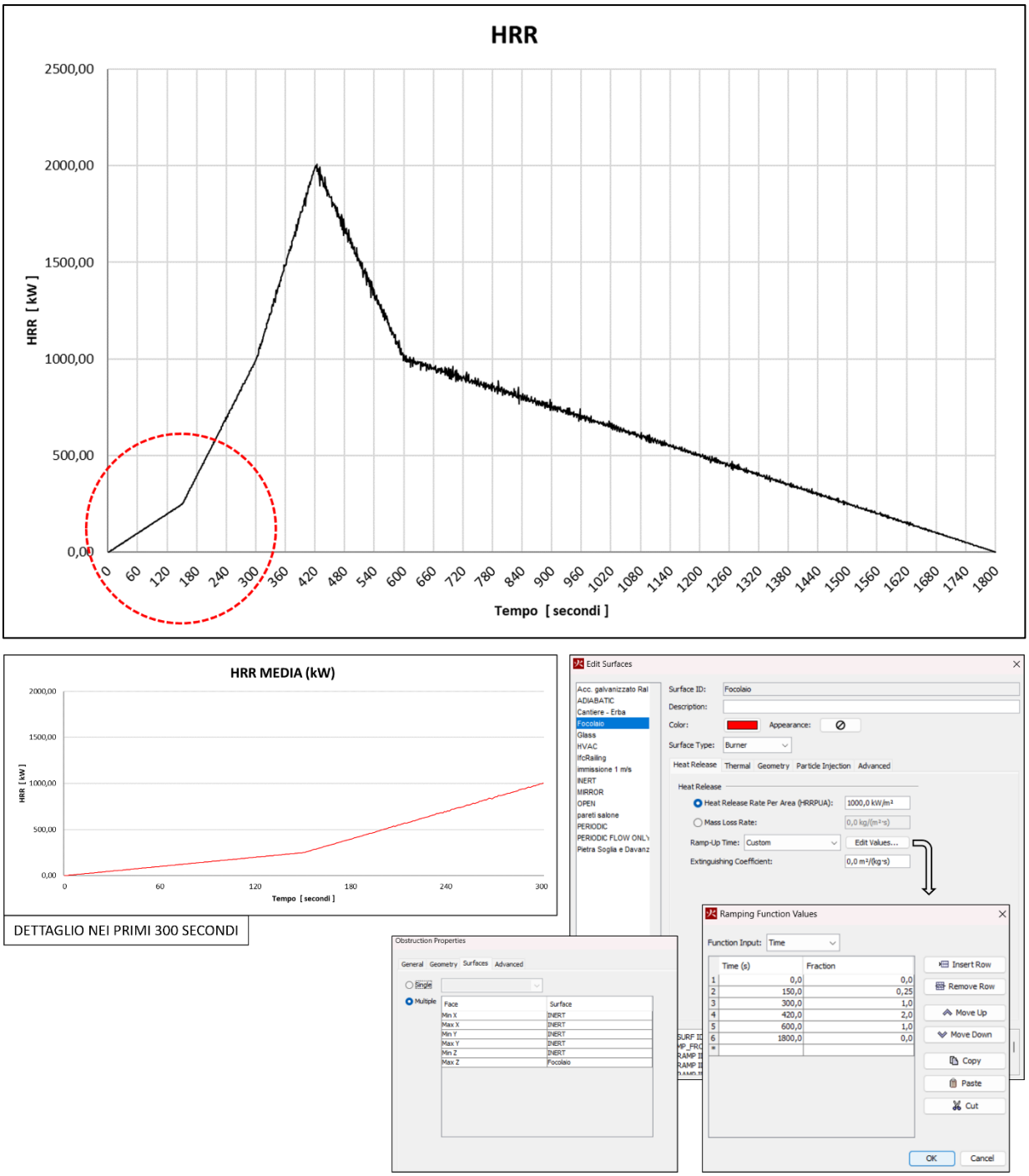
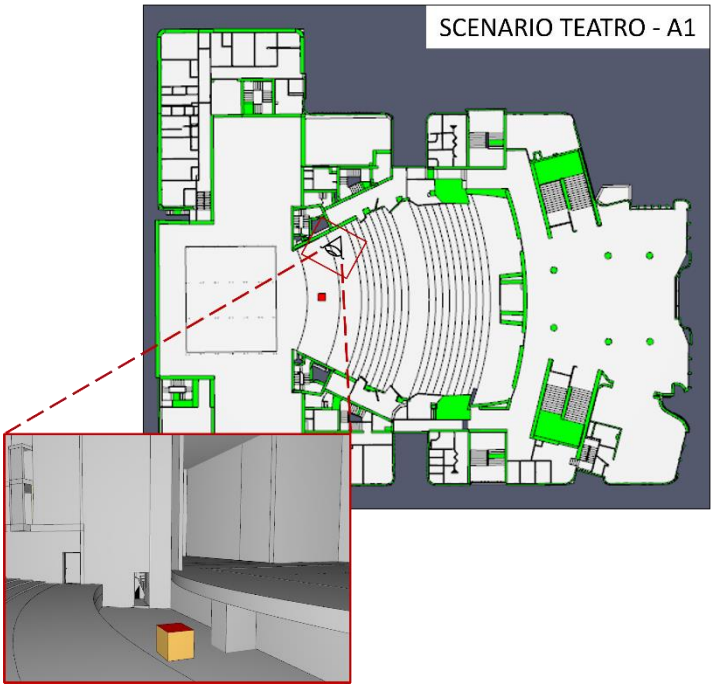


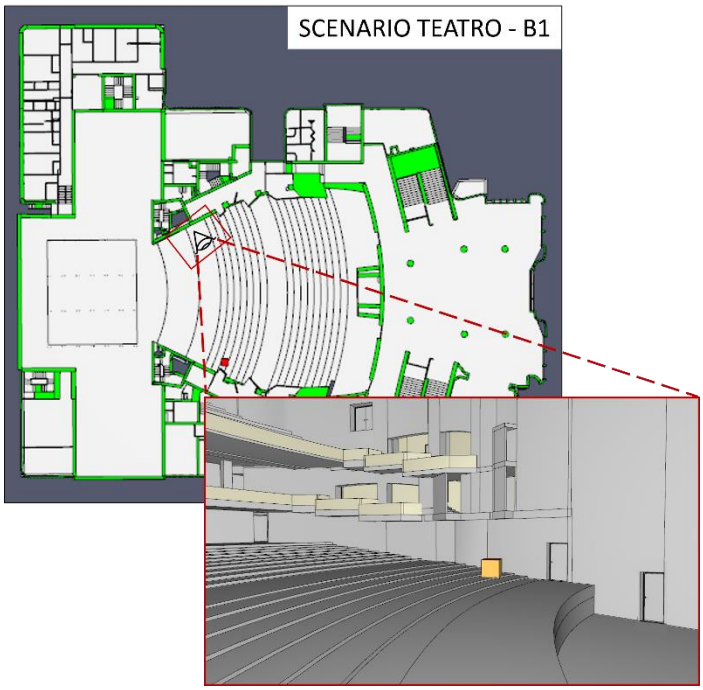
Figura 30. Curva RHR

In ultimo, sono stati localizzati i focolari in punti ritenuti critici in cui verosimilmente potrebbero trovarsi:

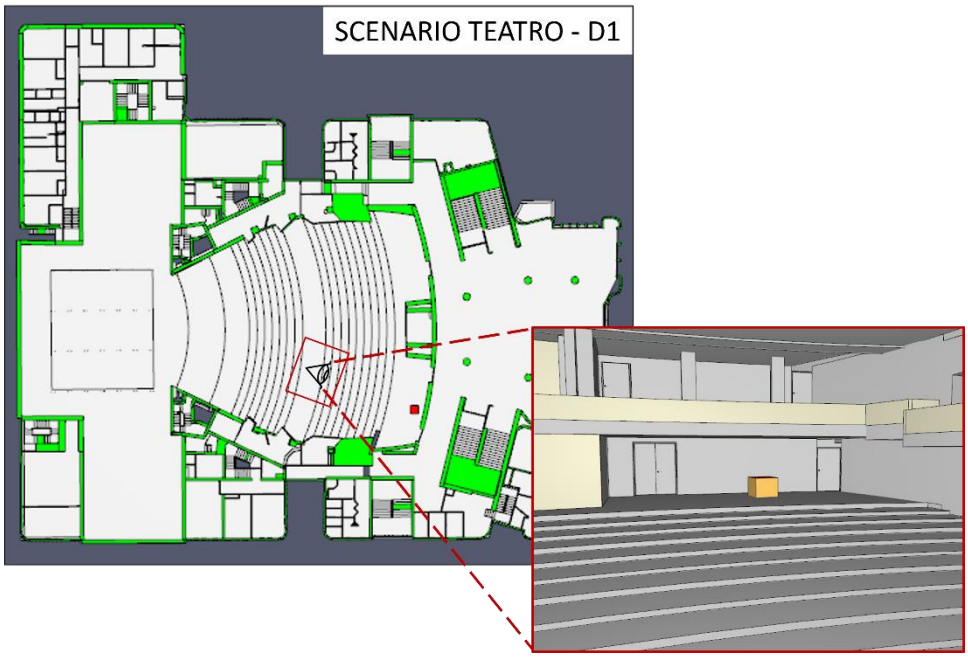
- Scenario TEATRO - A1: focolaio posizionato al centro della fossa d'orchestra



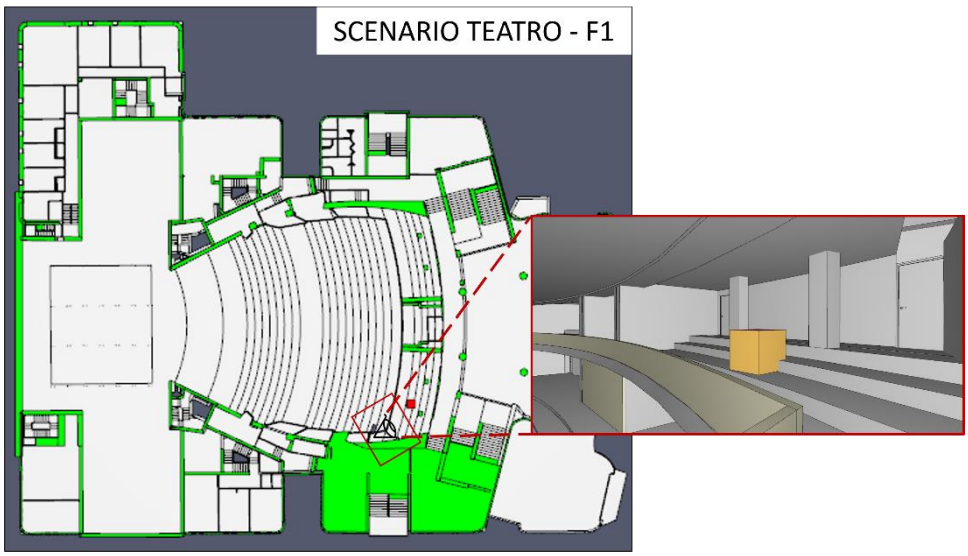
- Scenario TEATRO - B1: focolaio posizionato nelle prime file della platea, in adiacenza all'uscita di sicurezza verso il corridoio



- Scenario TEATRO - D1: focolaio posizionato nella zona della platea alta di fronte le uscite di sicurezza verso l'atrio



- Scenario TEATRO - F1: focolaio posizionato nella prima galleria gradonata, lato destro



- Scenario TEATRO - G1: focolaio posizionato al centro della seconda galleria gradonata

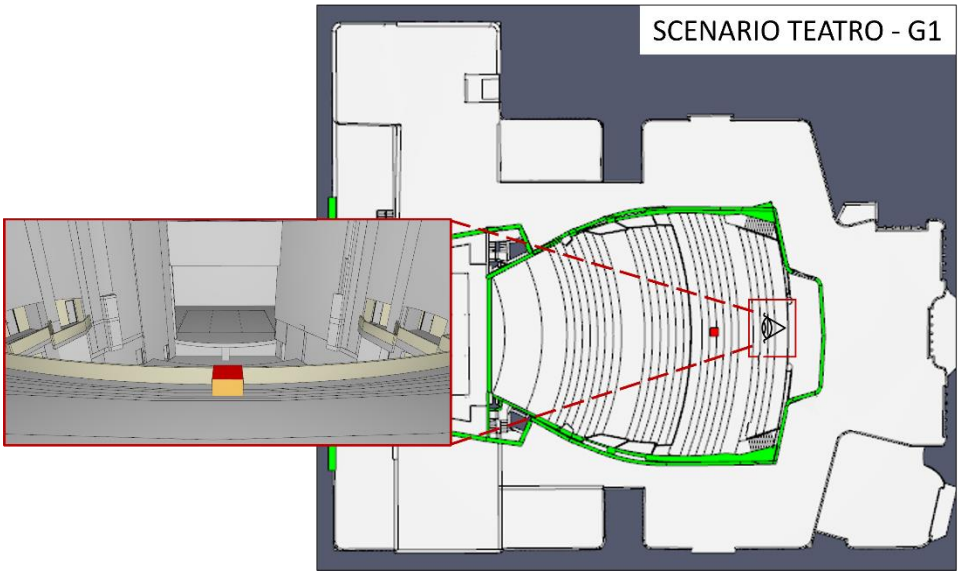


Figura 31. Scenari di incendio di progetto

Un aspetto importante nell'impostazione del modello riguarda la caratterizzazione e il posizionamento dei dispositivi dai quali estrapolare dati di output. In particolare, sono stati utilizzati *Devices*, *Slices* e *Isosurfaces*. Tutti possono essere calibrati per esportare valori di temperatura, visibilità, FED, irraggiamento o altri parametri, in diverse posizioni in pianta e a diverse quote. Nel dettaglio, i *Devices* estraggono valori puntuali delle grandezze variabili nel tempo, le *Slices* sono dei piani su cui è possibile visualizzare i diversi parametri secondo range specifici e le *Isosurfaces* offrono la possibilità di osservare l'andamento volumetrico delle stesse grandezze in base a dei valori soglia impostati.

Negli scenari sono stati posizionati 14 gruppi di *Devices* (contenenti sonde di FED, temperatura, visibilità e irraggiamento, ossia le grandezze corrispondenti a tre dei quattro modelli per le verifiche di incendio avanzate e per il calcolo del tempo di ASET, descritto successivamente), privilegiando vie di esodo, zone angolari ed uscite, quindi punti di indagine importanti.
Sono state collocate le *Slices* a quote diverse per via della configurazione a più livelli della Sala Rossa, ma sempre a 2 m (pari ad altezza uomo) e in posizione x e y (secanti l'edificio per valutare le zone occupate dai fumi).
Infine, sono state impostate le *Isosurfaces* di temperatura e visibilità per le soglie di occupanti e soccorritori, rispettivamente di 60 - 80 °C e 10 - 5 m.

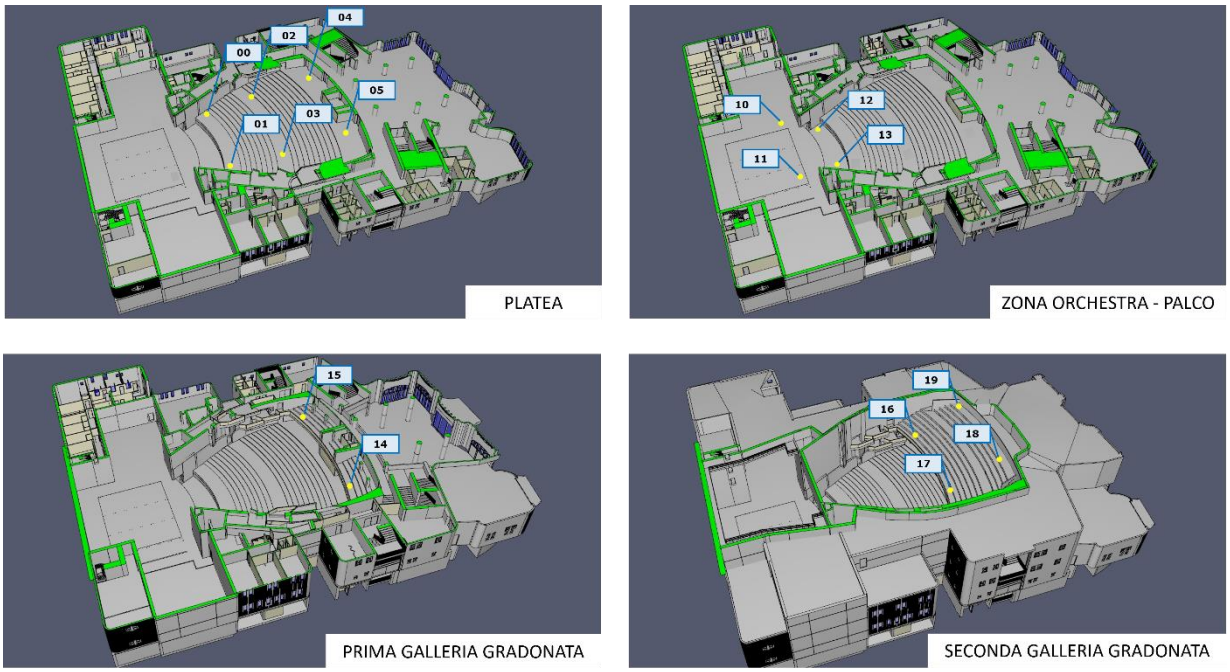


Figura 32. Posizione *Devices*

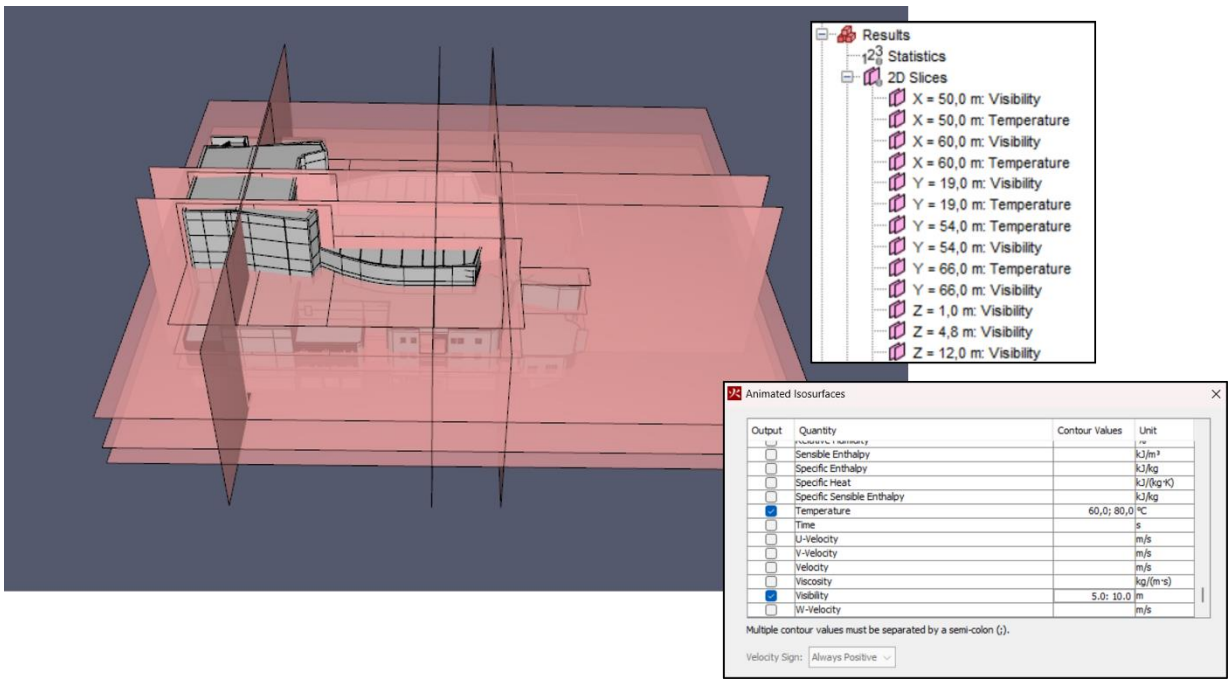


Figura 33. Posizione *Slices* e configurazione *Isosurfaces*

Un altro aspetto importante nell'impostazione del modello riguarda la caratterizzazione e il posizionamento degli impianti di immissione forzata aria di riscontro per il SEFC. Si tratta, nel modello FDS, di elementi di forma cubica, la cui superficie superiore è stata realizzata con il comando *Draw a Block Obstruction* e dimensionata secondo quanto detto prima: ad ogni faccia superiore è stata associata la superficie creata ad hoc "Immissione". Tutte le altre superfici sono state caratterizzati come inerti, in quanto si è voluto indagare il contributo fornito da questi impianti con le bocchette rivolte verso l'alto, con l'obiettivo di

allontanare e dirigere i prodotti della combustione verso i lucernari posizionati a soffitto. Per creare scenari verosimili e con condizioni al contorno efficaci, un ulteriore aspetto riguarda l'impostazione del controllo di questi elementi. È stato quindi utilizzato il comando *Controls* che, tra le altre cose, permette di gestire i tempi di attivazione di un impianto. Nello specifico è stato impostato un controllo per l'attivazione dei 4 immissori posizionati in platea, con tempo di attivazione dopo 150 s dall'innesco dell'incendio.

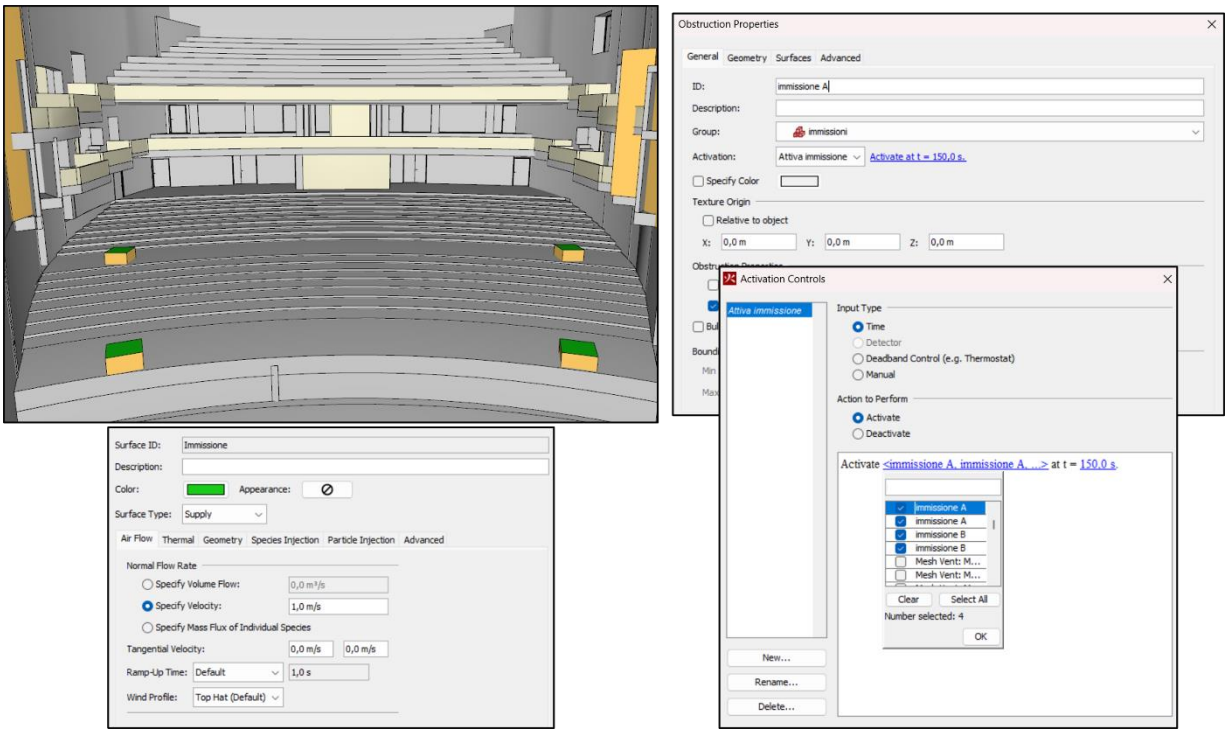


Figura 34. Impostazione del controllo sugli elementi di immissione forzata aria di riscontro

Prima di procedere con le simulazioni è stato impostato un ultimo importante parametro legato alla durata delle stesse. Il tempo è stato impostato in base agli obiettivi prefissati e all'andamento della curva RHR, affinché questa potesse raggiungere il picco e l'estensione completa. In particolare, la simulazione è stata condotta fino a 1800 s per tutti gli scenari, cogliendo tutto l'andamento della curva fino all'annullamento della potenza, nonostante questo abbia comportato tempi di simulazione piuttosto elevati.

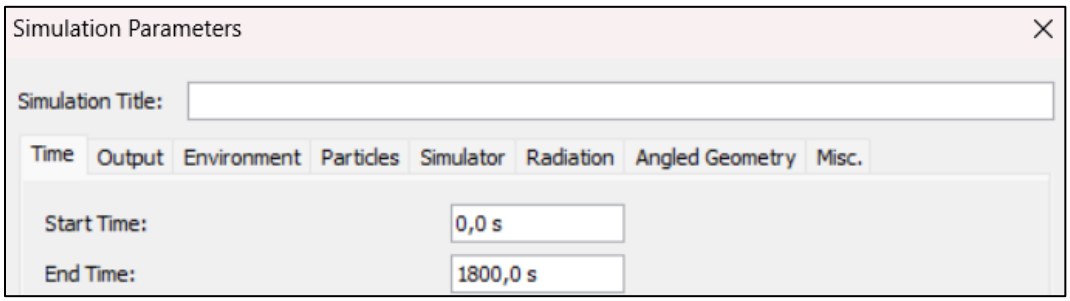


Figura 35. Durata delle simulazioni

4.3. Modellazione di esodo

Si è parlato delle modalità di impostazione dei parametri di input nei modelli di incendio per il calcolo di ASET, ma nulla si è detto riguardo la modellazione con i software di esodo. Questo paragrafo è dedicato a comprendere il procedimento logico con cui realizzare i modelli di esodo e le peculiarità del metodo usato per ciascuno degli scenari di incendio di progetto selezionati. In particolare, si introducono e descrivono i parametri di input per determinare il tempo richiesto per l'esodo, ossia RSET.

L'iter procedurale ha previsto l'utilizzo del software Pathfinder®, prodotto dagli stessi sviluppatori di PyroSim® e pertanto altamente interoperabili per lo scambio di dati. Tale strumento è un software di modellazione comportamentale e fluidodinamico per cui necessita di dati relativi alle caratteristiche fisiche, alle abilità e alle modalità di comportamento degli occupanti. Il tutto previa modellazione delle geometrie rappresentative l'edificio oggetto di studio. Una volta importato il modello BIM in formato IFC da Autodesk Revit® e da PyroSim®, in modo da avere rispettivamente l'esatta posizione dei posti a sedere e l'esatta collocazione dei focolai nei diversi scenari di incendio selezionati, si è proceduto con la modellazione geometrica di dettaglio in modo che fosse effettivamente leggibile dal software in termini di simulazione: Pathfinder® infatti utilizza geometrie tridimensionali distinguendo tra pavimenti calpestabili e spazi vuoti rappresentanti ostruzioni in cui gli occupanti fisicamente non possono muoversi (le stesse geometrie, in fase di simulazione, vengono tradotte in elementi solamente bidimensionali). Gli occupanti possono per l'appunto muoversi in uno spazio continuo rappresentato da una mesh triangolare e scandito da *Rooms*, *Doors* e da altri elementi per superare dislivelli quali scale e rampe. Sono stati modellati i singoli locali per ogni piano, la platea e le gallerie gradonate con gli elementi di collegamento, come corridoi, scale e porte. I vari livelli del fabbricato teatrale sono stati messi in comunicazione mediante le due scale previste a progetto. Infine, sono stati modellati tutti i varchi corrispondenti alle uscite inserendo delle porte per mettere in comunicazione l'interno dell'attività con l'esterno, al fine di simulare il movimento degli occupanti verso un luogo sicuro.

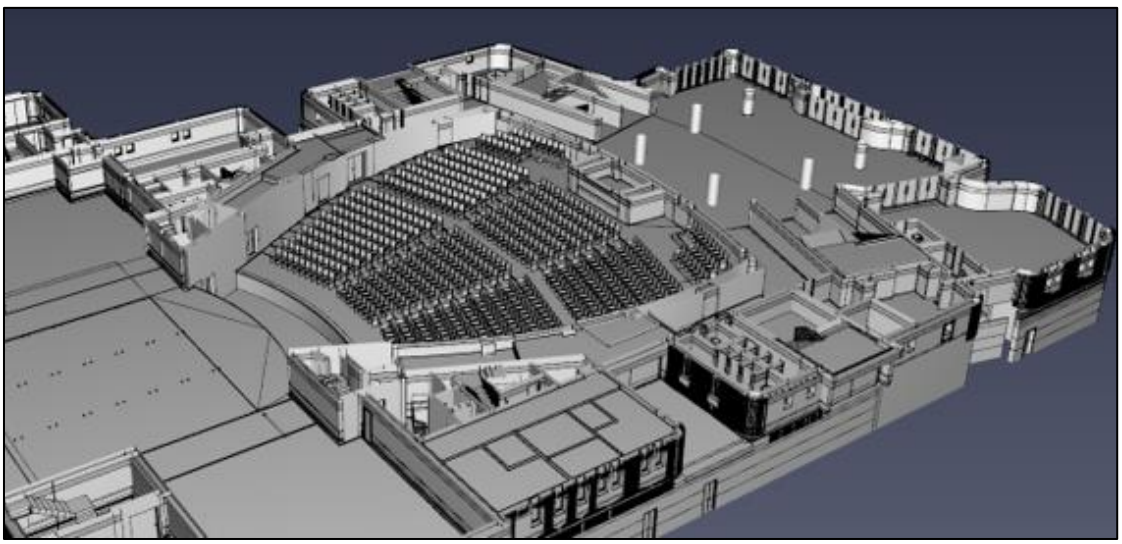


Figura 36. Interoperabilità BIM – CFD - Pathfinder® (dettaglio platea con posti a sedere)

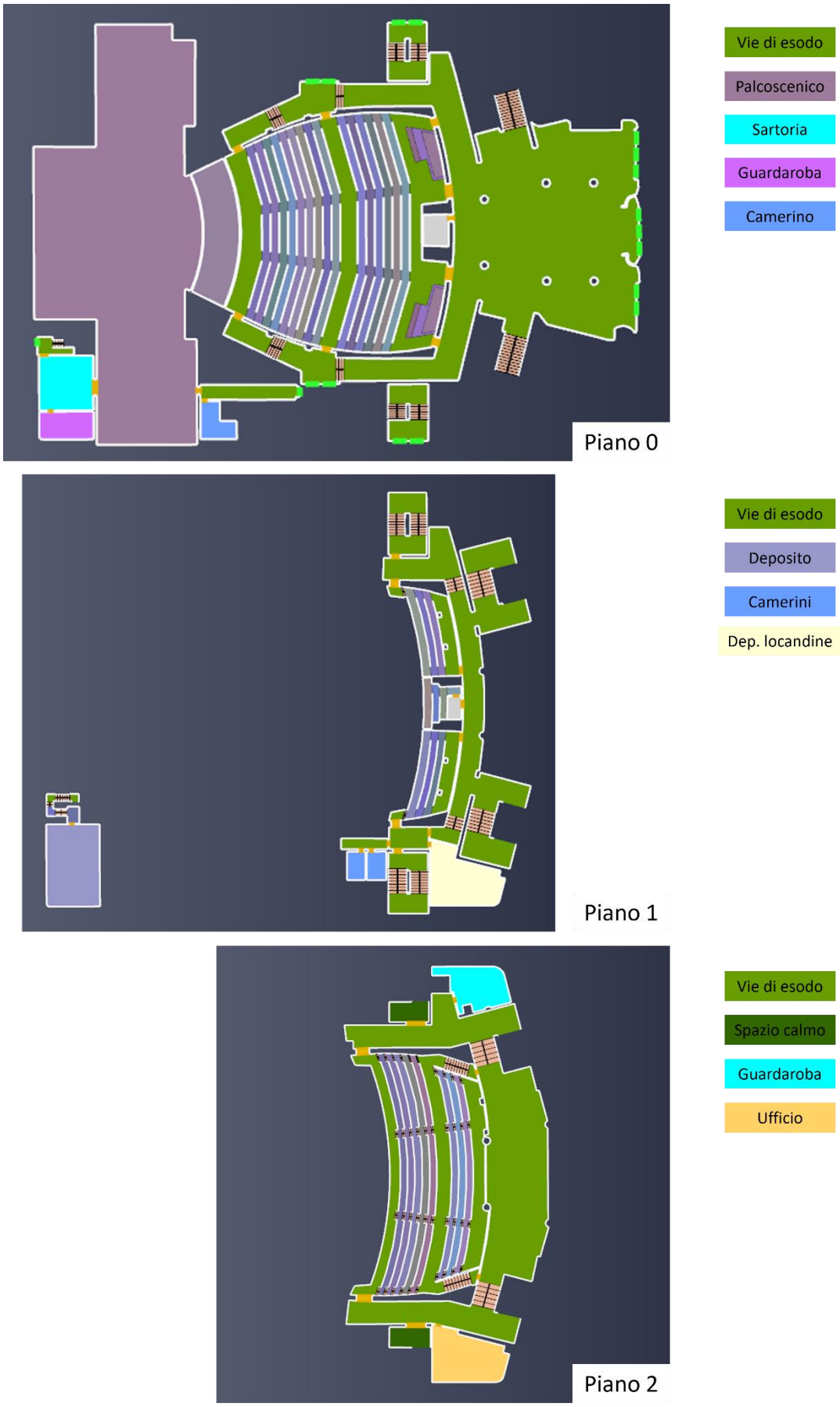


Figura 37. Definizione geometrie di dettaglio

Il secondo passo riguarda la definizione dell'**affollamento** e la **caratterizzazione** degli occupanti, in termini di *Profiles* (ingombro spaziale e parametri di movimento) e di *Behaviors* (sequenza di azioni che gli occupanti svolgono prima di recarsi verso un luogo sicuro). Le informazioni sull'affollamento sono già state introdotte al Capitolo 4, di cui si riporta per completezza di informazione una tabella sintetica, ricordando che il massimo affollamento teorico si basa sugli effettivi posti a sedere della sala e sulla densità di affollamento dei singoli locali (informazioni reperite all'interno del Codice di Prevenzione Incendi). Sulla base di questi aspetti quantitativi sono state fatte delle ulteriori indagini qualitative riguardo le tipologie di utenti che in genere frequentano attività teatrali. Nel presente lavoro i dati sugli utenti derivano da ricerche pubblicate sul sito dell'ISTAT[12] secondo cui si è riscontrato che le categorie di persone che si sono recate al teatro "7 volte e più" hanno un'età compresa tra 18 e 69 anni, mentre i bambini dai 6 ai 10 anni e gli over 69 sono solo una minoranza.

	CALCOLO COMPLESSIVO DEGLI OCCUPANTI						
	Sala Rossa	Bambini (6 - 10 anni) 1,3 %	Anziani (Over 69) 8,2 %	Personale di servizio del Teatro	Addetti di scena e personale artistico	Occupanti totali per piano	Occupanti totali
P0	693	6	57	-	16	709	1233
P1	103	4	9	2	15	120	
P2	382	5	30	20	2	404	

Tabella 4. Affollamento complessivo

Si è posta notevole attenzione anche alla componente relativa ai diversamente abili. Per definire tali utenti si è fatto ricorso ad un confronto tra i dati pubblicati dall'ISTAT[13] e la ricerca di un percorso di tesi di laurea[14] relativo alla progettazione e gestione dell'emergenza inclusiva che risultava estremamente calzante con il tema di interesse. Questo lavoro è stato effettuato per ricavare la percentuale di persone con disabilità che hanno partecipato ad attività culturali, come cinema, musei, concerti o teatri. Purtroppo, le informazioni e i dati reperibili all'interno del sito dell'Istituto Nazionale di Statistica si riferiscono al 2017, ossia l'ultimo anno in cui sono state condotte indagini significative. Come sappiamo, uno dei settori più colpiti dagli effetti della pandemia da Covid-19 negli ultimi tre anni è stato certamente quello delle manifestazioni e del pubblico spettacolo. Solamente nell'estate del 2022 c'è stata la tanto attesa ripresa delle attività senza particolari restrizioni, per cui, prima di poter leggere dei dati che non siano alterati, occorrerà aspettare ancora qualche anno.

[12] ISTAT – *Cultura e tempo libero*

[13] ISTAT – *Conoscere il mondo della disabilità. Persone, relazioni e istituzioni*

[14] Guion V. – *La progettazione e gestione dell'emergenza inclusiva: applicazioni e verifiche sulle attività di pubblico spettacolo nel complesso edilizio delle Officine Grandi Riparazioni in Torino*

In Italia, nonostante le tante buone pratiche, purtroppo frammentate e discontinue, l'accessibilità dell'offerta culturale per le persone con limitazioni gravi resta ben al di sotto delle necessità: nel 2015, per esempio, dichiaravano di essere attrezzati con strutture per disabili il 37,5 % dei musei italiani, pubblici e privati; appena il 20,4 % di essi offrivano materiali e supporti informativi. Negli ultimi anni però la questione dell'accessibilità fisica è entrata a far parte di molte decisioni operative quotidiane, anche per precise disposizioni di legge che riguardano proprio i locali di pubblico spettacolo, mentre le esigenze delle persone con disabilità cognitive e intellettive restano ancora largamente disattese, anche se qualcosa sta cambiando, grazie a iniziative innovative. I dati relativi agli utenti restituiscono ancora oggi un quadro di diffusa esclusione delle persone con limitazioni gravi, per le quali si registrano livelli più bassi di partecipazione culturale: dichiarano infatti di aver svolto tre o più attività culturali, come per esempio essere andati almeno quattro volte al cinema, almeno una volta a Teatro, a un concerto o in visita a un museo nei 12 mesi precedenti l'intervista, appena il 9,3% delle persone con limitazioni gravi con più di 13 anni. In seguito all'elaborazione dei dati è stata elaborata la seguente tabella:

Percentuale di disabili con limitazioni gravi che hanno partecipato almeno una volta a Teatro	
Attività	% di disabili
Cinema	1,86
Teatro	2,19
Concerto	2,43
Museo	2,04

Tabella 5. Partecipanti ad attività culturale

A seguito di queste analisi si è quindi assunto che il 2% dei partecipanti nella Sala Rossa possedesse disabilità. Questo valore è stato ulteriormente discretizzato sulla base delle forme di disabilità che si sono considerate:

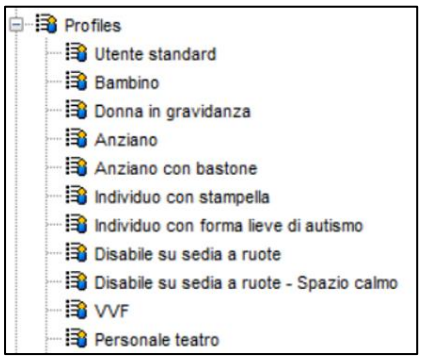
- Disabilità fragili:
    - donne incinte (30%)
    - anziani con bastone (15%)
    - individui con stampelle (15%)
    - individui con una forma lieve di autismo (5%)

- Disabilità gravi:
    - occupanti con disabilità motoria su sedia a ruote (35%)

	Occupanti		Disabilità fragili				Disabilità gravi
	Sala Rossa	2%	Donne Incinte (30%)	Anziani con bastone (15%)	Individui con stampelle (15%)	Individui con una forma lieve di autismo (5%)	Occupanti su sedia a ruote (35%)
P0	693	17	6	2	2	1	6
P1	103	3	1	1	1	-	-
P2	382	8	4	1	1	-	2

Tabella 6. Distribuzione occupanti con disabilità

A tutti gli occupanti sono stati associati gli ingombri cilindrici predefiniti del software (diametro 45,58 cm e altezza 182 cm) ad eccezione dei bambini, cui è stata assegnata un'altezza di 1,20 m e dagli utenti con disabilità fragili e gravi, modellati incrementando gli ingombri: per i primi si è semplicemente utilizzato un ingombro cilindrico di diametro pari a 52 cm, mentre per gli occupanti su sedia a ruote posizionati in platea o a livello della seconda galleria gradonata, che autonomamente riescono a raggiungere rispettivamente l'esterno verso luogo sicuro o lo spazio calmo in adiacenza al vano scala, si è passati dalla forma cilindrica standard a quella rettangolare. Inoltre, per gli occupanti su sedia a ruote (P2) l'ingombro rettangolare viene sostituito dal sistema cilindro-rettangolo-cilindro non appena giungono in soccorso i VVF che dallo spazio calmo offrono assistenza per il movimento verso luogo sicuro all'esterno del P0.
Per quanto riguarda le velocità sono stati impostati i vari andamenti in base all'utente e alle disabilità considerate. Per gli adulti normodotati, con riferimento all'ISO/TR 16738:2009 è stato assunto il valore di movimento pari a 1,19 m/s. Per i bambini e i disabili fragili si è invece fatto riferimento al lavoro di tesi citato, differenziando le velocità in base alla difficoltà nei movimenti: 0,98 m/s per i bambini, 1 m/s per le donne in gravidanza e gli individui con una forma lieve di autismo (valore che è stato cautelativamente ridotto rispetto all'utente standard), 0,92 m/s per gli anziani e 0,81 m/s per quelli che si muovono con bastone, 0,85 m/s per gli utenti che impiegano una o due stampelle. Infine, per gli utenti con disabilità grave si è fatto ancora riferimento all'ISO/TR 16738:2009, assumendo il valore di 0,69 m/s, mentre per i VVF la velocità è stata incrementata fino a 1,5 m/s.



. . .

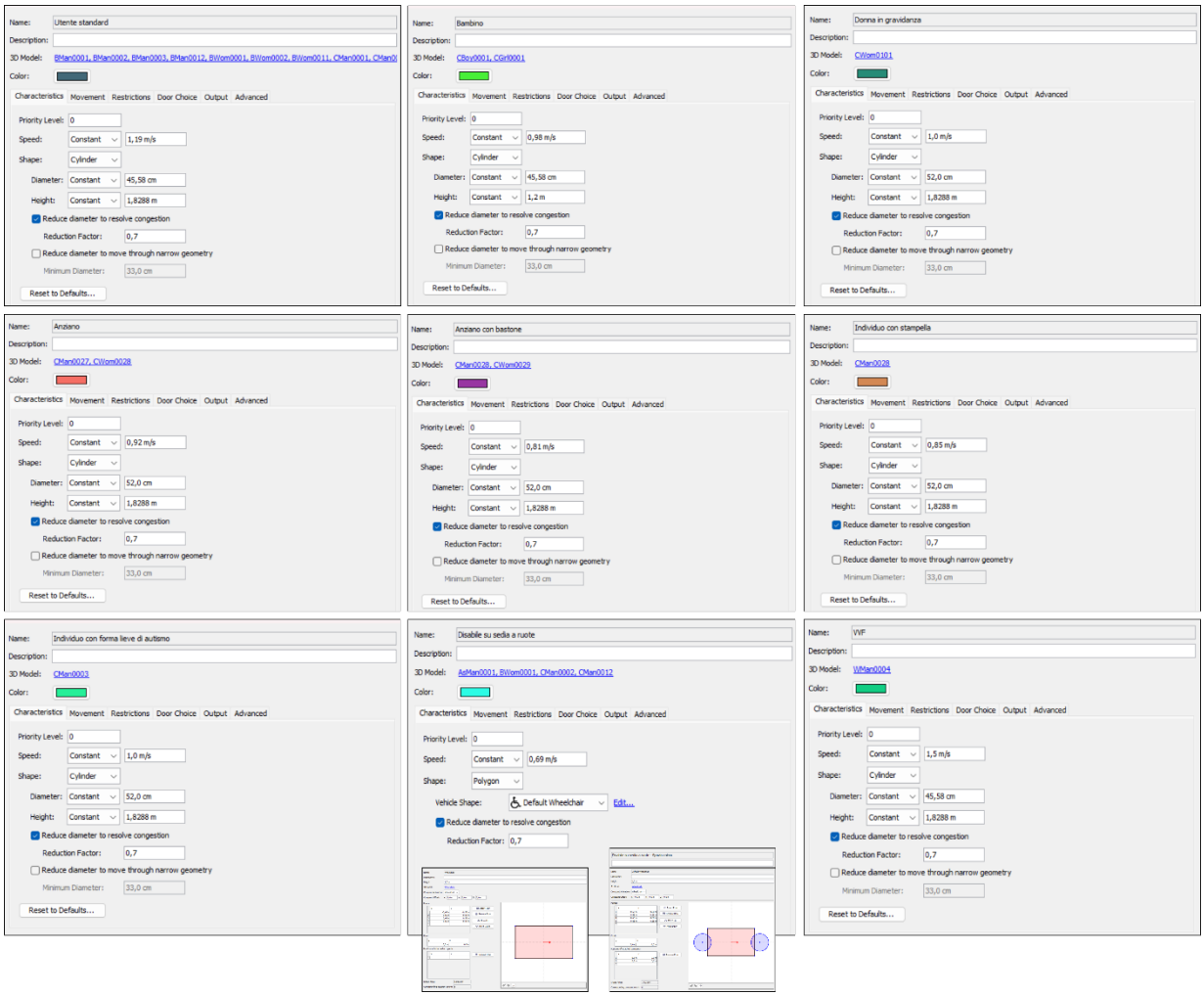


Figura 38: Definizione *Profiles*

Il lavoro di tesi è proseguito con la definizione dei comportamenti da attribuire agli occupanti, i cosiddetti *Behaviors*, con cui si impone agli utenti di compiere azioni in sequenza prima di raggiungere il luogo sicuro. Prima di procedere con la spiegazione di dettaglio, si anticipa un aspetto molto importante: "*la modellazione dell'esodo viene svolta in molteplici scenari, anche degradati (per esempio considerando inaccessibili alcune vie di esodo) con lo scopo di valutare ed ottimizzare le caratteristiche del fabbricato che rivestono particolare importanza per la sicurezza delle persone, permettendo una corretta progettazione e calibratura dei percorsi di fuga e della relativa cartellonistica e illuminazione di emergenza*"[15]. Il software Pathfinder® permette agli occupanti di stabilire autonomamente la via di esodo preferita (esodo automatico); in alternativa è possibile definire a priori quale uscita deve raggiungere ciascun gruppo di occupanti (esodo progettato).

[15] Cosi F. – Sicurezza antincendio: la modellazione dell'esodo di un fabbricato adibito a uffici

Sulla base di questa premessa, sono state effettuate due simulazioni di esodo, secondo due modalità e aspetti di modellazione differenti:

- Scenario TEATRO - AUTOMATICO: gli occupanti scelgono autonomamente la via di esodo più congeniale, ovvero quella più vicina o più libera, secondo regole proprie del software e derivate dalla ricerca alla base del suo sviluppo;
- Scenario TEATRO - PROGRAMMATO: gli occupanti si dirigono verso le vie di esodo impostate ed indicate con apposita cartellonistica, che corrispondono a quelle utilizzate nelle prove di evacuazione programmate.

Nello scenario "automatico" si è scelto di attribuire a tutti i behaviors creati l'azione *Goto Exits – Any* cosicché ognuno si dirigesse verso l'uscita più vicina. Nello scenario "programmato" invece si è dapprima realizzata una suddivisione degli occupanti in gruppi (in funzione della posizione all'interno della sala multipiano) e successivamente si è scelto di attribuire a ciascun gruppo il comando *Goto Waypoint*, per far seguire loro un percorso che verosimilmente coincidesse con quello previsto all'interno del Piano di Emergenza. Infine, per proseguire con le operazioni di esodo, anche in questo caso è stato attribuito il comando *Goto Exits – Any* affinché tutti potessero raggiungere le uscite finali.

Per quanto riguarda i comportamenti più di dettaglio, sono stati analizzati allo stesso modo per entrambi gli scenari con riferimento agli utenti disabili gravi, agli assistenti (VVF) e a coloro che si trovano più vicini all'incendio. In particolare, ai disabili su sedia a ruote che si trovano al P2 è stato attribuito il comando *Goto Waypoint* in modo che si dirigessero autonomamente verso la stanza etichettata come sicura, ossia lo spazio calmo; dopo è stato previsto il comportamento *Change profile*, affinché giunti nel luogo sicuro temporaneo, attendano i soccorsi e vengano assistiti dai soccorritori che sopraggiungono. In questo modo cambiano le modalità di trasporto e gli ingombri in quanto da una forma rettangolare dell'utente su sedia a ruota che riesce a raggiungere lo spazio calmo in autonomia, si passa ad una cilindro-rettangolo-cilindro con il disabile trasportato lungo le scale da due soccorritori. Quest'ultimi, identificati come *Vigili del Fuoco*, sono caratterizzati da due comportamenti: 2 si occupano dell'estinzione dell'incendio, per cui la loro posizione varia in funzione dello scenario di incendio, e 4 (2 per utente) prestano soccorso nello spazio calmo. Nell'ambito delle impostazioni di soccorso rientra la creazione di Teams di assistenza, ossia squadre di cui fanno parte occupanti con specifici set di comportamenti. Con questi è possibile istituire un'associazione biunivoca tra la categoria di assistente e quella di assistito. Infatti, sono stati creati Team di V.V.F. che prestano soccorso agli utenti nello spazio calmo.
Per quanto riguarda gli utenti vicini o in prossimità delle **uscite rese indisponibili** per la presenza di fumo, è stato molto utile il comando *Goto Waypoint*, per far seguire loro un percorso che verosimilmente li facesse allontanare dall'incendio e dai prodotti della combustione e dialogasse quindi con lo specifico scenario di incendio analizzato. Il software Pathfinder® permette infatti di sovrapporre i propri risultati con quelli delle simulazioni di incendio con l'importazione di quest'ultimi nel dominio dei risultati dei primi. Lo scopo è

comprendere se effettivamente l'occupante, lungo il suo percorso verso l'uscita, attraversa zone contaminate dai prodotti della combustione e quindi subisce minacce per la propria incolumità. In particolare, per alcune porte di sicurezza interne alla platea e al livello della prima galleria gradonata si è applicata un'impostazione che deriva dall'analisi dei dati della simulazione di incendio: alcune di esse sono state rese indisponibili se interessate da valori di visibilità molto bassi. Nello specifico, la simulazione dello scenario di incendio di progetto TEATRO - D1, ha permesso di capire da quale istante di tempo tali valori di visibilità risultassero al di sotto delle soglie previste per gli occupanti e in quali zone. Per modellare il più verosimilmente possibile il comportamento degli occupanti che vedendo il fumo si muovono verso un'altra direzione per raggiungere un luogo sicuro, oltre al comando già citato, si è scelto di chiudere le porte dall'istante di tempo coincidente con quello di rivelazione della specifica porta.

Figura 39. Chiusura porte all'istante di tempo prestabilito

Un ultimo aspetto importante riguarda l'interazione tra occupante, edificio e incendio. Nell'analisi prestazionale dell'esodo non è facile valutare tale interazione, a causa degli aspetti comportamentali delle persone. Come già discusso ai capitoli precedenti, gli occupanti, anche a seguito di allarmi, percezione di fumo, comunicazioni di altre persone, ecc., impiegano parte del tempo in attività non immediatamente rivolte all'evacuazione. Questi fattori si possono tradurre in un **ritardo iniziale** andando ad incidere sul calcolo del parametro RSET, il quale è dato dalla somma di:

$RSET = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra}$

In genere, con gli strumenti di modellazione di esodo, si eseguono simulazioni per ricavare il tempo di movimento degli occupanti (t_{tra}). È però possibile ricavare direttamente il valore di RSET, introducendo le altre componenti da cui è costituito, attraverso l'impostazione di un ritardo iniziale ai diversi behavior. In particolare, l'*Initial Delay* deriva dalla somma di:

- tempo di rivelazione (t_{det}), corrispondente al tempo necessario al sistema di rivelazione automatico per accorgersi dell'incendio, ad esempio attraverso il raggiungimento di valori soglia per specifiche sonde che simulano la presenza di un impianto di rivelazione automatica (IRAI). Nel caso in esame la determinazione del tempo di rivelazione è stata stabilita mediante il software PyroSim® ricavando un t_{det} pari 60 secondi;
- tempo di allarme generale (t_a), ossia il tempo necessario per la diffusione dell'allarme. È stato assunto pari a zero. Tale valore deriva dall'applicazione del ISO/TR 16738:2009 in presenza di rivelazione automatica;
- tempo di pre-movimento (t_{pre}), dato dalla somma del *tempo di riconoscimento*, necessario per accorgersi della situazione emergenziale (il quale tende, logicamente, ad essere ridotto per tutti gli occupanti presenti nelle immediate vicinanze del focolaio) e *tempo di risposta*, necessario all'occupante per interrompere le attività di cui si stava occupando ed attingersi alla fuga. Questo valore deriva dalla consultazione di norme e testi di letteratura e da specifiche valutazioni successive.

In particolare, per il tempo di pre-movimento si è fatto riferimento alla ISO/TR 16738:2009 che fornisce dei valori tabellari sulla base di specifiche classificazioni (A - B - M) e propone un andamento del tempo di pre-movimento di tipo log-normale con picchi spostati verso gli istanti iniziali per rappresentare i diversi tempi di reazione che intercorrono tra i primi e gli ultimi occupanti che raggiungono un luogo sicuro. Le lettere A, B, M si riferiscono rispettivamente a:

- A (alarm): qualità del sistema di allarme [suddiviso in classi da A1 ad A3];
- B (building complexity): grado di complessità dell'edificio [suddiviso in classi da B1 a B3];
- M (safety management): grado di addestramento che gli occupanti hanno nei confronti di un incendio, ovvero il livello della gestione della sicurezza antincendio [classi da M1 a M3].

Dal capitolo D.3.2 della norma ISO è stato definito il parametro A. La scelta è ricaduta sulla seguente casistica: "alarm system level A2", ovvero la presenza di rivelazione automatica estesa a tutta l'attività fornendo un preallarme di gestione o sicurezza, con un sistema di allarme generale ad attivazione manuale che risuona in tutte le aree occupate e un allarme generale dopo un ritardo fisso se il preallarme non viene cancellato. Il parametro B è stato definito consultando il capitolo D.3.3. In questo caso è stata scelta la casistica "building level B2" in linea con la configurazione dell'edificio: semplice, a più piani, con la maggior parte delle caratteristiche progettate in modo prescrittivo e layout interni semplici. Infine, per quanto riguarda il parametro M, è stato consultato il capitolo D.3.4 della medesima norma ISO; in particolare la scelta è ricaduta su "management level M1". Si ritiene di poter adottare il valore M1 in base alla presenza di addetti antincendio in numero sufficiente durante l'orario di svolgimento degli eventi.

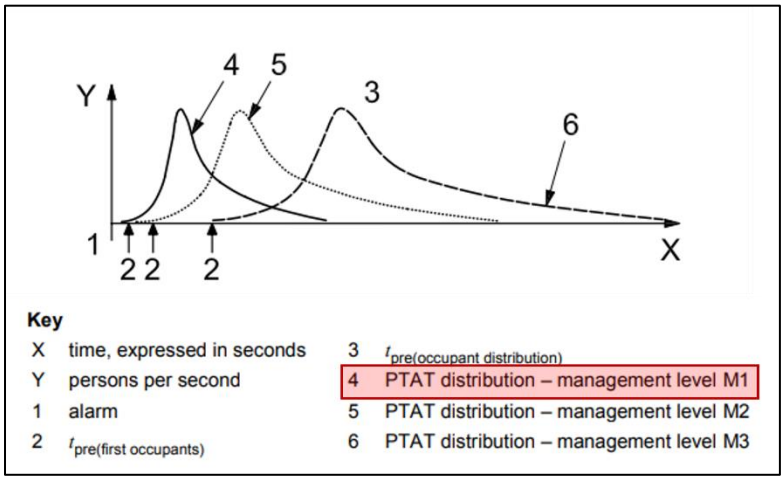


Figura 40. Distribuzione log-normale (ISO/TR 16738:2009)

Definite quindi le caratteristiche dell'attività e degli occupanti, il risultato si traduce nella seguente categoria: A2 - B2 - M1

Dopo aver consultato la tabella E.2 della ISO/TR 16738:2009, con riferimento al profilo di rischio R_{vita} B2 (occupanti in stato di veglia e senza familiarità con gli ambienti), si è ottenuto un tempo di pre-movimento per gli occupanti compreso tra **60 ÷ 180 s** (considerando i 30 s aggiuntivi per la classe B2).

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 41. Tabella E.2 (ISO/TR 16738:2009)

Per una modellazione ancora più attenta, è stato in seguito diminuito il tempo di riconoscimento per tutti gli occupanti ubicati nelle immediate vicinanze del focolaio (il cui profilo, all'interno del software, è stato nominato *Near Fire* e rappresentato in rosso) per simulare che si accorgano più velocemente della presenza dell'incendio. La logica adottata nell'assumere un certo raggio nell'intorno del focolaio, entro il quale gli occupanti si accorgono per primi della presenza del pericolo, si basa su tre fattori:

- tipo di attività;
- dimensione del comparto;
- stato degli occupanti.

Nel teatro è stato scelto di selezionare gli occupanti nel raggio di 5 m (tre file di posti a sedere immediatamente prossime all'incendio).
È importante specificare che, in realtà, la curva log-normale del tempo di pre-movimento tiene già conto della vicinanza di alcuni occupanti al punto di innesco (e della conseguente maggiore velocità di risposta), ma non della posizione dell'incendio. Quindi, per considerare tali aspetti e migliorare la qualità della simulazione, è stato scelto di dimezzare il tempo di pre-movimento degli occupanti più vicini all'incendio in entrambi gli scenari di progetto.

Behaviors	t_{det} [sec]	t_a [sec]	t_{pre} [sec]		Initial Delay [sec]	
Tutti gli occupanti	60	0	60	180	120	240
Near Fire	0	0	30	90	30	90

Tabella 7. Definizione del ritardo iniziale

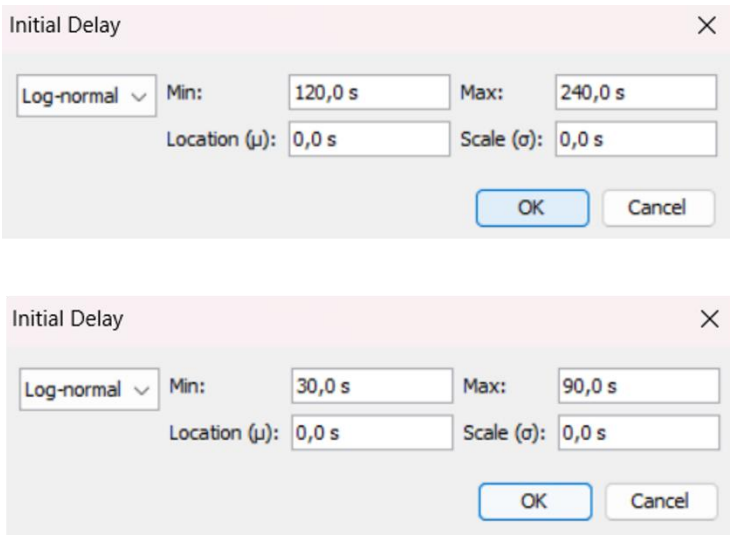


Figura 42. Impostazione all'interno del software

5. Analisi e verifiche dei risultati

Al termine delle simulazioni, sono stati estrapolati i dati di output di incendio e di esodo relativamente ai due modelli assunti separatamente e sono state eseguite analisi combinate date dalla loro sovrapposizione. L'obiettivo, nell'ottica della salvaguardia della vita (di occupanti prima e di soccorritori successivamente), si basa sul confronto tra i valori di ASET e RSET verificando che il primo sia superiore al secondo in base a specifici margini di sicurezza. Di seguito si riporta il procedimento adottato per dimostrare il raggiungimento dell'obiettivo:

- Simulazioni di incendio: si specificheranno i criteri utilizzati per estrapolare il tempo ASET attraverso le indagini con i dispositivi impostati nei modelli (*Devices, Slices*, *Isosurfaces*);
- Simulazioni di esodo: verranno illustrati i criteri utilizzati per determinare il tempo RSET attraverso grafici e valutazioni qualitative;
- Criterio ASET > RSET: verrà illustrata la disuguaglianza tra i due tempi attraverso la sovrapposizione degli output che è stata resa possibile grazie all'interoperabilità dei software utilizzati.

5.1. Simulazioni di incendio - ASET

Per quanto riguarda le simulazioni di incendio, sono stati elaborati i dati numerici ottenuti dai 14 gruppi di *Devices* inseriti nella modellazione (relativi a visibilità, temperatura, FED e irraggiamento). Successivamente sono stati analizzati i risultati grafici relativi alle *Slices* e alle *Isosurfaces*, procedendo con il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo, per verificare che ci fosse corrispondenza e coerenza nei risultati.

Le elaborazioni dei dati numeri sottoforma di grafici sono state realizzate prendendo per ogni singola grandezza misurata, i valori medi calcolati ogni 30 secondi. Invece, le illustrazioni grafiche relative alle *Slices* sono state inserite a intervalli regolari e costanti in base all'andamento dello scenario di incendio. In particolare, poiché la Sala Rossa si sviluppa come un grande volume multipiano, con platea e gallerie gradonate, verranno esposte: *Slices* Orizzontali alle quote interessate dall'incendio e quelle non direttamente interessate (2 m dal piano di calpestio) con l'obiettivo di registrare le situazioni più critiche lungo i posti occupati dal pubblico, e *Slices* Verticali secanti in direzione x e y lungo i percorsi, le vie di esodo e le aperture di smaltimento.

Il parametro ASET è stato ricavato come il minimo tra i valori rilevati dalle quattro tipologie di sonde e in linea generale la **visibilità** è risultato il parametro con il maggior numero di oscillazioni attorno alle soglie definite nella fase preliminare.

Scenario TEATRO – A1

Il primo scenario prevede un focolaio ubicato nella zona dell'orchestra. La posizione è stata scelta al fine di analizzare la propagazione del fumo nelle diverse parti del volume della sala.

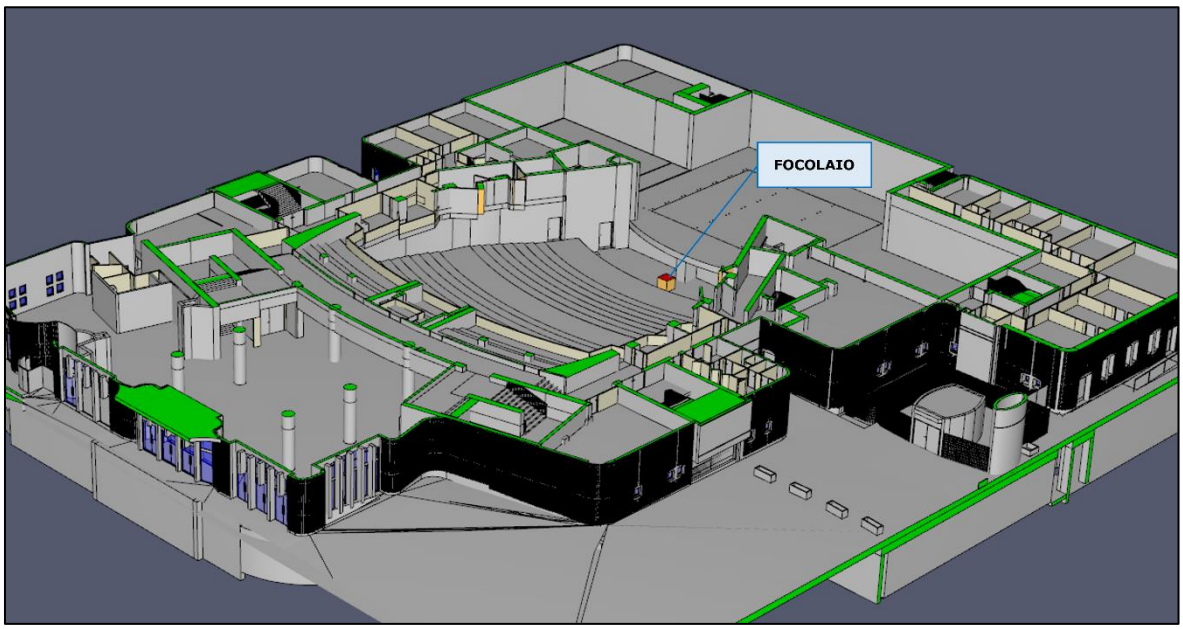


Figura 43. Posizione Focolaio Scenario TEATRO – A1

Attraverso l'utilizzo del primo dispositivo di indagine (*Devices*) sono state condotte le verifiche della sicurezza degli occupanti relative alla **visibilità**. I grafici sono stati realizzati prendendo i valori medi calcolati ogni 30 secondi e sono stati organizzati tenendo conto della collocazione delle sonde all'interno della Sala Rossa.

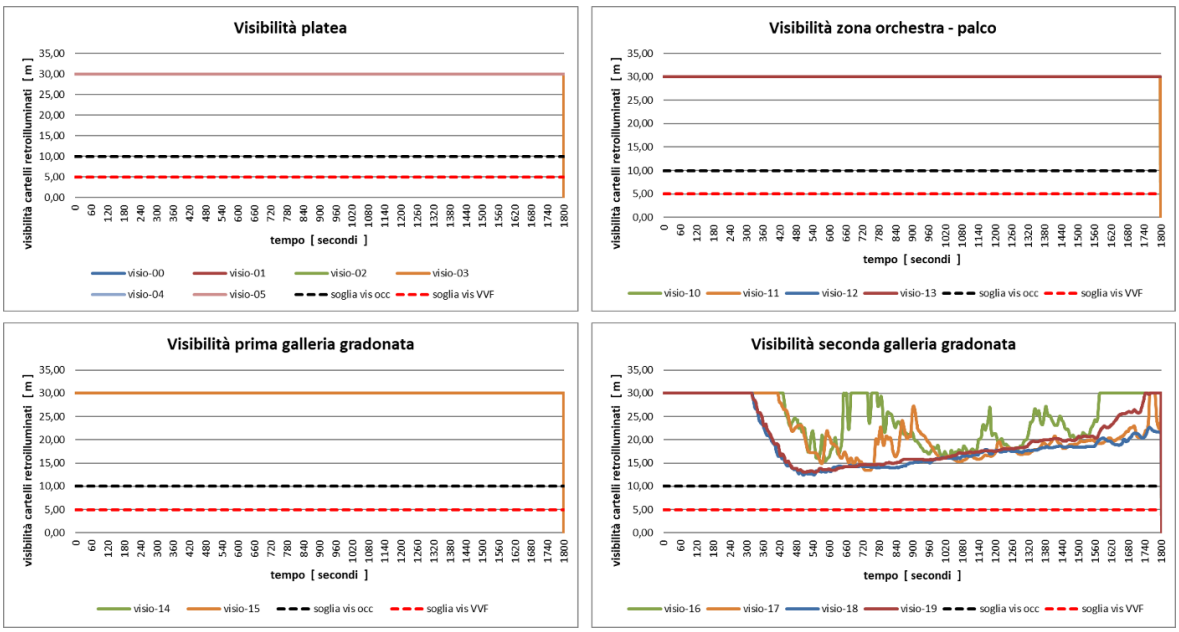


Figura 44. Grafici di visibilità Scenario TEATRO – A1

I grafici mostrano come la visibilità si mantenga quasi sempre costante (30 m) eccetto nel caso della seconda galleria gradonata, dove diverse sonde registrano valori al di sotto dei 15 m: è una quantità accettabile perché non corrisponde alle soglie di sicurezza previste per gli occupanti ed i soccorritori, pari rispettivamente a 10 e 5 m. Per avere un quadro completo su questo aspetto occorre eseguire ulteriori indagini, confrontando i risultati numerici con gli output derivanti dalle *Slices* di visibilità impostate nel modello, in particolare per capire se le sonde per le quali i valori si avvicinano alla soglia siano significativi nelle valutazioni per il calcolo di ASET.

Procedendo attraverso l'utilizzo dei dispositivi di indagine (*Slices* e *Isosurfaces*) è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo. I risultati grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** e **temperatura** sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi).
Dall'analisi delle *Slices* orizzontali di visibilità emerge che i fumi si accumulano solo nella parte alta della Sala Rossa dopo circa 300 s dalla fase dell'innesco con la visibilità che si abbassa a 480 s, senza mai superare il valore soglia. I fumi in questo lasso di tempo si stratificano in alto. Da quel punto in poi si muovono verso l'esterno grazie alle aperture di smaltimento installate in copertura oppure verso gli ambienti comunicanti (torre scenica) poiché non risultano separati da elementi di chiusura verticale.
I contributi forniti dalle *Slices* verticali di visibilità in direzione x e y confermano quanto detto: i fumi si diffondono nella parte superiore della sala, lambendo la superficie della copertura, per poi discendere lungo le pareti fino ad occupare l'intera parte alta del volume interno e localizzarsi soprattutto nelle zone della seconda galleria gradonata. I valori registrati non scendono mai al di sotto della soglia per merito dell'istallazione del SENFC ibrido: a partire da 150 s le bocchette di ventilazione, che dal basso imprimono la giusta quantità di portata d'aria per lo smaltimento, spingono il fumo verso l'alto che verrà espulso dai 16 ENFC. Questa soluzione progettuale si è rivelata un'alleata anche contro l'innalzamento delle temperature, le quali potrebbero compromettere la stabilità delle strutture.
Dalla *Slices* verticale di temperatura in direzione x non si registrano temperature elevate: le stesse risultano meno significative in quanto i valori di temperatura massima si attestano sempre attorno ai 34°C, ben al di sotto del valore soglia di sicurezza, che per gli occupanti è stato fissato a 60°C.

È stato deciso di non riportare risultati grafici relativi alle *Isosurfaces* poiché gli unici valori critici si sono registrati al di sopra della superficie del focolaio, dove al processo di combustione, generalmente, è associata la presenza di fiamma e di un pennacchio (plume).

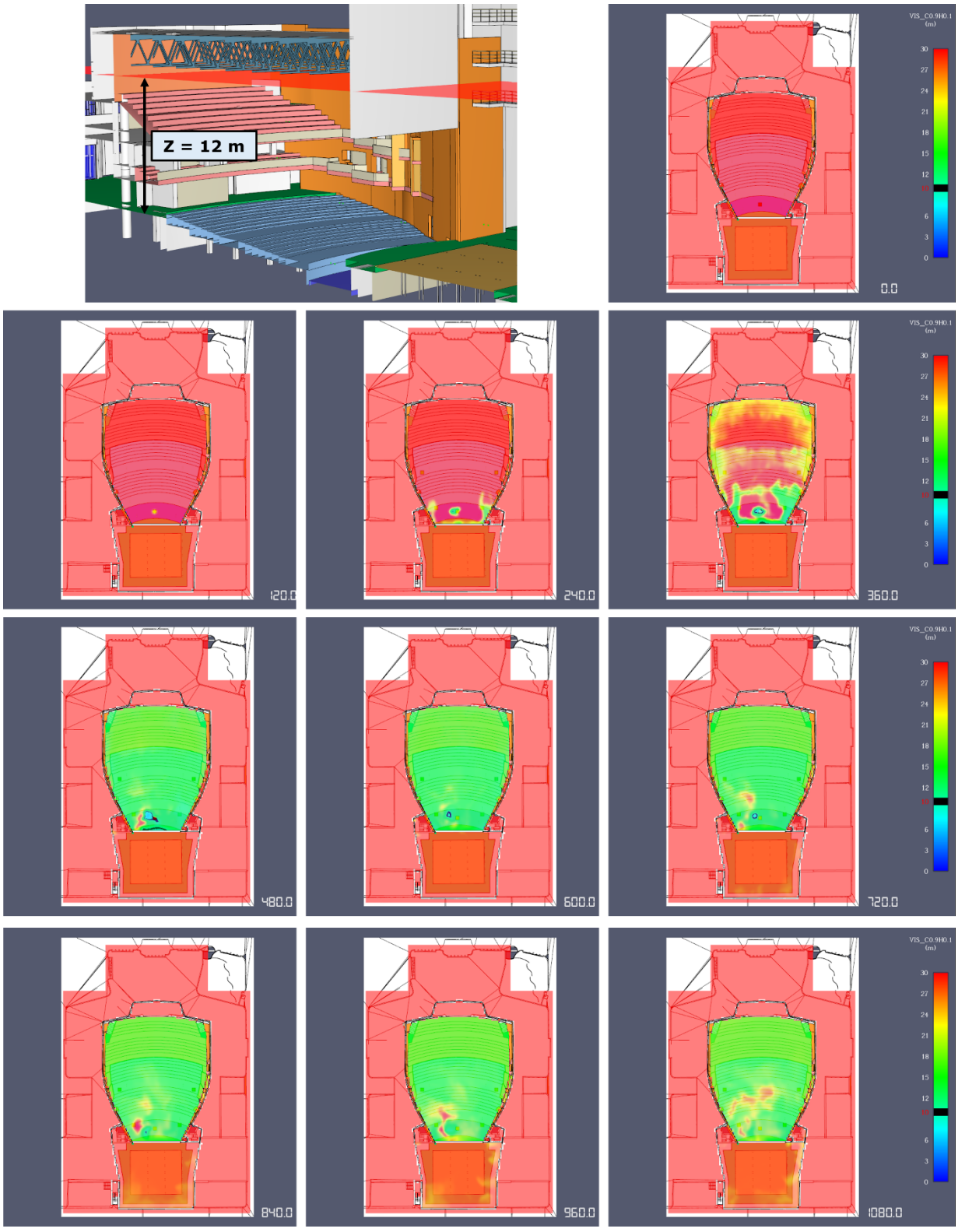


Figura 45. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 12 m

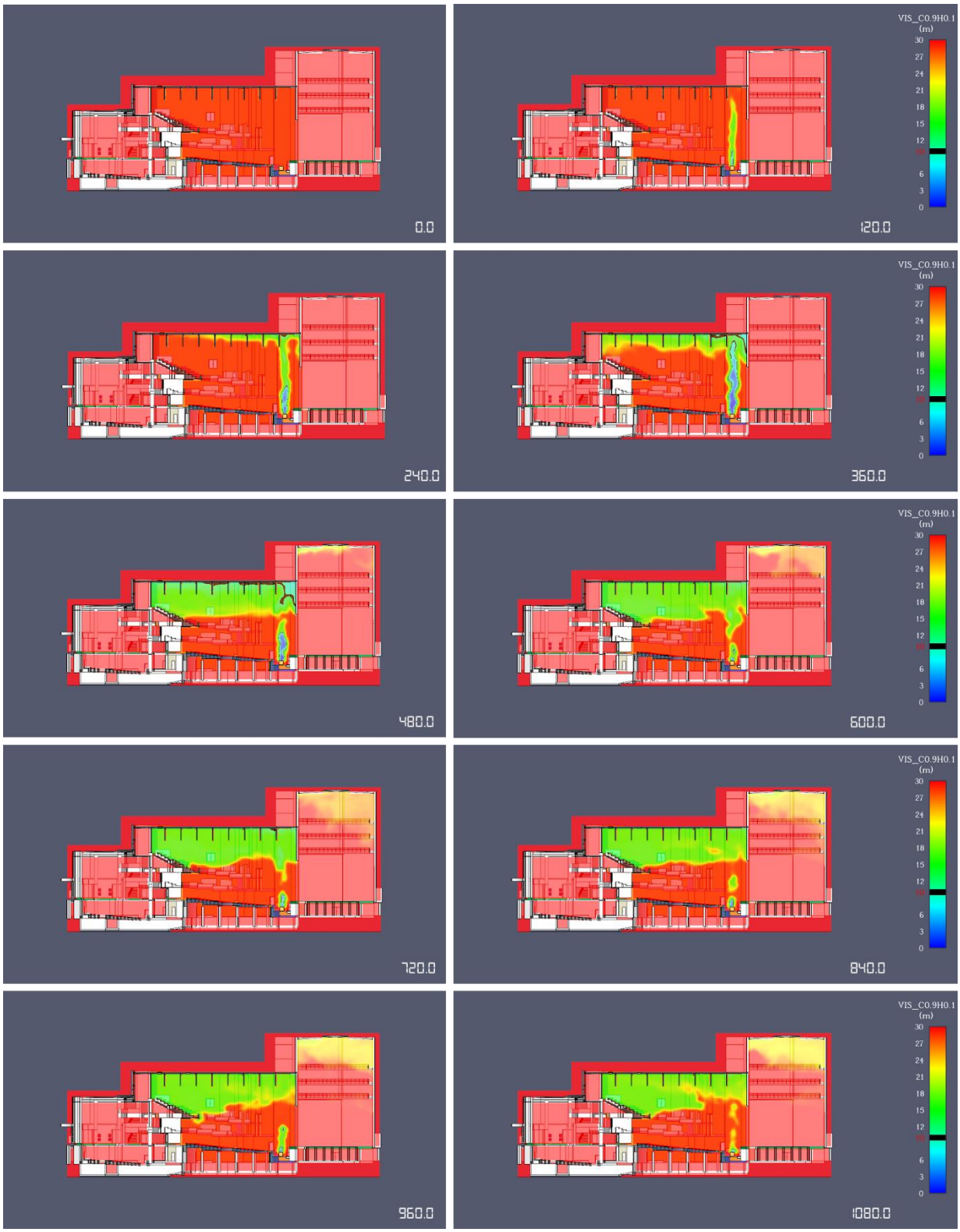


Figura 46. Distribuzione della visibilità lungo il bruciatore: Posizione X = 50 m

Figura 47. Distribuzione della visibilità lungo n. 4 evacuatori: Posizione Y = 54 m

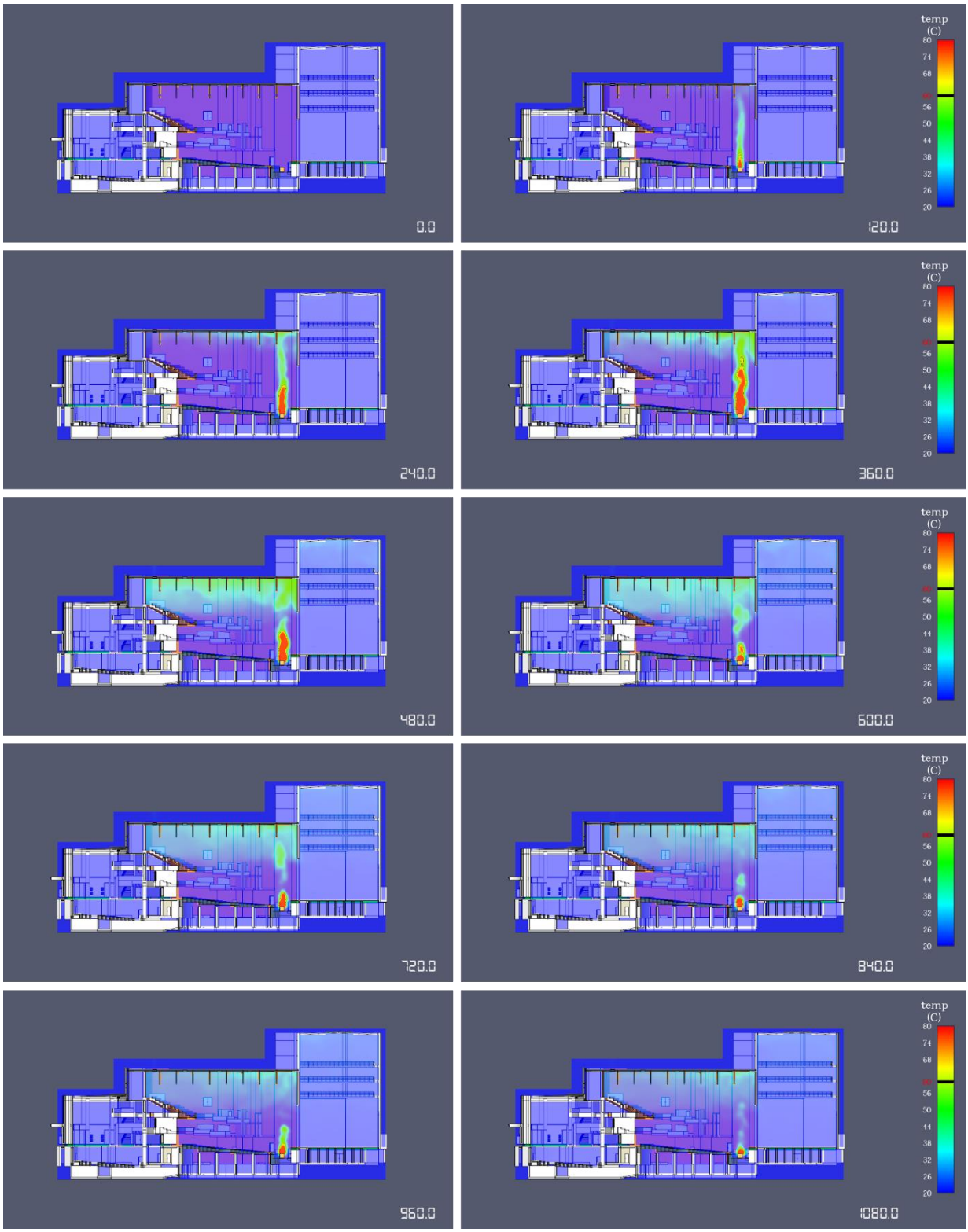


Figura 48. Distribuzione della temperatura lungo il bruciatore: Posizione X = 50 m

Scenario TEATRO – B1

Il secondo scenario prevede un focolaio ubicato nelle prime file della platea, in adiacenza all'uscita di sicurezza verso il corridoio.

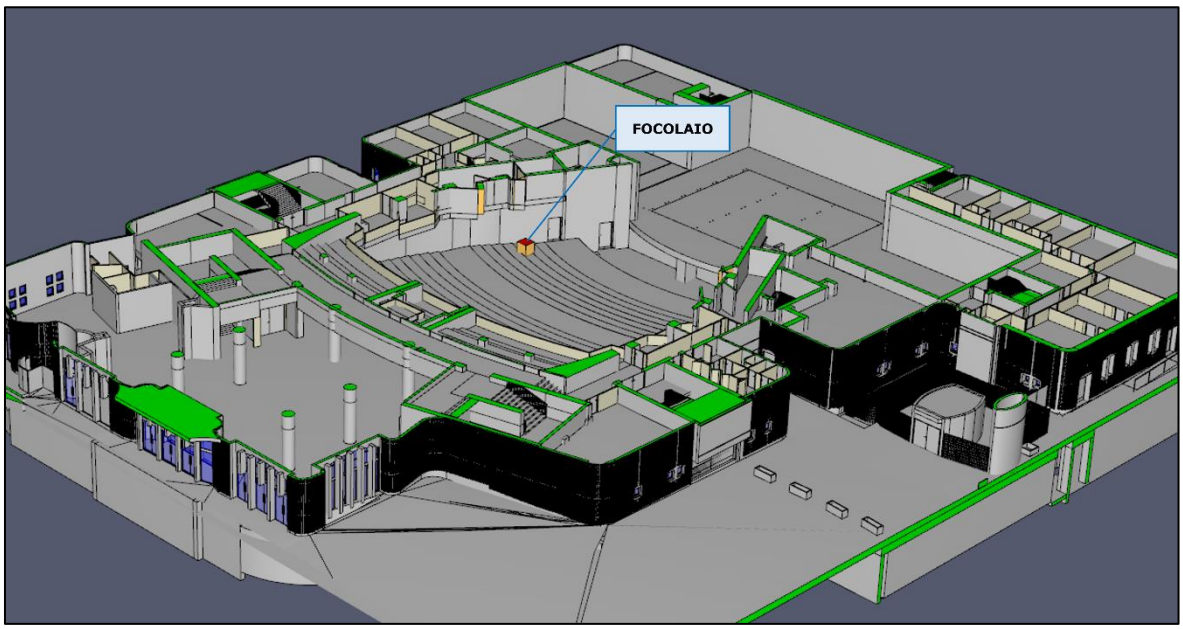


Figura 49. Posizione Focolaio Scenario TEATRO – B1

Attraverso l'utilizzo del primo dispositivo di indagine (*Devices*) sono state condotte le verifiche della sicurezza degli occupanti relative alla **visibilità**. I grafici sono stati realizzati prendendo i valori medi calcolati ogni 30 secondi e sono stati organizzati tenendo conto della collocazione delle sonde all'interno della Sala Rossa.

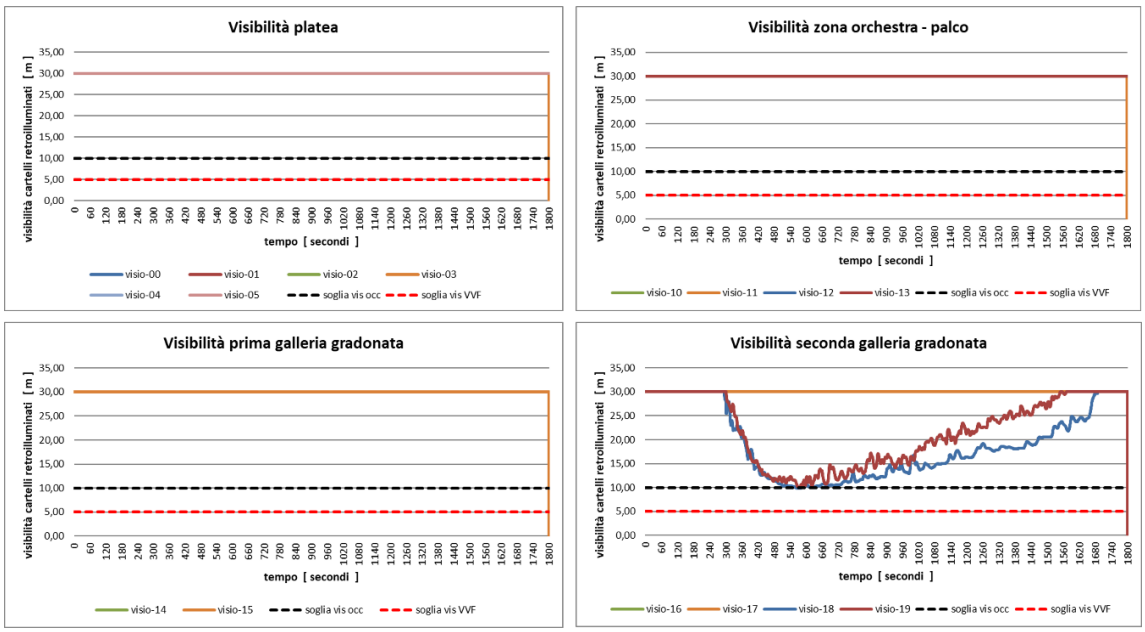


Figura 50. Grafici di visibilità Scenario TEATRO – B1

Gli output dei grafici mostrano come la visibilità si mantenga quasi sempre costante (30 m) eccetto nel caso della seconda galleria gradonata, dove diverse sonde registrano valori al di sotto dei 15 m, avvicinandosi alle soglie di sicurezza previste per gli occupanti ed i soccorritori, pari rispettivamente a 10 e 5 m. La configurazione di questo scenario di progetto non ha avuto ripercussioni sui dati di output rispetto alla simulazione precedente, però sorge una potenziale criticità, ovvero l'impossibilità per alcuni occupanti di usufruire di una delle uscite di sicurezza presenti nella Sala Rossa, poiché investita dai prodotti della combustione. Per avere un quadro completo su questo aspetto occorre eseguire ulteriori indagini, ossia il confronto tra i risultati numerici e gli output derivanti dalle *Slices* di visibilità impostate nel modello (per capire se le sonde per le quali i valori si avvicinano alla soglia siano significativi nelle valutazioni per il calcolo di ASET).

Procedendo attraverso l'utilizzo dei dispositivi di indagine (*Slices* e *Isosurfaces*) è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo. I risultati grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** e **temperatura** sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi).
Dall'analisi delle *Slices* orizzontali di visibilità emerge che i fumi si accumulano solo nella parte alta della Sala Rossa. Dopo circa 300 s dalla fase dell'innesco vi è un abbassamento della visibilità perché i prodotti della combustione iniziano ad occupare la seconda galleria gradonata con i picchi di criticità che si registrano solo lungo il perimetro laterale della sala, quindi ininfluente ai fini della sicurezza degli occupanti. Infatti, la quantità di fumo che si abbassa non è tale da superare il valore soglia: si stratifica in alto e si muove verso l'esterno grazie alle aperture di smaltimento installate in copertura.
I contributi forniti dalle *Slices* verticali di visibilità in direzione x e y confermano quanto detto: i fumi si diffondono nella parte superiore della sala, lambendo la superficie della copertura, per poi discendere lungo le pareti, limitandosi ad occupare metà galleria gradonata e non l'intera parte alta del volume interno, come meglio rappresentato in figura 45. Per una lettura più chiara è stato deciso di nascondere l'elemento "trave reticolare" da cui sono emerse delle tonalità cromatiche che si traducono in criticità: effettivamente la visibilità scende al di sotto del valore soglia, ma è un fenomeno che si registra ad una quota superiore rispetto a quella dove sono stati posizionati *Devices* e *Slices*, quindi oltre l'altezza media di un uomo e comunque in istanti di tempo (tra 480 e 600 secondi) per cui l'esodo è già avvenuto, come verrà illustrato nel capitolo successivo.
In generale i valori registrati non scendono mai al di sotto della soglia grazie all'istallazione del SENFC ibrido però si terrà comunque conto delle soglie più significative per valutare il parametro ASET con un approfondimento ai possibili tempi di coda.
Dalla *Slices* verticale di temperatura in direzione x non si registrano temperature elevate: le stesse risultano meno significative in quanto i valori di temperatura massima si attestano sempre attorno ai 30°C, ben al di sotto del valore soglia di sicurezza, che per gli occupanti è stato fissato a 60°C.

È stato deciso di non riportare risultati grafici relativi alle *Isosurfaces* poiché gli unici valori critici si sono registrati al di sopra della superficie del focolaio, dove al processo di combustione, generalmente, è associata la presenza di fiamma e di un pennacchio (plume).

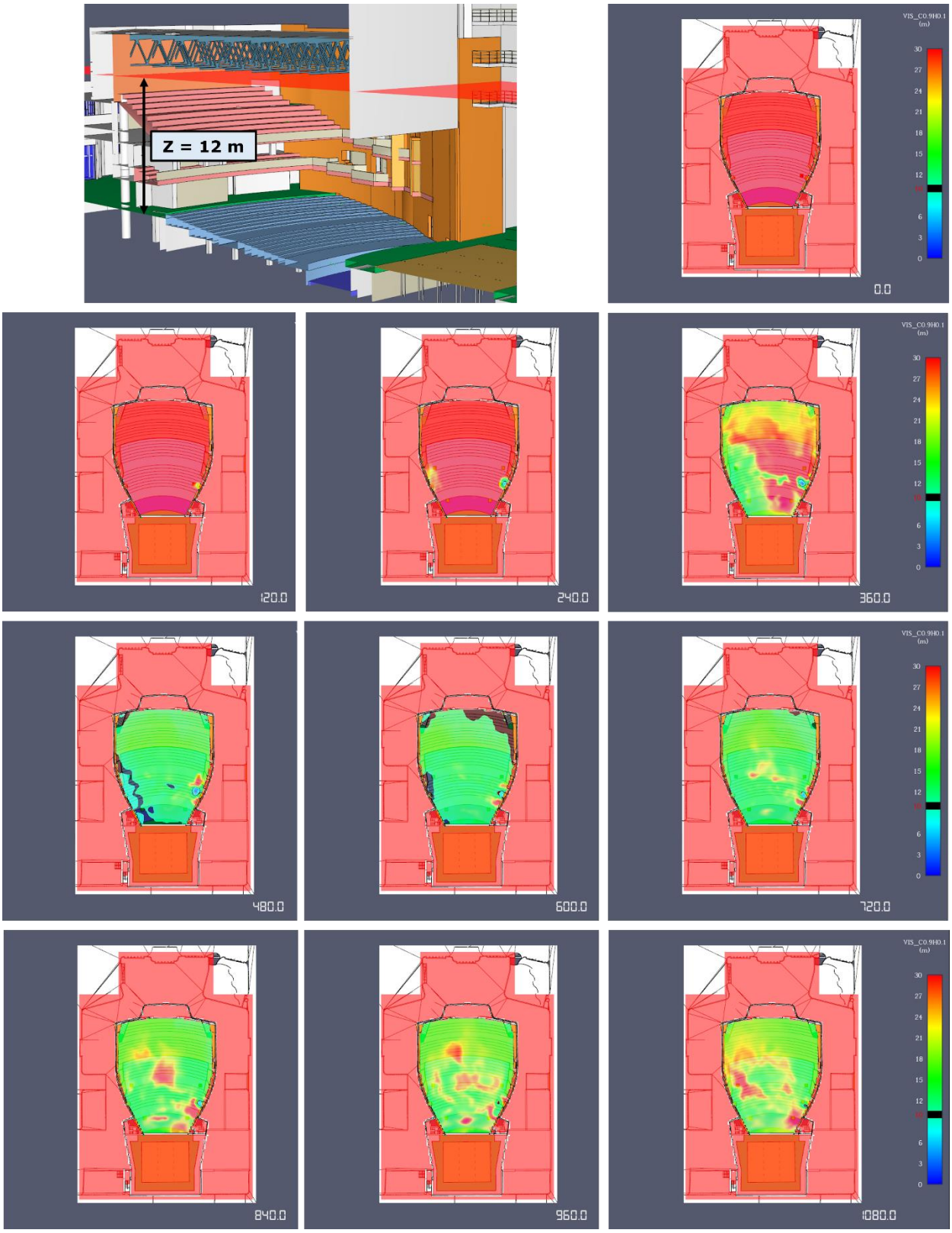


Figura 51. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 12 m

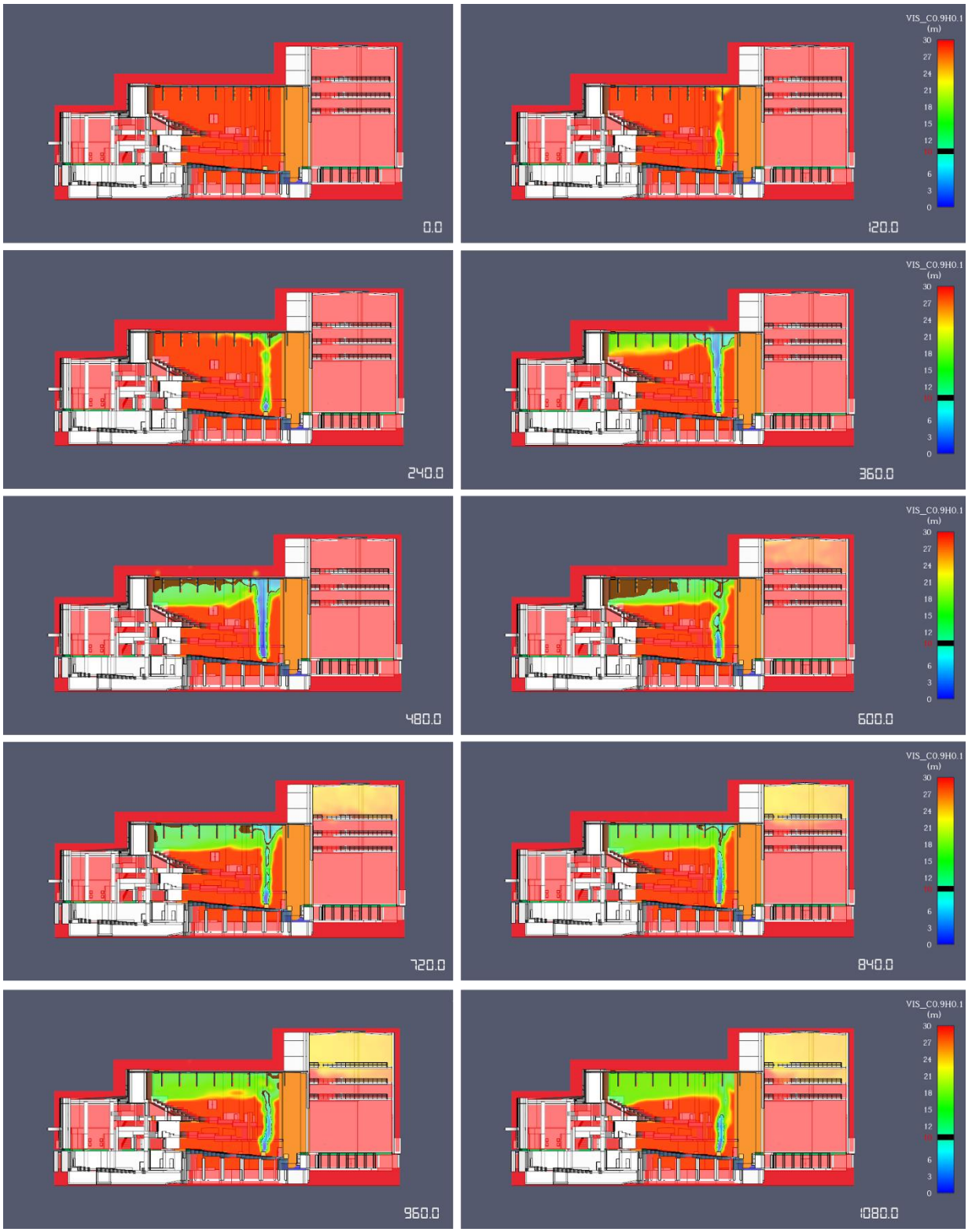


Figura 52. Distribuzione della visibilità lungo il bruciatore: Posizione X = 60 m

Figura 53. Distribuzione della visibilità lungo n. 4 evacuatori: Posizione Y = 54 m

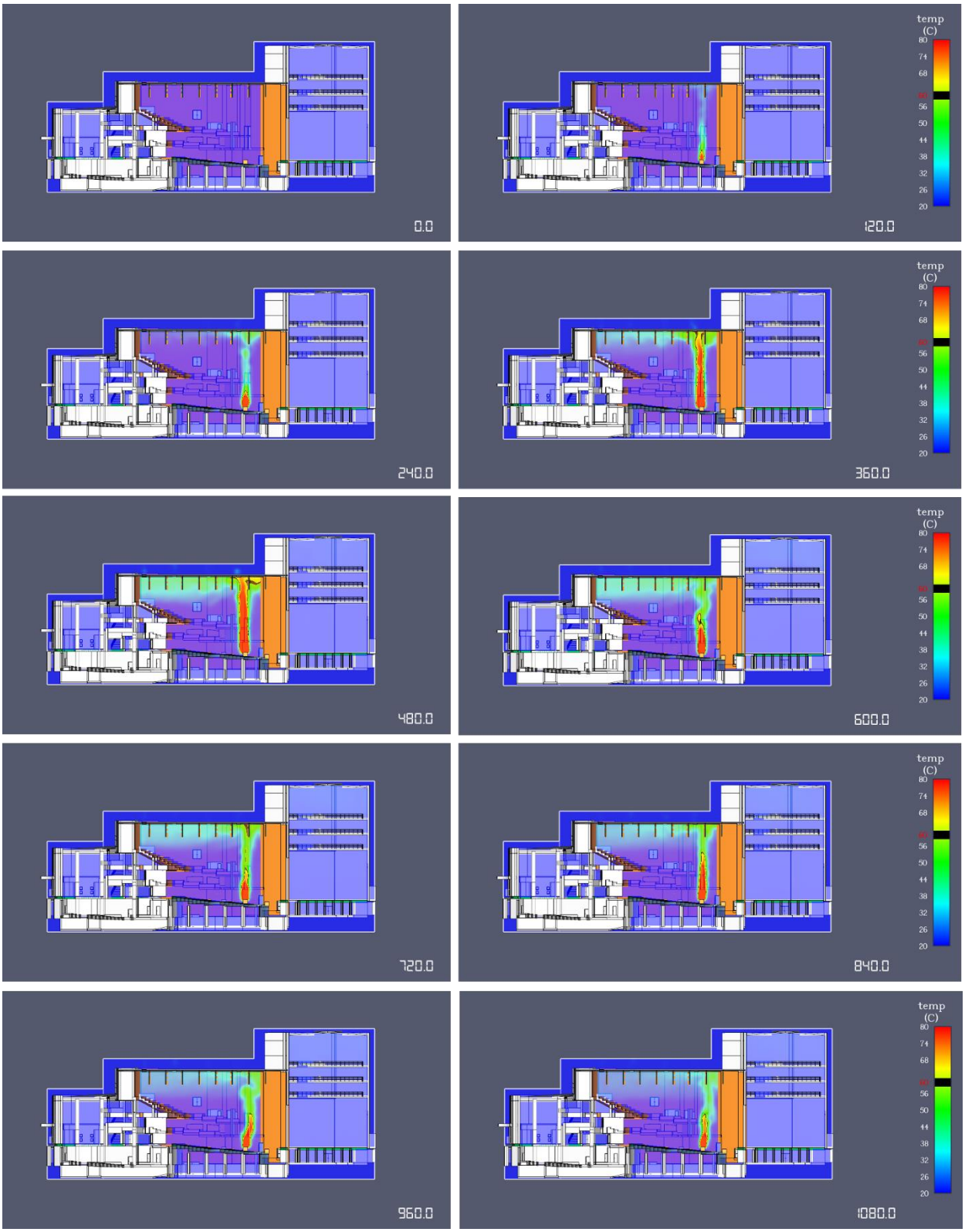


Figura 54. Distribuzione della temperatura lungo il bruciatore: Posizione X = 60 m

Scenario TEATRO – D1

Il terzo scenario prevede un focolaio posizionato nella zona della platea alta di fronte le uscite di sicurezza verso l'atrio.

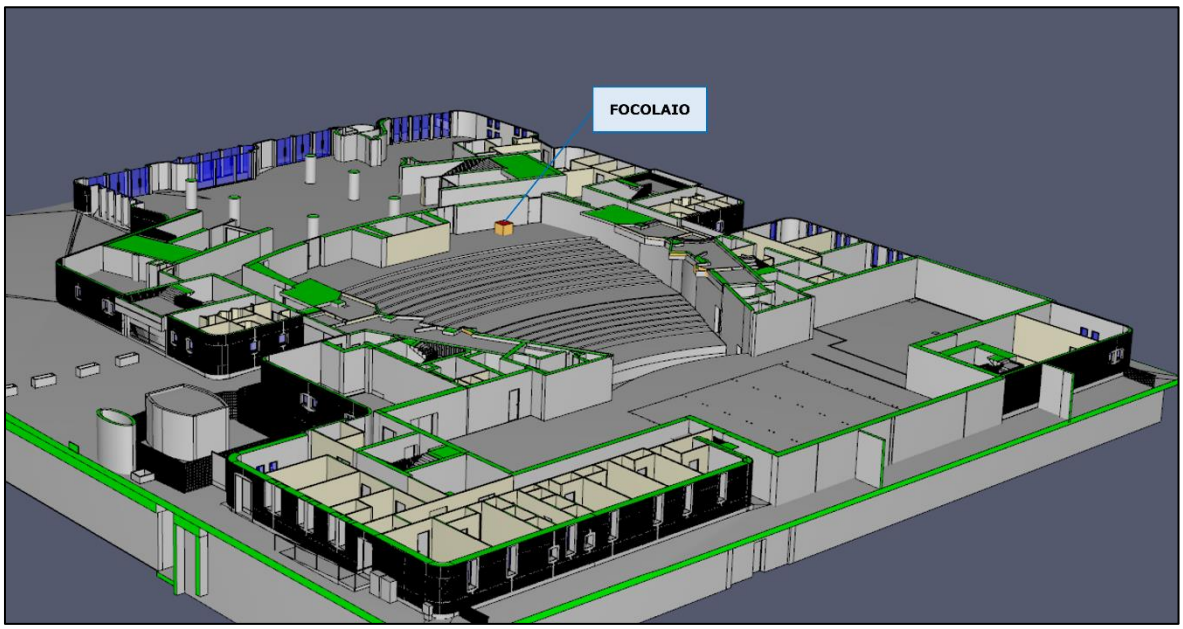


Figura 55. Posizione Focolaio Scenario TEATRO – D1

Attraverso l'utilizzo del primo dispositivo di indagine (*Devices*) sono state condotte le verifiche della sicurezza degli occupanti relative alla **visibilità**. I grafici sono stati realizzati prendendo i valori medi calcolati ogni 30 secondi e sono stati organizzati tenendo conto della collocazione delle sonde all'interno della Sala Rossa.

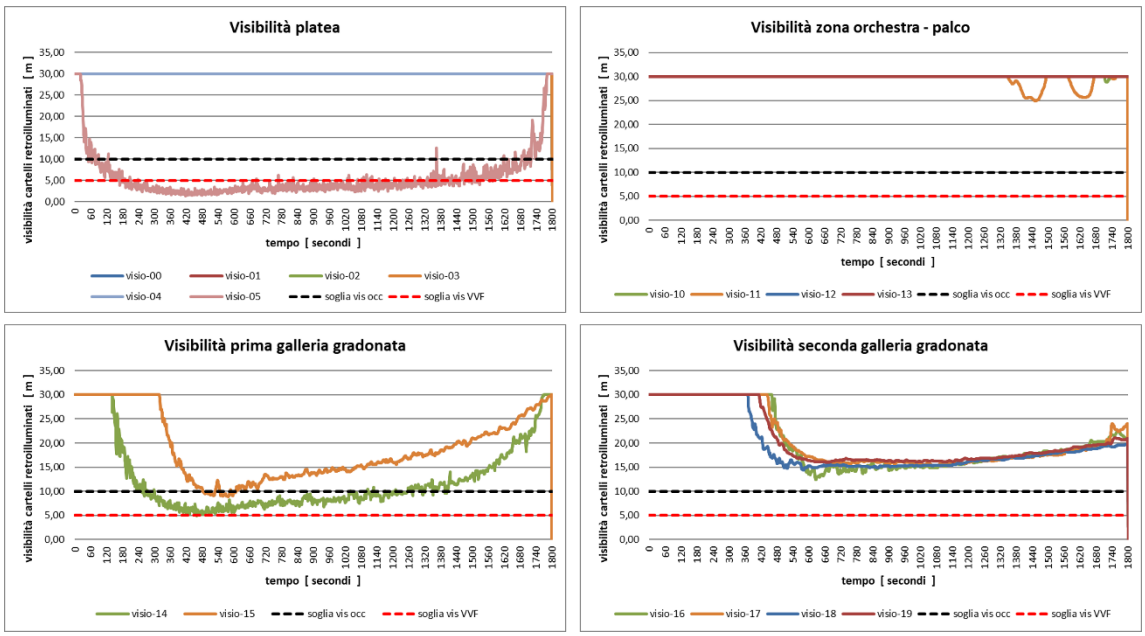


Figura 56. Grafici di visibilità Scenario TEATRO – D1

I grafici elaborati in questo scenario di progetto mostrano un importante oscillazione del parametro visibilità con picchi che scendono anche al di sotto delle soglie di sicurezza previste per gli occupanti ed i soccorritori, pari rispettivamente a 10 e 5 m. Su questo aspetto occorre eseguire ulteriori indagini, confrontando i risultati numerici con gli output derivanti dalle *Slices* di visibilità impostate nel modello, in particolare per capire se le sonde per le quali i valori si avvicinano alla soglia siano significativi nelle valutazioni per il calcolo di ASET. Le *Slices* e i *Devices* di visibilità sono stati infatti impostati a quote e in posizioni diverse in pianta per indagare il livello di oscuramento lungo le vie di esodo e in prossimità delle uscite. In particolare, dal grafico si nota che la prima sonda a rilevare valori critici è la visio-05 localizzata in platea. Dalla distribuzione in pianta si comprende però che è poco significativa per le analisi in quanto collocata nelle immediate vicinanze del focolaio. I dati estrapolati perdono di rilevanza in quanto è prevedibile che, in prossimità del punto di innesco, tutte le grandezze abbiano valori critici. Al contrario, la visibilità nella prima galleria gradonata, registrata dalla sonda visio-14, risulterà essenziale nel calcolo di ASET, come verrà specificato nel seguito.

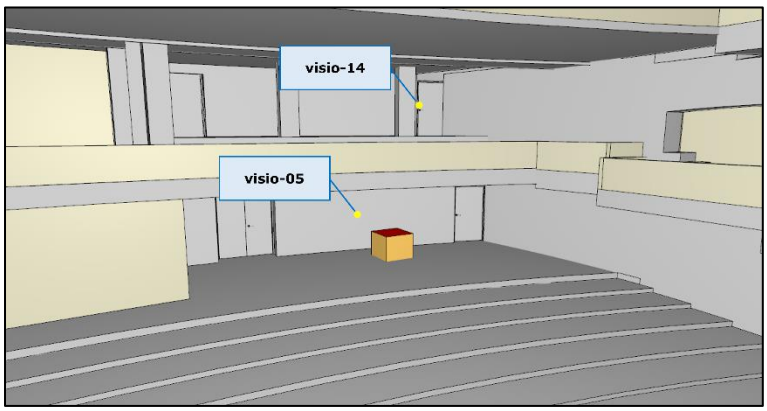
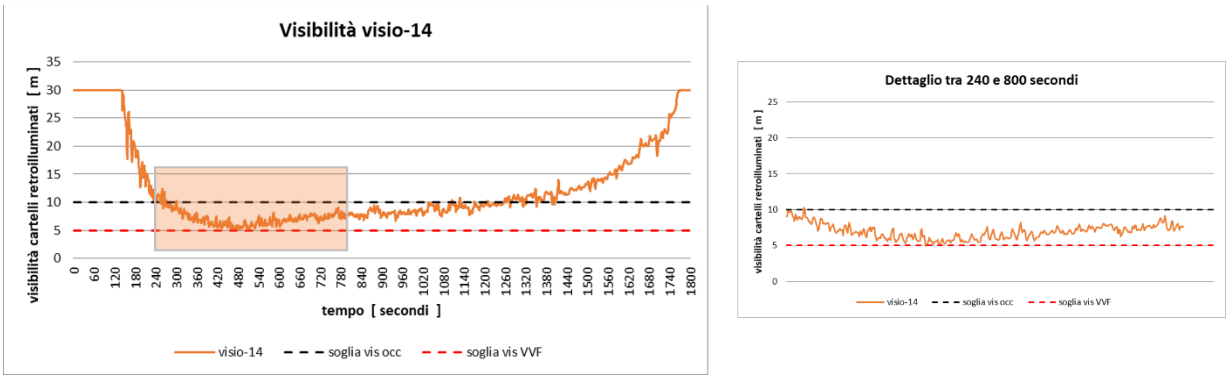


Figura 57. Prime sonde a rilevare valori critici

In caso di incendio proprio davanti le uscite della platea, si riscontra un ridotto ASET (circa 240 s) per il livello superiore, ovvero la prima galleria gradonata. Inoltre, le uscite risultano impraticabili per cui la sala disporrà di un minor numero di uscite con conseguente maggiore coda davanti le uscite restanti e allungamento dei tempi di esodo complessivo.



Procedendo attraverso l'utilizzo dei dispositivi di indagine (*Slices* e *Isosurfaces*) è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo. I risultati grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** e **temperatura** sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi), ad eccezione delle *Slices* di visibilità a quota Z = 4,5 m per le quali si è deciso di mostrare le criticità riscontrate ogni 60 secondi.

Dall'analisi delle *Slices* orizzontali di visibilità localizzate a quota Z = 4,5 m, emerge che i fumi sin dai primi minuti si diffondono ad altezza d'uomo nella prima galleria gradonata, causando una riduzione della visibilità con valori minimi che raggiungono i 5 - 6 m. Nei minuti successivi la stessa situazione si verifica nella parte speculare della sala, con i fumi che interessano anche una porzione del corridoio che porta verso le scale. Da qui in poi i fumi su propagano verso il Foyer, i quali verranno smaltiti grazie ai lucernari installati a soffitto (soluzione progettuale non trattata all'interno del presente elaborato).
Si specifica che i risultati derivanti da questo scenario di incendio sono frutto di una seconda simulazione, come verrà spiegato nel seguito:

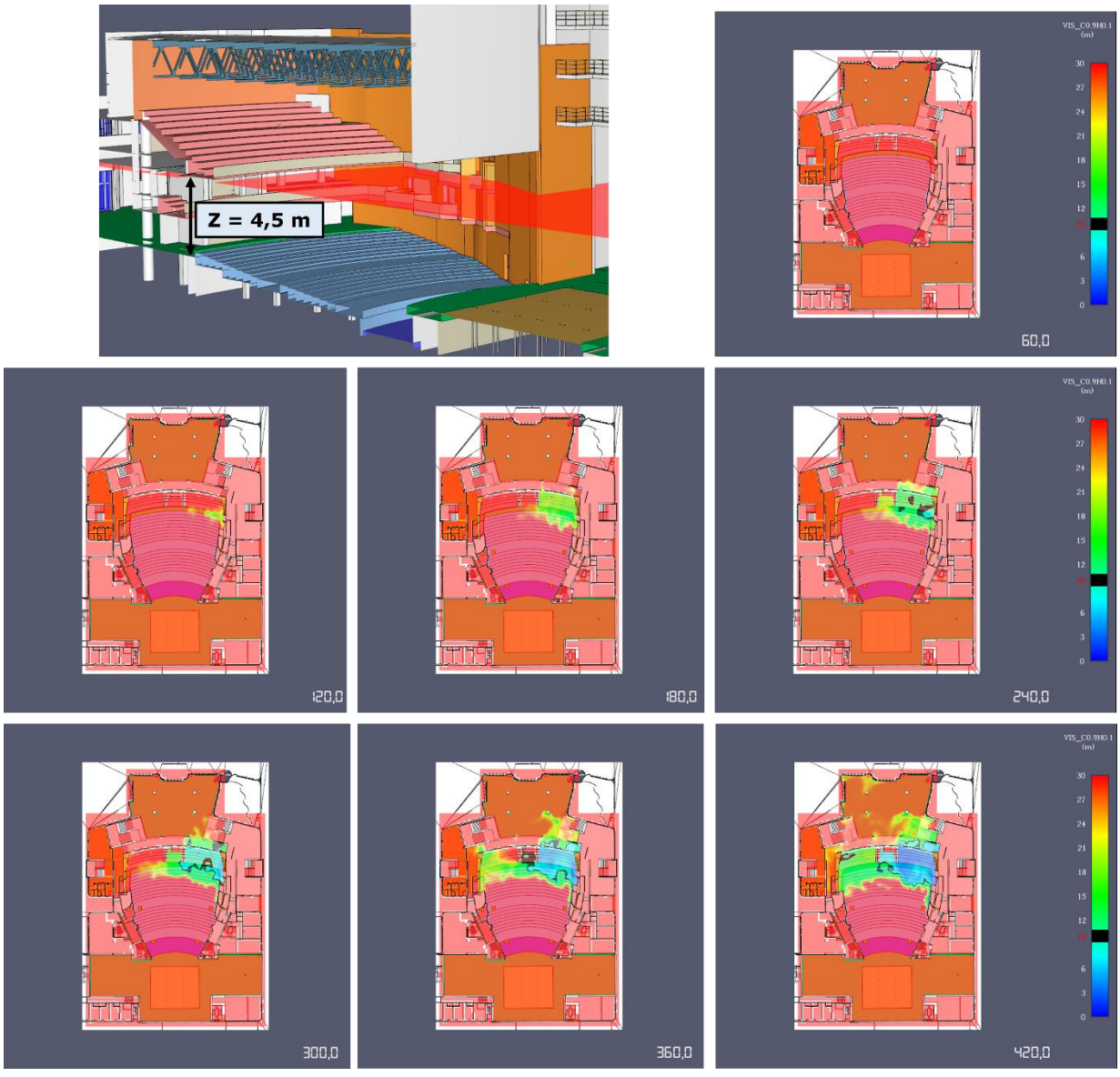
- mediante una prima simulazione si sono osservati i punti di oscuramento all'interno del compartimento di primo innesco. Tale analisi, in linea con le aspettative, ha mostrato come dapprima i fumi si diffondessero nelle immediate vicinanze del focolaio, per poi propagarsi nel resto dell'ambiente. Il punto su cui si è voluta focalizzare l'attenzione è stato il corridoio antistante le uscite di sicurezza, per cui è stata elaborata una seconda simulazione con l'intenzione di creare uno scenario il più verosimile coerente con le operazioni di esodo degli occupanti presenti. Mantenendo le stesse condizioni al contorno, sono state applicate delle modifiche: al livello della platea si sono installate due aperture con tempo di attivazione dopo 60 s dall'innesco dell'incendio, mentre al livello della prima galleria gradonata è stata realizzata una sola apertura con tempo di attivazione dopo 150 s dall'innesco dell'incendio.

Alla luce dei risultati riscontrati, con riferimento alla sonda visio-14, si nota che a 240 secondi lo strato dei fumi evolve facendo scendere ulteriormente di quota l'interfaccia con la zona non contaminata. Per questo motivo, la porzione di sala nell'intorno del focolaio e del corridoio, sarà soggetta ad ulteriori analisi nella simulazione di esodo, in quanto le uscite di sicurezza presenti sia al livello della platea che al piano superiore risulteranno interdette a causa delle condizioni incapacitanti che le caratterizzano.

I risultati grafici delle *Slices* orizzontali relative alla seconda galleria gradonata (Z = 12 m) sono stati ridotti per evitare di appesantire la trattazione vista la poca concentrazione dei fumi nella parte alta del volume interno. I fumi si accumulano e si stratificano in alto senza mai abbassare la soglia di visibilità per gli occupanti presenti. Da quel punto in poi si muovono verso l'esterno grazie alle aperture di smaltimento installate in copertura oppure verso gli ambienti comunicanti (torre scenica) poiché non risultano separati da elementi di chiusura verticale.

I contributi forniti dalle *Slices* verticali di visibilità in direzione x e y confermano quanto detto. I fumi si diffondono dapprima nelle immediate vicinanze del focolaio per poi ridurre drasticamente la visibilità nella prima galleria gradonata: si mantengono quasi sempre al di sotto di 2 metri dal piano di calpestio. Nel corridoio la caduta di visibilità è limitata allo spazio in cui si aprono le porte per permettere l'esodo degli occupanti, con la situazione che diventa stabile man mano che la potenza termica si riduce.

La *Slices* verticale di temperatura in direzione x mostra come i gradienti più elevati si registrino nelle immediate vicinanze del focolare, mentre lungo il corridoio e nella prima galleria gradonata le temperature oscillano tra 40 e 50 °C. Non si registrano temperature oltre soglia lungo le vie di esodo.



• • •

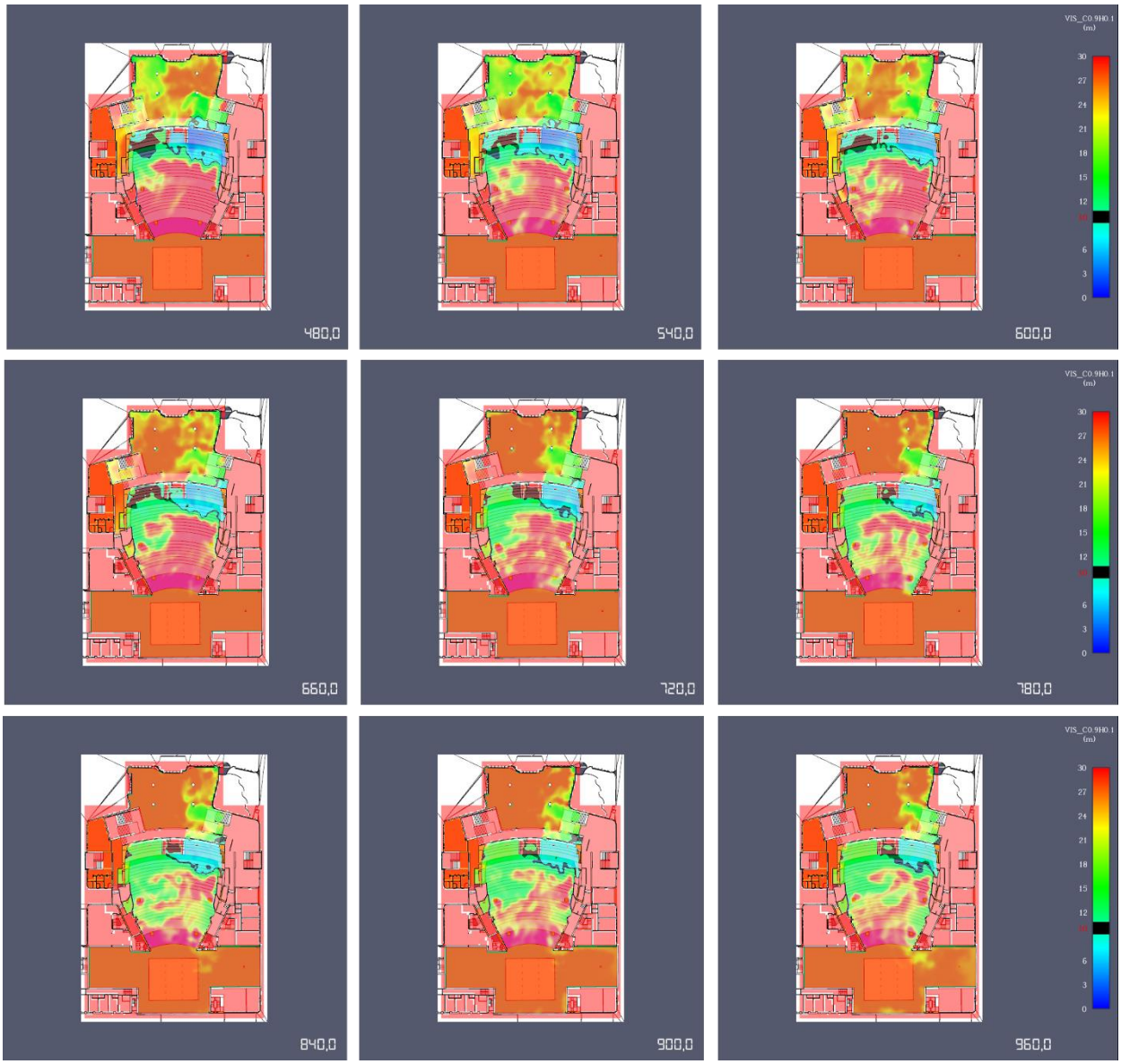


Figura 58. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 4,5 m

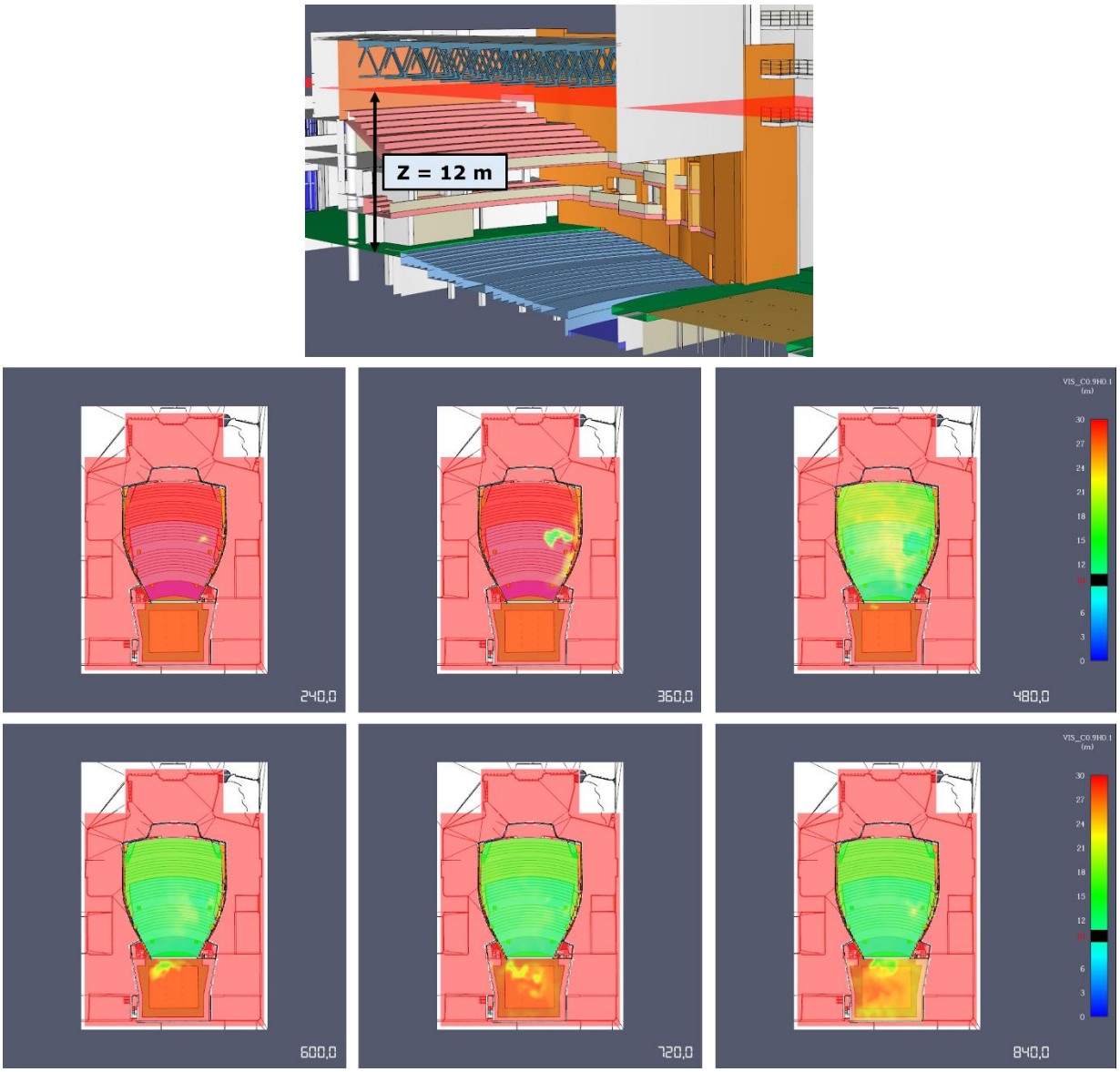


Figura 59. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 12 m

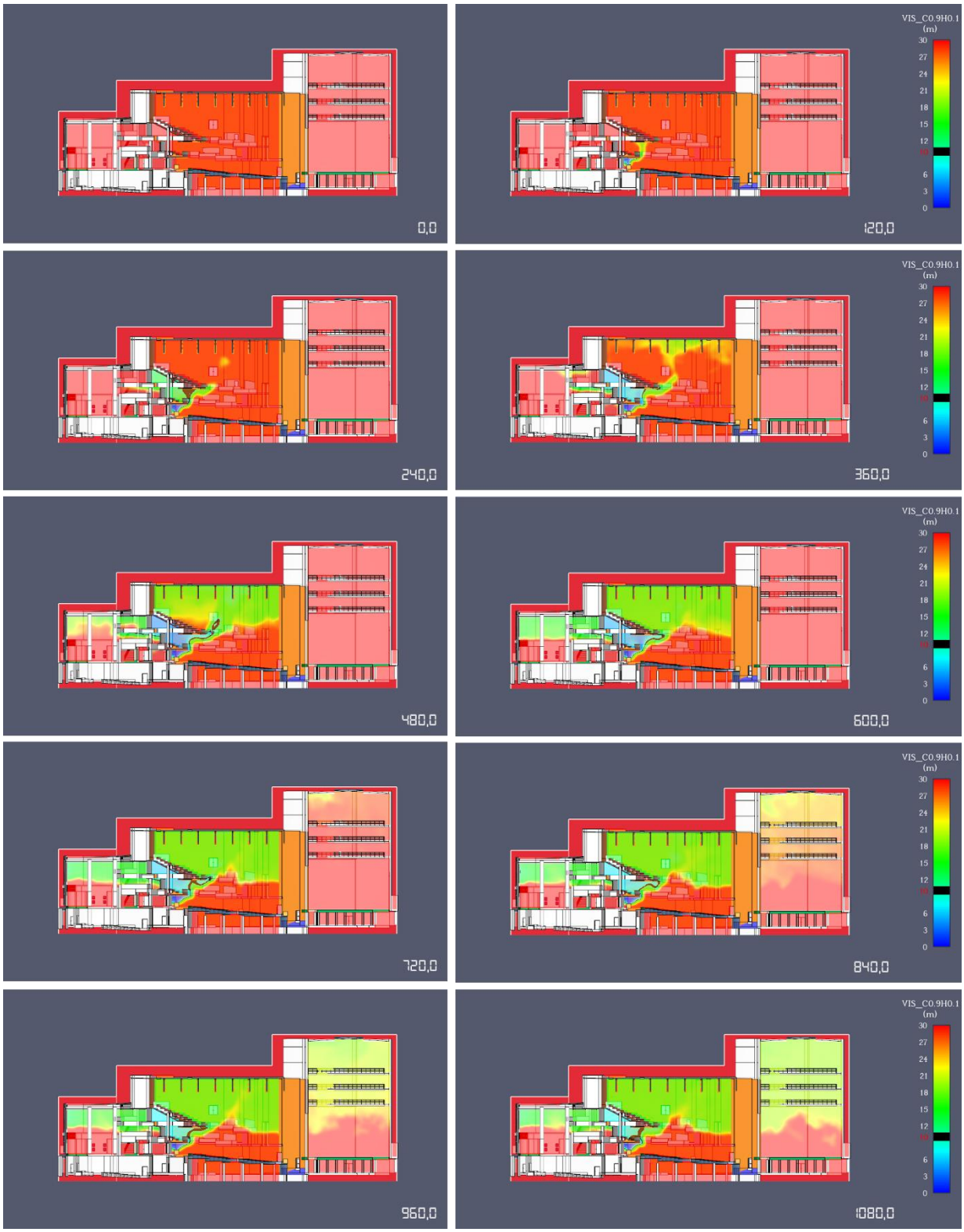


Figura 60. Distribuzione della visibilità lungo il bruciatore: Posizione X = 60 m

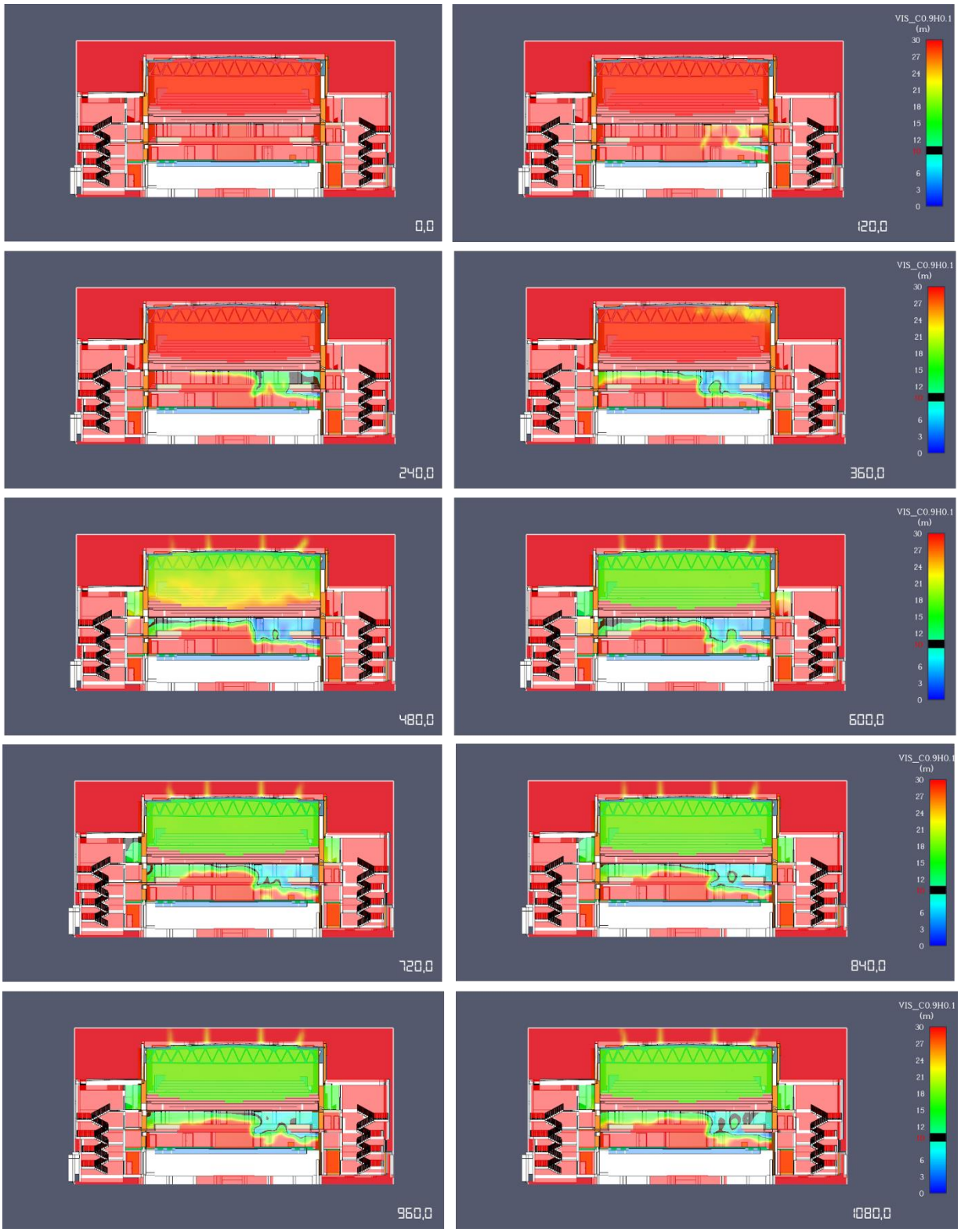


Figura 61. Distribuzione della visibilità lungo n. 4 evacuatori: Posizione Y = 54 m

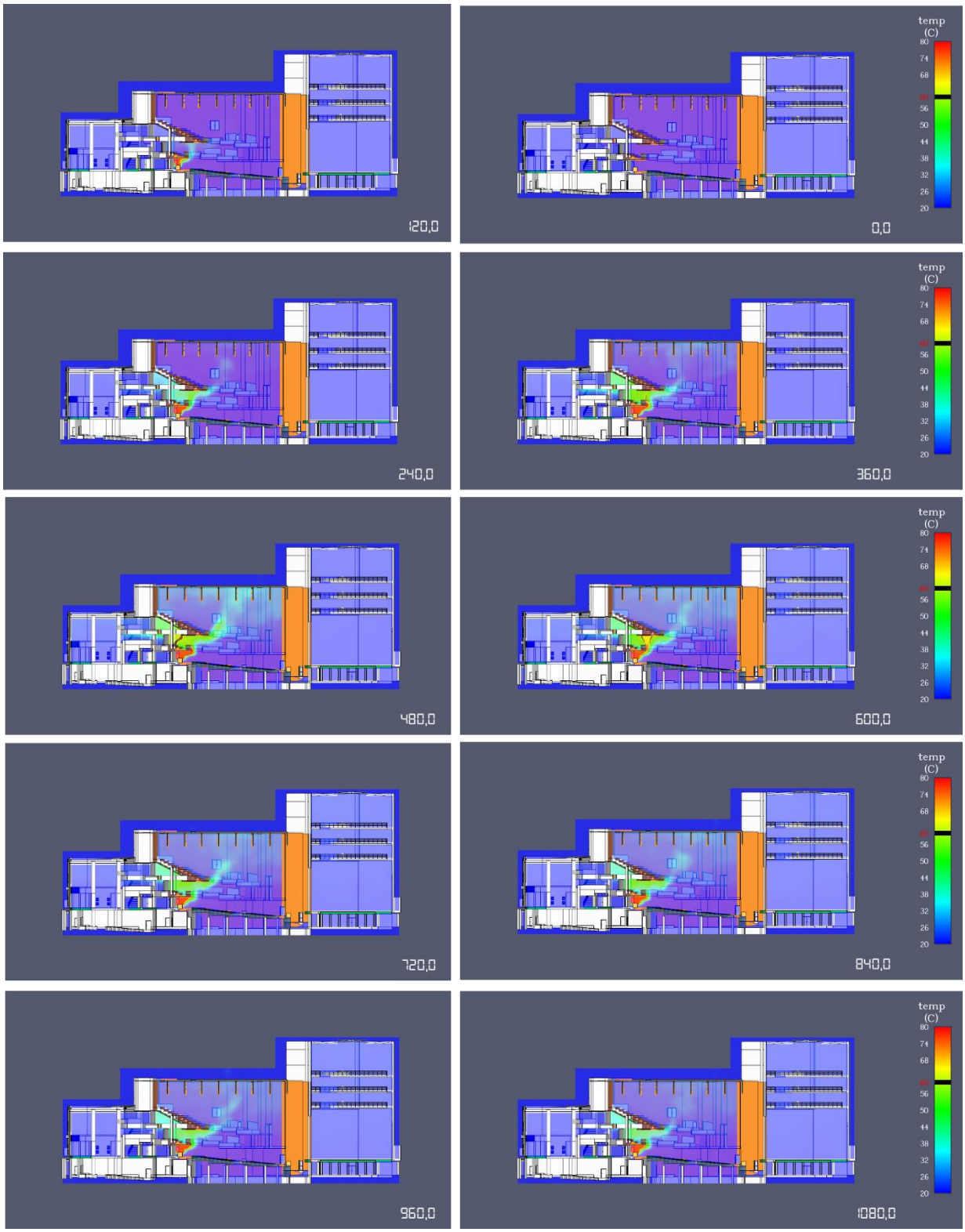


Figura 62. Distribuzione della temperatura lungo il bruciatore: Posizione X = 60 m

Per completare il quadro delle informazioni sono state selezionate le *Isosurfaces* per definire la configurazione dei fumi in punti critici dell'edificio e in istanti di tempo significativi. In questo scenario mostrano l'andamento dei fumi, quindi della visibilità, entro 10 metri e in momenti differenti:

- 0 secondi, inizio della simulazione;
- 150 secondi, si apre la porta al livello della prima galleria gradonata;
- 240 ÷ 300 secondi, la visibilità raggiunge il valore soglia per gli occupanti (10 m);
- 660 secondi, la propagazione dei fumi aumenta nella sala e diminuisce lungo il corridoio.

I punti scelti sono la platea e il corridoio in modo che sia visibile sia il focolaio che la direzione di diffusione degli effluenti. Si nota come gli effetti dell'incendio contaminano la prima galleria gradonata e la zona di distribuzione all'avanzare della combustione e vengono poi smaltiti verso l'esterno man mano che la potenza termica si riduce.

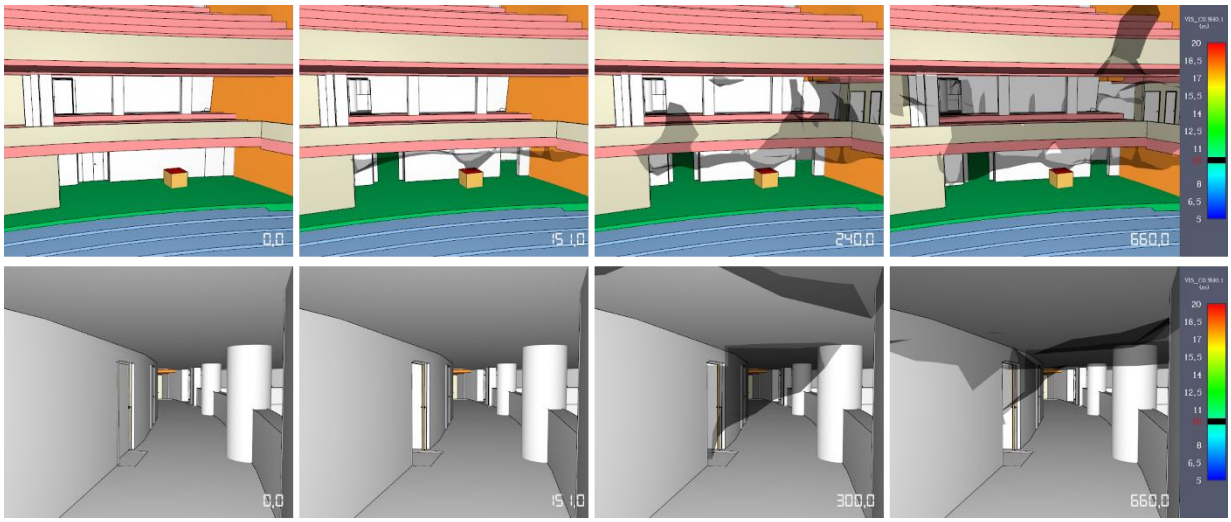


Figura 63. Isosurfaces di visibilità

Scenario TEATRO – F1

Il quarto scenario prevede un focolaio posizionato nella prima galleria gradonata, lato destro. La posizione è stata scelta al fine di analizzare la propagazione del fumo nelle diverse parti del volume della sala.

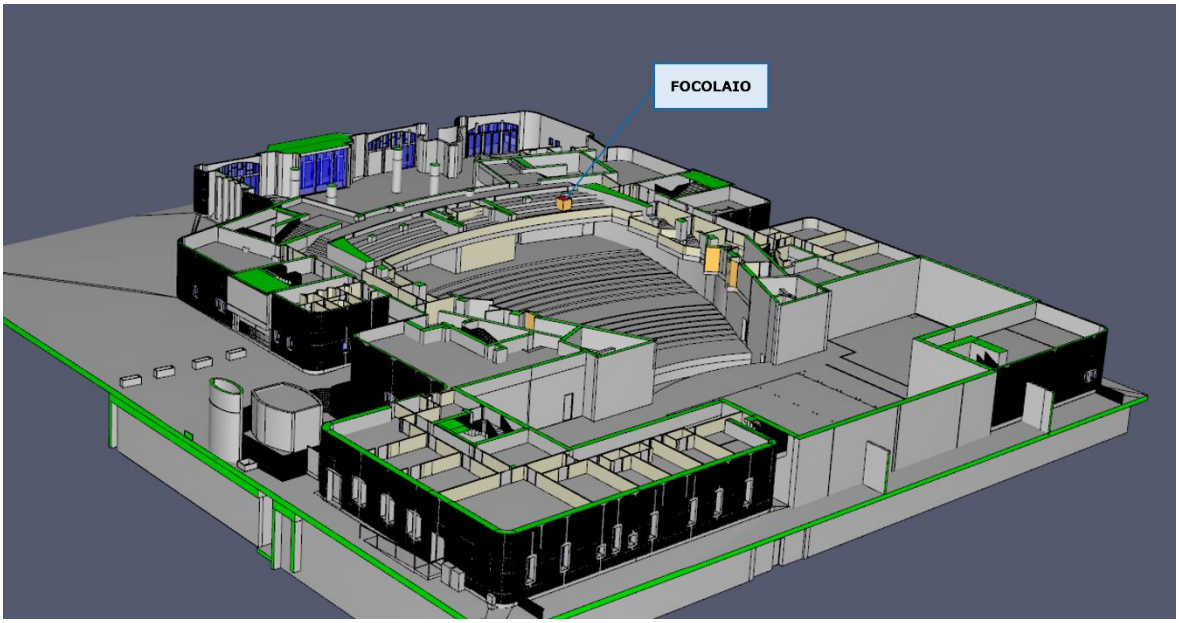


Figura 64. Posizione Focolaio Scenario TEATRO – F1

Attraverso l'utilizzo del primo dispositivo di indagine (*Devices*) sono state condotte le verifiche della sicurezza degli occupanti relative alla **visibilità**. I grafici sono stati realizzati prendendo i valori medi calcolati ogni 30 secondi e sono stati organizzati tenendo conto della collocazione delle sonde all'interno della Sala Rossa.

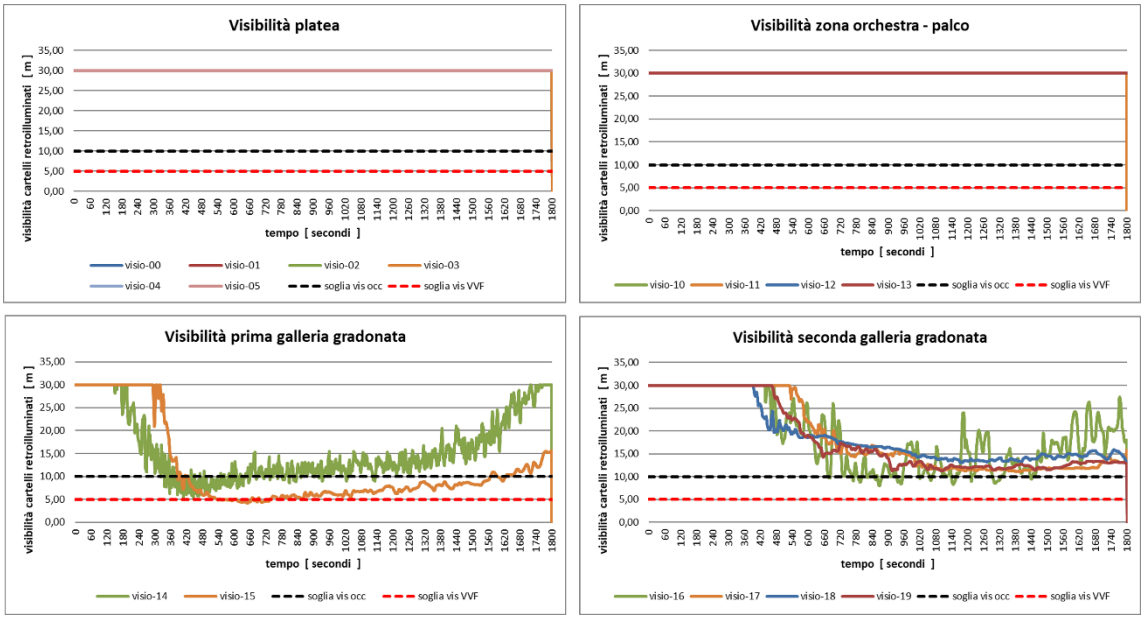


Figura 65. Grafici di visibilità Scenario TEATRO – F1

I grafici elaborati in questo scenario di progetto mostrano un importante oscillazione del parametro visibilità con picchi che scendono anche al di sotto delle soglie di sicurezza previste per gli occupanti ed i soccorritori, andamenti molto simili allo scenario di incendio analizzato precedentemente. Su questo aspetto occorre eseguire ulteriori indagini, confrontando i risultati numerici con gli output derivanti dalle *Slices* di visibilità impostate nel modello, in particolare per capire se le sonde per le quali i valori si avvicinano alla soglia siano significativi nelle valutazioni per il calcolo di ASET. Le *Slices* e i *Devices* di visibilità sono stati infatti impostati a quote e in posizioni diverse in pianta per indagare il livello di oscuramento lungo le vie di esodo e in prossimità delle uscite. In particolare, dal grafico si nota che le prime sonde a rilevare valori critici sono la visio-14 e la visio-15, entrambe localizzate nella prima galleria gradonata. Dalla distribuzione in pianta si comprende però che sono poco significative per le analisi in quanto collocate nelle immediate vicinanze del focolaio. I dati estrapolati perdono di rilevanza in quanto è prevedibile che, in prossimità del punto di innesco, tutte le grandezze abbiano valori critici.

Alla luce dei risultati ottenuti, molto vicini allo Scenario TEATRO – D1, è stato deciso di approfondire quest'ultimo con valutazioni di dettaglio in quanto si sono registrate delle condizioni critiche in platea e nella prima galleria gradonata che necessitano di ulteriori approfondimenti.
Si specifica inoltre che nonostante le soglie posizionate nella seconda galleria gradonata mostrino dei valori di visibilità che raggiungono minimi di circa 9 m, ai fini della tutela delle persone e dei soccorritori risultano poco rilevanti in quanto a circa 660 s l'esodo dell'edificio è già stato completato, con i soccorritori che possono operare in sicurezza in quanto la soglia dei 5 m non è mai superata. Il tutto si verifica nella parte alta della sala, punto dal quale i fumi si muoveranno verso l'esterno grazie al SEFC installato in copertura.

Per completezza di informazioni è stato deciso di riportare i risultati grafici estrapolati attraverso l'utilizzo dei dispositivi di indagine (*Slices* e *Isosurfaces*). In tal modo è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo. I risultati grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** e **temperatura** sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi), senza discretizzare ulteriormente l'intervallo di tempo per evitare di appesantire la trattazione.

Dall'analisi delle *Slices* orizzontali di visibilità localizzate a quota Z = 4,5 m, emerge che i fumi sin dai primi minuti si diffondono ad altezza d'uomo nella prima galleria gradonata, causando una riduzione della visibilità con valori minimi che raggiungono i 5 - 6 m. La stessa situazione si verifica nella parte speculare della sala, con i fumi che interessano anche il corridoio che porta verso le scale oltre all'ambiente Foyer. Da qui in poi i fumi si propagano in tutto l'ambiente, i quali verranno smaltiti grazie ai lucernari installati a soffitto. Si specifica che tali criticità riscontrate nei corridoi e nel Foyer sono state analizzate e risolte attraverso l'installazione di impianti di ventilazione meccanica ed evacuatori a soffitto (SEFFC), soluzioni non riportate nel presente elaborato poiché lo studio è stato condotto solo sulla sala multipiano.

Analizzando nuovamente il volume multipiano, si riportano i risultati delle *Slices* orizzontali di visibilità localizzate a quota Z = 12 m. L'andamento dei fumi conferma quanto detto precedentemente: questi si localizzano al di sotto della copertura, con la visibilità che inizia ad abbassarsi dopo 600 s circa, istante in cui gli occupanti hanno già abbandonato la seconda galleria gradonata. Da questo momento in poi i fumi caldi, in virtù della loro minore densità rispetto all'aria più fredda, tendono a galleggiare lambendo l'intradosso della copertura per poi essere smaltiti verso l'esterno.

I contributi forniti dalle *Slices* verticali di visibilità in direzione x confermano quanto detto: i fumi si diffondono nella parte superiore della sala, per poi discendere lungo le pareti fino ad occupare l'intera parte alta del volume interno e localizzarsi soprattutto nelle zone della seconda galleria gradonata.

Dalla *Slices* verticale di temperatura in direzione x si registrano valori prossimi agli 80°C, oltre la soglia di tollerabilità per gli occupanti, al limite per quanto riguarda i soccorritori. È un valore localizzato, registrato al di sopra del focolaio a partire da 600 s circa, per cui la sicurezza degli occupanti è garantita così come quella dei soccorritori che riescono ad intervenire, grazie al loro equipaggiamento che "aumenta" la soglia di sicurezza di 20°C rispetto a quella prevista per gli occupanti.

È stato deciso di non riportare risultati grafici relativi alle *Isosurfaces* poiché gli unici valori critici si sono registrati al di sopra della superficie del focolaio, dove al processo di combustione, generalmente, è associata la presenza di fiamma e di un pennacchio (plume).

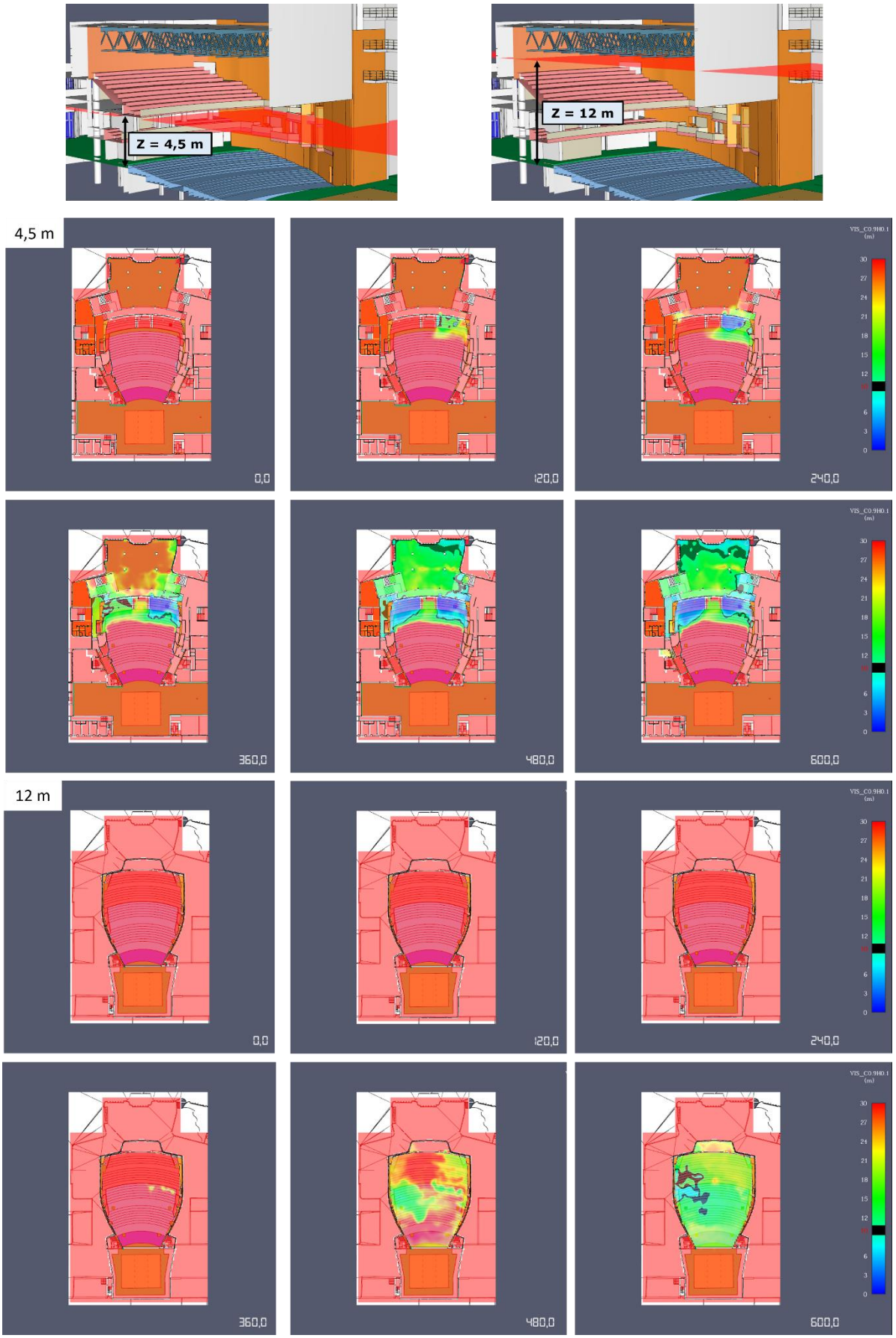


Figura 66. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 4,5 m e Z = 12 m

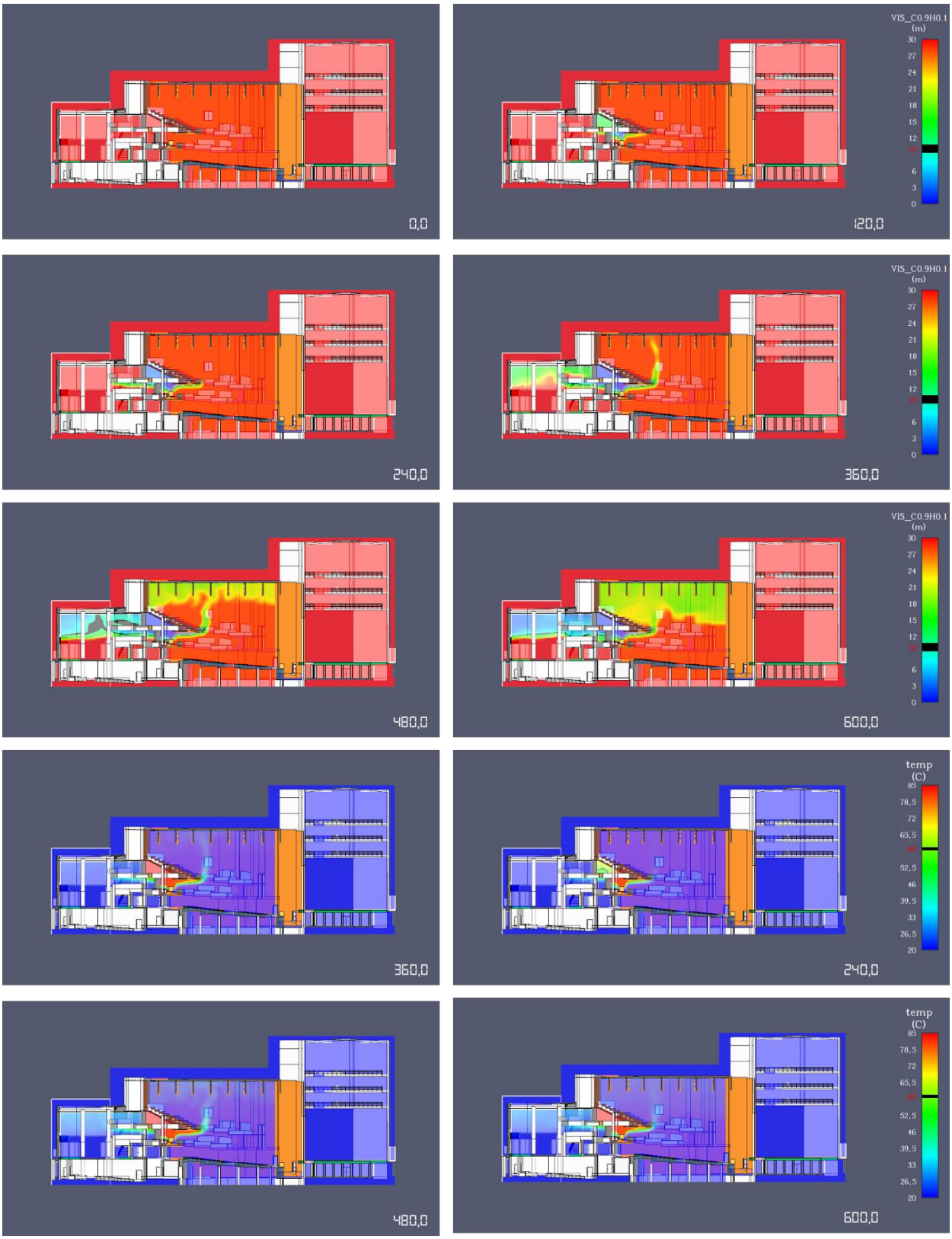


Figura 67. Distribuzione della visibilità e della temperatura lungo il bruciatore: Posizione X = 60 m

Scenario TEATRO – G1

Il quinto scenario prevede un focolaio al centro della seconda galleria gradonata. La posizione è stata scelta al fine di analizzare la propagazione del fumo nelle diverse parti del volume della sala.

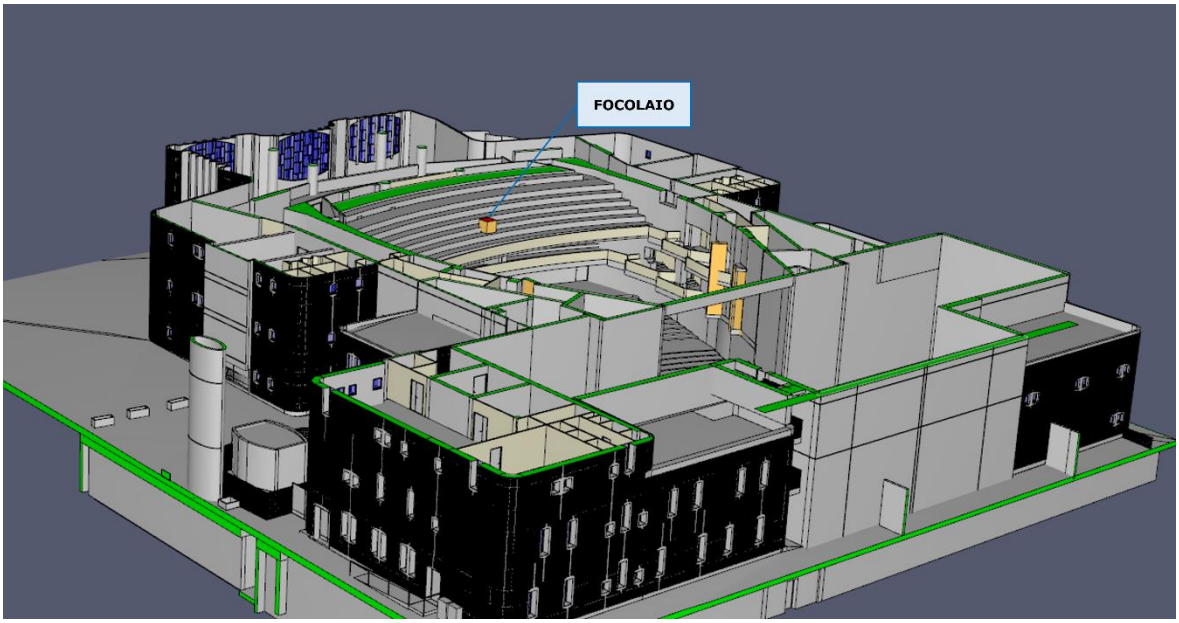


Figura 68. Posizione Focolaio Scenario TEATRO – G1

Attraverso l'utilizzo del primo dispositivo di indagine (*Devices*) sono state condotte le verifiche della sicurezza degli occupanti relative alla **visibilità**. I grafici sono stati realizzati prendendo i valori medi calcolati ogni 30 secondi e sono stati organizzati tenendo conto della collocazione delle sonde all'interno della Sala Rossa.

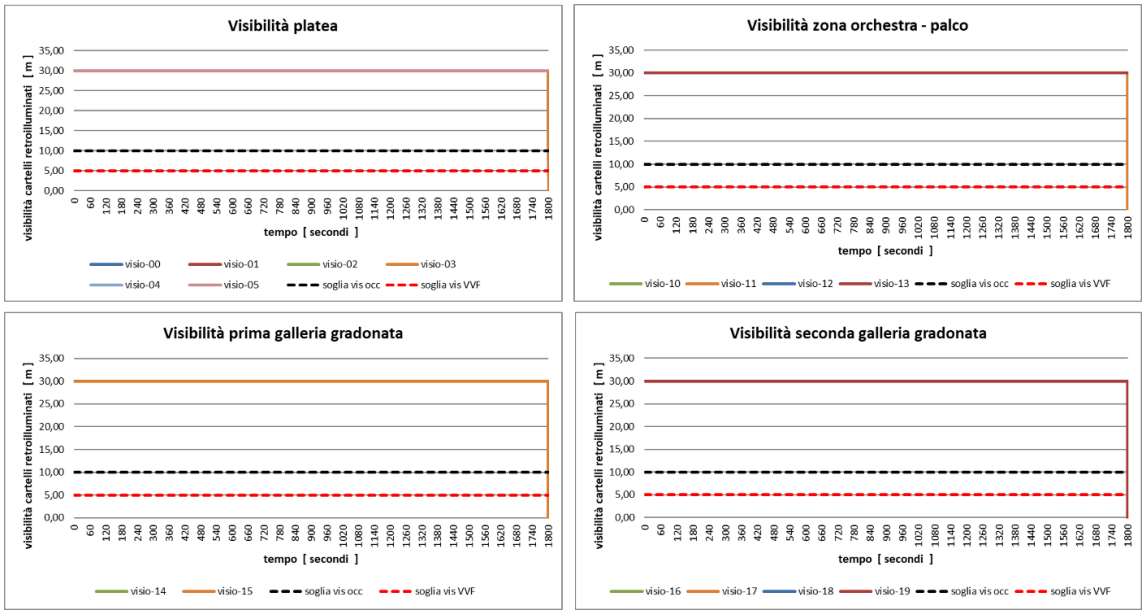


Figura 69. Grafici di visibilità Scenario TEATRO – G1

I grafici elaborati in questo scenario di progetto mostrano un andamento equilibrato del parametro visibilità con i valori che si mantengono costanti intorno ai 30 m. Su questo aspetto occorre eseguire ulteriori indagini, confrontando i risultati numerici con gli output derivanti dalle *Slices* di visibilità impostate nel modello. Le *Slices* e i *Devices* di visibilità sono stati infatti impostati a quote e in posizioni diverse in pianta per indagare il livello di oscuramento lungo le vie di esodo e in prossimità delle uscite.

Per completezza di informazioni è stato deciso di riportare i risultati grafici estrapolati attraverso l'utilizzo dei dispositivi di indagine (*Slices* e *Isosurfaces*). In tal modo è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo. I risultati grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi).

Data la posizione del focolaio alla quota della seconda galleria gradonata, le uniche *Slices* orizzontali di visibilità in grado di mostrare dei risultati significativi sono state quelle localizzate a quota Z = 12 m, da cui è emerso che i fumi si diffondono all'interno del solo volume interessato dall'incendio, senza mai causare una riduzione della visibilità ad altezza d'uomo in quanto vengono smaltiti dopo pochi minuti.

I contributi forniti dalle *Slices* verticali di visibilità in direzione x confermano quanto detto: i fumi si diffondono nella parte superiore della sala, per poi dirigersi verso l'esterno dell'edificio.

È stato deciso di non riportare risultati grafici relativi alle *Isosurfaces* poiché gli unici valori critici si sono registrati al di sopra della superficie del focolaio, dove al processo di combustione, generalmente, è associata la presenza di fiamma e di un pennacchio (plume).

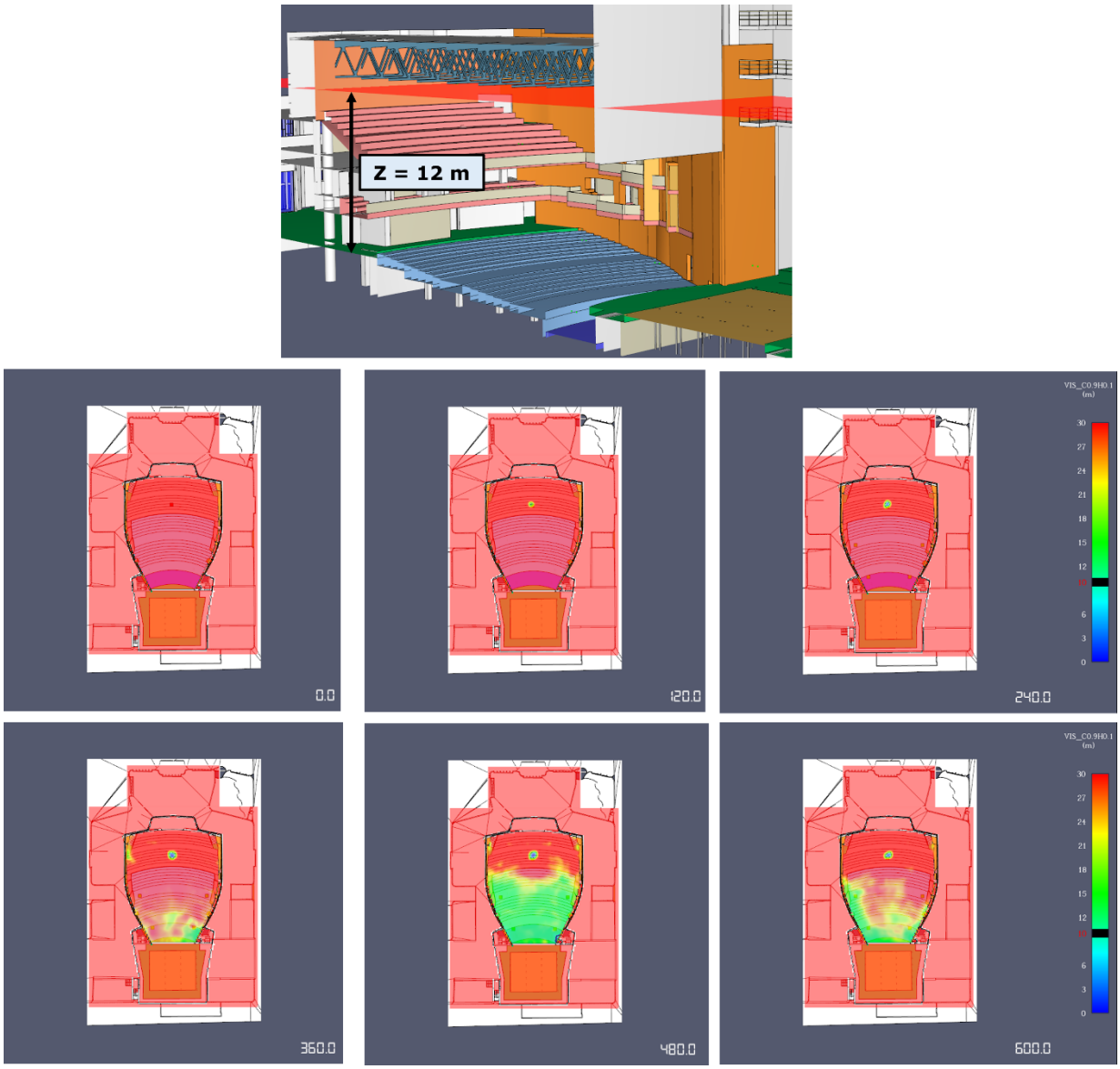


Figura 70. Distribuzione della visibilità ad altezza uomo (2 m): Quota Z = 12 m

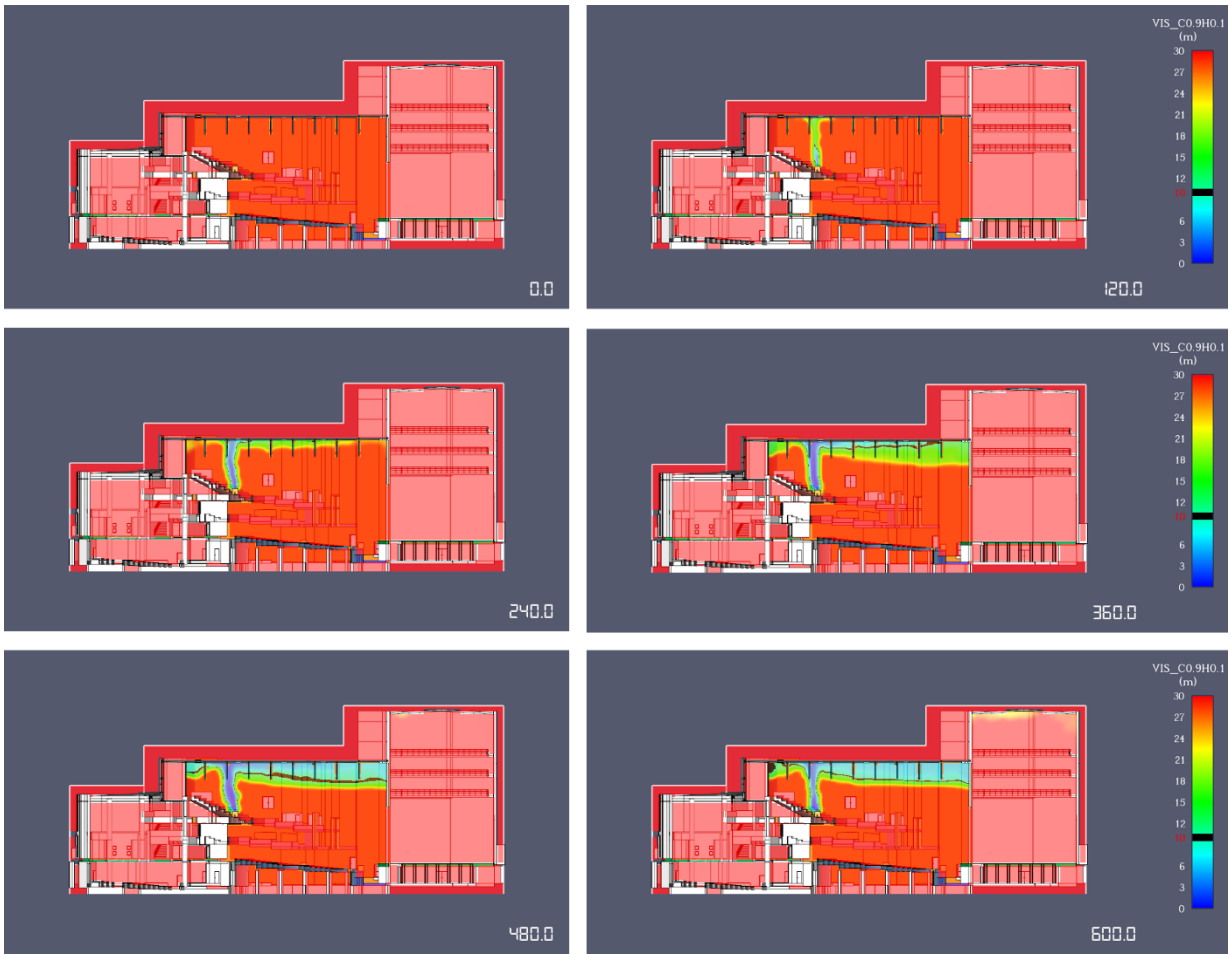


Figura 71. Distribuzione della visibilità lungo il bruciatore: Posizione X = 50 m

Individuazione ASET

A conclusione delle analisi effettuate su tutti gli scenari ed in particolare su quelli di progetto, è stato individuato il tempo relativo al parametro ASET, ricercando il minimo dei valori soglia registrati dalle sonde di visibilità, temperatura, FED ed irraggiamento, per i 14 gruppi di *Devices* impostati durante la modellazione di incendio. È stato dunque individuato il seguente valore, corrispondente all'istante in cui la sonda rivela un valore di visibilità al di sotto della soglia di sicurezza prevista per gli occupanti (10 m):

- **240 s** rivelati dalla sonda visio-14 relativa allo **Scenario TEATRO - D1** posizionata in corrispondenza della prima galleria gradonata.

5.2. Simulazioni di esodo – RSET

Per quanto riguarda le simulazioni di esodo, dopo aver configurato le caratteristiche fisiche e comportamentali degli occupanti, nel seguito si analizzeranno i risultati delle modellazioni per ciascuno scenario ipotizzato. In particolare, sono state analizzate due configurazioni base di evacuazione: nella prima gli occupanti presenti all'interno della sala multipiano scelgono autonomamente la via di esodo più congeniale, ovvero quella più vicina o più libera; nell'altra gli stessi si dirigono verso le vie di esodo impostate ed indicate con apposita cartellonistica, che corrispondono a quelle utilizzate nelle prove di evacuazione programmate.

L'output principale previsto dal programma è un visualizzatore di risultati 3D, che consiste in un lettore video in grado di riprodurre lo svolgimento dell'esodo simultaneamente alla navigazione dentro il modello stesso da parte dell'utente. Tramite i comandi sull'interfaccia grafica è possibile mettere in pausa il video al fine di estrapolare determinate viste e settare la velocità di riproduzione più consona ai fini dell'indagine. Nel caso in esame, data la configurazione a diversa altezza dei posti a sedere, per osservare l'evacuazione ad ogni "piano" è stato necessario frazionare ogni livello dell'edificio lungo l'asse verticale in modo da rendere meno compatto e più leggibile il percorso degli occupanti.

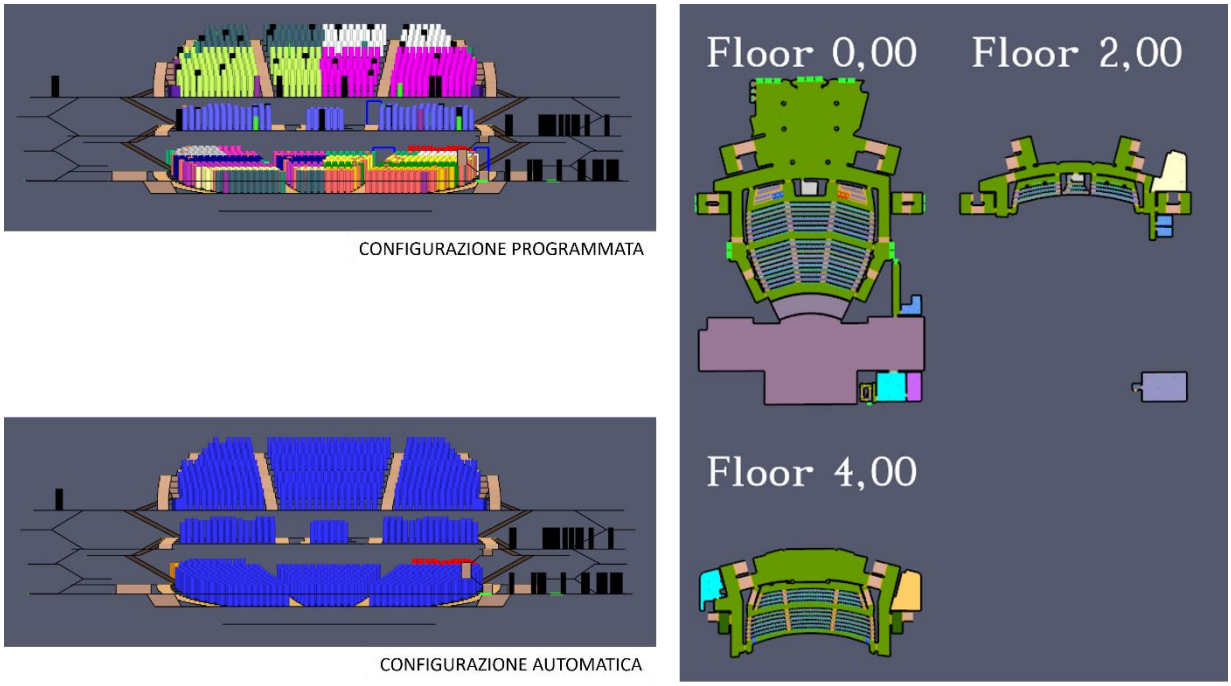


Figura 72. Vista Prospetto e Piante del modello

Di seguito vengono confrontati i risultati ottenuti dai due scenari in termini di tempo. Il programma permette di esportare gli output della simulazione nei quali sono contenute informazioni relative all'andamento nel tempo delle attività legate all'esodo.

Scenari	Tempi di esodo
Scenario TEATRO - Programmato	353 s
Scenario TEATRO - Automatico	347 s

Tabella 8. Confronto dei tempi di esodo tra i due scenari

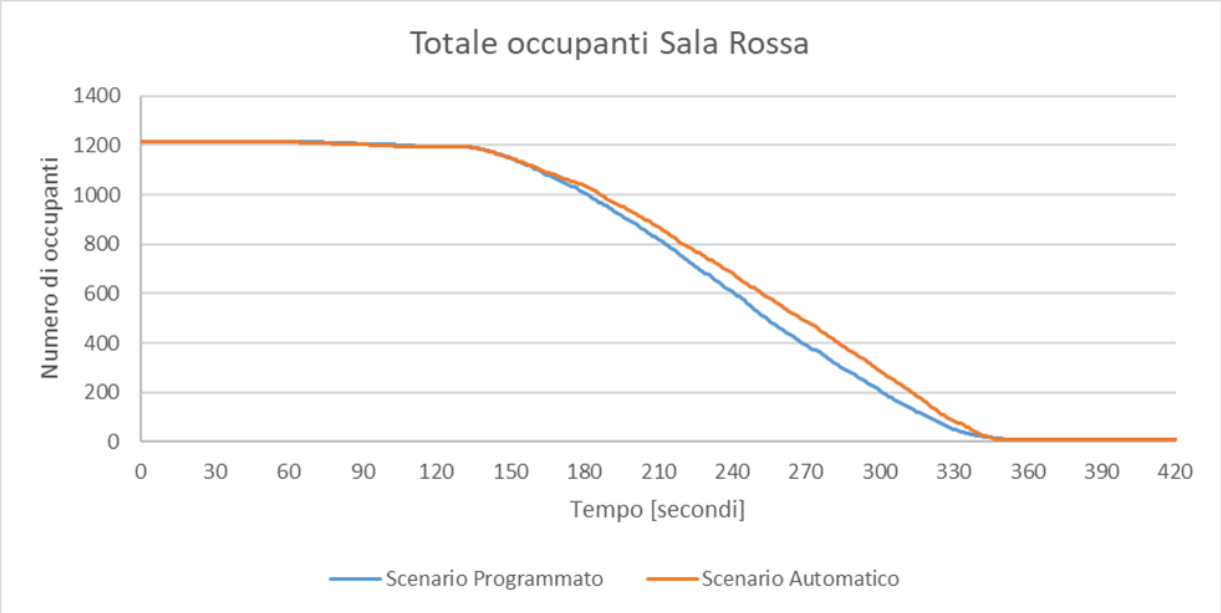


Figura 73. Grafico raffigurante il numero di occupanti presenti nella Sala Rossa

Il confronto ha consentito di quantificare il tempo impiegato dagli occupanti per recarsi in luogo sicuro. Dai valori sopra riportati si evince come l'intero edificio si possa evacuare in circa 347 s (configurazione automatica) rispetto ai 353 s impiegati con opportuna segnaletica. Nonostante la differenza in termini di tempo di esodo finale non sia importante, si può notare come invece vi sia una discesa anticipata nel numero di occupanti che lasciano l'edificio nello scenario programmato: questo risultato è stato raggiunto grazie alla predisposizione di un adeguato piano di emergenza oltre all'installazione di segnaletica retroilluminata, la quale sicuramente è un ottimo ausilio durante una situazione di emergenza, soprattutto quando la visibilità è compromessa dai prodotti della combustione.

Un osservazione importante riguarda la soglia di *edificio completamente vuoto*: questa si registra ben oltre i secondi sopra riportati. Si specifica che la discrepanza tra i risultati riportati e quelli leggibili dal grafico è dovuta alla presenza dei disabili su sedia a ruote che, recandosi nello spazio calmo al P2, permangono in attesa dei soccorritori. I VVF sopraggiungono all'interno dell'edificio dopo circa 828 s (tempo medio di arrivo delle squadre di soccorso per la provincia considerata) e da quel momento in poi l'intero Teatro sarà evacuato, senza che vi siano ulteriori pericoli.
È necessario riportare un ulteriore osservazione e non focalizzarsi solo sul confronto dei dati sui tempi. Dalla sovrapposizione degli scenari di incendio e di esodo è possibile osservare se gli occupanti intraprendono o meno dei percorsi contaminati dai prodotti della combustione. La scelta della via di esodo, infatti, non influenza solamente l'evacuazione in termini di tempo, ma anche di sicurezza. L'impiego delle vie di esodo non sicure, attraversando per esempio ambienti contaminati dagli effluenti dell'incendio, ha una forte influenza negativa sulla valutazione della salvaguardia della vita umana. Dunque, prima di procedere con la sovrapposizione dei risultati, si riporta una valutazione qualitativa di entrambi gli scenari per conoscere le direzioni intraprese dagli occupanti.

I risultati grafici relativi al movimento degli occupanti all'interno dell'edificio sono stati estrapolati ad intervalli di tempo costanti (120 secondi), rispettivamente all'istante 0, nelle fasi intermedie dell'esodo e ad evacuazione avvenuta. Per entrambi gli scenari è stato riportato sia l'andamento degli occupanti raffigurati tramite un cilindro che il flusso dei percorsi (possibile grazie al comando *Paths*) per illustrare la densità di affollamento. In questo caso il confronto a video ha messo in luce che non vi sono sostanziali differenze tra le due simulazioni di esodo: nella configurazione programmata è stato deciso di suddividere gli occupanti in piccoli gruppi e indirizzarli verso le uscite più vicine; allo stesso modo, nella configurazione automatica, sono gli stessi occupanti che, autonomamente, prediligono le uscite di sicurezza poste nelle immediate vicinanze. Con queste modalità gli utenti non vengono investiti dai prodotti della combustione, come verrà mostrato anche in seguito. Per quanto riguarda gli occupanti che si trovano in prossimità del focolaio, riescono a lasciare l'edificio prima che le condizioni diventino incapacitanti. La stessa soluzione di interdire le tre uscite di sicurezza poste a ridosso dell'incendio e/o interessate dagli effetti dello stesso, di cui due al livello della platea e una al livello della prima galleria gradonata, si è rivelata efficace in quanto gli occupanti, invece di andare incontro ai prodotti della combustione, sono stati indirizzati verso uscite alternative per salvaguardare la loro incolumità.

L'unica criticità riscontrata in entrambi gli scenari è dovuta alla formazione di code davanti le uscite di sicurezza posizionate lungo i lati e al centro della platea. Tale fenomeno si verifica a causa dell'elevato affollamento, in particolare a partire da 250 s fino a 345 s (Scenario programmato) e a partire da 230 s fino a 330 s (Scenario automatico). La durata della coda è rispettivamente 95 e 100 secondi, inferiore in entrambi i casi al limite previsto dalla Tabella S.4-27 del Codice di Prevenzione Incendi riferita al profilo di rischio R_{vita} B2 pari a 270 s.

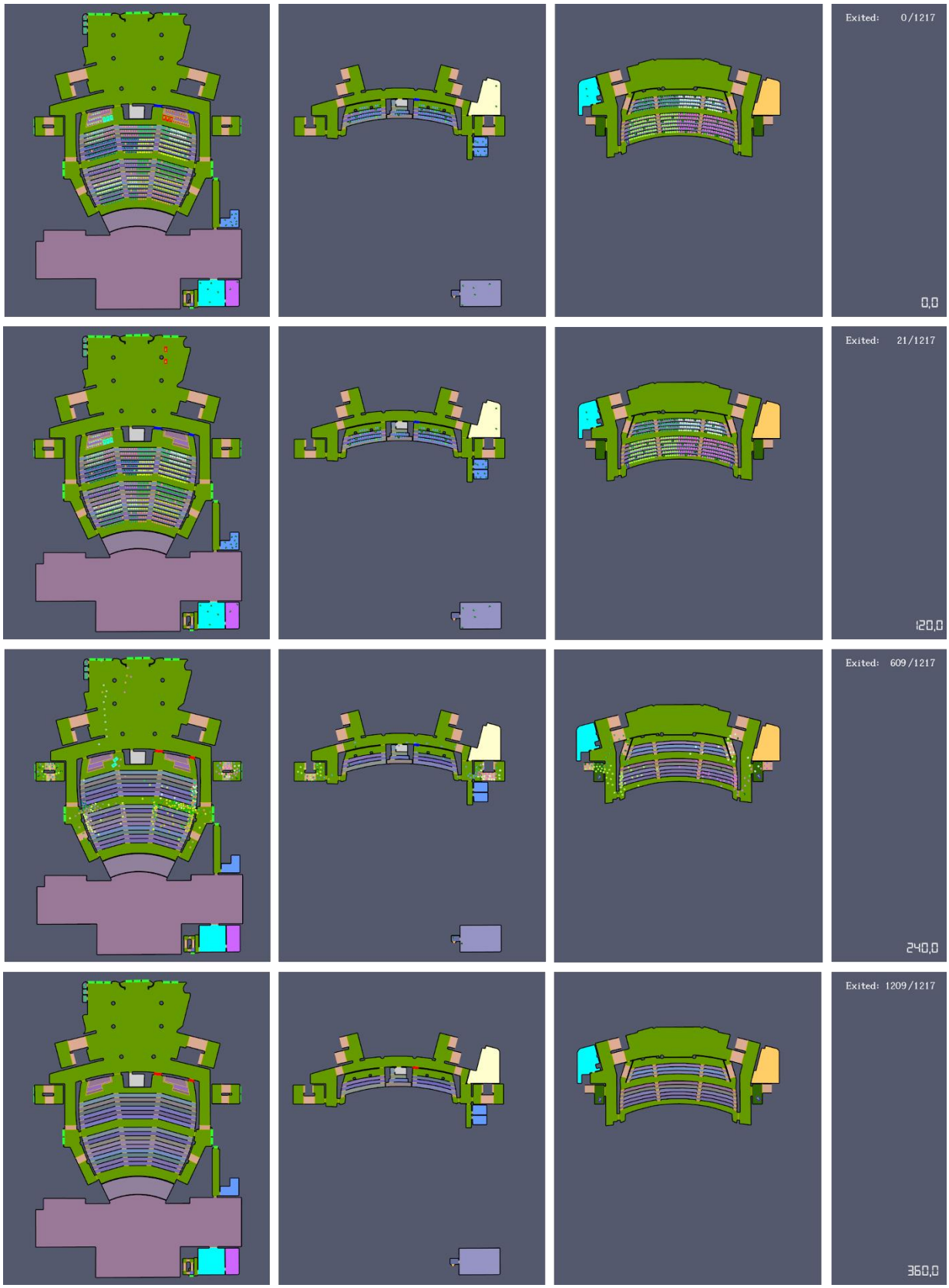


Figura 74. Posizione degli occupanti durante le operazioni di esodo - Scenario Programmato

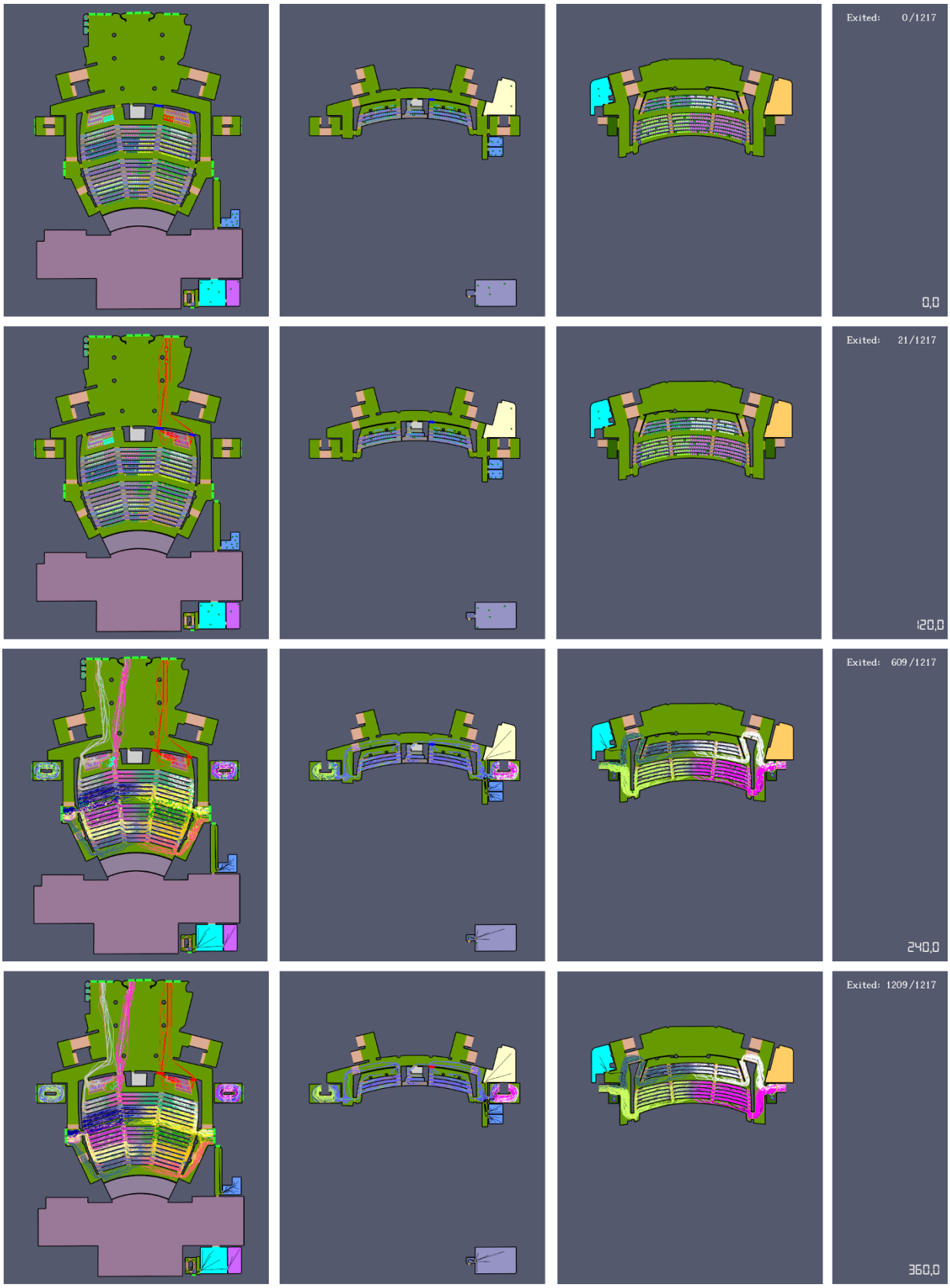


Figura 75. Densità di affollamento - Scenario programmato

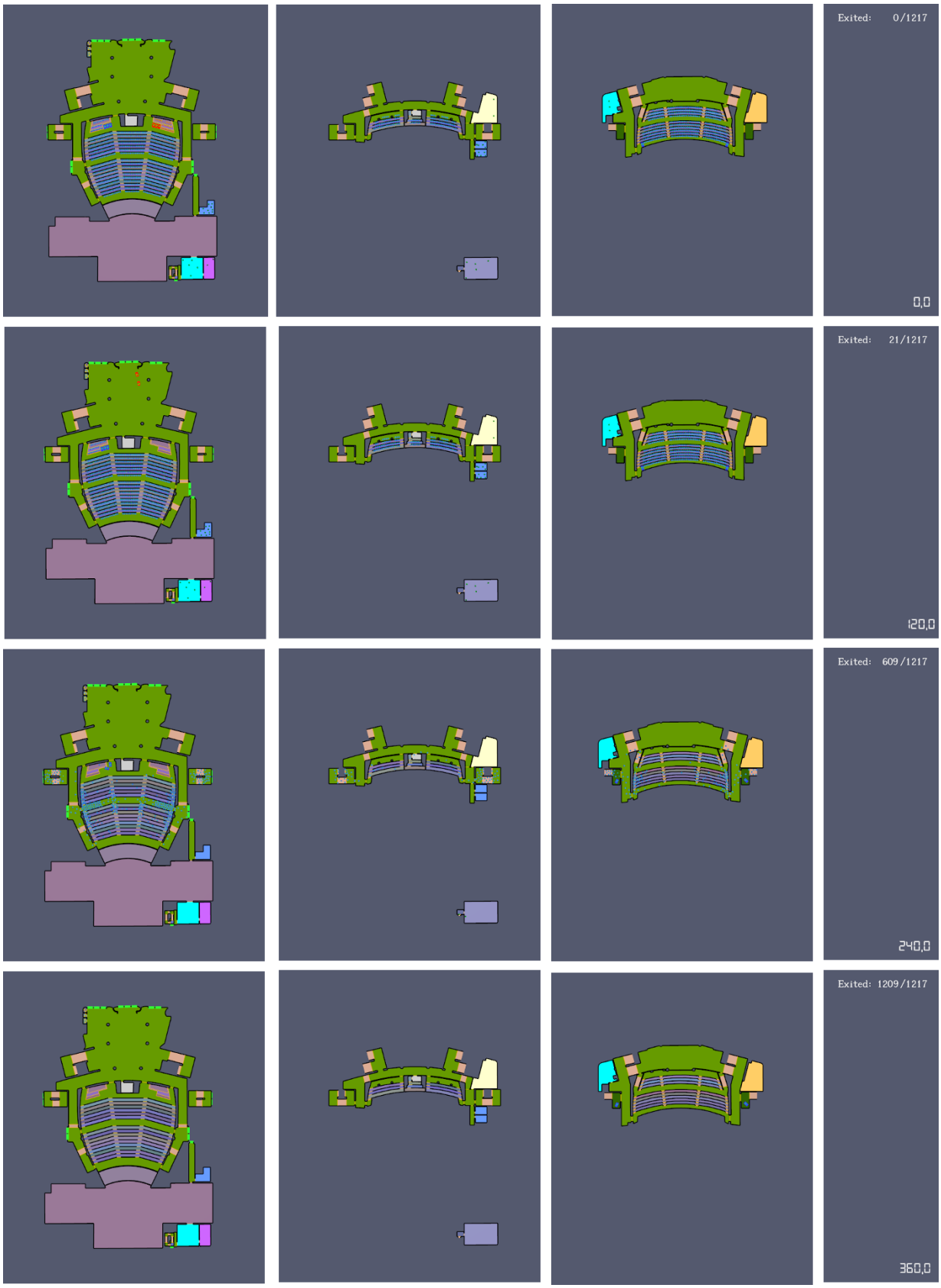


Figura 76. Posizione degli occupanti durante le operazioni di esodo - Scenario Automatico

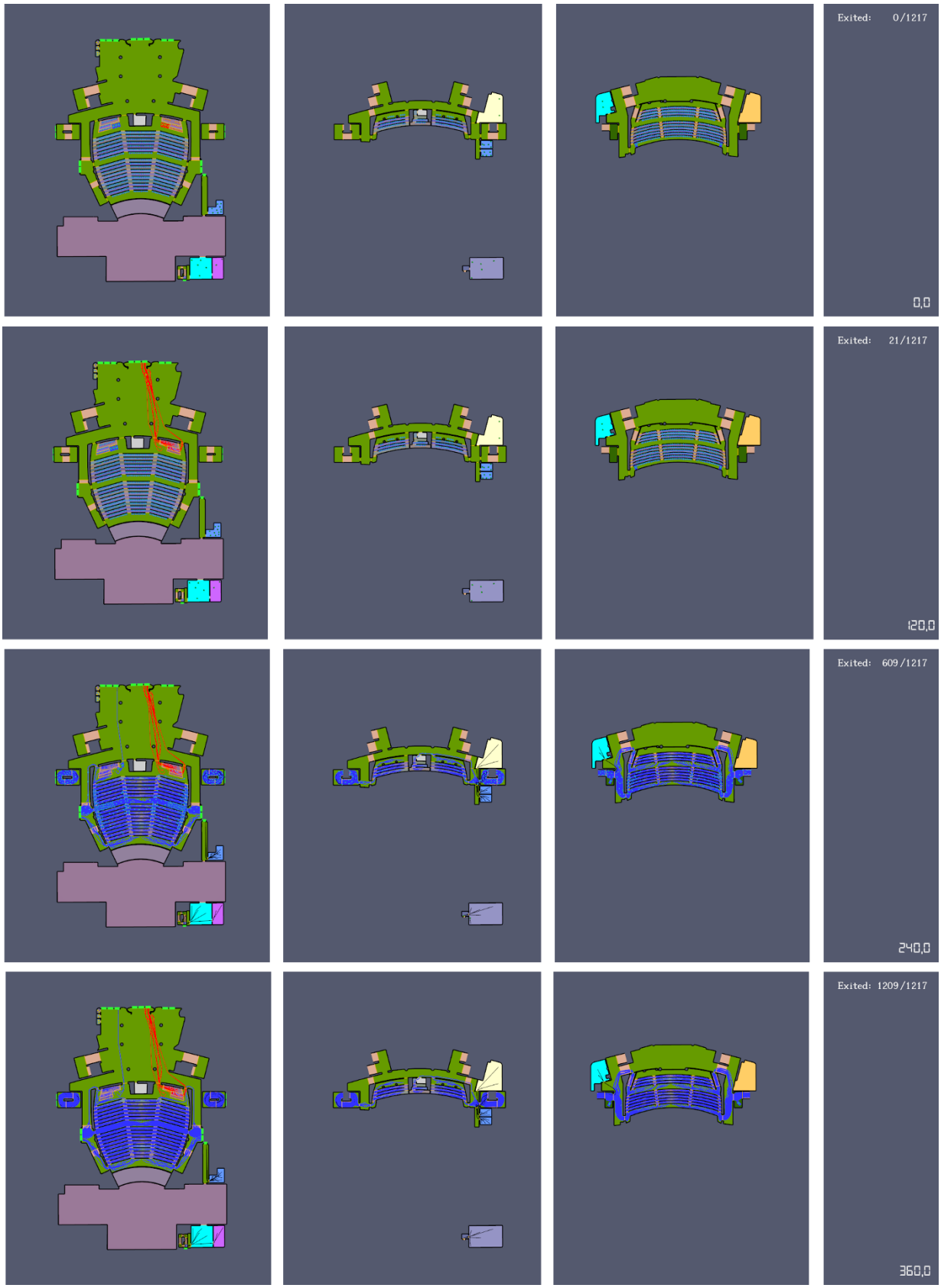


Figura 77. Densità di affollamento - Scenario Automatico

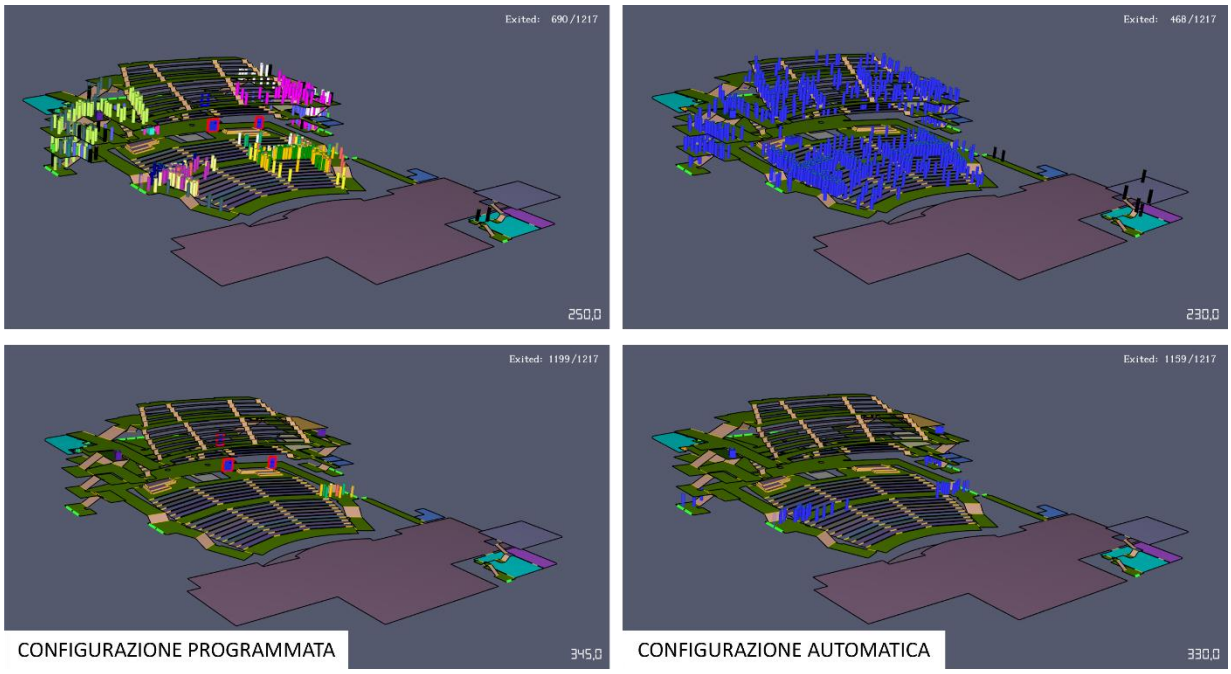


Figura 78. Formazione di code nei due scenari

Per comprendere al meglio le dinamiche ed ottenere un quadro completo sull'efficacia della progettazione dell'esodo, quindi delle misure progettuali adottate in soluzione alternativa, è utile sovrapporre le simulazioni di esodo con quella di incendio per verificare le informazioni relative alla visibilità degli occupanti in punti dell'edificio ritenuti critici, quali vie di esodo e uscite di sicurezza dalla Sala multipiano verso luogo sicuro. Si specifica che il parametro ASET è stato ricavato come il minimo tra i valori rilevati dalle quattro tipologie di sonde nello scenario di incendio considerato e in linea generale la **visibilità** è risultato il parametro con il maggior numero di oscillazioni attorno alle soglie definite nella fase preliminare. Per tale motivo si riportano i grafici esportati per i due scenari in riferimento agli occupanti selezionati nello specifico scenario.

In particolare, sono stati estrapolati i dati degli occupanti che verosimilmente potrebbero essere coinvolti in una situazione di pericolo. Nello specifico, sono stati selezionati gli utenti normodotati e i disabili autonomi su sedia a ruote che si trovano nel punto di innesco del focolaio: per i primi, nonostante siano tra i primi ad abbandonare l'edificio, si registrano dei valori di visibilità quasi oltre la soglia. Per gli utenti su sedia a ruote, invece, non si registrano criticità in quanto l'altezza dello strato libero dai fumi consente loro di avere ancora margini accettabili. Le stesse analisi sono state effettuate per gli ultimi utenti che abbandonano la platea passando per il Foyer (ambiente soggetto a presenza di fumo) per i quali però non si registrano criticità. Infine, gli occupanti che abbandonano la platea per ultimi non sono investiti dagli effluenti del focolare, nonostante gli utenti selezionati passino a pochi metri dal punto in cui si manifesta l'incendio.

La criticità più importante è stata riscontrata per gli occupanti che si trovano costretti ad abbandonare la prima galleria gradonata: dalla simulazione di incendio (su cui si basa la medesima simulazione di esodo) è stato osservato come questo volume fosse il primo ad essere contaminato dai fumi, motivo per il quale si è scelto di interdire nello scenario programmato le due uscite di sicurezza posizionate alla stessa quota, prima di intraprendere il corridoio. Il fenomeno critico che si registra per l'ultimo occupante che abbandona la prima galleria gradonata avviene qualche istante dopo la chiusura delle porte, con la soglia di visibilità che raggiunge minimi di 9 metri per pochi secondi, permettendo comunque all'occupante di recarsi verso il vano scala protetto, per poi proseguire con le operazioni di esodo fino a luogo sicuro.

Al contrario, nello scenario automatico la medesima situazione si registra per l'ultimo occupante in corrispondenza del corridoio, a partire da circa 240 s. Anche in questo caso è un valore che tende verso l'equilibrio dopo pochi secondi, ma importante ai fini dei risultati. Si evince come il motivo di questo fenomeno sia dovuto ai varchi di uscita mantenuti accessibili per tutto lo sviluppo della simulazione.

Il confronto tra i due scenari ha permesso di comprendere la criticità a cui si potrebbe andare incontro se le uscite di sicurezza nella prima galleria gradonata fossero sempre aperte. Con la chiusura delle stesse è possibile impedire che si possano presentare criticità anche per altri occupanti, i quali invece sono indirizzati verso ulteriori uscite di sicurezza.

Infine, per quanto riguarda il disabile su sedia a ruote che autonomamente si dirige verso lo spazio calmo collocato nel vano scala al livello della seconda galleria gradonata non si registrano criticità per tutta la durata della simulazione, ossia fino all'arrivo delle squadra di soccorso. Questo risultato è frutto delle strategie di protezione passiva, in particolare la compartimentazione organizzata per rispondere alle esigenze della sicurezza in caso di incendio.

È importante osservare come la compartimentazione del vano scala rispetto alla Sala multipiano faciliti anche le squadre di soccorso intervenute dopo circa 13 minuti, con l'obiettivo di prestare aiuto al disabile su sedia a ruote. Per entrambi gli scenari, sia nel vano scala di sinistra che in quello di destra, non si registrano criticità per i soccorsi chiamati ad intervenire, nonostante la soglia sia pari a 5 m. Invece, tale soglia si raggiunge con minimi di 2 – 3 m in prossimità del focolaio, in quanto un team di VVF è stato selezionato per indagare e controllare l'incendio fino alla sua completa estinzione.

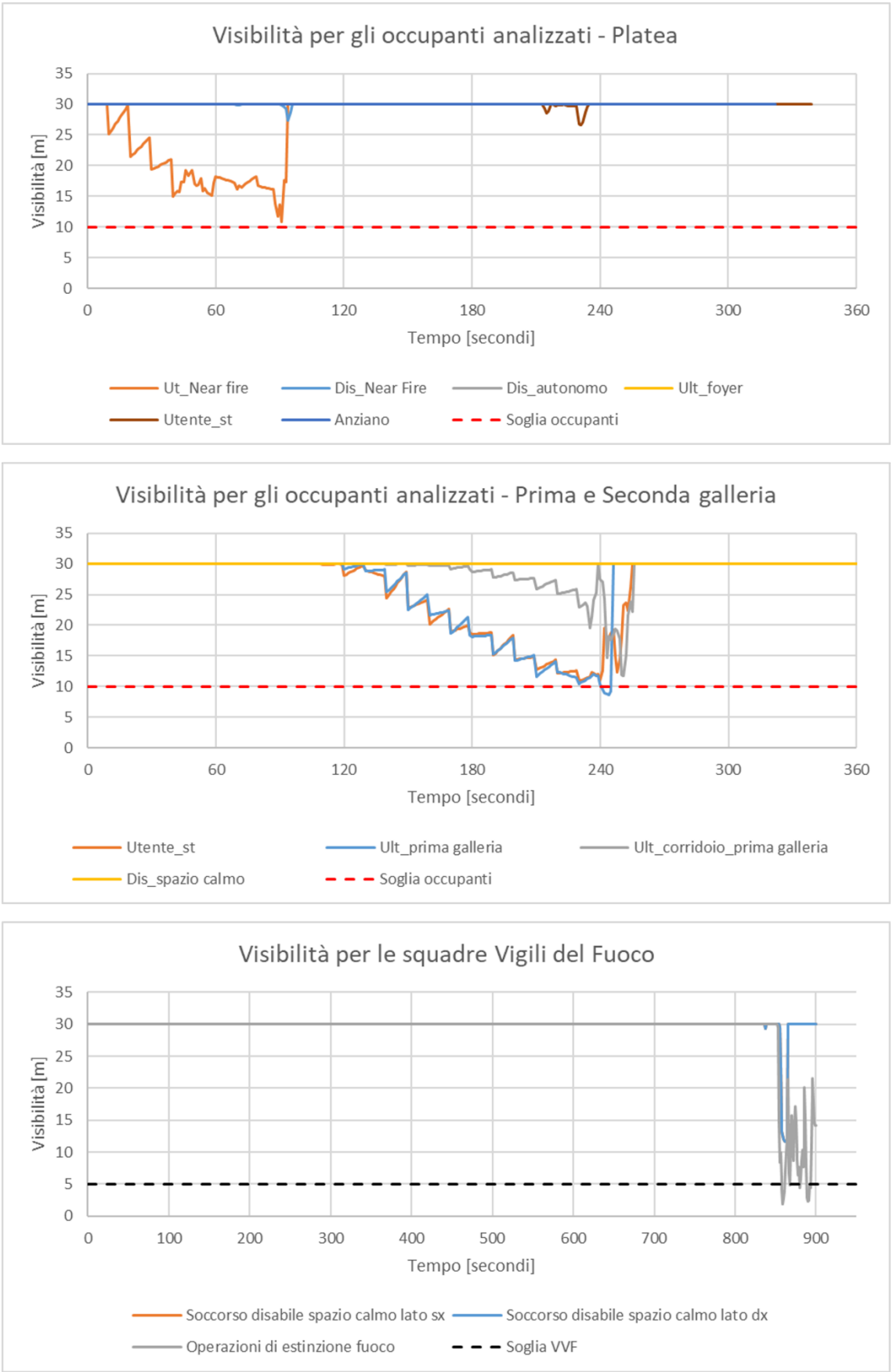
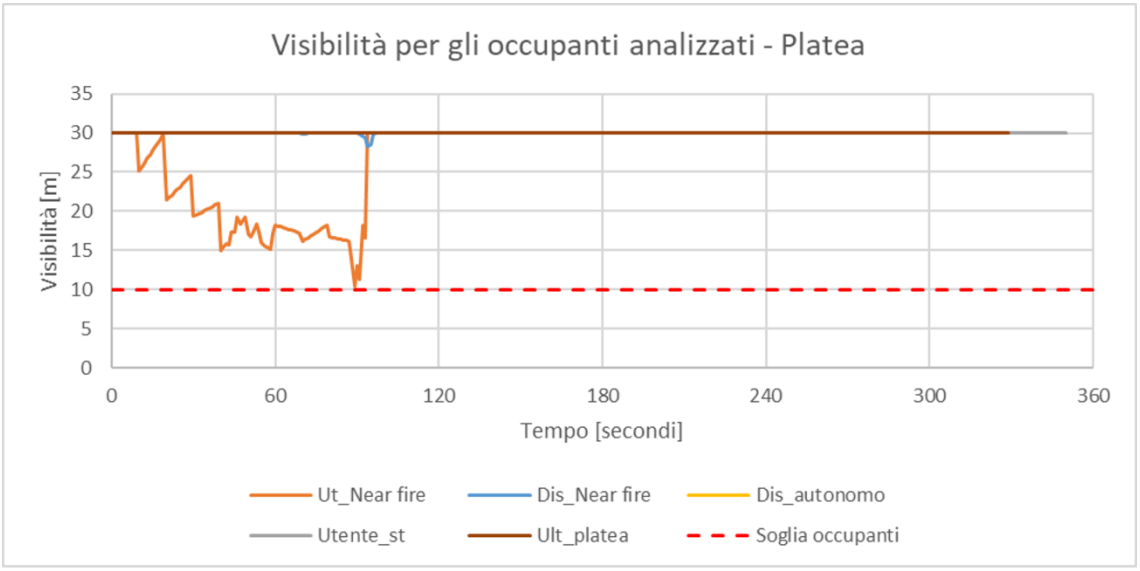
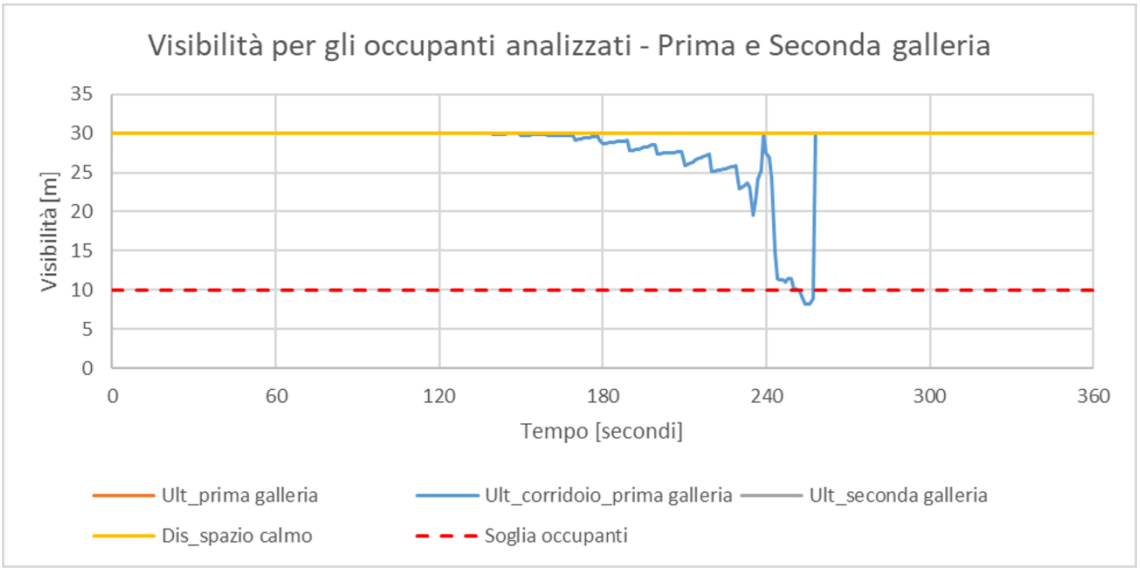


Figura 79. Visibilità occupanti e soccorritori - Scenario Programmato





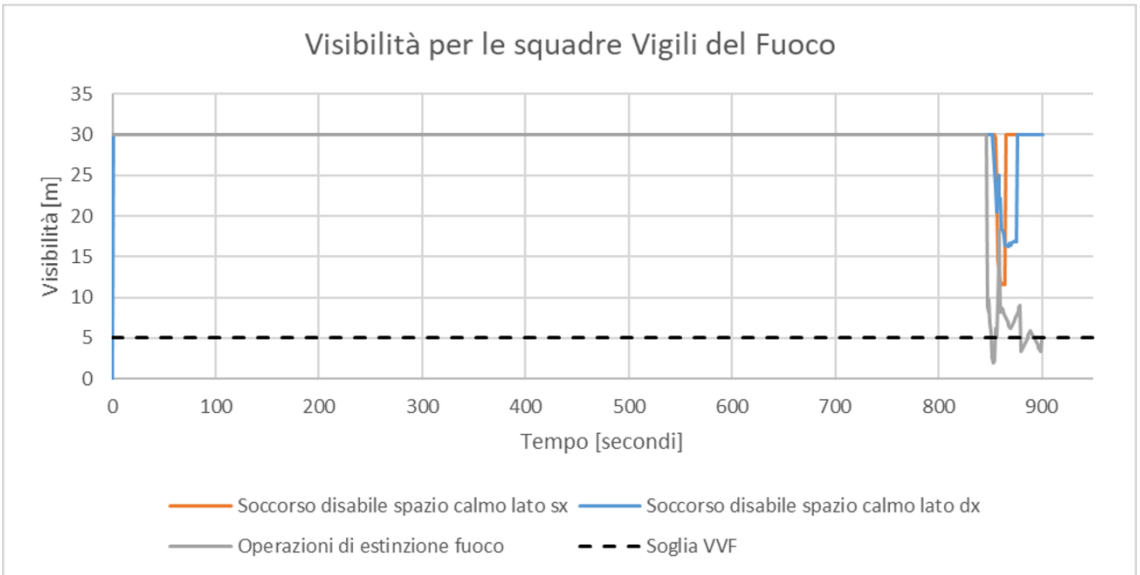


Figura 80. Visibilità occupanti e soccorritori - Scenario Automatico

Per indagare il requisito di visibilità è stato scelto di utilizzare i dispositivi di indagine (*Slices*) già introdotti al capitolo precedente. Mediante l'ausilio di questi strumenti è stato possibile il confronto tra gli aspetti quantitativi e le valutazioni qualitative sugli andamenti degli effetti dell'incendio nel tempo.
I grafici delle *Slices* relative alla **visibilità** sono il risultato della *sovrapposizione* tra le simulazioni di incendio e di esodo, estrapolati ad intervalli di tempo significativi costanti (ogni 60 secondi), ovvero istante iniziale, fase centrale dell'esodo, istante in cui la maggior parte degli occupanti si dirige verso le uscite di sicurezza e ad esodo ultimato.

Dall'analisi effettuate sia nel primo che nel secondo scenario tramite le *Slices* orizzontali di visibilità localizzate a quota Z = 1,8 m, emerge che i fumi sin dal primo minuto si diffondono nella parte in cui è posizionato il focolaio. Gli occupanti posizionati nelle immediate vicinanze riescono ad accorgersi per primi del pericolo per cui riescono ad abbandonare le loro postazioni prima che le condizioni diventino incapacitanti. Man mano che trascorre il tempo i fumi si diffondono all'interno del volume multipiano, in particolare al livello della prima e della seconda galleria gradonata. Questo fenomeno è leggibile tramite le *Slices* orizzontali posizionate rispettivamente a quota Z = 4,5 m e Z = 12 m. In entrambi i casi gli occupanti si dirigono verso le scale protette con una visuale libera dai prodotti della combustione.
Alla luce dei risultati ottenuti attraverso le due simulazioni, ne risulta la possibilità di evacuare l'ambiente senza che la vita degli occupanti sia compromessa.

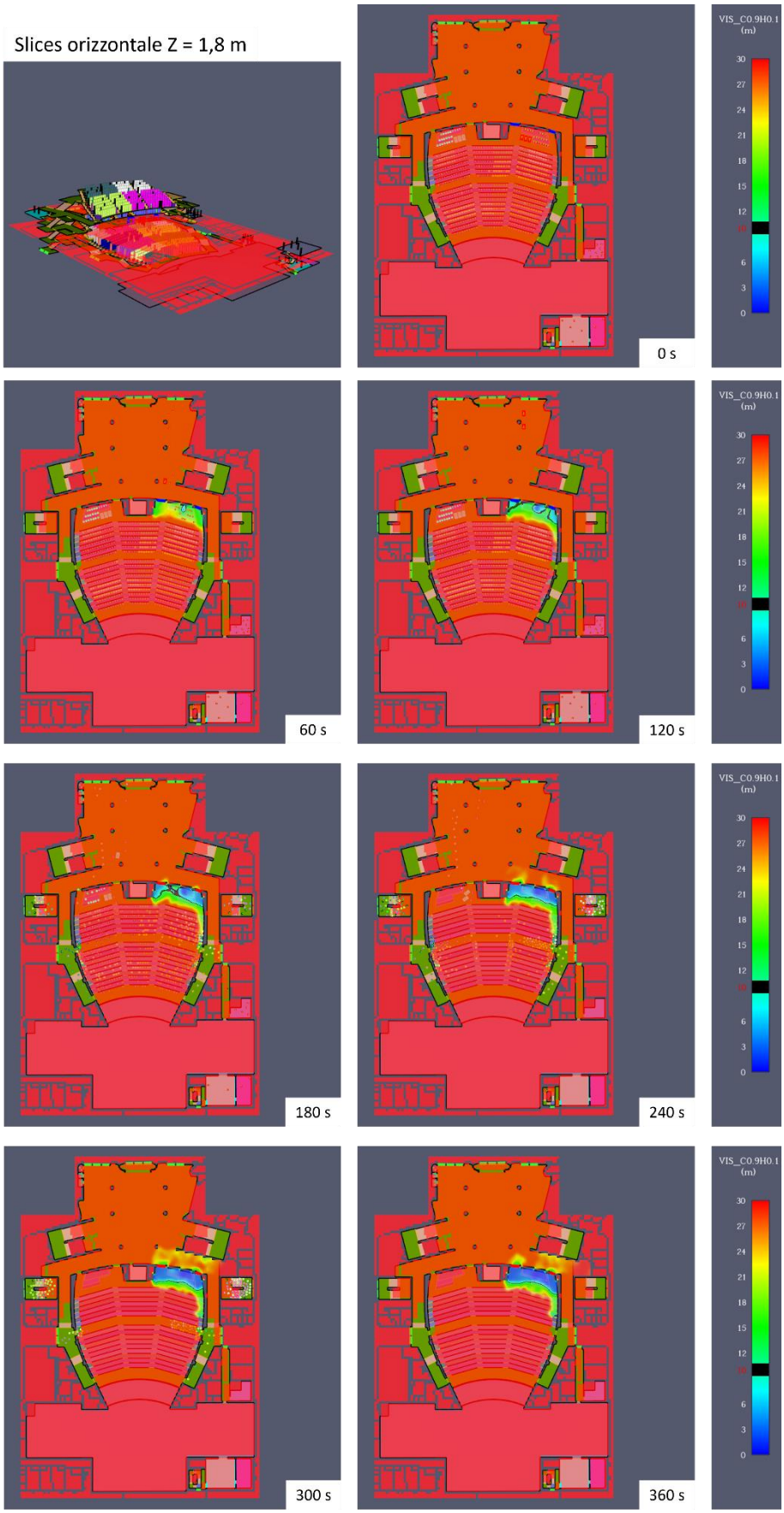


Figura 81. Slices Orizzontale di visibilità - Scenario Programmato

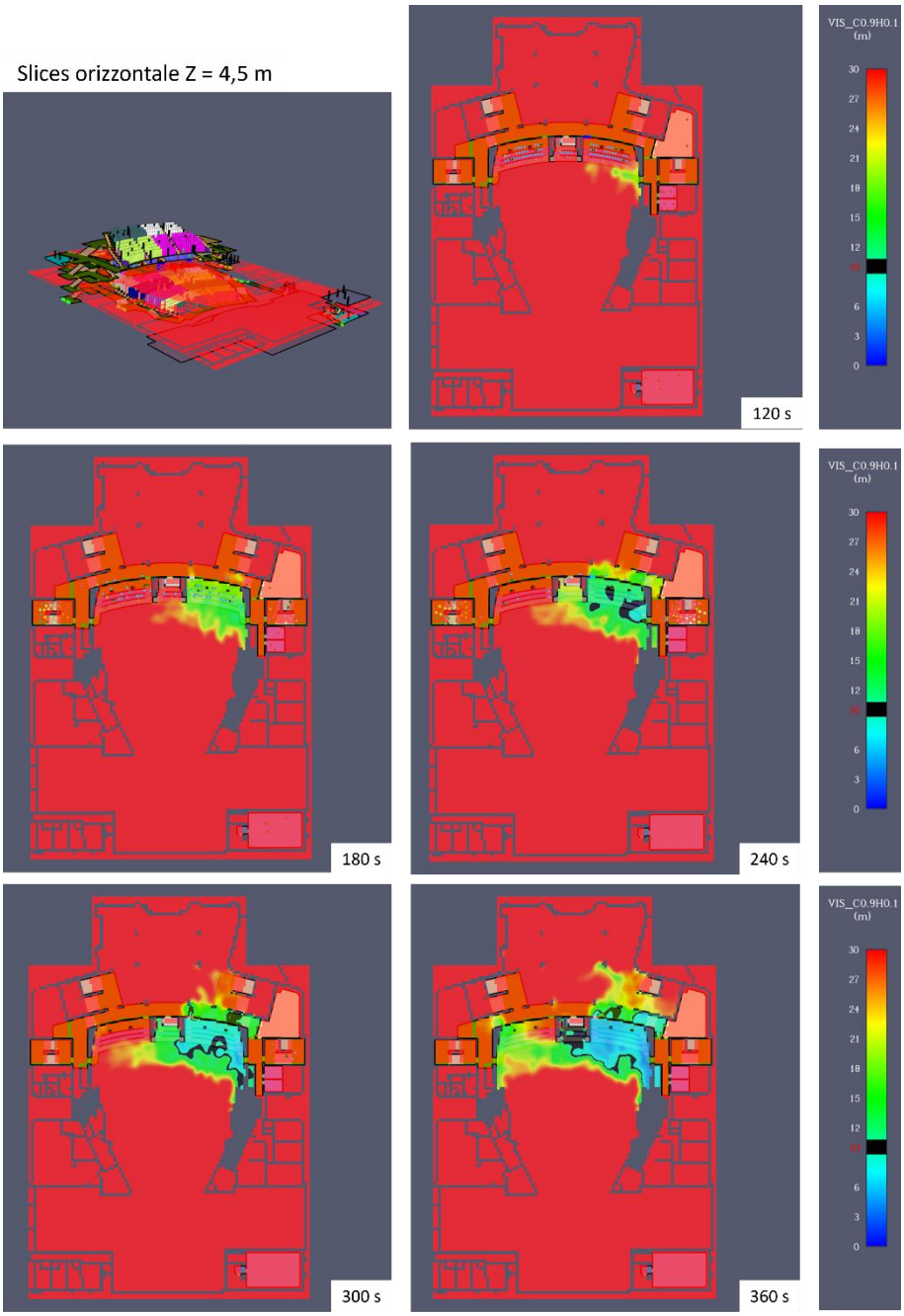


Figura 82. Slices orizzontale di visibilità - Scenario Programmato

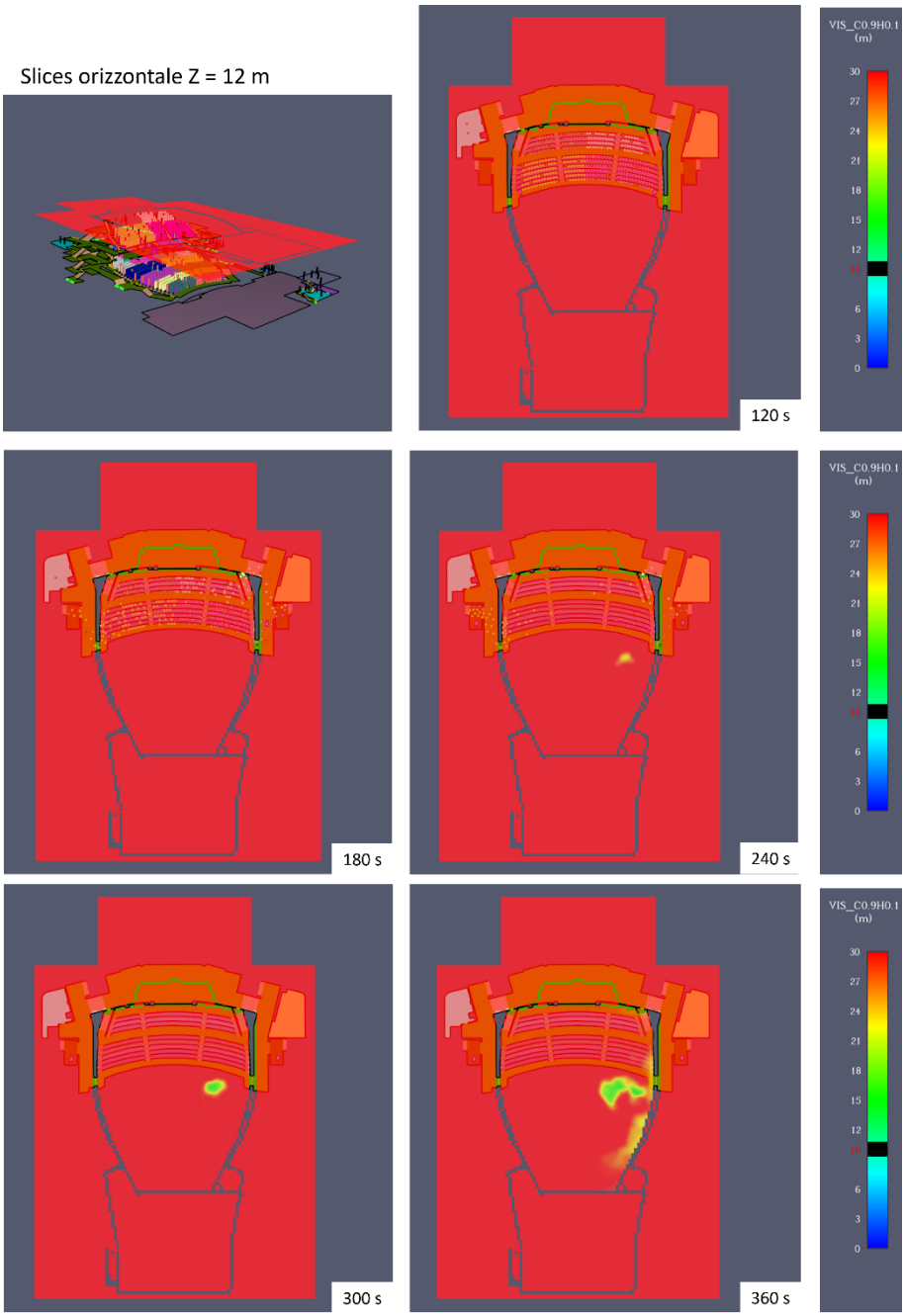


Figura 83. Slices orizzontale di visibilità - Scenario Programmato

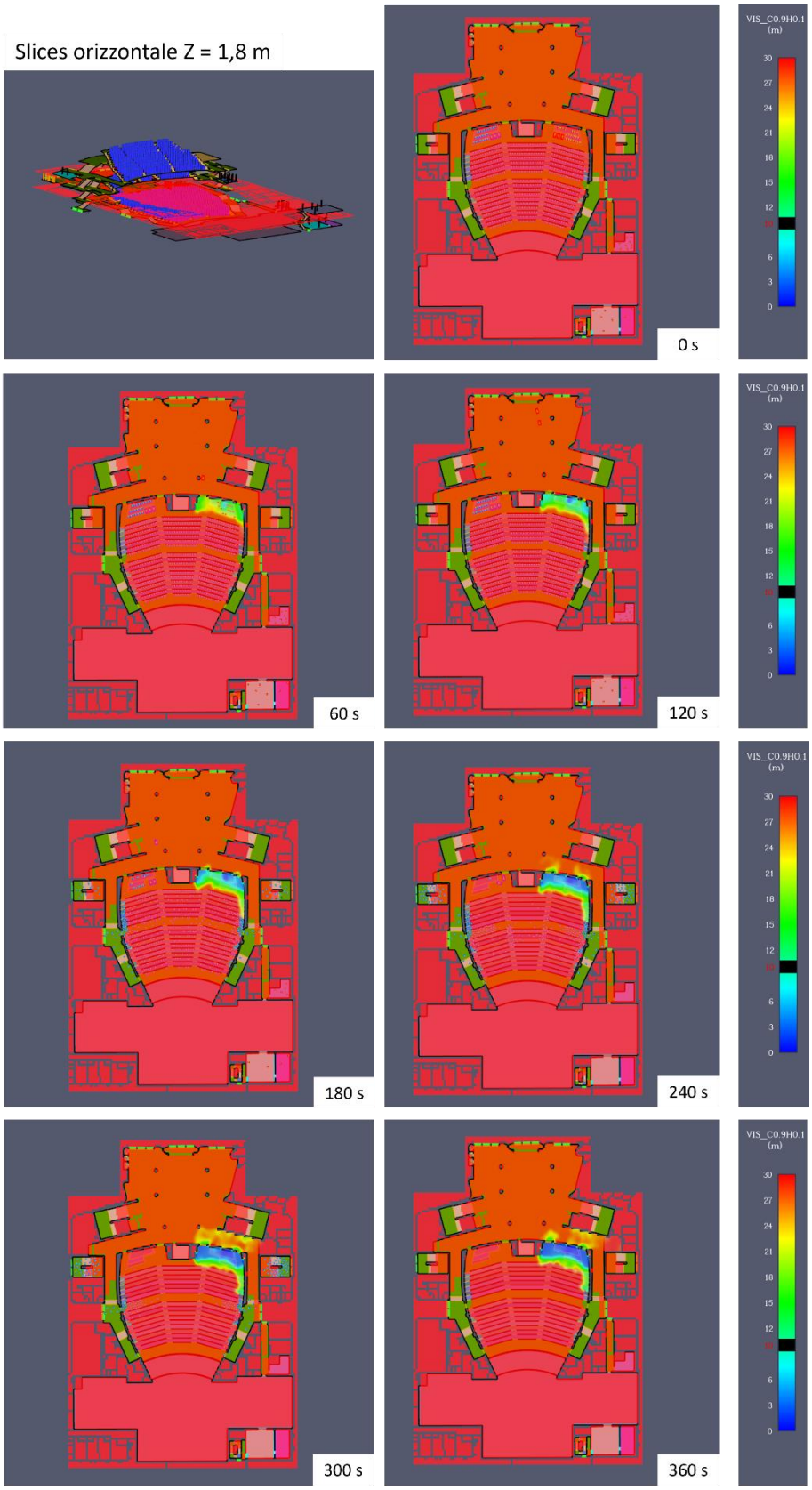


Figura 84. Slices Orizzontale di visibilità - Scenario Automatico

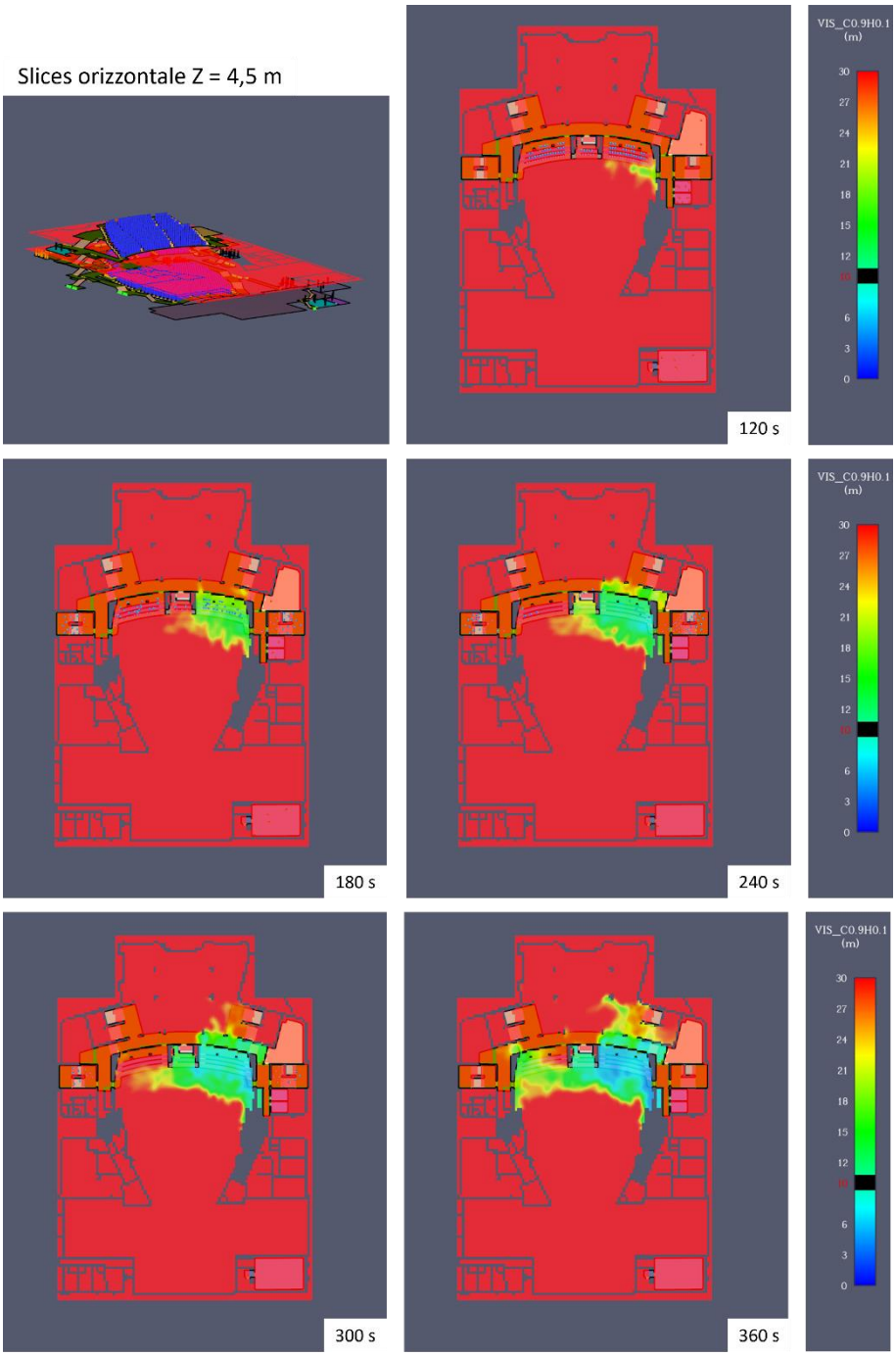


Figura 85. Slices Orizzontale di visibilità - Scenario Automatico

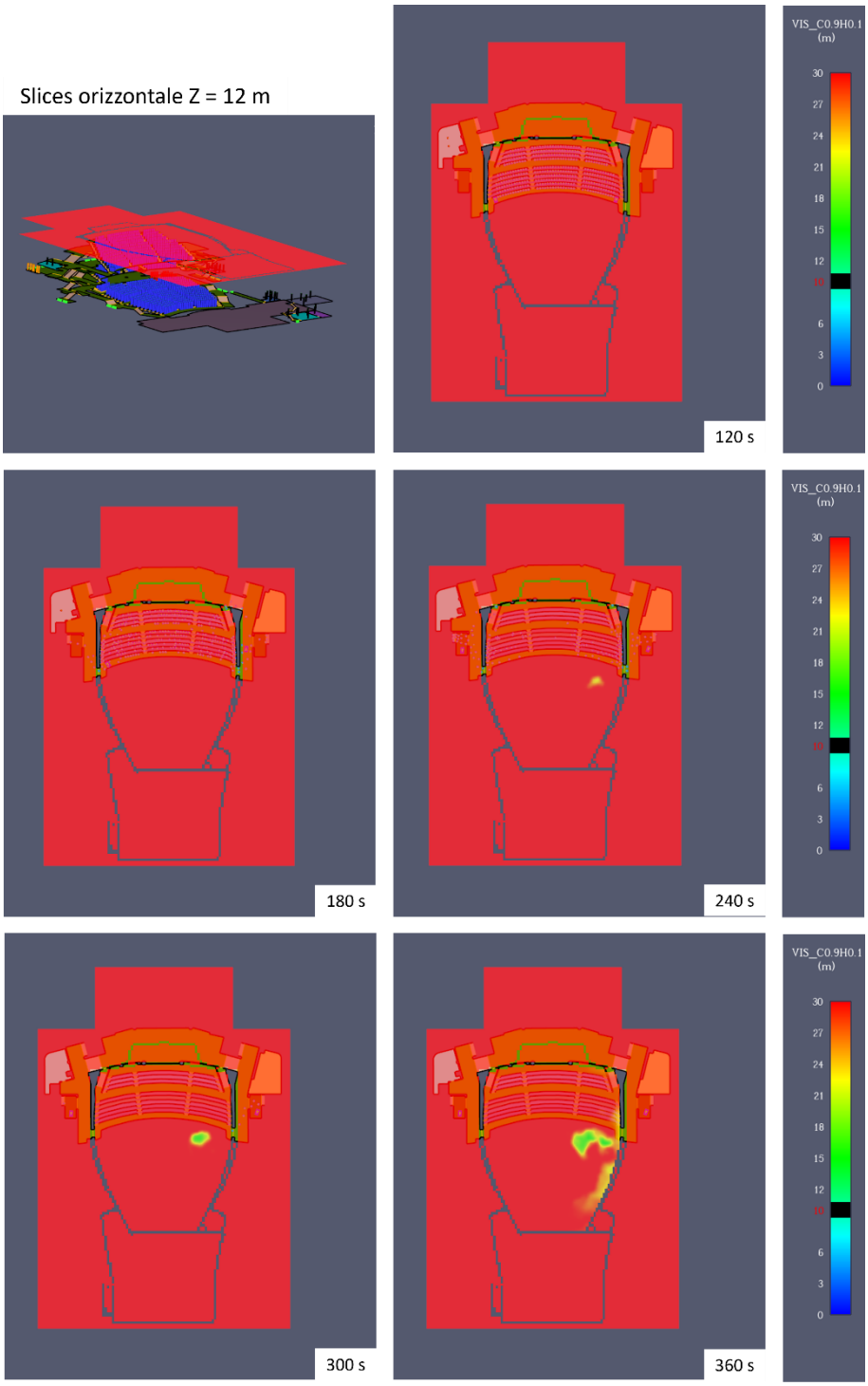


Figura 86. Slices Orizzontale di visibilità - Scenario Automatico

5.3. Criterio ASET > RSET

Terminate le simulazioni per i due scenari analizzati secondo le diverse configurazioni relative allo scenario di incendio di progetto Teatro - D1, si sono riscontrati due valori di RSET.

Scenari	RSET
Scenario TEATRO - Programmato	353 s
Scenario TEATRO - Automatico	347 s

Tabella 9. Tempo richiesto per l'esodo

Il Codice di Prevenzione Incendi prevede che si effettuino delle verifiche ad un tempo t_{marg} di:

- 30 secondi
- 10% · RSET
- 100% · RSET

Nel seguito sono riportati gli andamenti dei valori di visibilità in riferimento agli istanti sopra indicati, in particolare, poiché la differenza tra i due scenari è minima, si è optato per mostrare gli andamenti nel tempo con riferimento allo Scenario TEATRO – Programmato.

Dai risultati è possibile notare come all'istante 383 s corrispondente ai 30 secondi previsti, le condizioni di visibilità risultano al di sotto del valore soglia in corrispondenza del focolaio e al livello della prima galleria gradonata. Nonostante ASET fosse minore di RSET, e quindi il criterio previsto dalla norma non fosse soddisfatto, sono state comunque condotte le simulazioni previste dal Codice.
È riportata la medesima verifica effettuata al 10% · RSET, dove si può constatare come la situazione rimanga piuttosto invariata e non siamo emersi grossi cambiamenti.
Infine, è stata analizzata la situazione corrispondente al 100% · RSET. Dalla visualizzazione grafica si evince come le condizioni critiche si sviluppano nel tempo, con una maggiore propagazione dei fumi al livello della prima galleria gradonata, per poi spostarsi verso il livello superiore.

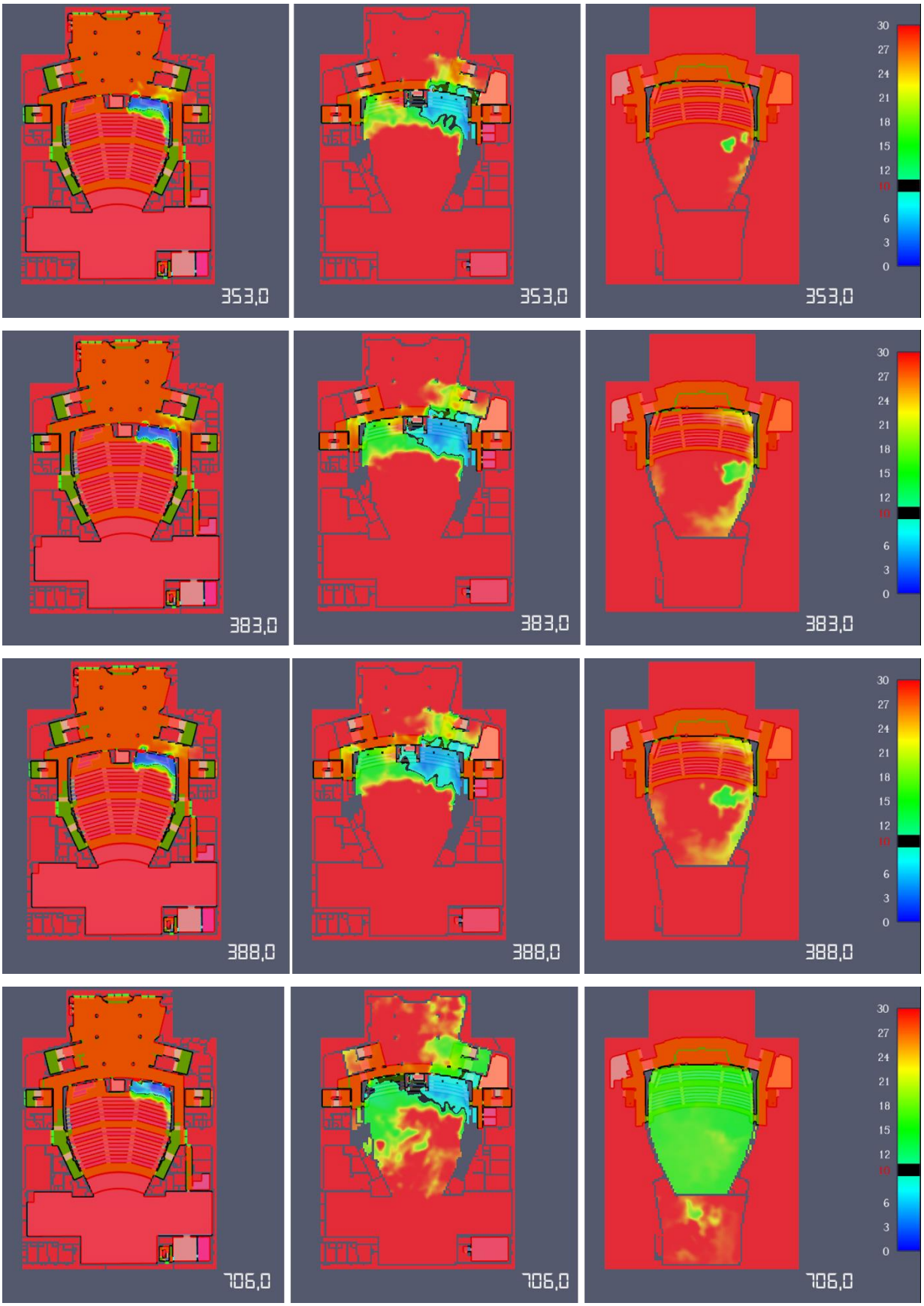


Figure 87. Verifiche Criterio ASET > RSET

Conclusioni

Giunti alle conclusioni delle analisi effettuate, è certamente utile riassumere i risultati ottenuti. Il lavoro di tesi esposto è stato affrontato con l'obiettivo di trattare alcune delle dinamiche legate alla Prevenzione Incendi, con l'ottica di garantire la salvaguardia degli occupanti e dei soccorritori, oltre alla tutela dei beni e dell'ambiente. Il tutto è stato affrontato mediante l'ausilio di strumenti a supporto della Fire Safety Engineering. L'elaborato ha affrontato più ambiti correlati tra loro, quali l'individuazione di soluzioni progettuali alternative per garantire lo smaltimento di fumo e calore in emergenza; quindi, la modellazione di scenari di incendio e di esodo con l'obiettivo ultimo di dimostrare l'efficacia della soluzione adottata, oltre a garantire la sicurezza sia degli occupanti che dei soccorritori, i quali sono chiamati a prestare aiuto. Il loro contributo si rivela efficace soprattutto quando all'interno di un contesto importante, come un'attività teatrale, si possono ritrovare diverse tipologie di occupanti. In merito a questo aspetto si è proposto di analizzare il comportamento delle persone in situazioni di emergenza e come queste possano rispondere o reagire diversamente sulla base di aspetti individuali e/o collettivi. È stato illustrato come i comportamenti dei singoli possono essere influenzati da comportamenti gregari e viceversa e come questi cambi di rotta possano trascinare la situazione in una condizione critica. Sono stati affrontati anche aspetti legati all'inclusione, considerando i diversi profili di utenti che generalmente frequentano il teatro.

Focalizzando l'attenzione al criterio ASET > RSET, nonostante non sia stata dimostrata la disuguaglianza, si può certamente concludere che la sicurezza per gli occupanti e i soccorritori è stata garantita con le soluzioni progettuali previste. La stesse simulazioni di esodo hanno permesso di valutare l'andamento degli occupanti all'interno dell'edificio e di calcolare i tempi impiegati per le operazioni di evacuazione. È emerso che gli occupanti riescano a raggiungere un luogo sicuro senza mai incontrare gli effluenti dell'incendio. A conclusione del presente elaborato è importante osservare come gli strumenti di simulazione di esodo debbano necessariamente essere impiegati in ogni fase della progettazione, in quanto risultano efficaci ed al tempo stesso molto vincolanti nei confronti del progetto. Essi, infatti, restituiscono al progettista un input importante sull'efficienza delle misure adottate.

Tuttavia, ancora oggi ci sono aspetti comportamentali che richiedono ulteriori studi e approfondimenti, ma sicuramente l'utilizzo degli strumenti utilizzati per condurre le analisi all'interno del lavoro di Tesi offrono un supporto fondamentale al progettista.

Bibliografia

1. Ministero dell'Interno – *D.M. 3 agosto 2015 - Codice di Prevenzione Incendi* e *s.m.i.*
2. D. Lgs. n. 81 del 09/04/2008, art. 2 – *Testo Unico di salute e sicurezza sul lavoro*
3. Muneretto P. – *Nuove prospettive per le attività di pubblico spettacolo*
4. ISO/TR 13387-1:1999 FSE - *Part 1: Application of fire performance concepts to desing objectives*
5. Bontempi F., Caire L., Mangione M. – *Il comportamento umano in caso di incendio: i modelli di* evacuazione
6. Pietrantoni L., Prati G. – *I comportamenti collettivi durante l'evacuazione nelle emergenze*
7. Schiavone E. – *Progettare la sicurezza inclusiva: da dove iniziare?*
8. Vancetti R., Zanut S., Minoia M. – *Simulazioni di esodo per il progetto dei piani di evacuazione in emergenza nelle attività scolastiche*
9. D'Addato M. – Dirigente del progetto di ricerca: *Studio degli incendi di grande rilevanza verificatisi nelle scuole, centri commerciali, attività alberghiere e di pubblico spettacolo finalizzato all'individuazione delle cause e degli effetti*
10. ISTAT – *Cultura e tempo libero*
11. ISTAT – *Conoscere il mondo della disabilità. Persone, relazioni e istituzioni*
12. Guion V. – *La progettazione e gestione dell'emergenza inclusiva: applicazioni e verifiche sulle attività di pubblico spettacolo nel complesso edilizio delle Officine Grandi Riparazioni in Torino*
13. Cosi F. – *Sicurezza antincendio: la modellazione dell'esodo di un fabbricato adibito a uffici*