



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
A.a. 2021/2022
Sessione di Laurea Marzo 2022**

Analisi e verifiche di Fire Safety Engineering sulla propagazione degli incendi in facciata in edifici a grande altezza

Relatore:

Roberto VANCETTI

Candidato:

Simone BASSO

Correlatore:

Emiliano CEREDA

INDICE

INTRODUZIONE	7
METODOLOGIA	8
CAPITOLO 1 - Generalità	9
1.1 Edifici a grande altezza: caratteristiche e problematiche principali ..	9
1.2 Facciate: tipologie e metodi di analisi	17
1.2.1 Facciata semplice	20
1.2.2 Facciata a doppia parete	21
1.2.3 Facciata continua (o curtain wall)	23
1.2.4 Parete aperta	24
1.3 Facciate: resistenza al fuoco e possibilità di intervento	29
1.3.1 Facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco	30
1.3.2 Facciata semplice e curtain wall	31
1.3.3 Facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile	33
1.3.4 Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile	34
CAPITOLO 2 - Modellazione	41
2.1 Fase preliminare: concetti base e curva RHR	41
2.2 Fase progettuale: modellazione in Pyrosim	50
2.2.1 Facciata semplice	56

CAPITOLO 3 - Risultati	64
3.1 Analisi della temperatura interna	64
3.1.1 Focolare interno.....	65
3.1.2 Focolare esterno	66
3.2 Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata	68
3.3 Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 1)	81
3.4 Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 5)	85
3.5 Soluzione con misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata	89
CONCLUSIONI	93
ALLEGATI	95
BIBLIOGRAFIA	98

INDICE DELLE FIGURE

CAPITOLO 1

Figura 1 - Esempi di altezza antincendio	10
Figura 2 - Schema composizione altezza interpiano.....	12
Figura 3 - Scenari tipici di diffusione dell'incendio in facciata	18
Figura 4 - Esempi di facciata semplice	20
Figura 5 - Esempio di facciata a doppia parete non ventilata	21
Figura 6 - Esempi di facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile.....	21
Figura 7 - Esempi di facciata a doppia parete ventilata ispezionabile.....	22
Figura 8 - Esempio di facciata continua	23
Figura 9 - Esempi di facciata a parete aperta	24
Figura 10 - Esempi di barriere orizzontali per facciate ventilate.....	26
Figura 11 - Schema costruttivo del modello a media scala analizzato	27
Figura 12 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata	29
Figura 13 - Esempio di facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco.....	30
Figura 14 - Esempio di facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco.....	30
Figura 15 - Esempio di facciata semplice resistente al fuoco.....	31
Figura 16 - Esempio di curtain wall resistente al fuoco.....	31
Figura 17 - Esempi di costituzione della fascia di separazione	32
Figura 18 - Esempi di facciata con parete chiusa resistente al fuoco	33
Figura 19 - Esempi di facciata con parete aperta resistente al fuoco.....	34
Figura 20 - Esempio di facciata con parete chiusa resistente al fuoco	35
Figura 21 - Esempio di facciata con parete chiusa resistente al fuoco	35
Figura 22 - Esempio di facciata ispezionabile resistente al fuoco	36
Figura 23 - Esempio di fascia di separazione orizzontale.....	37
Figura 24 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio.....	38

Figura 25 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio.....	38
Figura 26 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio.....	39

CAPITOLO 2

Figura 27 - Modello a zone	42
Figura 28 - Modello di campo.....	42
Figura 29 - Curva RHR.....	43
Figura 30 - Schematizzazione delle stanze considerate.....	45
Figura 31 - Interfaccia del software Namirial Suite 2.0.....	46
Figura 32 - Posizione bruciatore e curva HRR	52
Figura 33 - Modellazione della facciata.....	53
Figura 34 - Modellazione aperture e controlli	54
Figura 35 - Modellazione mesh	55
Figura 36 - Stratigrafia del sistema di facciata di riferimento	56
Figura 37 - Facciata oggetto dell'esperimento	59
Figura 38 - Curva HRR ottenuta dall'esperimento.....	59
Figura 39 - Valore di riferimento HRR.....	60
Figura 40 - Estratto tabella temperature di ignizione.....	60
Figura 41 - Facciata priva di misure antincendio.....	61
Figura 42 - Facciata con fascia di separazione orizzontale, schema 1	62
Figura 43 - Facciata con fascia di separazione orizzontale, schema 5	62
Figura 44 - Facciata con misura di prevenzione contro la diffusione dell'incendio.....	63

CAPITOLO 3

Figura 45 - Modello semplificato con focolare interno	65
Figura 46 - Andamento temperatura interna con focolare interno.....	65

Figura 47 - Modello semplificato con focolare esterno	66
Figura 48 - Andamento temperatura interna con focolare esterno	66
Figura 49 - Andamento del fumo, by material.....	69
Figura 50 - Andamento della temperatura, by material	69
Figura 51 - Andamento della temperatura superficiale, by material	70
Figura 52 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, by material.....	71
Figura 53 - Andamento del fumo, manual HRR.....	73
Figura 54 - Andamento della temperatura, manual HRR	74
Figura 55 - Andamento della temperatura superficiale, manual HRR	75
Figura 56 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, manual HRR.....	76
Figura 57 - Valore del tasso di perdita di massa.....	77
Figura 58 - Andamento del fumo, manual mass loss rate.....	78
Figura 59 - Andamento della temperatura, manual mass loss rate	78
Figura 60 - Andamento della temperatura superficiale, manual mass loss rate	79
Figura 61 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, manual mass loss rate.....	80
Figura 62 - Andamento del fumo, schema 1	82
Figura 63 - Andamento della temperatura, schema 1	82
Figura 64 - Andamento della temperatura superficiale, schema 1	83
Figura 65 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, schema 1.....	84
Figura 66 - Andamento del fumo, schema 5.....	86
Figura 67 - Andamento della temperatura, schema 5	86
Figura 68 - Andamento della temperatura superficiale, schema 5	87
Figura 69 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, schema 5.....	88
Figura 70 - Andamento del fumo, alternativa.....	90
Figura 71 - Andamento della temperatura, alternativa	90
Figura 72 - Andamento della temperatura superficiale, alternativa.....	91
Figura 73 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, alternativa.....	92

INTRODUZIONE

La seguente tesi tratta il tema del rischio di incendio in edifici a grande altezza; in particolare l'elaborato è stato svolto con l'obiettivo di analizzare il comportamento e la reazione al fuoco di diverse tipologie di facciate. Per una di esse, la facciata semplice con sistema di cappotto esterno in poliuretano espanso, è stata verificata l'efficacia di diverse misure atte a prevenire la diffusione dell'incendio proposte dalla *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili* valutandolo attraverso un'analisi di FSE.

Dopo un breve cenno sugli edifici a grande altezza e i loro aspetti rilevanti riguardo l'antincendio, vengono descritti i principali sistemi di facciata oggi utilizzati e il loro comportamento al fuoco così da comprendere quali sono gli scenari tipici per la propagazione dell'incendio e i principali fattori che caratterizzano la propagazione del fuoco su una facciata. Inoltre, è stata fatta un'analisi dei riferimenti normativi italiani, specialmente inerenti alla *Guida*, in modo tale da avere un punto di partenza per la fase successiva, ovvero quella di modellazione.

Successivamente, infatti, il focus verte sull'espone i passaggi seguiti e sullo spiegare i meccanismi adoperati per la modellazione dei diversi scenari ipotizzati a partire dalla stima della curva di Heat Release Rate (o curva RHR) fino ad arrivare alla descrizione della modellazione vera e propria effettuata per mezzo del software Pyrosim.

Infine, dopo aver ultimato la fase di modellazione delle diverse configurazioni della facciata analizzata, sono esposti i risultati ottenuti in modo tale da poter effettuare un confronto tra le diverse misure utilizzate atte a prevenire la diffusione dell'incendio in facciata così da poter capire quale sia la soluzione migliore tra quelle esaminate e poter comprendere l'efficacia e la completezza della Guida.

METODOLOGIA

Il primo step effettuato è stato la fase di ricerca: come prima cosa infatti sono stati reperiti articoli al fine di ricavare tante più informazioni possibili, le quali saranno poi necessarie in fase di modellazione come ad esempio il valore di picco della curva HRR caratteristica della facciata semplice con isolante esterno in poliuretano espanso.

Dopo aver recuperato tutte le informazioni necessarie e le norme a cui fare riferimento, il secondo step compiuto è stato la definizione delle caratteristiche del focolare utilizzato in fase di modellazione, a partire dai valori del carico d'incendio. Per lo step successivo, sono stati utilizzati i risultati ottenuti in modo tale da ottenere un valore di carico di incendio medio, utilizzato poi per poter ricavare, seguendo le indicazioni riportate nel Codice di Prevenzione Incendi, la curva HRR relativa al focolare interno.

Infine, è stata effettuata l'analisi in FDS, dopo aver effettuato l'intera modellazione, così da ottenere dei file 3Dplot che contengono le informazioni sul fumo e sulla temperatura, i quali tramite un confronto dei vari casi analizzati, hanno permesso di trarre le conclusioni in riferimento alla configurazione nel suo complesso migliore e, più in generale, qual è l'utilità di effettuare un'analisi di questo tipo.

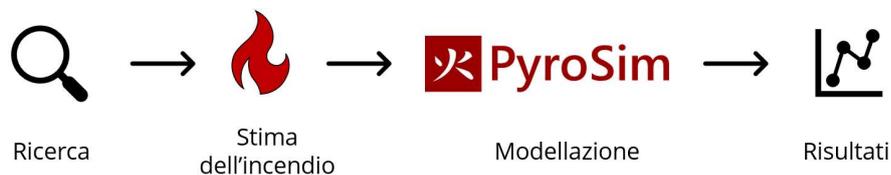


Figura 1 - Metodologia utilizzata

CAPITOLO 1 - Generalità

1.1 Edifici a grande altezza: caratteristiche e problematiche principali

Con edificio a grande altezza si intende un fabbricato la cui altezza sia superiore ad un determinato valore, che varia a seconda del Paese in cui ci si trova. In Italia, uno dei primi documenti che regolava la classificazione degli edifici è il Decreto Ministeriale del 16 febbraio 1983, dove l'assoggettabilità era legata alla misura di *altezza in gronda*, ovvero la distanza misurata dal suolo alla linea di gronda. Successivamente, con l'emanazione del Decreto Ministeriale n°246 del 16 maggio 1987, il parametro adottato per determinare l'assoggettabilità degli edifici civili è diventata l'*altezza antincendio*, ovvero la massima quota dei piani dell'attività (sono esclusi i piani con presenza occasionale e di breve durata di personale addetto, come ad esempio i vani tecnici). Inoltre, l'allegato al D.M. del 1987 prevede la classificazione degli edifici in funzione della loro altezza antincendio secondo quanto indicato nella seguente tabella:

Tipo di edificio	Altezza antincendi	Massima superficie del compartimento (m ²)	Massima superficie di competenza di ogni scala per ogni piano	Tipo dei vani scala e di almeno un vano ascensore	Caratteristica REI del vano scala e ascensore, filtri, porta, elementi di suddivisione tra i compartimenti.
a	Da 12 m a 24 m	8.000	500	Nessuna prescrizione	60 (**)
			500	Almeno protetto se non sono osservati i requisiti del punto 2.2.1	60
			550	Almeno a prova di fumo interno	60
			600	A prova di fumo	60
b	Da oltre 24 m a 32 m	6.000	500	Nessuna prescrizione	60 (**)
			500	Almeno a prova di fumo interno se non sono osservati i requisiti del punto 2.2.1	60
			550	Almeno a prova di fumo interno	60
			600	A prova di fumo	60
c	Da oltre 32 m a 54 m	5.000	500	Almeno a prova di fumo interno	90
d	Da oltre 54 m a 80 m	4.000	500	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore a 0,36 m ²	90
e	Oltre 80 m	2.000	350 (*)	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore a 0,36 m ²	120

Tabella A - Classificazione edifici a grande altezza

Al giorno d'oggi, la classificazione dei fabbricati avviene attraverso l'altezza antincendio; infatti, il nuovo *Codice di prevenzione incendi* (Testo coordinato dell'allegato I del DM 3 agosto 2015 e successive versioni: DM 18 ottobre 2019) utilizza lo stesso concetto adottato nel passato, anche se con la nuova formulazione l'assoggettabilità è stata estesa agli edifici destinati ad uso civile (e non solo civile abitazione). Sono di seguito riportati degli esempi di calcolo dell'altezza antincendio presenti nel Codice, capitolo G.1.7.

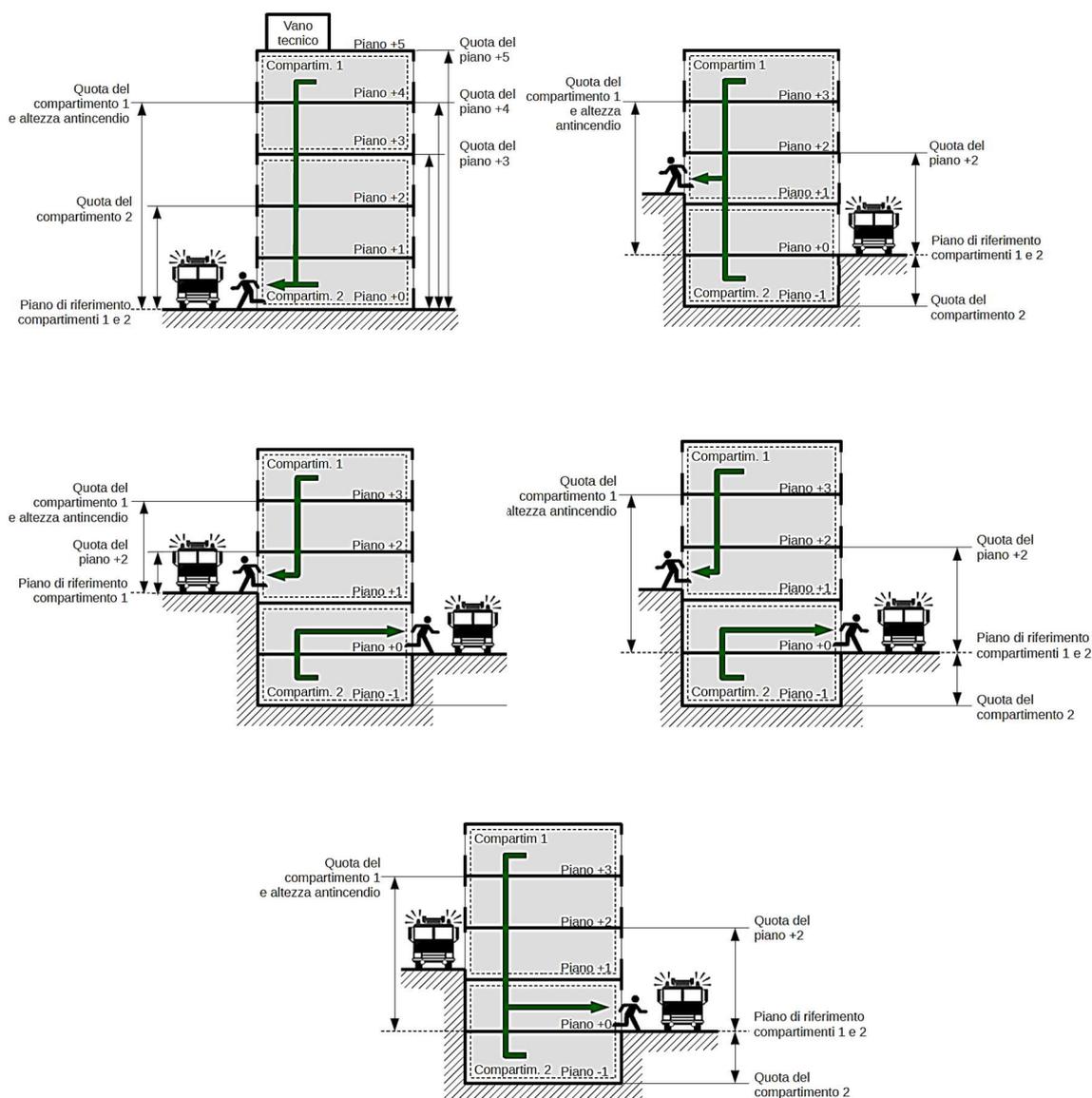


Figura 2 - Esempi di altezza antincendio

Come detto, dunque, gli edifici a grande altezza possono essere classificati al variare della loro altezza; nonostante questa differenziazione, i fabbricati presentano caratteristiche e tecniche costruttive comuni, da cui derivano problematiche comuni, soprattutto al crescere dell'altezza. La loro progettazione è un processo complesso, sia per le notevoli dimensioni dell'edificio stesso, sia a causa della necessaria integrazione di tutti gli aspetti progettuali.

Il cuore degli edifici a grande altezza è il *nucleo*, elemento centrale in cui sono presenti locali e funzioni che rimangono invariati su tutti i piani; generalmente esso è composto da gli ascensori e le scale, le scale antincendio, i servizi igienici, i quadri elettrici, i locali tecnici per le unità della HVAC e i cavedi. Il nucleo può essere di diverso tipo:

- Centrale, la soluzione migliore dal punto di vista strutturare (grazie alla sua rigidità che permette al fabbricato di resistere maggiormente ai carichi dovuti al vento) e della suddivisione degli spazi (vantaggio che riguarda anche la distribuzione dei condotti del condizionamento).
- Laterale, utilizzato nel caso di edifici adiacenti o se la dimensione del piano è ridotta
- Multipli, a differenza dei precedenti, usati nel caso di piani estesi, sia per questioni strutturali, sia per ridurre la lunghezza della via di esodo e la distanza dai bagni.

Un secondo elemento che caratterizza e contraddistingue la maggior parte degli edifici a grande altezza è la facciata, che svolge un ruolo molto importante, in particolare per quanto riguarda l'ambito energetico. Essa infatti deve essere in grado di ridurre gli apporti solari della radiazione incidente del 20% e allo stesso tempo fornire un adeguato isolamento termico, sia nel periodo invernale per evitare un'eccessiva dispersione di calore dall'interno verso l'esterno sia nel periodo estivo in modo da evitare il surriscaldamento dell'ambiente interno. Si precisa che il tema delle facciate, dalle diverse tipologie al comportamento al fuoco, verrà affrontato con maggior dettaglio nel prossimo paragrafo.

Un ulteriore aspetto alla base della progettazione di ogni edificio a grande altezza è l'altezza interpiano, parametro fondamentale che influenza il costo globale dell'opera: una variazione di altezza anche solo di un centimetro, moltiplicata per il numero di piani, può comportare un aumento notevole dell'altezza e della superficie esterna dell'edificio, e quindi del costo legato all'involucro stesso. Per questo motivo i progettisti cercano per quanto possibile di ridurre al minimo questa quantità, e per farlo tengono conto di tutte le misure che costituiscono l'altezza interpiano, ovvero:

- Altezza del pavimento, nel caso si tratti di pavimento classico o galleggiante.
- Altezza netta, quella che può variare maggiormente, comunque compresa tra i 2,6m e i 3m.
- Altezza del controsoffitto, che varia a seconda del tipo e della dimensione dell'impianto di ventilazione e riscaldamento.
- Altezza del solaio strutturale, differente a seconda del tipo di tecnologia costruttiva adottata.

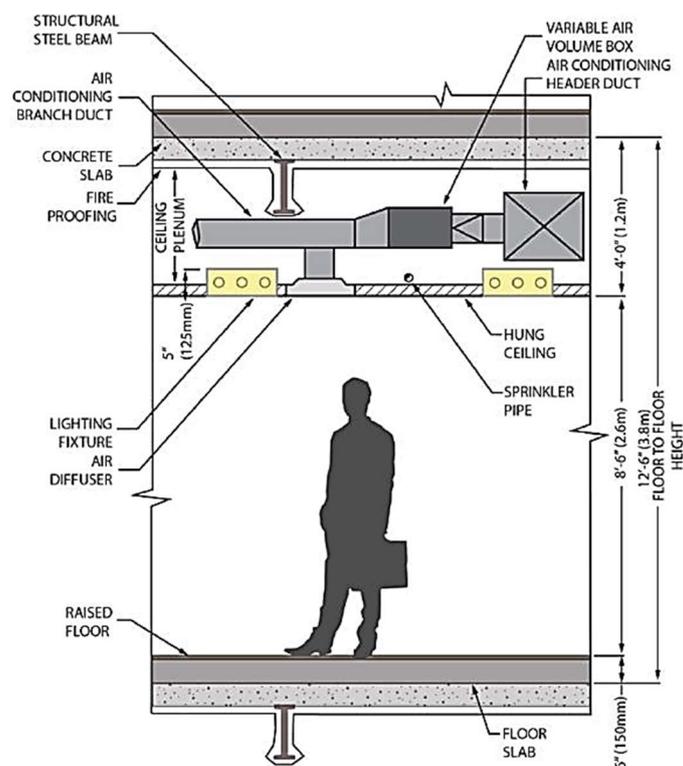


Figura 3 - Schema composizione altezza interpiano

Come accennato in precedenza, anche l'impianto di riscaldamento è una caratteristica comune degli edifici a grande altezza: nella maggior parte di essi, infatti, la temperatura e la qualità dell'aria viene regolata da sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), ovvero un complesso di sistemi, macchine e tecnologie utilizzati per fornire il riscaldamento, il raffreddamento, la ventilazione e l'aria condizionata ai vari ambienti del fabbricato in modo tale da garantire il comfort termico agli occupanti. Al fine di raggiungere i risultati migliori in termini di efficienza energetica e di comfort interno, i sistemi HVAC devono essere progettati in modo tale da:

- prevedere un flusso d'aria costante ed uniforme per ogni ambiente e zona;
- monitorare e controllare il flusso di aria esterna che viene trattato, effettuando misurazioni della portata d'aria all'interno dei condotti stessi;
- diffondere in maniera uniforme ed efficace l'aria nelle zone occupate, variando dunque il quantitativo di aria proveniente dall'esterno così da evitare una ventilazione eccessivo (la quale sarebbe causa di spreco energetico);
- utilizzare sistemi appropriati in esterno nel caso in cui siano previsti;
- utilizzare la ventilazione a controllo ambientale o la ventilazione naturale o mista a seconda dei casi.

Progettare e dimensionare l'intero sistema rispettando quanto detto in precedenza è compito del progettista, che a sua volta può fare affidamento sulle normative e gli standard internazionali, in cui, tra i vari parametri e limiti presenti, sono anche riportate le portate d'aria per persona, che variano a seconda della tipo di ambiente in cui ci si trova. In generale, è necessario prevedere un sistema che immetta più aria esterna di quella espulsa: questo dev'essere sempre verificato e deve valere per l'interno edificio, con un'immissione del 5% in più dell'aria esterna rispetto a quella prevista dal bilanciamento, in modo da garantire le corrette condizioni di pressione interna, assicurando così il benessere termoigrometrico degli occupanti.

Un ultimo aspetto comune alla maggior parte degli edifici a grande altezza è la copertura: quasi sempre, infatti, si tratta di copertura piana. Questo elemento assume un ruolo molto importante dal punto di vista funzionale ed organizzativo in quanto sono molti gli elementi che può ospitare e le funzioni che può svolgere:

- ospitare i macchinari per il trattamento dell'aria;
- possedere spazi destinati all'alloggiamento di gru a torre;
- prevedere sistemi meccanici per la pulizia delle facciate;
- ospitare piste di atterraggio per elicotteri (necessaria sulle coperture degli edifici di oltre 80m).

Negli ultimi anni però, questi spazi hanno assunto sempre più una funzione decorativa e di intrattenimento: esempio estremo è la copertura del Marina Bay Sands, hotel-casinò di Singapore, dove in copertura è presente una piscina di 150m oltre a vari bar, discoteche e un osservatorio. Molto spesso dunque, le coperture sono concepite come spazi di socializzazione per gli occupanti, formate da parchi, aree comuni o piscine; nonostante ciò, questi spazi conservano comunque l'aspetto funzionale di luogo sicuro temporaneo in caso di emergenza.

Con il passare degli anni, la costruzione di edifici a grande altezza è aumentata esponenzialmente, portando, come detto in precedenza, alla realizzazione di fabbricati con caratteristiche simili e questo ha permesso la diffusione problematiche comuni, in particolar modo quando si tratta di gestione e sicurezza antincendio.

Come detto, il quadro normativo di riferimento per gli edifici alti è stato fornito, fino a pochi anni fa, dal Decreto 246/87, facente parte del corpo di norme successive al Decreto 16/2/82: tali indicazioni si basano sul concetto di resistenza al fuoco della struttura e sulla compartimentazione, dove l'esodo è sostanzialmente un esodo verticale semplice, in cui la sicurezza delle persone è data dalle scale, considerate un luogo sicuro dinamico a prova di fumo che

consentono, nei tempi previsti, di arrivare fino al piano terra. Per quanto riguarda eventuali restrizioni inerenti alla dimensione dello stabile, si prende in considerazione solamente l'altezza e non ci sono classificazioni legate all'affollamento massimo ipotizzabile del fabbricato stesso; inoltre, non sono previsti impianti particolari per la rilevazione, la quale è affidata a sistemi occasionali. Oltre a quanto detto in precedenza, va precisato che non sono presenti indicazioni sulla gestione dell'emergenza: non è prescritto né un piano di emergenza di sito, né squadre di emergenza ad hoc o sale di controllo.

Da questi limiti presenti all'interno della normativa sono derivate una serie di problematiche comuni: di seguito si riporta una tabella con riassunte alcune delle problematiche ricorrenti.

NORME MISURE	D.M. n. 246/87 (edifici nuovi)	D.M. n. 246/87 (edifici esistenti)	Misure migliorative proposte
Accostamento autoscala VV.F.	Punto 2.2.1: deve essere possibile l'accostamento delle autoscale ad ogni piano	----	Lungo i lati accessibili: - Eliminazione di ogni ostacolo fisso; - Divieti di sosta, transenne per impedire il parcheggio.
Impianto elettrico	Punto 5: realizzazione "a regola d'arte", con illuminazione di emergenza ad alimentazione autonoma, che consenta un ordinato sfollamento	Punto 8.1: illuminazione di emergenza ad alimentazione autonoma, che consenta un ordinato sfollamento. Interruttori di protezione delle linee elettriche (Legge 46/90 - esistenti)	Realizzazione della piena conformità alla "regola dell'arte", anche per gli impianti esistenti, evitando che lo stesso inneschi l'incendio, contribuisca o ne favorisca la propagazione.
Tipologia scale ed aerazione	Punto 2.4: Scale protette in edifici fino a 24mt. in gronda, se non è possibile l'accostamento dell'autoscala; scale a prova di fumo per altezze superiori. Aerazione permanente netta in sommità di 1 mq.	----	Scale protette in edifici fino a 24mt. in gronda, anche negli edifici esistenti; scale a prova di fumo per altezze superiori. Comunicazione tra scale e cantinati tramite filtri a prova di fumo. Aerazione permanente netta in sommità di 1 mq., ovvero EFC.
Portineria e compartimentazione	----	----	Evitare la portineria nell'atrio comunicante con la scala, qualora essa non abbia arredi completamente incombustibili e non interferisca con le vie d'esodo.
Impianti antincendio	Punto 7: idranti o naspi ad ogni piano con adeguate prestazioni idrauliche in grado di coprire tutte le aree.	Punto 8.2: per edifici fino a 32 m. in gronda sono validi gli impianti già installati.	Impianti a regola d'arte come previsto al punto 7, anche per gli edifici esistenti, disponendo preferibilmente naspi, esternamente alle scale
Gestione della sicurezza	----	----	Piano di evacuazione, con informazione dei condomini, segnaletica e planimetrie di orientamento. Luogo sicuro ove coordinare le emergenze da personale formato, con sistema di comunicazione ed allarme.

Tabella B - Misure di prevenzione incendi

Oggi però, le norme tecniche che regolano tutti i discorsi di prevenzione incendi e gestione delle emergenze sono contenute nel Codice di prevenzione incendi, soggetto ogni anno a modifiche introdotte da diverse disposizioni normative. L'aggiornamento del testo di riferimento e delle direttive stesse che lo compongono permettono di risolvere le problematiche del passato e, allo stesso tempo, quelle nuove che nascono con lo sviluppo tecnologico odierno.

Un esempio di concetto introdotto con il Codice che va ad ovviare una problematica prima presente è quello di distanza di separazione, ovvero quella distanza che deve essere interposta, su spazio a cielo libero, non inferiore alla massima altezza della costruzione verso altre opere da costruzione e verso il confine dell'area su cui sorge l'attività medesima. All'interno del Codice sono inoltre presentati due metodi attraverso i quali poter determinare tale grandezza: il *metodo tabellare*, che permette di ricavare la distanza di separazione in funzione del valore della percentuale di foratura della piastra radiante (ciascuna porzione del piano radiante impiegata per il calcolo semplificato dell'irraggiamento termico dalla sorgente a bersaglio) e di due valori tabellari, e il *metodo analitico*, in cui la distanza di separazione è sufficiente se verificata una disuguaglianza.

Tutto questo semplicemente per dire che con l'introduzione del Codice di prevenzione incendi è stato possibile risolvere gran parte delle problematiche legate alla gestione delle emergenze, fornendo una guida con indicazioni precise e parametri oggettivi a cui poter fare riferimento, a partire dalla posizione stessa dell'edificio: non essendoci indicazioni precise e puntuali a riguardo, in passato si sono creati diversi disagi nel corso della gestione delle emergenze, come ad esempio l'accessibilità all'edificio, o difficoltà nel posizionamento dell'autoscala a causa della presenza di ostacoli fissi, problemi che ad oggi sono stati risolti.

1.2 Facciate: tipologie e metodi di analisi

Un problema che al giorno d'oggi non è ancora stato pienamente risolto è la diffusione dell'incendio lungo le facciate dell'edificio. Negli ultimi anni, la riduzione del consumo di energia è una delle massime priorità per lo sviluppo sostenibile e la limitazione delle emissioni di gas serra. Per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, in modo tale da raggiungere gli attuali standard normativi, gli spessori degli strati di isolamento termico sono più che raddoppiati e, soprattutto quando viene utilizzato un materiale infiammabile, i rispettivi carichi d'incendio sono inevitabilmente cresciuti, causando un aumento della durata del potenziale incendio e una maggiore difficoltà della sua estinzione. Sono state sviluppate tecniche di produzione molto avanzate nell'industria dei materiali per facciate esterne degli edifici: le pareti esterne fatte di materiali organici isolanti, come il polistirolo e il poliuretano, sono ampiamente utilizzate in edifici alti a causa delle richieste di risparmio energetico. Tuttavia, le fiamme possono diffondersi molto rapidamente sulla loro superficie e generare grandi quantità di prodotti tossici una volta che questi materiali isolanti combustibili vengono incendiati. Gli scenari tipici per la propagazione dell'incendio sulle facciate, caratterizzati dalla presenza di materiali combustibili, sono principalmente di tre tipi:

- diffusione dell'incendio esterno sulla facciata per irraggiamento dall'edificio vicino e separato;
- diffusione dell'incendio esterno per effetto radiativo o per effetto diretto del fuoco da una fonte di fuoco situata vicino alla facciata (per esempio il fuoco sviluppato su un balcone o da un'auto parcheggiata vicino alla facciata);
- incendio interno iniziato in uno spazio all'interno di un edificio che si diffonde attraverso aperture nella facciata

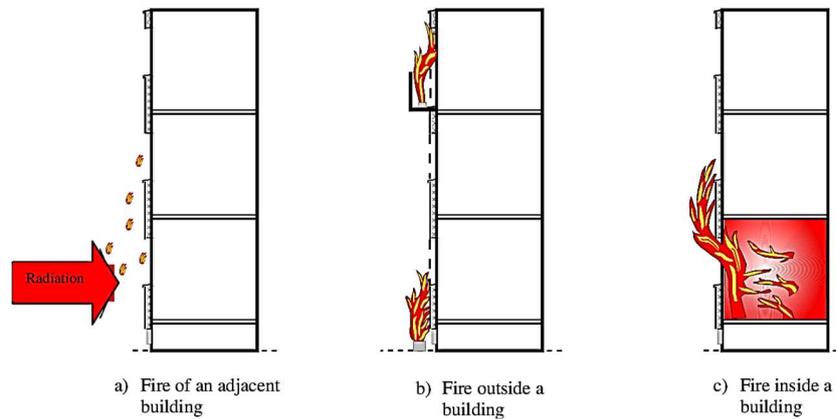


Figura 4 - Scenari tipici di diffusione dell'incendio in facciata

Tra i principali fattori che caratterizzano la propagazione del fuoco su una facciata, ci sono:

- proprietà di reazione al fuoco dei materiali che compongono il sistema di facciata, che influenzano la velocità di propagazione del fuoco sull'involucro dell'edificio;
- aperture di facciata, come ad esempio le finestre, che molto spesso sono la causa di diffusione dell'incendio in diversi spazi del fabbricato, siano essi interni o esterni.
- presenza di cavità, che possono causare l'estendersi delle fiamme a causa dell'effetto camino, indipendentemente dalle proprietà dei materiali: se non si usano speciali barriere antincendio, questo effetto può causare una rapida propagazione verticale del fuoco, aggravato dal fatto che all'inizio il fuoco non è direttamente visibile perché "nascosto" sotto il rivestimento della facciata;

La sicurezza antincendio dei materiali isolanti delle facciate esterne è diventata un problema importante per gli edifici a grande altezza, ma non è l'unico aspetto che influenza la diffusione e propagazione dell'incendio in facciata: ci sono infatti altri aspetti che vanno considerati:

- assenza di ostacoli alla propagazione dell'incendio sulla facciata e/o sulle facciate vicine;

- presenza di caratteristiche geometriche e di ventilazione nella facciata che possono facilitare la diffusione dell'incendio e la sua propagazione verso l'alto, ma anche in direzione orizzontale;
- possibilità di distacco di porzioni di facciata bruciate e coinvolgimento di porzioni ancora intatte.

Oltre a dover tener presente di tutti questi aspetti in fase di progettazione e realizzazione di nuovi fabbricati, bisogna prestare particolare attenzione anche nel caso di ristrutturazione degli edifici. Questo perché un aumento del rischio di incendio legato alle soluzioni tecniche specifiche utilizzate per le facciate spesso non è compensato da un efficace aggiornamento del sistema antincendio e delle uscite di emergenza dell'edificio, come purtroppo è stato possibile notare nell'evento di incendio della Grenfell Tower a Londra nel giugno 2017, dove il corto circuito di un frigorifero ha innescato un incendio che nel giro di pochi minuti ha raggiunto il rivestimento esterno, propagandosi così verso i piani superiori.

Per poter fare chiarezza, come prima cosa sono analizzate le diverse tipologie di facciate che costituiscono l'involucro esterno degli edifici. Queste facciate sono definite all'interno della *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili*, ovvero un documento redatto per poter raggiungere i seguenti obiettivi:

- limitare la probabilità di propagazione di un incendio originato all'interno dell'edificio, a causa di fiamme o fumi caldi che fuoriescono da vani, aperture, cavità verticali della facciata;
- limitare la probabilità di incendio di una facciata e la sua successiva propagazione, a causa di un fuoco avente origine esterna;
- evitare o limitare, in caso d'incendio, la caduta di parti di facciata che possono compromettere l'esodo in sicurezza degli occupanti l'edificio e l'intervento in sicurezza delle squadre di soccorso.

1.2.1 Facciata semplice

La Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili definisce la facciata come “l’insieme dei componenti che costituiscono un sistema di chiusura (materiali, elementi, accessori etc.), progettati, assemblati ed installati al fine di realizzare l’involucro esterno verticale, o quasi-verticale, dell’edificio”. Con facciata semplice si intende quella facciata, anche di tipo multistrato, in cui gli strati che la compongono sono assemblati con continuità senza intercapedini d'aria a separarli (elementi forati quali laterizi, blocchetti in calcestruzzo, vetrocamera, ecc. sono considerati come unico strato). Fanno parte delle facciate semplici quelle rivestite con elementi prefabbricati, fissati con legante umido o a secco, in aderenza alla parete esistente sottostante (come avviene ad esempio per i cappotti termici, in cui il materiale isolante è applicato sulla superficie esterna sia per mezzo di materiale collante sia con l’utilizzo di tasselli appositi) e le facciate in mattoni o blocchi dotati di camera d’aria per l’isolamento termico.

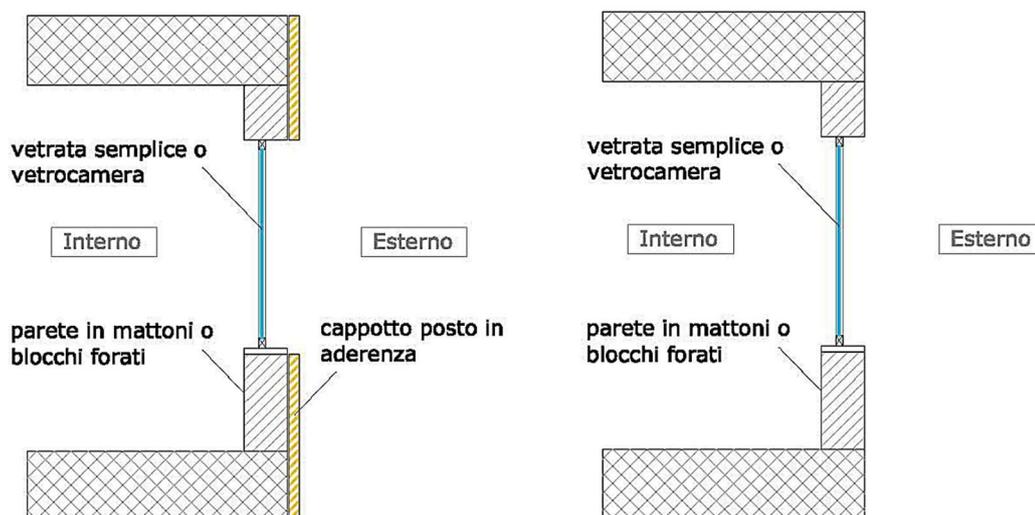


Figura 5 - Esempi di facciata semplice

1.2.2 Facciata a doppia parete

Come suggerito dal nome stesso, la facciata a doppia parete è una facciata di tipo multistrato in cui gli strati sono separati da una cavità o intercapedine d'aria. Le facciate a doppia parete possono essere di due tipologie differenti: di tipo ventilato, che a sua volta può essere distinto in ispezionabile e non ispezionabile, e di tipo non ventilato, con pareti opache o vetrate.

- Facciata a doppia parete non ventilata

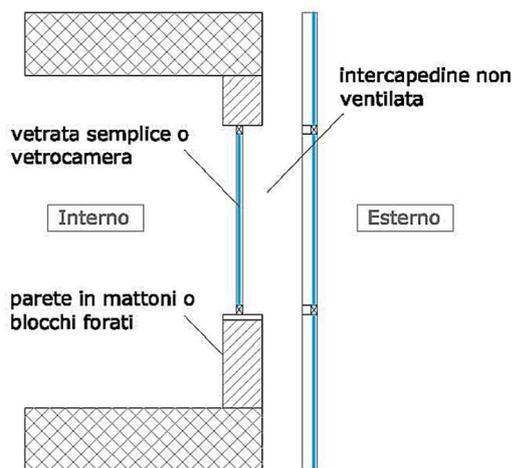


Figura 6 - Esempio di facciata a doppia parete non ventilata

La facciata a doppia parete non ventilata dal punto di vista della sicurezza antincendio è assimilabile ad una facciata semplice.

- Facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile

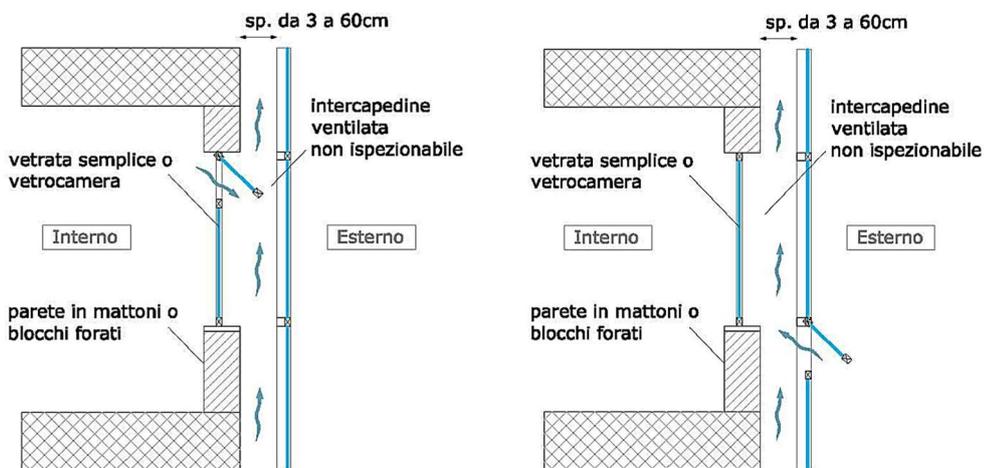


Figura 7 - Esempi di facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile

La facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile può essere ventilata sia verso l'interno che verso l'esterno, dove lo spessore dell'intercapedine è generalmente compreso tra i 5cm e i 10cm.

- Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile

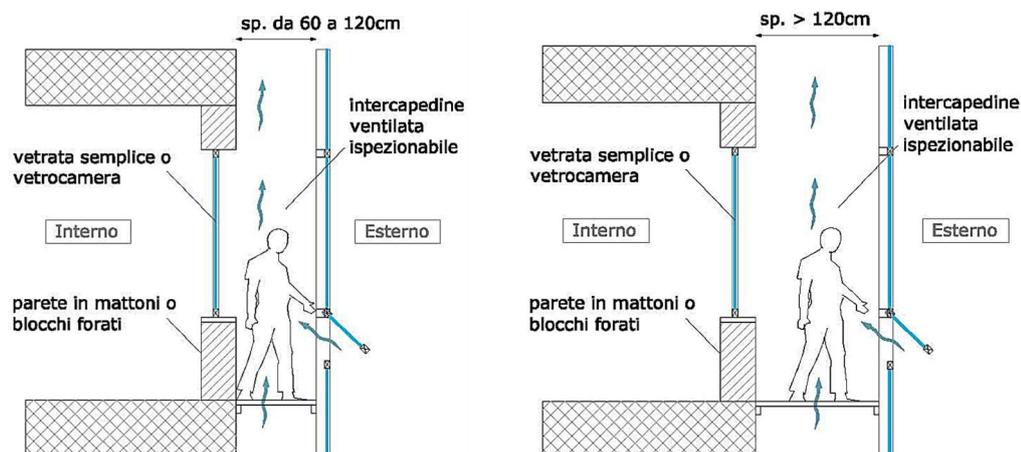


Figura 8 - Esempi di facciata a doppia parete ventilata ispezionabile

La facciata a doppia parete ventilata ispezionabile è generalmente composta da una parete interna semplice, con o senza infissi, e una parete esterna vetrata e l'intercapedine tra le due è attrezzata per consentire il passaggio di addetti alle operazioni di manutenzione. Nel caso però in cui la misura dell'intercapedine risulti maggiore di 120cm, le due pareti costituiscono, dal punto di vista della sicurezza antincendio, due sistemi di facciata indipendenti.

1.2.3 Facciata continua (o *curtain wall*)

Con curtain wall si intende una facciata esterna non portante indipendente dall'ossatura strutturale dell'edificio e generalmente fissata davanti alla testa dei solai e dei muri trasversali. È solitamente formata da una intelaiatura, costituita da elementi strutturali lineari interconnessi, vincolata alla struttura di supporto dell'edificio a formare una pelle continua leggera e avvolgente che fornisce, di per sé o insieme all'edificio, tutte le normali funzioni di una parete esterna, ma tale da non avere funzioni portanti per lo stesso edificio.

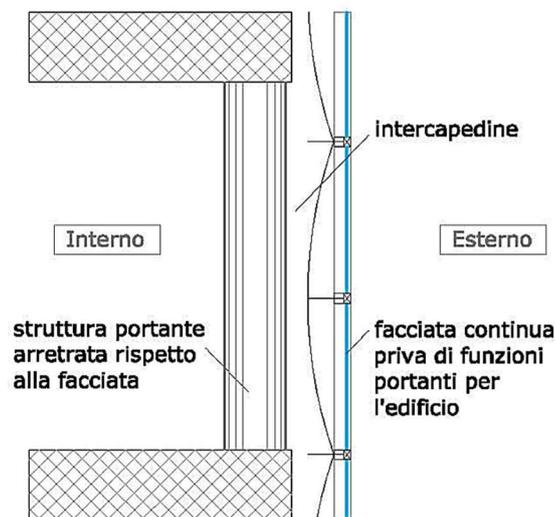


Figura 9 - Esempio di facciata continua

È inoltre richiesto che l'elemento di giunzione degli elementi che compongono la facciata ai solai e ai muri trasversali di compartimentazione sia di classe di resistenza al fuoco EI 60.

1.2.4 Parete aperta

Si tratta di un tipo di parete esterna costituita per almeno il 50% della sua superficie da giunti, griglie fisse o mobili (che si aprono automaticamente in caso di incendio di almeno 60 gradi rispetto alla posizione di chiusura) distribuiti in modo sufficientemente uniforme, o infine, da pannelli realizzati con materiali che a temperature superiori a 200°C si rompono e cadono. Ovviamente, si parla di parete chiusa, nel caso di parete esterna che non rispetta i criteri della parete aperta.

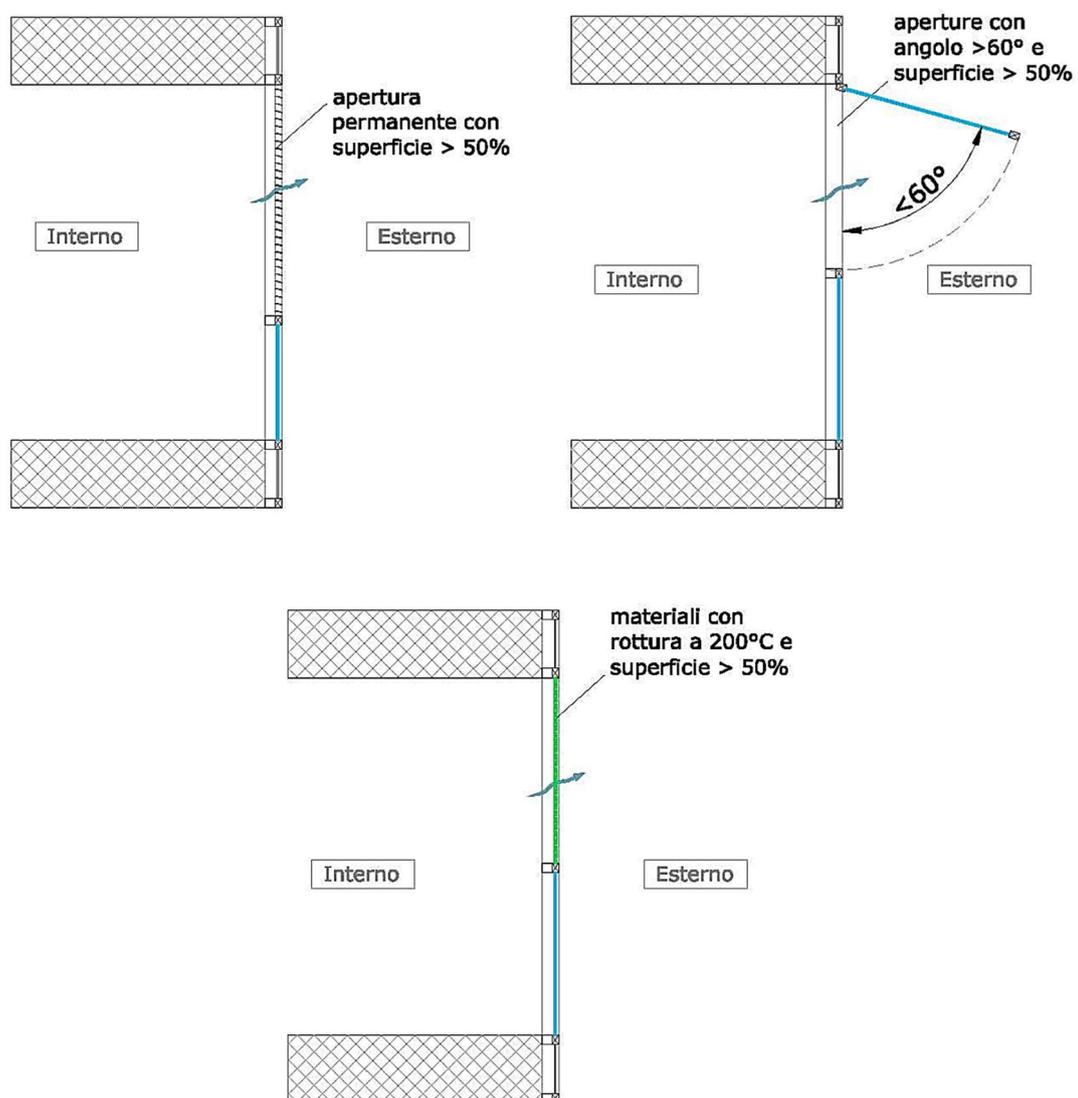


Figura 10 - Esempi di facciata a parete aperta

Metodi di analisi

Prima di poter procedere con l'analisi del comportamento al fuoco delle diverse facciate, cosa che avverrà nel paragrafo seguente, è importante precisare come è possibile studiare e prevedere il comportamento delle facciate in caso di incendio. Esistono infatti tre diverse metodologie che permettono di osservare il comportamento di un determinato sistema di facciata in modo tale da stabilire se tale sistema è applicabile per lo specifico scenario di incendio analizzato: l'analisi numerica, il test a media scala e il test a larga scala¹.

- Analisi numerica

Consiste nell'effettuare un'analisi della propagazione dell'incendio in facciata attraverso delle simulazioni al computer, permettendo così di studiare diversi aspetti in contemporanea ma soprattutto di abbattere i costi, in quanto l'altra strada percorribile prevede la realizzazione di prove di laboratorio. Un esempio di studio al computer, è quello effettuato da Giraldo et al.² i quali hanno analizzato il comportamento di un incendio specifico all'interno dell'intercapedine di un sistema di facciata ventilata, dando un'immagine rappresentativa della propagazione del fuoco in funzione del tipo e dalle caratteristiche della barriera, dell'isolamento e della larghezza dell'intercapedine d'aria. Anche nel caso di isolamento ignifugo, il loro studio ha dimostrato che il fumo e le fiamme si diffondono attraverso l'intercapedine della facciata ventilata se non vengono utilizzate barriere orizzontali: le barriere poste sui bordi delle finestre rendono difficile per il fuoco passare dallo spazio infiammato all'interno della facciata ventilata e viceversa, ma non impediscono alla fiamma di raggiungere la superficie della facciata dove il fuoco può diffondersi liberamente. Una corretta progettazione dovrebbe, oltre alle barriere sui bordi

¹ Čolić, A., Pečur, I.B. (2020) Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. *Fire Technol* 56, 1725–1754

² Giraldo MP, Lacasta A, Avellaneda J, Burgos C (2013) Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated facade systems. *MATEC Web Conf* 9:03002

delle finestre, prevedere barriere orizzontali sulle solette così da interrompere la diffusione delle fiamme.

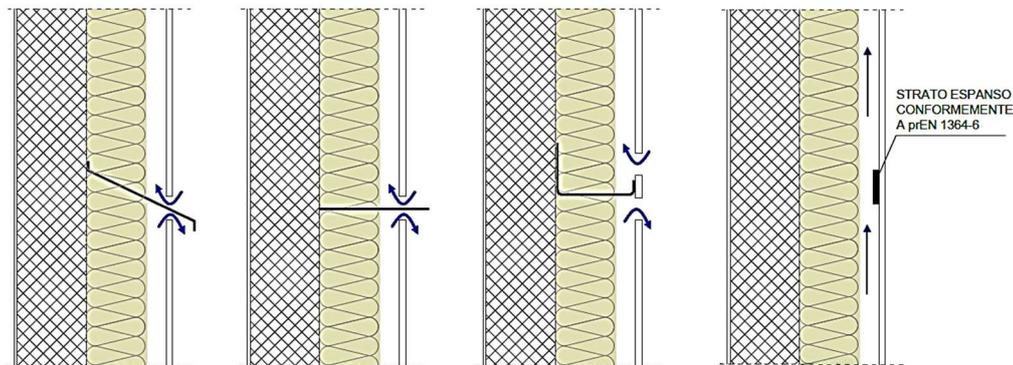


Figura 11 - Esempi di barriere orizzontali per facciate ventilate

- Test su media scala

Consiste nella creazione di modelli fisici o parti di edificio così da analizzare il comportamento reale dell'elemento facciata. I risultati dei test su media scala possono essere usati per lo sviluppo dei prodotti e l'indicazione del comportamento dei materiali con il vantaggio di non essere così costosi come i test su larga scala. Tuttavia, sono spesso incomparabili con i test su larga scala, a causa della minore esposizione al fuoco e dei dettagli costruttivi meno integrati negli elementi come giunti o barriere. L'esecuzione di prove su scala intermedia può essere un buon modo per completare le valutazioni effettuate su larga scala, ma è necessario sviluppare le competenze per poter valutare correttamente i risultati. Un esempio di test su media scala è quello effettuato da Guillaume et al³, i quali hanno osservato gli effetti di barriere orizzontali e diversi materiali isolanti su nove campioni di sistema di facciata ventilata. Hanno dimostrato l'inefficacia delle barriere orizzontali con la presenza di materiale combustibile, mentre si sono rivelate efficaci nei test con materiali non combustibili.

³ Guillaume E, Fateh T, Schillinger R, Chiva R, Ukleja S (2018) Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. Fire Mater 42(5):561–577

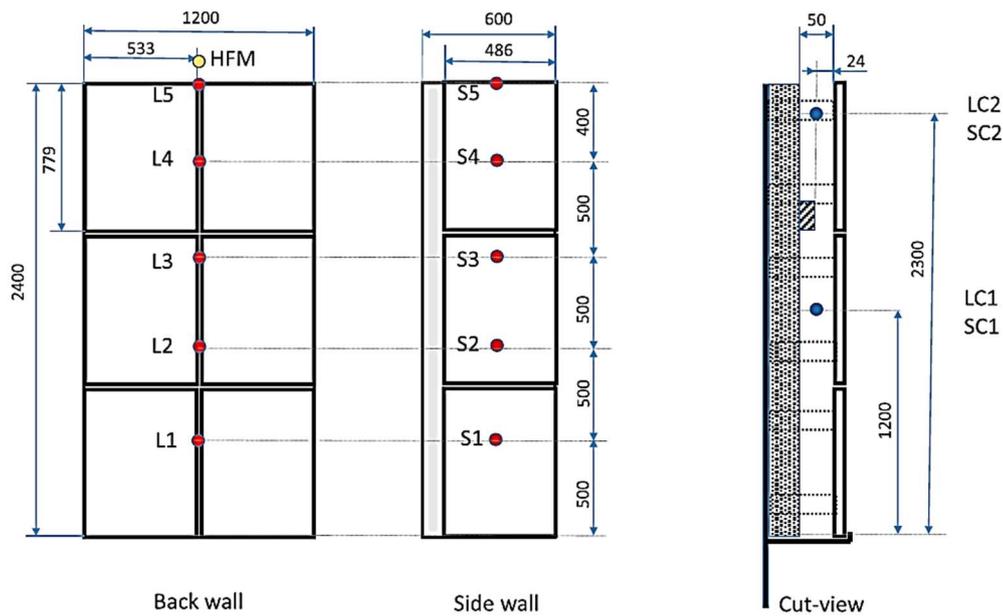


Figura 12 - Schema costruttivo del modello a media scala analizzato

- Test su larga scala

I test su larga scala sono spesso visti come il modo più rappresentativo per mostrare le prestazioni complete di un edificio durante l'incendio, a patto che sia ben progettato e costruito. Esistono numerosi metodi di prova su larga scala, ma manca ancora un metodo di prova armonizzato per l'Europa. Nel lavoro riportato dal RISE, insieme a un gruppo di laboratori⁴, gli autori hanno spiegato come la ripetibilità e la riproducibilità dei metodi di prova, così come questa armonizzazione, può essere mantenuta. Essi suggeriscono che una possibile soluzione potrebbe essere quella di definire una curva di esposizione al calore, come per le prove di resistenza al fuoco. Propongono l'uso di bruciatori a gas che possono essere regolati invece di usare una quantità definita di combustibile a combustione libera e consigliano di usare termometri a piastra per misurare l'esposizione al calore sulla facciata. Un esempio di test a larga scala è quello

⁴ Anderson J, Bostrom L, McNamee RJ, Milovanovic B (2016) Uncertainties in facade fire tests—measurements and modeling. MATEC Web Conf 46:03002

condotto da Jeffs et al.⁵ i quali, utilizzando lo standard francese del 1964 (già all'epoca infatti era stata notata l'importanza delle barriere antincendio), hanno studiato l'influenza delle barriere verticali e orizzontali sullo sviluppo del fuoco. In seguito al test effettuato, i ricercatori hanno affermato che, negli edifici alti, è necessario prevenire la diffusione del fuoco utilizzando dettagli di costruzione adeguatamente progettati. Hanno anche notato che la propagazione del fuoco lungo la facciata, così come la sua penetrazione nei compartimenti antincendio vicini, potrebbe essere impedita utilizzando barriere a forma di elementi di fissaggio orizzontali per i rivestimenti delle facciate ventilate.

⁵ Jeffs GMF, Klingelhofer HG, Prager FH, Rosteck H (1986) Fire-performance of a ventilated facade insulated with a B2-classified rigid polyurethane foam. Fire Mater 10:79–89

1.3 Facciate: resistenza al fuoco e possibilità di intervento

L'effetto di un incendio di facciata sugli occupanti è secondario: infatti gli occupanti dell'edificio raramente o mai sono feriti direttamente dalle fiamme o dalle alte temperature della facciata. Invece, il pericolo sta nel fatto che la facciata può agire come un veicolo per la diffusione dell'incendio, propagando il fuoco in piani e stanze lontane dal luogo di accensione originale. Tra le possibili misure che possono essere adottate per ridurre il rischio di propagazione del fuoco su una facciata opaca, ci sono:

- controllo della reazione dei materiali al fuoco e uso di materiali preferibilmente non combustibili;
- progettazione di elementi ignifughi, utili per dividere l'edificio in compartimenti, e definizione dettagliata del loro collegamento con i sistemi di facciata e i sistemi di copertura;
- misure per controllare la propagazione del fuoco attraverso le aperture di facciata.

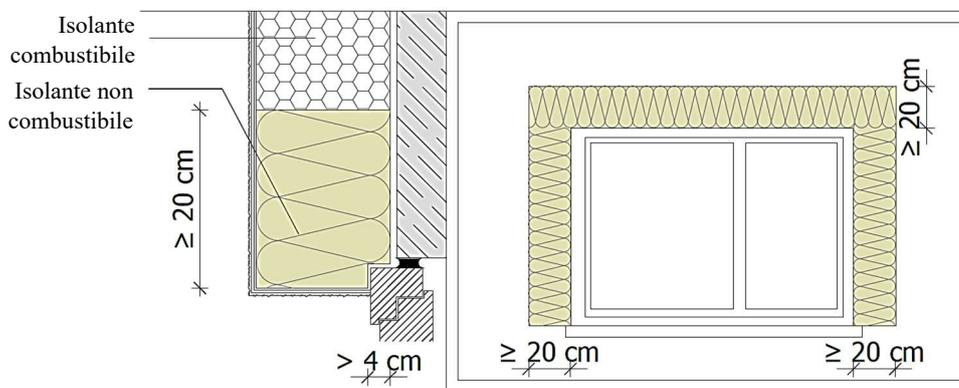


Figura 13 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata

Di seguito vengono proposte le tipologie di facciata presentate nella *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili* in modo tale da poterle analizzare dal punto di vista del proprio comportamento al fuoco ed illustrare le prime possibilità di intervento.

1.3.1 Facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco

All'interno delle linee guida analizzate sono riportati due casi particolari in cui non sono previsti particolari requisiti di resistenza al fuoco:

- gli elementi della facciata appartengono a compartimenti aventi carico d'incendio specifico minore o uguale a 200 MJ/mq.

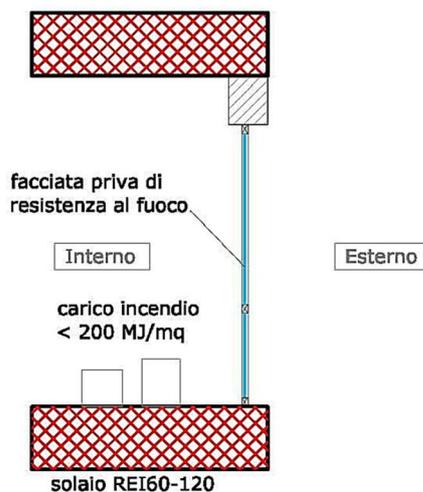


Figura 14 - Esempio di facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco

- gli elementi della facciata appartengono a compartimenti aventi carico d'incendio specifico maggiore di 200 MJ/mq, ma è previsto un sistema di spegnimento ad attivazione automatica.

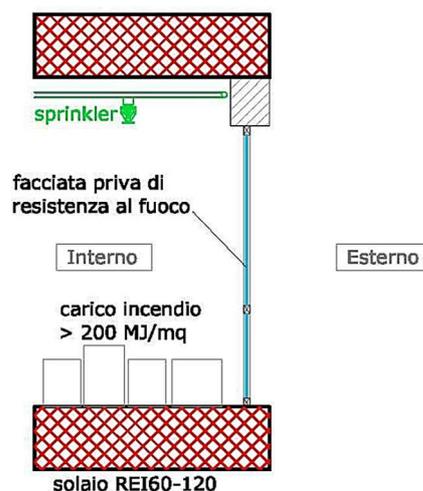


Figura 15 - Esempio di facciata priva di requisiti di resistenza al fuoco

1.3.2 Facciata semplice e curtain wall

Nel caso di facciate semplici e di curtain walls le disposizioni da seguire per il raggiungimento dei requisiti di resistenza al fuoco sono simili:

- nel caso di facciata semplice è necessario predisporre, in corrispondenza di ogni solaio e di ogni muro trasversale, una fascia realizzata come descritto all'interno della guida stessa, con classe di resistenza al fuoco E60.

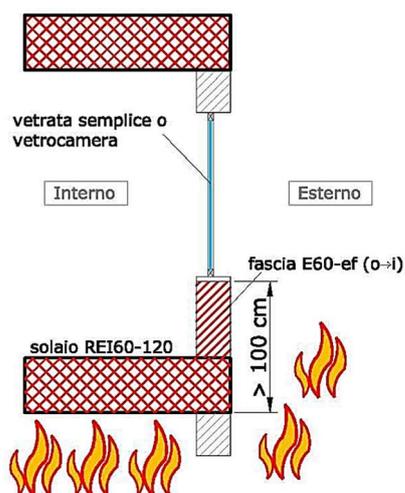


Figura 16 - Esempio di facciata semplice resistente al fuoco

- nel caso di curtain wall, oltre alla fascia di resistenza al fuoco E60, bisogna prevedere che l'elemento di giunzione ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti sia di classe di resistenza al fuoco EI60.

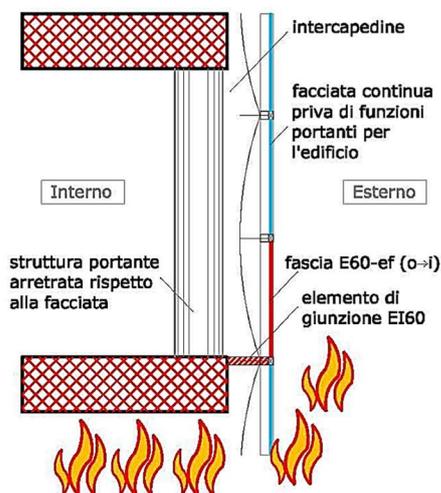


Figura 17 - Esempio di curtain wall resistente al fuoco

Entrambe le tipologie di facciata possono presentare aperture a condizione che, in corrispondenza delle stesse, siano predisposte apposite serrande tagliafuoco, o sistema equivalente, con il medesimo requisito di resistenza al fuoco previsto per le parti di facciata.

La fascia di separazione con classe di resistenza E60 può essere costituita da:

- una sporgenza orizzontale continua di larghezza “a” raccordata al solaio;
- un parapetto continuo di altezza “b” raccordato al solaio;
- un architrave continuo di altezza “c” raccordato al solaio.
- lo spessore del solaio “d”.

La somma delle dimensioni a, b, c e d deve essere uguale o superiore ad un metro; ciascuno dei valori a, b o c può eventualmente essere pari a 0.

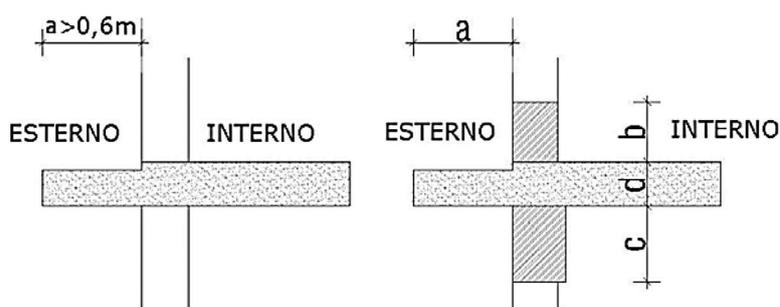


Figura 18 - Esempi di costituzione della fascia di separazione

Si vuole precisare che i limiti di resistenza al fuoco imposti per la fascia della facciata semplice e per l'elemento di giunzione per il curtain wall differiscono tra loro. Nelle sigle che definiscono le caratteristiche di resistenza al fuoco le lettere R, E, I, hanno un preciso significato derivante dalle esigenze di difesa dal fuoco. L'acronimo R.E.I. indica e certifica il possesso dei seguenti requisiti:

- R [Resistenza]: attitudine a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco per il numero di minuti di esposizione al fuoco definiti dal numero connesso alla sigla.

- E [Emissione]: attitudine a impedire il passaggio o la produzione di fuoco o fumo al lato opposto a quello di sviluppo dell'incendio.
- I [Isolamento]: isolamento termico atto a ridurre la trasmissione del calore da un lato all'altro della porta ed a mantenere quindi entro limiti prefissati (circa 150°C) la temperatura della superficie investita.

1.3.3 Facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile

Come mostrato negli esempi riportati nel capitolo precedente, è possibile distinguere due tipologie differenti di facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile, ovvero quella con parete esterna chiusa e quella con parete esterna aperta, ma comunque le disposizioni da seguire per il raggiungimento dei requisiti di resistenza al fuoco sono simili.

- nel caso di parete esterna chiusa, se sono presenti gli elementi di giunzione ai solai non combustibili, la parete interna deve obbedire alle stesse regole delle facciate semplici (non richiesti se l'intera parete interna ha una classe di resistenza al fuoco EI30); se mancano questi elementi, all'interno dell'intercapedine deve essere utilizzato esclusivamente isolante classificato almeno B-s3,d0, ovvero materiale combustibile non infiammabile o difficilmente infiammabile.

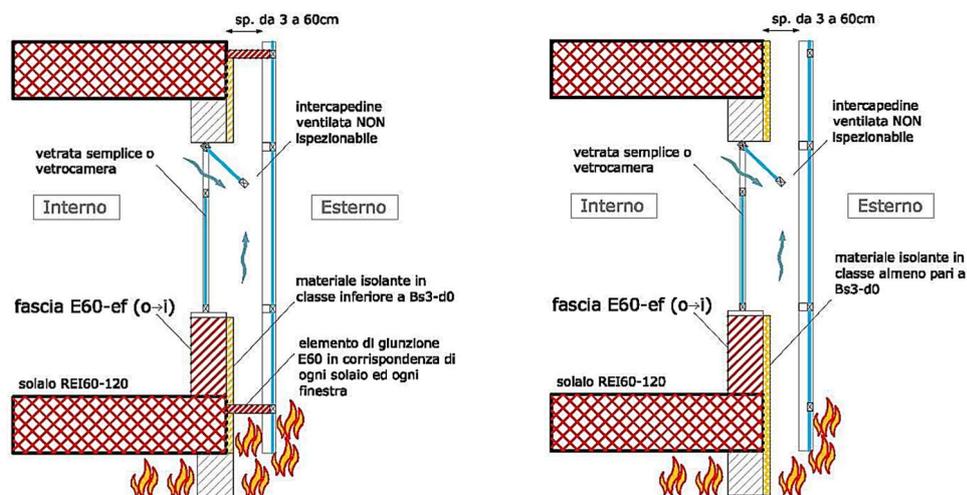


Figura 19 - Esempi di facciata con parete chiusa resistente al fuoco

- nel caso di parete esterna aperta, se nell'intercapedine è presente esclusivamente isolante classificato almeno B-s3,d0 o la parete interna ha una classe di resistenza al fuoco EI30, devono essere seguite le stesse regole delle facciate semplici.

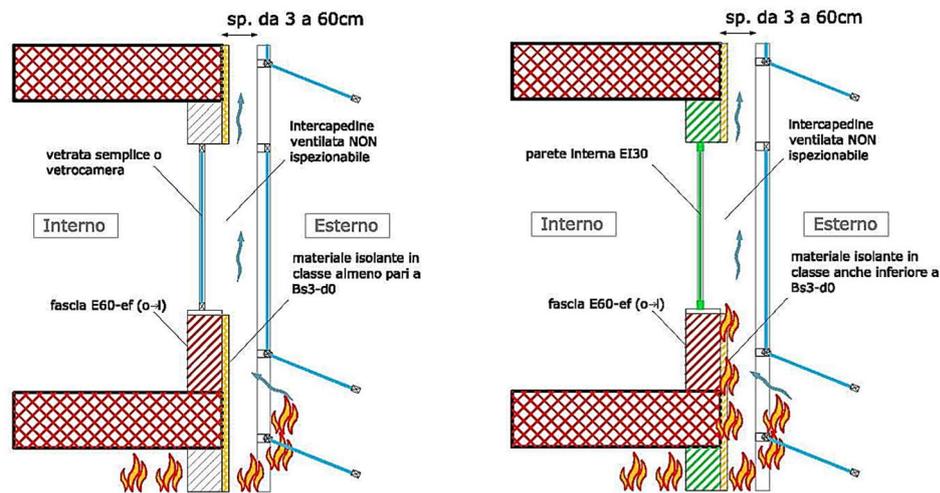


Figura 20 - Esempi di facciata con parete aperta resistente al fuoco

1.3.4 Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile

Come mostrato negli esempi riportati in precedenza, è possibile distinguere due tipologie differenti di facciata a doppia parete ventilata ispezionabile: quella con parete esterna chiusa e quella con parete esterna aperta. Mentre per quella con parete aperta è sufficiente che la parete interna rispetti i requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici, per quella con parete chiusa il discorso si complica leggermente, presentando diversi casi possibili, simili a quelli visti in precedenza:

- nel caso di parete esterna chiusa, se l'intercapedine è interrotta da solai di classe E60 in ogni piano, per la parete interna devono essere seguite le stesse regole delle facciate semplici. Possono inoltre essere applicate aperture nei solai per consentire il circolare dell'aria a patto che, in caso di incendio, sia mantenuta la continuità di compartimentazione attraverso l'intervento di dispositivi automatici di chiusura di classe E60.

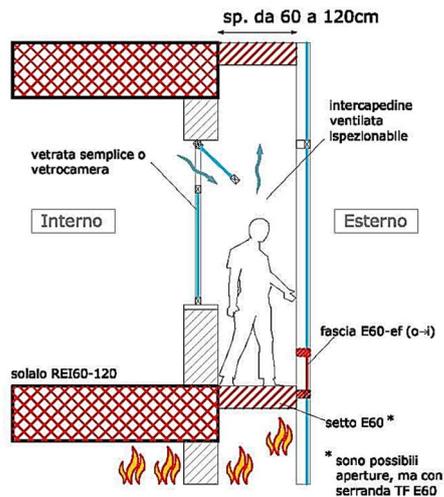


Figura 21 - Esempio di facciata con parete chiusa resistente al fuoco

- nel caso di parete esterna chiusa se l'intercapedine non è interrotta da solai di classe E60 in ogni piano la parete interna deve essere di classe EI30 in ogni piano. Nel caso in cui la parete interna è di tipo curtain wall, gli elementi di giunzione con il solaio devono essere di classe EI60.

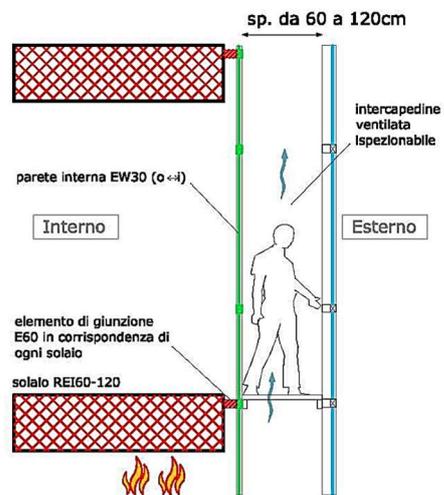


Figura 22 - Esempio di facciata con parete chiusa resistente al fuoco

In alternativa è possibile dotare la facciata di un sistema automatico di spegnimento, posto nell'intercapedine e con gli erogatori rivolti verso la parete interna con portata sufficiente per garantire il funzionamento anche del sistema di spegnimento del piano superiore a quello interessato dall'incendio e durata almeno pari a 60 minuti. L'impianto deve essere comandato da apposito sistema

di rivelazione automatico a servizio di ciascun piano dell'edificio e inoltre l'intercapedine deve essere provvista di un sistema di evacuazione dei fumi, come ad esempio una superficie di ventilazione naturale di area pari al 10% della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.

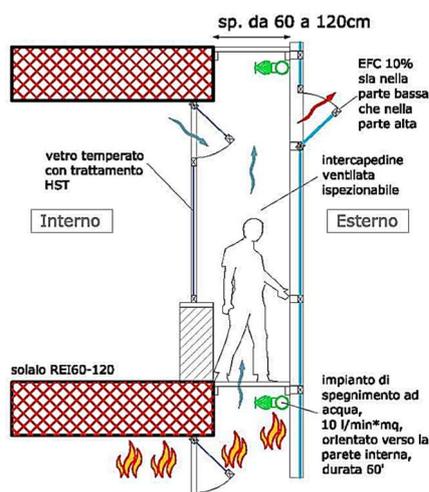


Figura 23 - Esempio di facciata ispezionabile resistente al fuoco

Per ogni tipologia di facciata la norma riporta la metodologia da seguire per effettuare la verifica dei requisiti di resistenza al fuoco e per questo motivo è possibile consultare l'intera *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili*, riportata in appendice al termine di questo elaborato.

Ci sono diverse possibili misure che possono essere adottate per ridurre il rischio di propagazione del fuoco su una facciata opaca: la *Guida* stessa propone diverse soluzioni: dalla fascia di separazione costituita come spiegato in precedenza, alla più semplice fascia di separazione orizzontale, ovvero una sporgenza orizzontale continua a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio, di larghezza "a" uguale o superiore a 0,6 m, raccordata al solaio.

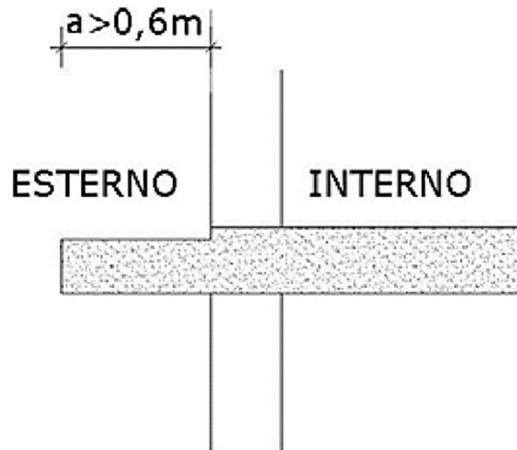


Figura 24 - Esempio di fascia di separazione orizzontale

Sono inoltre presenti all'interno della *Guida* il concetto di fascia di separazione verticale, al fine di separare due compartimenti adiacenti, e le disposizioni per le facciate adiacenti che formano un angolo compreso tra 0 e 180°, attraverso cui viene precisata una distanza minima tra le aperture dei diversi compartimenti, con lo scopo appunto di limitare la propagazione dell'incendio da un compartimento all'altro.

Le misure enunciate dalla *Guida* non sono le uniche adottabili in caso di incendio: nel corso degli anni sono state studiate diverse soluzioni tecnologiche al fine di limitare la propagazione dell'incendio in facciata. Come detto, un incendio può diffondersi in facciata, dopo essere iniziato all'interno attraverso le aperture presenti ed è per questo motivo che sono state studiate alcune soluzioni al fine di evitare questo scenario. In questo caso infatti, il punto più sensibile risulta essere il bordo superiore dell'apertura quando a causa di elevate temperature, può verificarsi la disgregazione del rivestimento e il raggiungimento delle fiamme sullo strato isolante combustibile. Quest'evento può essere prevenuto con la realizzazione di una protezione aggiuntiva sotto forma di barriera antincendio per un'altezza di almeno 20 cm sopra il bordo dell'apertura nella facciata ed una sporgenza pari a 30 cm su ogni lato dal bordo laterale dell'apertura. La barriera antincendio può essere inserita fino a 4 cm al massimo sul telaio della finestra e deve essere incollata alla parete esterna lungo

tutta la superficie in modo tale che non si creino delle cavità tra la barriera e la parete esterna che altrimenti in caso di incendio consentirebbero alle fiamme di raggiungere l'isolante combustibile.

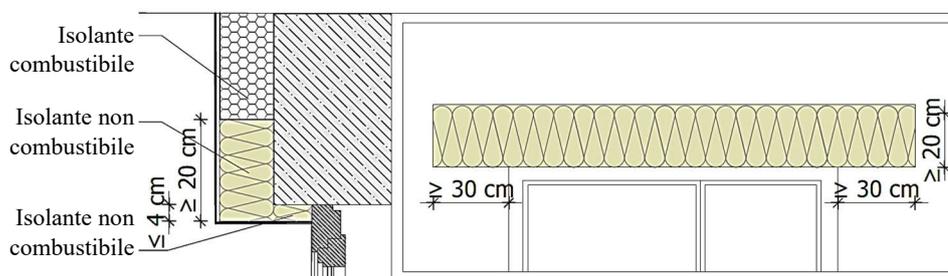


Figura 25 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio

È inoltre possibile installare, in facciate costituite da isolante combustibile, delle fasce continue di isolante termico incombustibile di dimensioni fisse, ogni due piani dell'edificio ad esempio, in modo tale da ostacolare la propagazione verticale dell'incendio. Per fare in modo che questa misura sia efficace per tutta la durata dell'incendio è necessario che lo strato di isolante incombustibile sia non solo incollato su tutta la superficie, ma devono inoltre essere montati dei tasselli meccanici sul supporto della parete esterna.

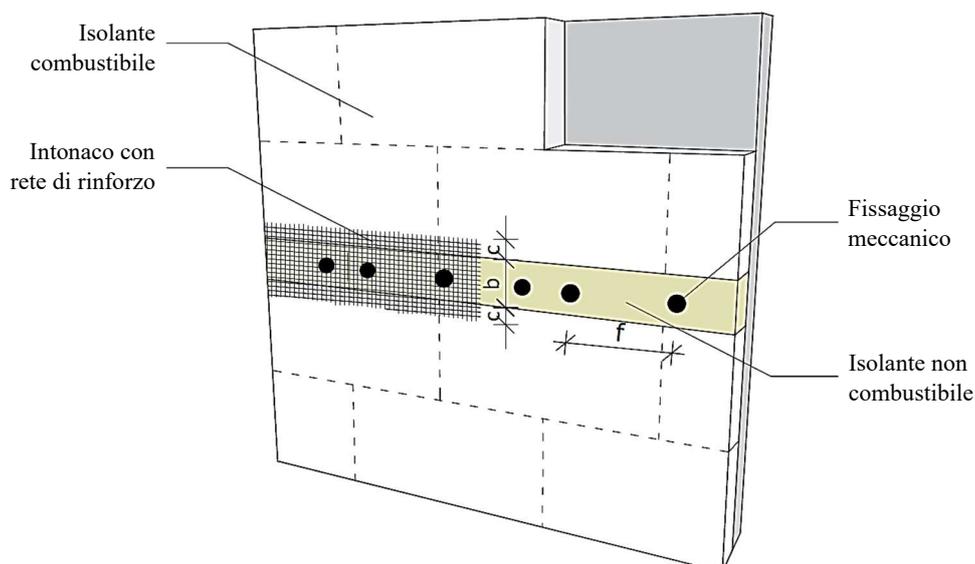


Figura 26 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio

Un altro aspetto importante riguarda le scale di evacuazione: nel caso in cui fossero presenti scale di evacuazione esterne infatti, è necessario installare un

isolamento non combustibile la cui estensione in larghezza sia superiore a 3 metri da ogni lato del bordo della scala antincendio, in questo modo se l'incendio è diffuso nel compartimento in cui è situata l'uscita di emergenza, non sarà in grado di diffondersi in facciata nel momento in cui viene aperta l'uscita.

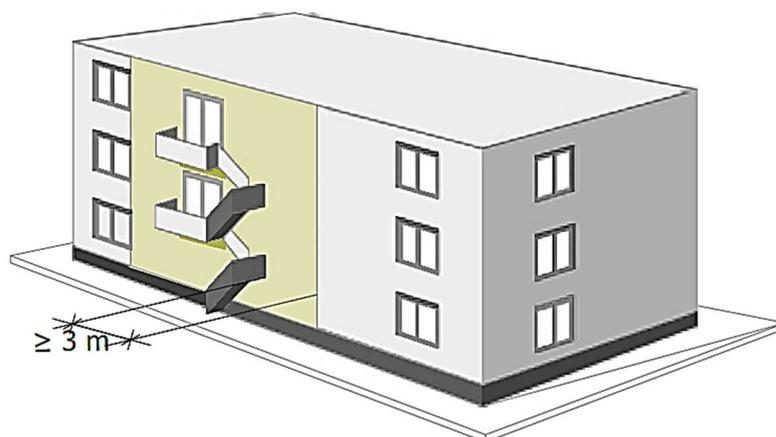


Figura 27 - Esempio di misure atte a prevenire la diffusione in facciata dell'incendio

Sulla base di queste considerazioni, il lavoro di tesi è proseguito passando alla fase di modellazione, prendendo in esame una tipologia tra quelle enunciate a cui sono state applicate le misure previste dalla Guida.

Si vuole precisare che la scelta di analizzare una delle tipologie di facciate precedentemente descritte, in particolare la facciata semplice con sistema di cappotto esterno in poliuretano espanso, è stata presa dopo aver effettuato una serie di considerazioni.

In primo luogo, la facciata semplice con sistema di cappotto esterno è, insieme alla facciata a doppia parete ventilata, la tipologia più diffusa per gli edifici civili. Inoltre, visto l'elevato numero di cantieri di ristrutturazione delle facciate, in cui l'intervento principale è l'applicazione del cappotto esterno, è importante capire come una non corretta progettazione delle misure antincendio, spesso trascurate in caso di ristrutturazione, possa provocare danni ben più ingenti.

Inoltre, sono state riscontrate diverse criticità nella fase di modellazione e analisi effettuate per mezzo del modello fluidodinamico FDS sviluppato dalla NIST, attraverso l'interfaccia grafica di Pyrosim, come precisato in seguito al paragrafo 2.1. In particolare, nel caso di facciata con uno strato d'aria, indipendentemente dal fatto che sia ventilata o non ventilata, tale strato non può essere inserito all'interno della stratigrafia come materiale. Un'ulteriore possibilità sarebbe quella di modellare separatamente la muratura portante e lo strato esterno di rivestimento, così da essere automaticamente separati da uno strato d'aria: in questo caso si presentano problemi di interazione e trasmissione del calore tra i vari elementi presenti, oltre che una difficile previsione ed approssimazione dei fenomeni che possono verificarsi a causa dell'intercapedine presente.

CAPITOLO 2 - Modellazione

2.1 Fase preliminare: concetti base e curva RHR

La sicurezza in caso di incendio è legata a molte variabili e deve essere valutata, indagata e risolta caso per caso attraverso un'analisi FSE (Fire Safety Engineering) specifica, che tenga conto, oltre che della quantità e della tipologia dei materiali combustibili coinvolti e l'energia termica che possono rilasciare, di diversi aspetti:

- distribuzione spaziale dei materiali combustibili;
- sviluppo e diffusione del fuoco sulle facciate;
- HRR (Heat Release Rate);
- distribuzione della temperatura;
- composizione, movimento e diffusione del fumo;
- ventilazione;
- visibilità;

Tutto questo per determinare le soluzioni di costruzione e protezione più appropriate ed efficaci.

Il presente elaborato è stato redatto con l'obiettivo di analizzare, attraverso un'analisi FSE, il comportamento in caso di incendio di alcune configurazioni di facciata semplice con sistema di cappotto esterno, le quali si differenziano a seconda delle misure adottate per limitare la propagazione dell'incendio.

La Fire Safety Engineering ha come principio base quello di definire soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo: nel momento in cui il professionista antincendio decide di adottare questa strada, può scegliere il modello di calcolo più appropriato tra quelli disponibili a seconda delle caratteristiche del caso analizzato e delle grandezze ricercate. Poiché il caso oggetto di studio richiede un'analisi più complessa con

interazioni dipendenti dal tempo, si è deciso di adoperare modelli numerici, i quali sono basati sui principi della chimica e della fisica dell'incendio.

Le due tipologie principali di modelli numerici sono:

- *Modelli a zone*, usati nel caso di geometrie semplici, che va a simulare la dinamica di un incendio in un ambiente confinato, risolvendo le equazioni di conservazione di massa ed energia relativamente ad un numero basso di zone macroscopiche (generalmente si tratta di due zone omogenee).

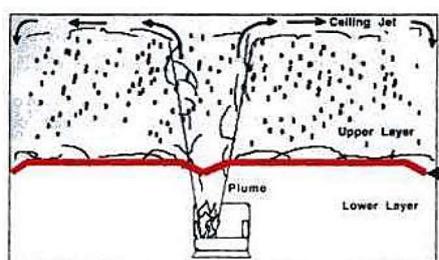


Figura 28 - Modello a zone

- *Modelli di campo*, usati nel caso di geometrie complesse in quanto rappresentano l'ambiente nel modo più adeguato alla necessità. Essi stimano l'incendio per via numerica, dividendo lo spazio in un numero elevato di celle, risolvendo le equazioni di conservazione di massa, energia etc. all'interno di ciascuna di esse.

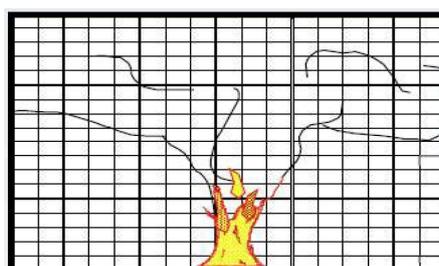


Figura 29 - Modello di campo

Per le analisi che sono state effettuate si è fatto riferimento ai modelli di campo e si è scelto di utilizzare il modello fluidodinamico FDS sviluppato dalla NIST, versione 6.7.5, per mezzo dell'interfaccia grafica di Pyrosim, versione 2021.1.0224.

Prima di procedere con la modellazione del fabbricato in Pyrosim 2021 è necessario innanzitutto stimare la curva RHR che caratterizza il possibile incendio che potrebbe svilupparsi in un ambiente di un edificio a grande altezza con affaccio verso l'esterno. La curva RHR infatti esprime l'andamento temporale della potenza termica rilasciata dall'incendio, fornendo una schematizzazione matematica dell'incendio naturale in modo da distinguere le diverse condizioni fisiche prevedibili

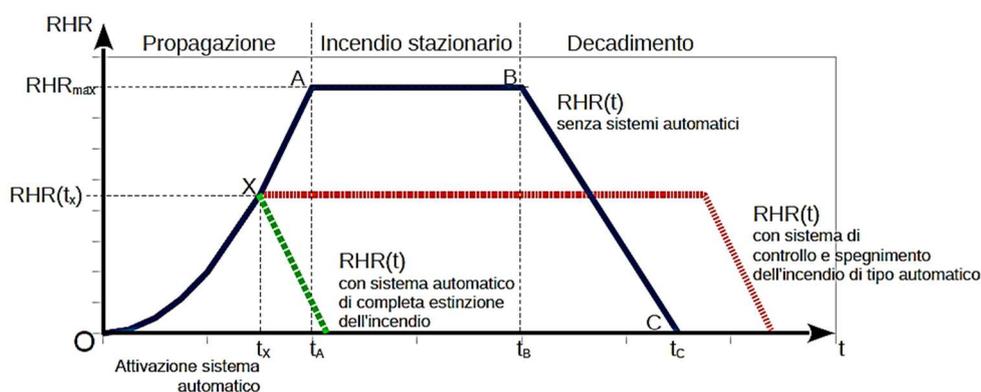


Figura 30 - Curva RHR

Come è possibile notare dall'immagine precedente, la curva RHR si compone di tre fasi distinte:

- *fase di crescita parabolica*: rappresenta la fase di propagazione dell'incendio; la pendenza di questo ramo può variare ed esprime la velocità di propagazione dell'incendio, che può essere ultra rapida, rapida, media e lenta.
- *fase intermedia stazionaria*: rappresenta la fase di stazionarietà dell'incendio, in cui il fuoco ha raggiunto la sua massima potenza rilasciata e che si sviluppa fino a quando non inizia ad esaurirsi il materiale combustibile presente.
- *fase finale lineare*: rappresenta la fase di spegnimento dell'incendio, dovuto al progressivo esaurimento del combustibile che determina la riduzione dell'emissione termica da parte dell'incendio.

Per poter stimare la curva RHR che meglio rappresenta l'incendio che potrebbe innescarsi all'interno di un compartimento di un edificio a grande altezza, bisogna come prima cosa andare a determinare il carico d'incendio, così definito al punto 1 lettera c) del DM 09/03/2007: *potenziale termico netto, espresso in MJ (convenzionalmente 1 MJ e assunto pari a 0,057 kg di legna equivalente), della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretto in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali.* All'interno del Codice di Prevenzione Incendi, precisamente al capitolo S.2.9, è spiegato come determinare il carico d'incendio e quali sono i parametri indicativi della partecipazione alla combustione, ossia:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f \quad [\text{MJ/m}^2]$$

- δ_{q1} : fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione alla dimensione della compartimentazione antincendio, i cui valori sono definiti da una tabella.
- δ_{q2} : il fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento antifuoco, i cui valori sono definiti anch'essi da una tabella.
- δ_n : fattore che tiene conto delle differenti misure di protezione del compartimento, i cui valori sono definiti da una tabella⁶.
- q_f : valore nominale del carico d'incendio specifico, da determinarsi secondo la formula:

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \psi_i}{A} \quad [\text{MJ/m}^2]$$

- g_i : massa dell'i-esimo materiale combustibile [kg];
- H_i : potere calorifico inferiore dell'i-esimo materiale combustibile [MJ/kg];

⁶ Le tabelle dei diversi fattori di partecipazione sono riportate in appendice, allegato 1, allegato 2 e allegato 3.

- m_i : fattore di partecipazione alla combustione dell' i -esimo materiale combustibile pari a 0,80 per il legno e altri materiali di natura cellulosa e 1,00 per tutti gli altri materiali combustibili;
- ψ_i : fattore di limitazione della partecipazione alla combustione dell' i -esimo materiale combustibile pari a 0 per i materiali contenuti in contenitori appositamente progettati per resistere al fuoco; 0,85 per i materiali contenuti in contenitori non combustibili e non appositamente progettati per resistere al fuoco; 1 in tutti gli altri casi;
- A: superficie in pianta lorda del compartimento [m²].

È stato calcolato un carico d'incendio medio in modo tale da tener conto dell'ambiente in cui l'incendio si sviluppa: è possibile infatti, a seconda della disposizione in pianta di un appartamento, che l'incendio possa innescarsi in una camera da letto piuttosto che in un soggiorno. Per questo motivo, poiché cambiando stanza cambiano i materiali e gli elementi presenti e di conseguenza il carico d'incendio, sono stati presi di riferimento tre diversi ambienti: una camera da letto, una cucina e un soggiorno, così da determinare un carico d'incendio medio rappresentativo di ogni possibile ambiente.

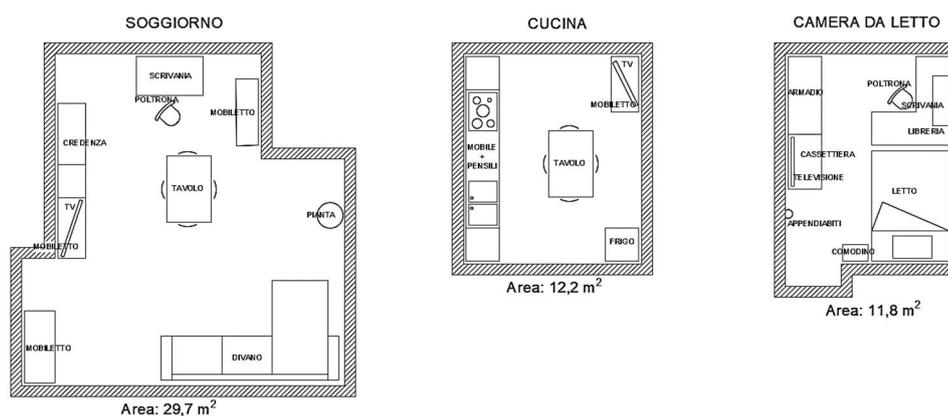


Figura 31 - Schematizzazione delle stanze considerate

Per il calcolo del carico d'incendio è stato utilizzato Namirial Suite 2.0, un programma che consente di stimare il carico d'incendio andando a selezionare da un elenco i vari elementi presenti in ambiente e assegnando loro la quantità

ipotizzata (ad ogni elemento è associato il proprio potere calorifico), nonché i diversi fattori di partecipazione da considerare.

Compartimento: Camera da letto				
#	Descrizione	Pot. Calorifico	Quantità	$m_1 \cdot \Psi_1$
1	Abiti	16.74 MJ/Kg	20	1.00
2	Abiti su stampelle	570 MJ/m	1	1.00
3	Biancheria	5400 MJ/m ²	0.05	1.00
4	(*) Armadio a 2 ante vuoto	1335.25 MJ/Pz	1	1.00
5	(*) Comodino Da Notte (+ cont.)	167.40 MJ/cad.	1	1.00
6	(*) Computer	167.40 MJ/Pz	1	1.00
7	(*) Lampada 18 W	50 MJ/pz	3	1.00
8	Cappelli e guanti	17 MJ/kg	0.01	1.00

Figura 32 - Interfaccia del software Namirial Suite 2.0

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, rispettivamente per camera da letto, cucina e soggiorno:

	Camera	Cucina	Soggiorno
Area del compartimento	11,8 m ²	12,2 m ²	29,7 m ²
Valore nominale del carico d'incendio	8346,4 MJ	4902,5 MJ	9623,1 MJ
Normalizzazione del carico d'incendio	707,3 MJ/m ²	401,8 MJ/m ²	323,7 MJ/m ²
Carico d'incendio specifico di progetto	565,9 MJ/m ²	321,5 MJ/m ²	258,9 MJ/m ²

Tabella C - Risultati ottenuti

In seguito è stato ricavato il carico d'incendio medio pari a 382,1 MJ/m², valore utilizzato per definire la curva RHR da inserire all'interno di Pyrosim per poter effettuare la simulazione dell'incendio.

Per riuscire a determinare la curva RHR sono stati seguiti i passaggi riportati nel capitolo M, paragrafo 2.6 del *Codice di Prevenzione Incendi*: bisogna come prima cosa precisare che il caso analizzato, dopo aver effettuato le opportune verifiche, risulta essere un incendio controllato dal combustibile e non dalla superficie di ventilazione, questo vuol dire che la dimensione dell'apertura è sufficientemente grande da garantire un'adeguata quantità d'aria e dunque di ossigeno che affluisce al locale.

Poiché nell'ambiente considerato non sono previsti impianti di controllo o estinzione automatica dell'incendio, si suppone che dal tempo t_A fino a t_B (in seguito viene precisato cosa identificano questi valori) la potenza termica prodotta dall'incendio si stabilizzi al valore massimo RHR_{max} . Inoltre, essendo l'incendio controllato dal combustibile, il valore di RHR_{max} può essere ricavato applicando la seguente espressione:

$$RHR_{max}=RHR_f A_f$$

- RHR_f : valore della potenza termica massima rilasciata per unità di superficie lorda. Per alcune attività, tale valore può essere desunto dai prospetti dell'appendice E.4 dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2. [kW/m²]
- A_f : superficie lorda del compartimento in caso di distribuzione uniforme del carico d'incendio, oppure superficie lorda effettivamente occupata dal combustibile oppure area operativa di sistemi automatici di controllo dell'incendio. [m²]

Nel caso oggetto di studio il valore di RHR_f è stato ricavato dai prospetti dell'appendice E.4 dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2, in quanto l'ambiente che è stato considerato per le analisi è assimilabile alla destinazione d'uso di alloggio.

Velocità di crescita dell'incendio e RHR_f per differenti destinazioni d'uso

Velocità massima di rilascio di calore RHR_f			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_α [s]	RHR_f [kW/m ²]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Tabella D - Valori RHR_f per destinazioni d'uso comuni

Noto il valore di RHR_{\max} , il tempo t_A di inizio della fase di incendio stazionario si calcola con la seguente espressione:

$$t_A = \sqrt{RHR_{\max} \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$

La fase di incendio stazionario termina al tempo t_B , tempo di inizio della fase di decadimento, in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile $q_f \cdot A_f$ è stata rilasciata nel compartimento antincendio. È necessario valutare se l'energia termica inizialmente disponibile è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione e raggiunga la potenza massima RHR_{\max} : questo accade se è verificata la seguente disuguaglianza:

$$70\%q_f A_f \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3$$

Se l'energia termica inizialmente disponibile non è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione, la curva RHR raggiunge il valore massimo per qualche secondo poi passa direttamente alla fase di decadimento.

Nel caso oggetto di studio la disuguaglianza risulta verificata, dunque il tempo t_B di fine della fase di incendio stazionario si calcola con la seguente espressione:

$$t_B = t_A + \frac{70\%q_f A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{RHR_{\max}}$$

Il tempo t_C , trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento è consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile:

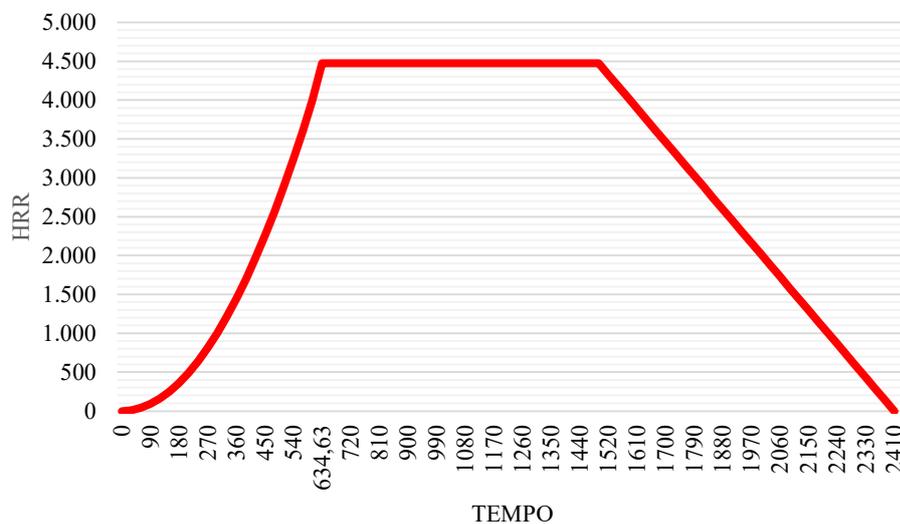
$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\%q_f A_f}{RHR_{\max}}$$

Durante la fase di decadimento l'andamento della potenza prodotta dall'incendio è lineare, è dunque possibile ricavare l'andamento utilizzando la seguente relazione:

$$RHR(t) = RHR_{\max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B}$$

Applicando le formule precedentemente descritte sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- RHR_f : potenza termica rilasciata per unità di superficie 250 kW/m²
- A_f : superficie lorda del compartimento 17,9 m²
- RHR_{\max} : potenza termica massima 4475 kW
- t_A : tempo di inizio della fase di incendio stazionario 634,6 s
- t_B : tempo di fine della fase di incendio stazionario 1493 s
- t_C : tempo di annullamento della potenza termica rilasciata 2410 s
- curva RHR:

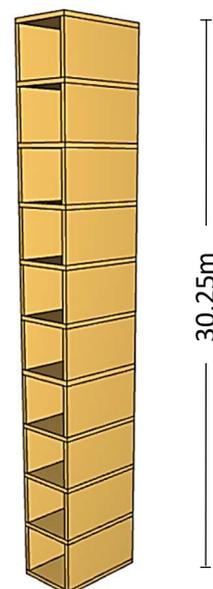


I valori puntuali della curva ottenuta sono stati inseriti all'interno di Pyrosim in modo tale da caratterizzare l'elemento bruciatore, ovvero la superficie che definisce l'andamento dell'incendio nel tempo in termini non solo di potenza termica emessa ma anche di quantità di fumo prodotta.

2.2 Fase progettuale: modellazione in Pyrosim

Al fine di analizzare l'evoluzione dell'incendio in diverse facciate di edifici a grande altezza è stato utilizzato il software Pyrosim2021, programma che permette di creare un modello semplificato attraverso cui simulare l'andamento delle grandezze desiderate. Di seguito è riportata una descrizione degli aspetti principali caratterizzanti la modellazione, con un maggior dettaglio per quelli più rilevanti al fine dello studio dell'andamento in facciata dell'incendio.

Come prima cosa è importante precisare che non è stato modellato un intero edificio, bensì è stato creato un modello semplificato composto da un unico ambiente di area pari a 17,9 m² (lo stesso valore utilizzato per la stima della curva HRR) ripetuto per dieci piani. Questo ambiente è caratterizzato da pavimento, soffitto e setti (ad eccezione della facciata) posti come, ovvero elementi la cui temperatura rimane fissa a temperatura ambiente, così da semplificare l'analisi per poter porre l'attenzione e un maggior dettaglio alla facciata.



Successivamente è stata aggiunta la facciata, andando ad utilizzare la tipologia *layered*, ovvero superfici stratificate composte da una o più definizioni di materiali, i quali possono includere sostanze solide e liquide come il cemento, il legno o l'etanolo. Questo tipo di superficie è ideale per i muri e altri oggetti che sono composti da materiali del mondo reale, per questo motivo è stata scelta così da approssimare al meglio la realtà. Le superfici *layered* hanno diversi gruppi di opzioni per poter caratterizzare e descrivere al meglio le proprietà e il comportamento in caso di incendio, a partire dal *Material layers*, che contiene la definizione degli strati che compongono la stratigrafia. In particolare, questo gruppo di proprietà contiene una serie di opzioni tra cui quella per definire lo spessore del materiale, o la composizione del materiale, in quanto all'interno di

un livello (riga), è possibile specificare più materiali basati sulla frazione di massa. Per esempio, per specificare uno strato che è solo mattoni, basta digitare 1.0 BRICK (assumendo che sia stato creato un materiale chiamato BRICK) mentre per specificare uno strato di mattoni bagnati, è possibile inserire 0.95 BRICK; 0.05 WATER.

Un secondo gruppo di opzioni è il *Surface Props*, che permette di precisare una serie di proprietà tra cui la temperatura interna iniziale o il backing della superficie, ovvero la condizione limite dietro la superficie. Esistono tre differenti condizioni: *air gap*, quella predefinita che rappresenta un'intercapedine d'aria; *exposed*, che permette alla superficie di trasferire il calore nello spazio retrostante il muro e *insulated*, che impedisce qualsiasi perdita di calore dal retro del materiale.

Infine troviamo la sezione di *Reaction*, ovvero la reazione al fuoco della superficie che può essere presa dalle specifiche del materiale, selezionando l'opzione *governed by material*, o data specificando manualmente i parametri ottenendo così una superficie simile ad un bruciatore, con la possibilità di modificare questo comportamento utilizzando le opzioni di reazione, come il valore di HRR di picco e l'andamento della curva, la temperatura di ignizione e la possibilità di rimuovere dalla simulazione gli elementi che hanno consumato il materiale disponibile alla combustione.

Una seconda tipologia di superficie da inserire all'interno del modello è quella di tipo *burner*, per poter definire il bruciatore da porre all'interno dell'ambiente così da simulare un incendio domestico. Una volta aperta l'apposita scheda, i parametri principali da inserire sono contenuti nel gruppo di opzioni *Heat Realise*, e sono i seguenti:

- L'HRR per unità di superficie del bruciatore (in alternativa è possibile specificare il Mass Loss Rate, ovvero il tasso di perdita di massa per unità di superficie del bruciatore)

- L'andamento della curva, con la possibilità di scegliere tra diverse opzioni, tra cui quella di default in cui si ha un andamento crescente lineare, o t^2 dunque andamento esponenziale o personalizzato, andando ad inserire la frazione del valore di picco di HRR raggiunta in funzione del tempo
- Coefficiente di estinzione, nel caso di estinzione dell'incendio con l'acqua (ad esempio nel caso in cui siano presenti impianti di estinzione automatici)

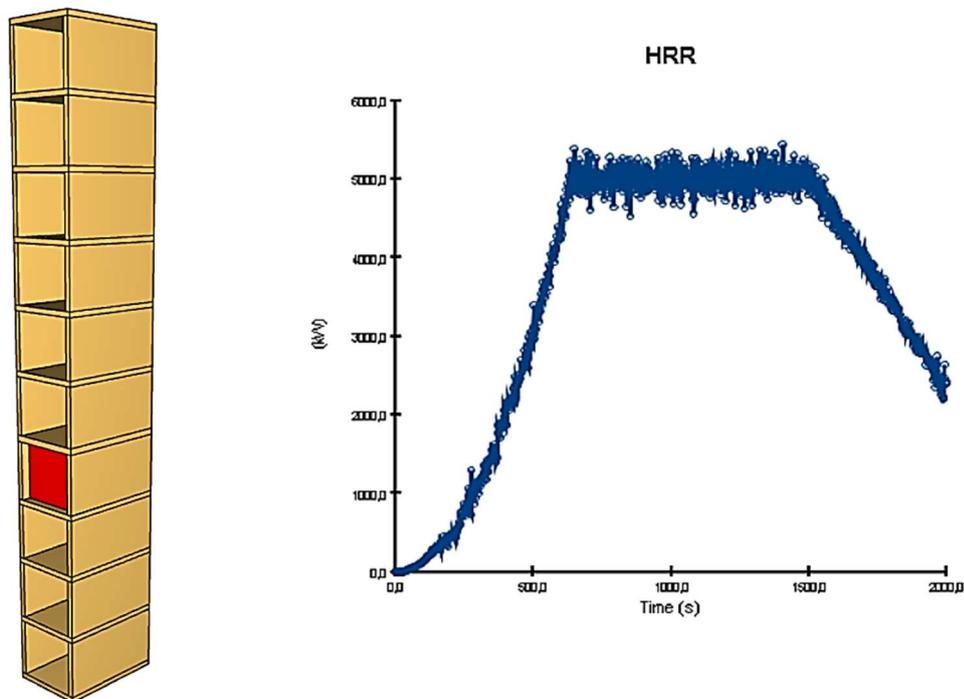


Figura 33 - Posizione bruciatore e curva HRR

Prima di poter comporre la stratigrafia che verrà assegnata agli elementi che compongono la facciata, è necessario dunque definire i materiali che la compongono. Dall'apposita scheda *Materials* è possibile aggiungere un materiale dalla libreria interna di Pyrosim o in alternativa è possibile creane uno attribuendo una serie di proprietà. Per poterlo fare bisogna aprire la scheda di

modifica e selezionare il gruppo di opzioni *Thermal Properties*, in cui è possibile assegnare i seguenti parametri:

- La densità.
- Il calore specifico che può essere impostato costante o può essere definito un andamento personalizzato in funzione della temperatura.
- La conducibilità termica, anch'essa può essere costante o avere un andamento personalizzato in funzione della temperatura.
- L'emissività.
- Il coefficiente di assorbimento.

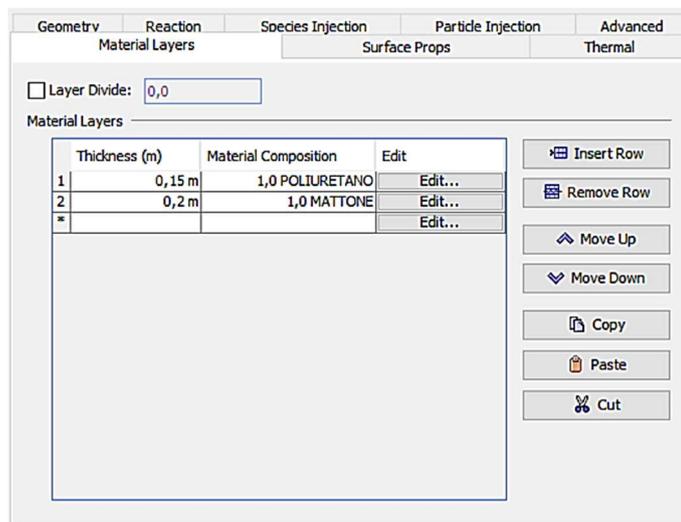
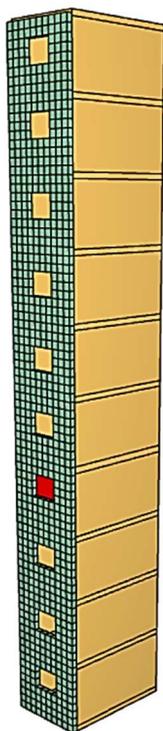


Figura 34 - Modellazione della facciata

Dopo aver modellato la facciata, è necessario aggiungere le aperture: per poter ricreare un modello il più possibile fedele alla realtà basta ricreare il materiale vetro il quale, al verificarsi di determinate condizioni e con l'applicazione degli appositi device, viene rimosso in modo tale da simulare la rottura dell'infixo.

Dopo aver creato il materiale vetro come spiegato in precedenza, bisogna collocare gli elementi con la superficie vetro in facciata e successivamente impostare i sensori e i controlli necessari. In particolare, per le modellazioni proposte in questo elaborato, si è scelto di utilizzare il *Solid Phase Device*, un device che permette di misurare diverse grandezze, in questo caso utilizzato per misurare la temperatura superficiale dell'elemento in vetro. Successivamente occorre definire le aperture: dopo aver collocato gli elementi *hole* in corrispondenza degli infissi, è possibile attribuire loro i controlli che andranno a regolamentare l'attivazione o meno dell'apertura. I controlli possono essere di diverso tipo, e si distinguono gli uni dagli altri a seconda del tipo di input e dell'azione che devono eseguire, ovvero attivazione e disattivazione. Una volta scelti i parametri del controllo è possibile associare un controllo diverso per ogni apertura predisposta, come avvenuto in questo caso, in quanto è stato creato un controllo personalizzato per ogni apertura: ogni controllo attiva l'apertura di riferimento quando il sensore a cui è associato rileva una temperatura di 280°C, ovvero la massima temperatura di servizio del vetro.

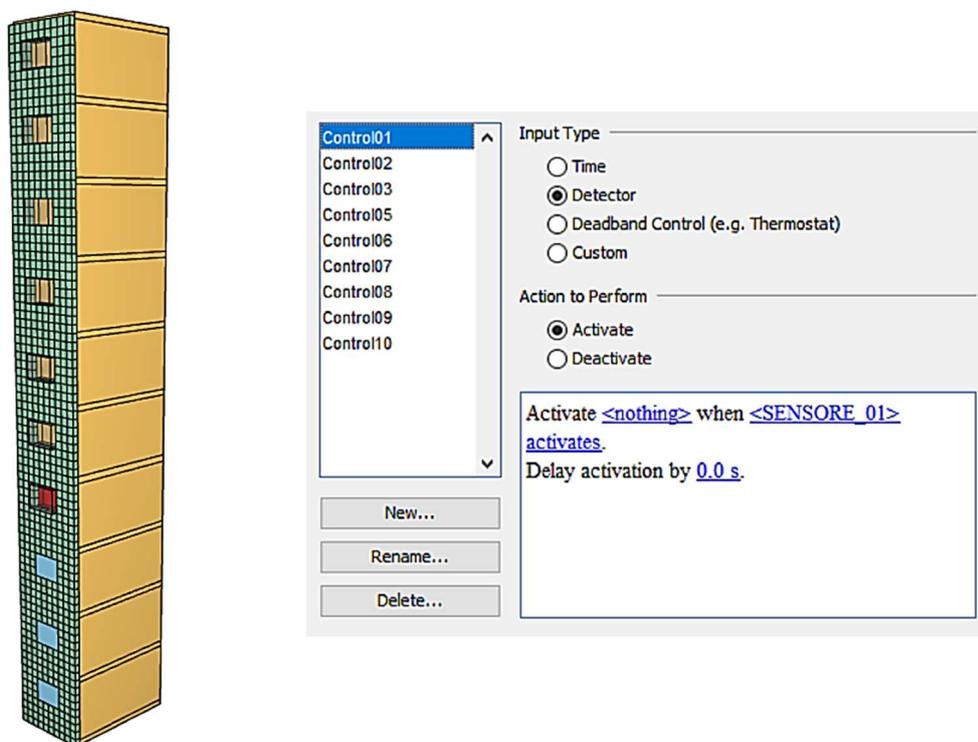


Figura 35 - Modellazione aperture e controlli

Infine, per poter lanciare l'analisi occorre realizzare la mesh, in quanto tutti i calcoli FDS sono eseguiti all'interno di mesh di calcolo. Poiché l'analisi si concentra sulla facciata, la mesh è stata splittata con l'apposito comando in modo tale da avere un livello di dettaglio maggiore per la facciata e allo stesso tempo non appesantire troppo l'analisi così da non incorrere inutilmente in tempi eccessivamente lunghi. Per quanto riguarda la dimensione delle celle della mesh, per ottenere una precisione di simulazione ottimale, è importante utilizzare celle di maglia che sono approssimativamente della stessa dimensione in tutte e tre le direzioni; la cosa importante è che una volta splittate le due mesh risultino comunque allineate. In seguito verranno precisate le varie dimensioni scelte delle celle e il perché delle scelte effettuate.

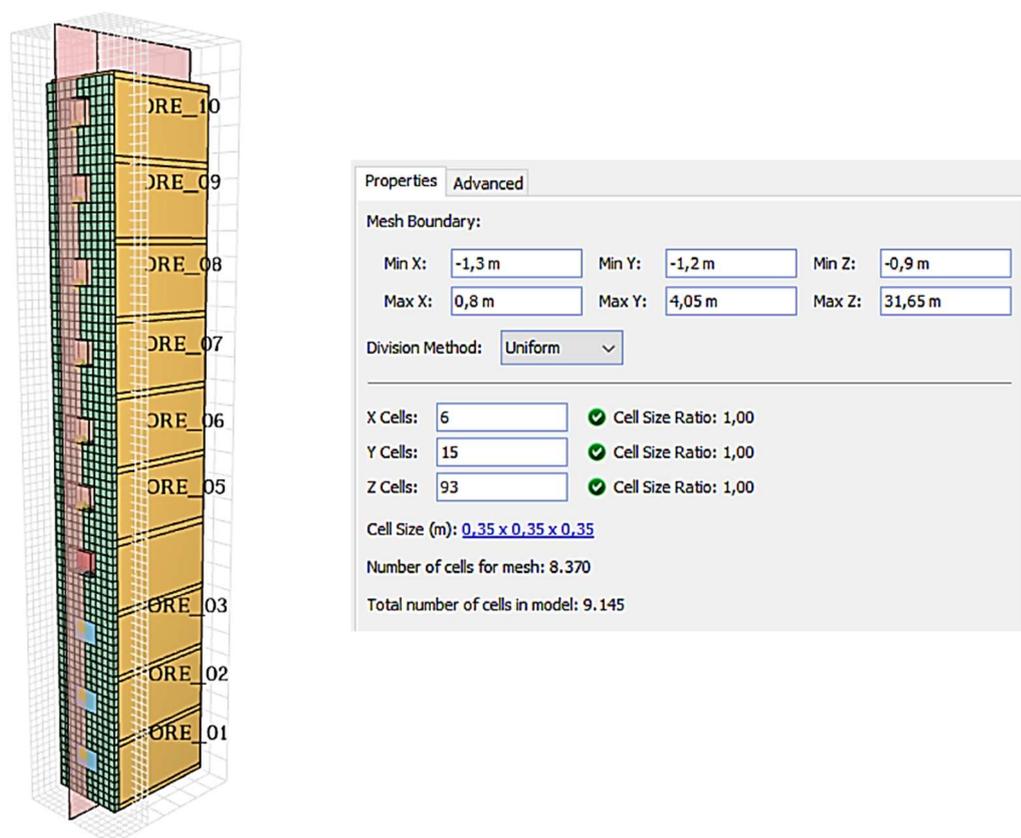


Figura 36 - Modellazione mesh

Come precedentemente anticipato, nel presente elaborato viene analizzato il comportamento in caso di incendio di due tipologie di facciata: una facciata semplice e una facciata ventilata non ispezionabile.

2.2.1 Facciata semplice

Per quanto riguarda la facciata semplice si è fatto riferimento ad un sistema di facciate tipo, con blocchi di laterizio e sistema di cappotto esterno.

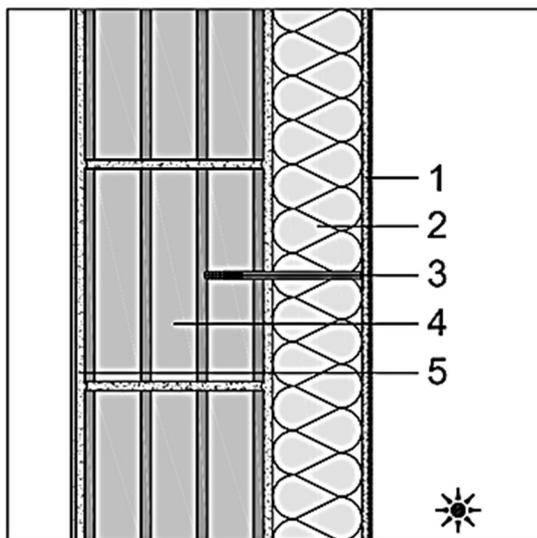


Figura 37 - Stratigrafia del sistema di facciata di riferimento

In un primo momento la facciata all'interno di Pyrosim è stata impostata come segue, dall'interno all'esterno:

- 0,015m di intonaco base gesso.
- 0,20m di laterizio asciutto (composizione impostata come 100% laterizio).
- 0,15m di isolante esterno in poliuretano espanso.
- 0,015m di rivestimento esterno in intonaco

Per diversi motivi però, l'analisi è stata condotta sulla base di una stratigrafia semplificata, composta dai soli strati di laterizio e di isolante. Per quanto riguarda il laterizio, le proprietà del materiale sono state ricavate prendendo in considerazione i blocchi tipo POROTON P600, avente le seguenti caratteristiche:

- Densità: 650 kg/m³
- Calore specifico: 1,0 kJ/(kg K)
- Conducibilità termica: 0,15 W/(m K)
- Emissività: 0,9
- Coefficiente di assorbimento: 50.000 1/m

Per quanto riguarda l'isolante, le proprietà del materiale sono state ricavate prendendo in considerazione i pannelli in poliuretano espanso disponibili in commercio, aventi le seguenti caratteristiche:

- Densità: 45,0 kg/m³
- Calore specifico: 1,5 kJ/(kg K)
- Conducibilità termica: 0,026 W/(m K)
- Emissività: 0,9
- Coefficiente di assorbimento: 50.000 1/m

I motivi principali della semplificazione della stratigrafia sono due: la visualizzazione dei risultati e il livello di dettaglio dei calcoli FDS.

Per quanto riguarda la visualizzazione dei risultati, il problema è dato dall'alluminio dalla finitura, in quanto non permette di visualizzare il comportamento dell'isolante sottostante. Per valutare l'andamento della temperatura sulla superficie della facciata, è bastato selezionare la visualizzazione della *wall temperature* tra le condizioni al contorno di output.

Per poter comprendere il secondo problema bisogna prima precisare che alla stratigrafia che compone la facciata è stato assegnato l'attributo *backing* di tipo '*exposed*', in modo che il programma calcoli la conduzione del calore attraverso l'intero spessore e utilizza la temperatura della fase gassosa e il flusso di calore sui lati anteriore e posteriore per le condizioni al contorno. Questo attributo è possibile selezionarlo solo nel caso in cui lo spessore totale della stratigrafia non sia superiore alla dimensione della cella della mesh: per questo motivo per trovare un giusto compromesso tra il livello di dettaglio dei calcoli e quello della

stratigrafia si è deciso di rimuovere l'intonaco (così da andare ad alleggerire la mole di dati e di conseguenza i tempi di calcolo).

Come precedentemente anticipato, la mesh è stata splittata in due, impostando le celle nei pressi della facciata di spessori pari alla stratigrafia, ovvero 0,35m x 0,35m, collocandola in modo tale che mesh e stratigrafia risultassero allineate, mentre la parte retrostante presenta una mesh di 1,05m x 1,05m, in modo tale che le due mesh risultassero allineate. Inoltre un ulteriore accorgimento preso nei confronti della mesh è l'aver aperto i suoi confini, operazione effettuata con l'apposito comando *Open Mesh Boundaries*, in modo tale da non confinare i prodotti della combustione all'interno della mesh.

Infine, l'analisi è stata effettuata impostando entrambi i tipi di reazione per la facciata, ovvero quello governato dal materiale e quello governato manualmente. Per quanto riguarda il primo, è sufficiente selezionare *governed by material* nell'apposito gruppo di opzioni in quanto le proprietà ai materiali risultano già applicate. Per poter utilizzare l'opzione manuale è invece necessario selezionare una serie di parametri: il rilascio di calore, dunque la curva HRR e la temperatura di ignizione. Per ottenere dei risultati il più possibile fedeli alla realtà, la curva HRR utilizzata è relativa al risultato di un test svedese a larga scala effettuato su diverse tipologie di facciata, tra cui quella con cappotto esterno in poliuretano espanso⁷.

⁷ Babrauskas, V. (1996) Façade fire tests: Towards an international test standard. Fire Technol 32, 219–230.

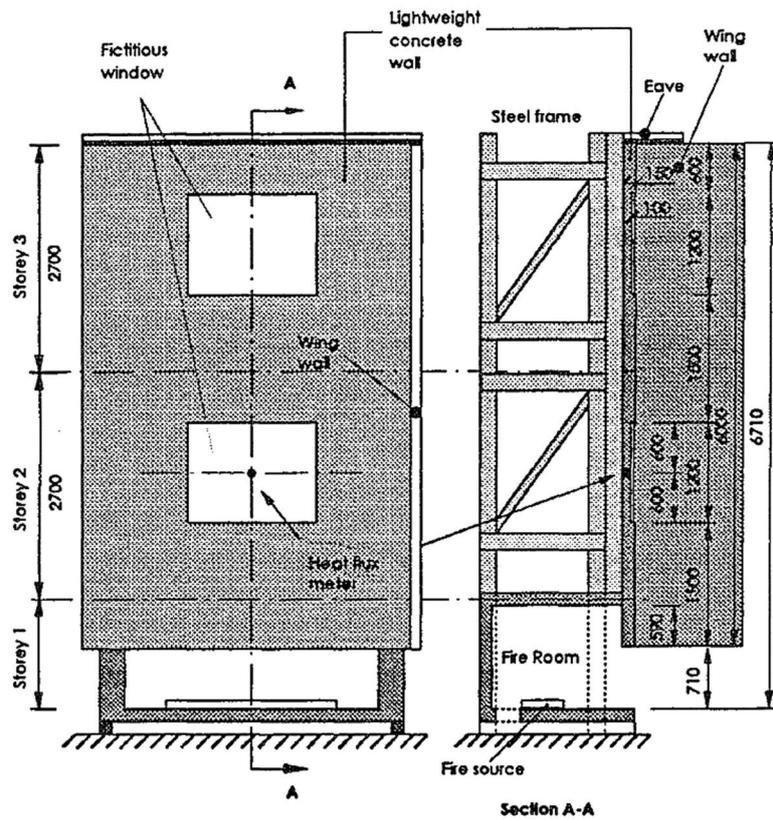


Figura 38 - Facciata oggetto dell'esperimento

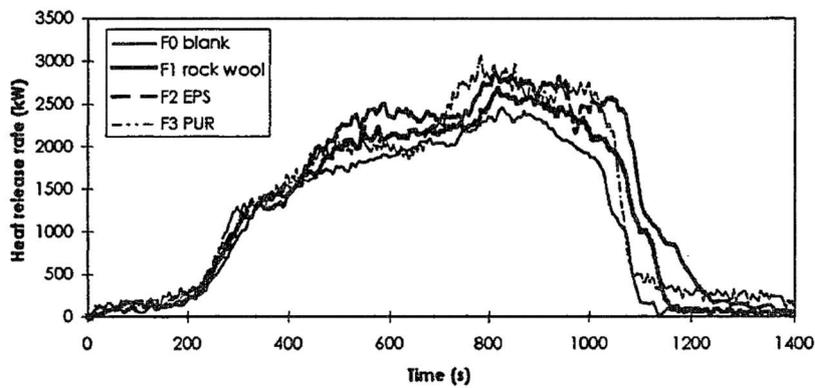


Figura 39 - Curva HRR ottenuta dall'esperimento

L'articolo riporta inoltre il valore di picco dell'HRR, valore utilizzato poi nell'analisi governata manualmente per semplificare la curva utilizzando quel valore come valore costante.

Property	Variable	F1 rock wool	F2 EPS	F3 PUR
Ignition time [s]	t_{ign}	3	248	176
Flameout [s]	$t_{flameout}$	0	578	687
Peak HRR [kW m^{-2}]	$\dot{q}_{p,t}$	13	154	71
Avg HRR, 60 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{60}''	2	43	39
Avg HRR, 180 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{180}''	4	78	52
Avg HRR, 300 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{300}''	6	71	55
Total heat produced [MJ m^{-2}]	THR	4.0	27.9	25
Peak SPR [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	SPR_{max}	*	0.071	0.025
Average SPR [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	SPR_{avg}	*	0.015	0.009

Figura 40 - Valore di riferimento HRR

L'ultimo parametro inserito è stato la temperatura di ignizione, per cui una volta raggiunta quella temperatura gli elementi iniziano a bruciare seguendo l'andamento della curva inserita. Il valore inserito è di 280°C , valore della temperatura di ignizione del poliuretano⁸, ricavato dal SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer.

Material	T_{ig} ($^{\circ}\text{C}$)	k_{pc} ($\text{kW}^2\text{s}/\text{m}^4\text{K}^2$)	Φ (kW^2/m^3)	$T_{s,min}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Φ/k_{pc} (mK^2/s)
PMMA polycast (1.59 mm)	278	0.73	5.4	120	8
Polyurethane (S353M)	280	—	—	105	82
Hardboard (6.35 mm)	298	1.87	4.5	170	2
Carpet (acrylic)	300	0.42	9.9	165	24
Fiberboard, low density (S119M)	330	—	—	90	42
Fiber insulation board	355	0.46	2.2	210	5

Figura 41 - Estratto tabella temperature di ignizione

Infine per entrambe le opzioni è stato abilitato il comando che permette agli elementi di sparire una volta ultimato il materiale combustibile, così da ottenere una migliore comprensione dell'andamento del fenomeno (poiché però la stratigrafia è composta anche da laterizio, prima di poter assistere alla "scomparsa" di questi elementi bisognerebbe prolungare l'analisi, fino a quando anche il laterizio ha ultimato la combustione, il che richiederebbe analisi troppo lunghe e durature, inutili per l'obiettivo di questo elaborato).

⁸ Morgan J. Hurley, (2016) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer, 718

Tutte le impostazioni precedentemente descritte sono state applicate alle diverse configurazioni dei modelli analizzati: poiché la *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili* propone diverse modalità di intervento per limitare la propagazione dell'incendio in facciata. I modelli analizzati sono i seguenti:

- Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata

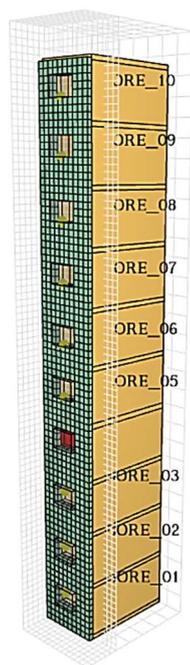


Figura 42 - Facciata priva di misure antincendio

- Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 1, allegato A della *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili*)

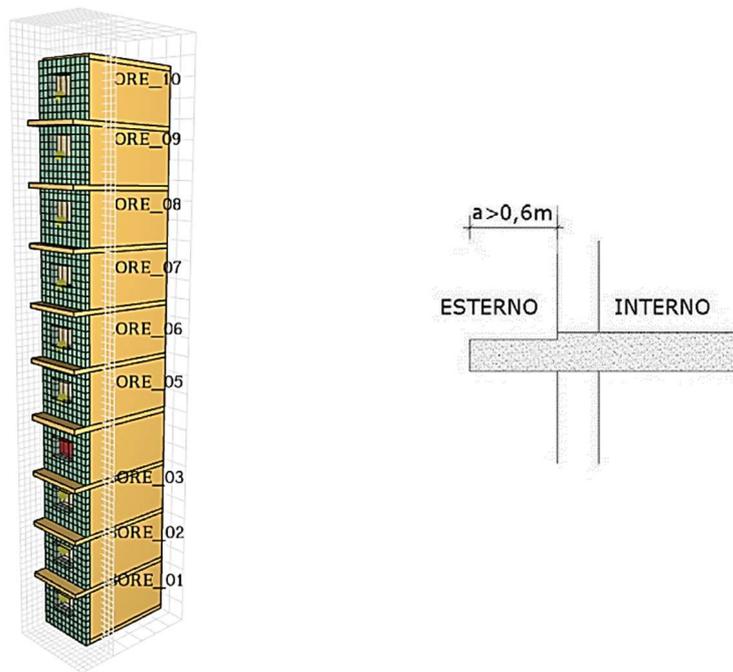


Figura 43 - Facciata con fascia di separazione orizzontale, schema 1

- Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 5, allegato A della Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili)

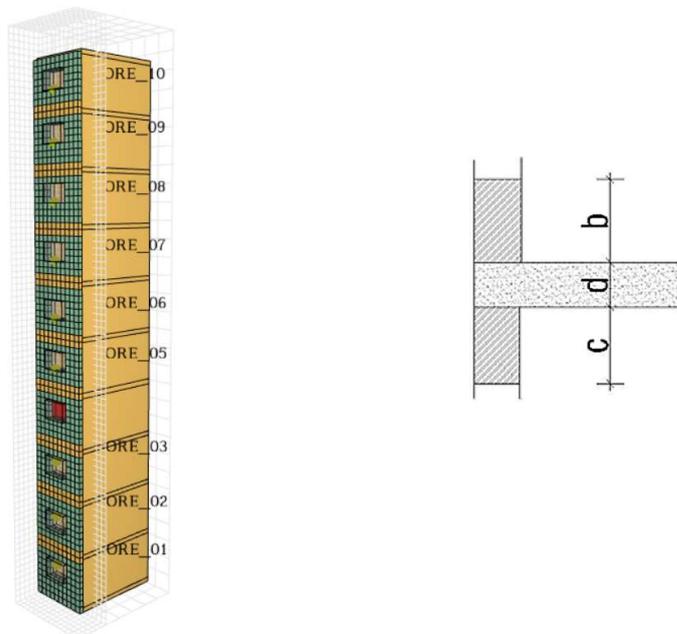


Figura 44 - Facciata con fascia di separazione orizzontale, schema 5

- Soluzione con misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata

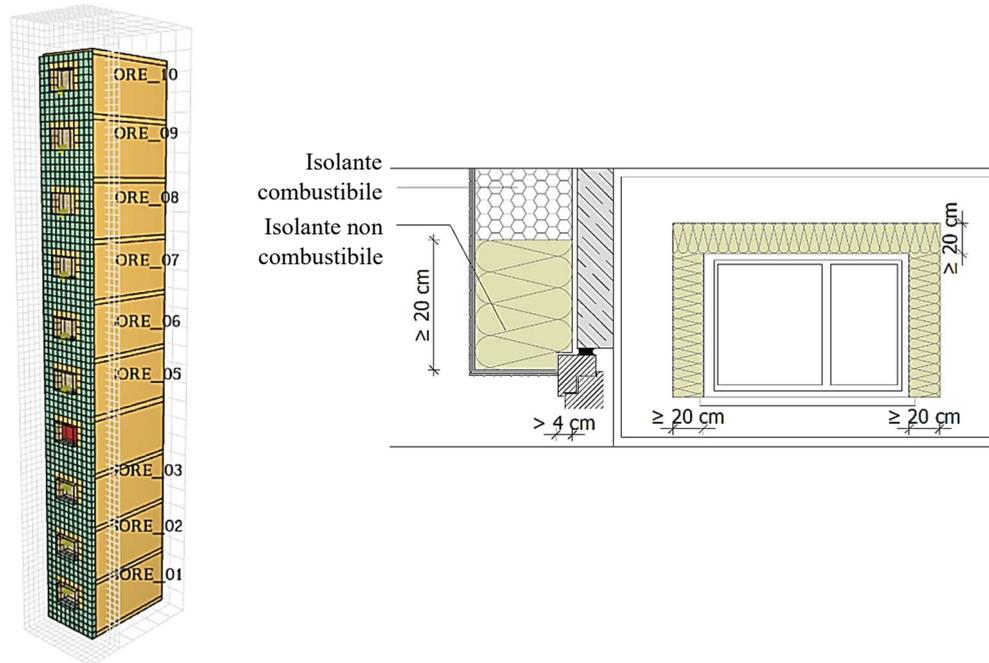


Figura 45 - Facciata con misura di prevenzione contro la diffusione dell'incendio

CAPITOLO 3 - Risultati

3.1 Analisi della temperatura interna

Uno dei parametri principali al fine di analizzare e prevedere l'andamento e la propagazione di un incendio in facciata è la temperatura interna: essa permette infatti di comprendere attraverso quale meccanismo le fiamme riescono a diffondersi.

Nel caso di innesco dell'incendio all'interno dell'ambiente, è possibile che quest'ultimo raggiunga la facciata in due maniere differenti: nel caso di aperture per fuoriuscita delle fiamme oppure per innalzamento della temperatura interna fino ad arrivare al valore della temperatura di ignizione per i materiali più facilmente combustibili.

Al fine di studiare l'andamento della temperatura interna di una facciata semplice è stato realizzato un modello semplificato con l'utilizzo di Pyrosim2021. All'interno del software è possibile utilizzare diversi devices, tra questi è presente il *solid-phase device* che misura la quantità scelta all'interno del solido sul quale viene posto, semplicemente andando a scegliere il punto e la profondità alla quale farlo.

Come prima cosa sono stati modellati il pavimento, il soffitto ed i setti (ad eccezione della facciata) come inerti, ovvero elementi la cui temperatura rimane fissa a temperatura ambiente, così da semplificare l'analisi. Dopodiché è stata aggiunta la facciata andando ad effettuare una semplificazione: il device infatti permette di misurare la temperatura di un elemento composto da un unico materiale. Per questo motivo sono stati analizzati due casi differenti: il primo caso presenta il focolare all'interno dell'ambiente e il materiale principale è il laterizio, in quanto caratterizzante la stratigrafia se analizzata dall'interno all'esterno; il secondo caso presenta il focolare all'esterno dell'ambiente e il materiale principale è l'isolante, in quanto caratterizzante la stratigrafia se analizzata dall'esterno all'interno.

3.1.1 Focolare interno

Di seguito si riporta un'immagine del modello semplificato, da cui è possibile notare la posizione del focolare, posto a 0,5m dalla parete, e il punto in cui è stata effettuata la misurazione, rappresentato dal pallino giallo. Si vuole precisare che per una miglior comprensione del modello il solaio di copertura è stato nascosto nella vista proposta.

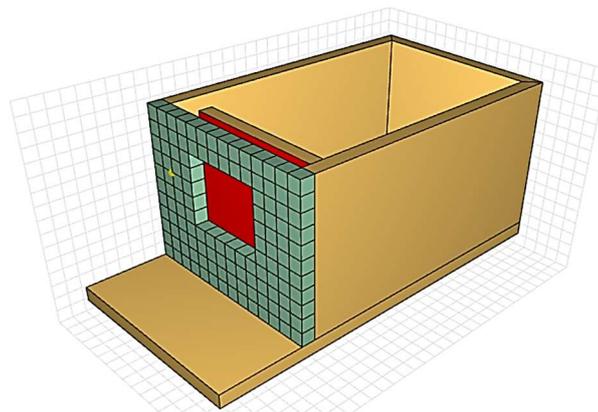


Figura 46 - Modello semplificato con focolare interno

Una volta lanciata ed ultimata l'analisi il programma restituisce una serie di risultati, tra cui un file .xls in cui sono raccolti tutti i dati registrati dai devices utilizzati. Per poter visualizzare l'andamento della temperatura interna è bastato graficare tali dati così da avere una più chiara ed immediata visualizzazione.

Andamento temperatura interna

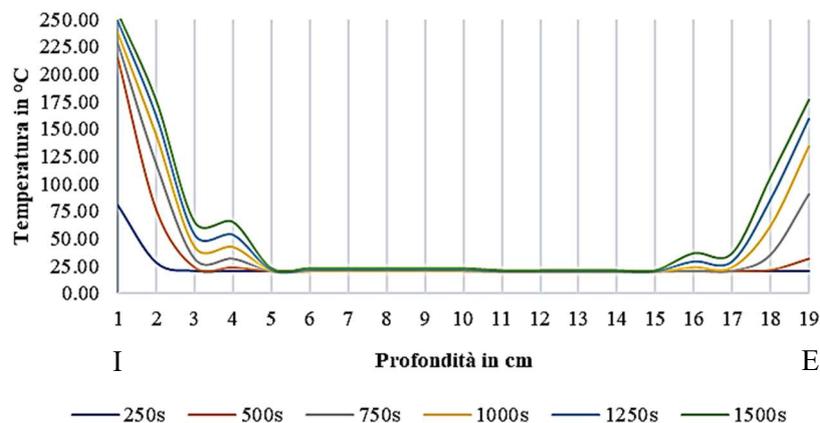


Figura 47 - Andamento temperatura interna con focolare interno

3.1.2 Focolare esterno

Di seguito si riporta un'immagine del modello semplificato, da cui è possibile notare la posizione del focolare, posto a 0,5m dalla parete, e il punto in cui è stata effettuata la misurazione, rappresentato dal pallino giallo. Si vuole precisare che per una miglior comprensione del modello il solaio di copertura è stato nascosto nella vista proposta.

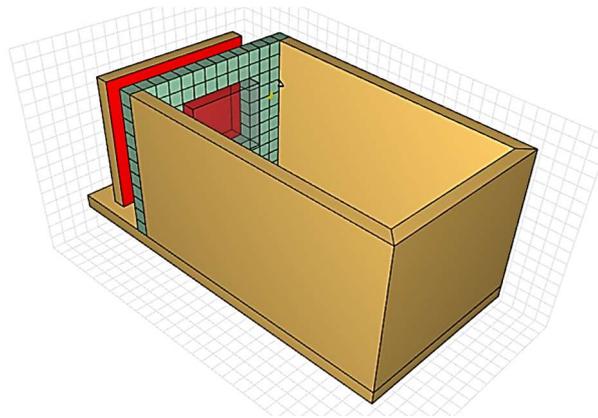


Figura 48 - Modello semplificato con focolare esterno

Una volta lanciata ed ultimata l'analisi il programma restituisce una serie di risultati, tra cui un file .xls in cui sono raccolti tutti i dati registrati dai devices utilizzati. Per poter visualizzare l'andamento della temperatura interna è bastato graficare tali dati così da avere una più chiara ed immediata visualizzazione.

Andamento temperatura interna

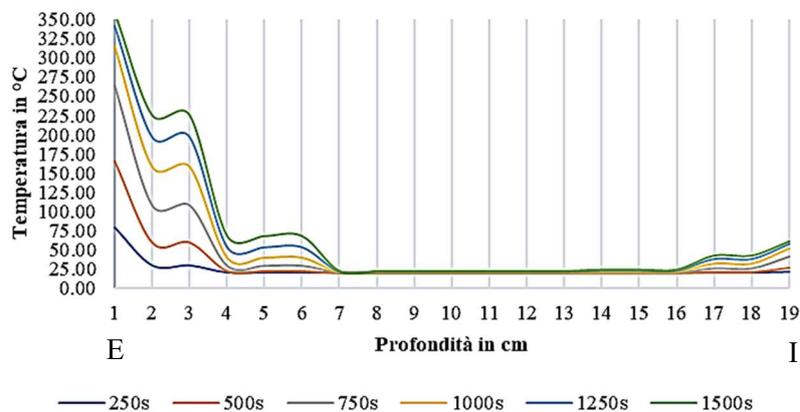


Figura 49 - Andamento temperatura interna con focolare esterno

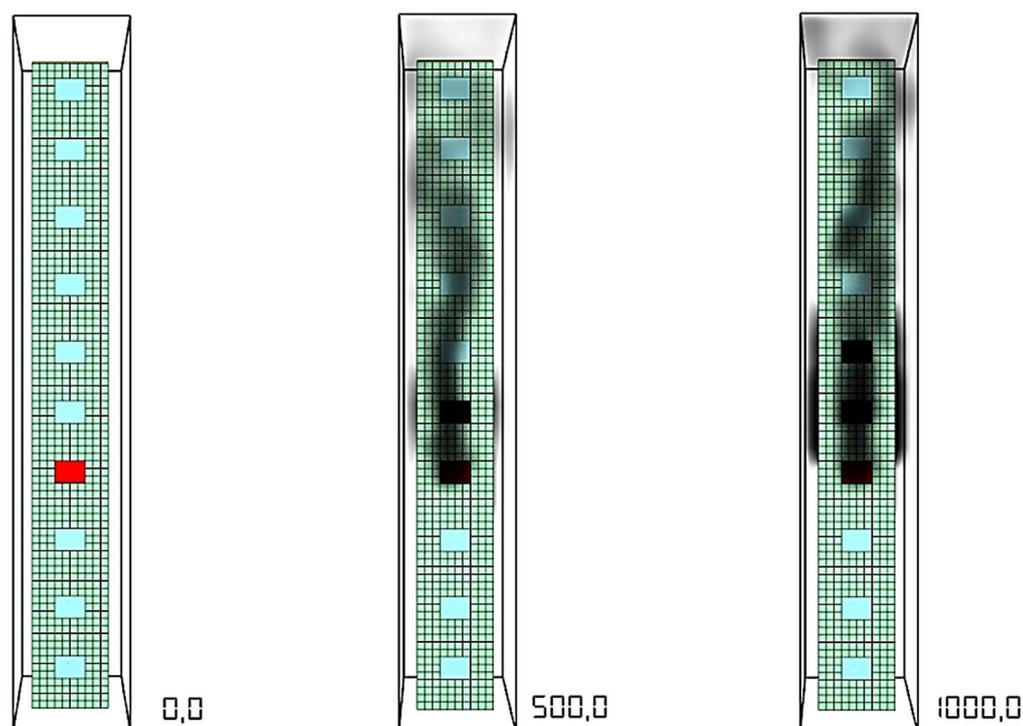
Osservando i risultati precedentemente riportati, è possibile effettuare una serie di considerazioni:

- La temperatura raggiunta dall'isolante è maggiore rispetto a quella del laterizio, non solo perché le proprietà del materiale sono differenti ma anche perché a 280° l'isolante raggiunge la temperatura di ignizione, per cui inizia a bruciare emettendo a sua volta calore.
- La temperatura della faccia opposta rispetto alla posizione del focolare è maggiore per il laterizio, questo perché con il focolare all'esterno parte della radiazione termica si disperde verso l'alto e solo una piccola parte entra in ambiente, causando dunque un leggero innalzamento della temperatura sulla superficie dell'isolante. Per quanto riguarda il focolare interno il discorso è diverso: in questo caso l'incendio ha un'unica via d'uscita, ovvero l'apertura, motivo per cui la radiazione raggiunge prima e in quantità maggiore la superficie esterna del laterizio innalzandone la temperatura.
- La temperatura all'interno del laterizio resta pressoché invariata per tutta la durata dell'analisi (ovviamente aumentando la durata dell'analisi, aumenterà a mano a mano anche la temperatura interna) mentre all'esterno aumenta. Questo dato è molto importante: nel caso di incendio interno, ci sono maggiori probabilità che l'incendio raggiunga la facciata nel caso di apertura in quanto la radiazione fuoriesce da essa facendo così innalzare la temperatura della superficie esterna fino a farla bruciare.

3.2 Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata

La prima analisi che è stata effettuata è quella della facciata priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio: in particolare si tratta del modello in cui la reazione dei materiali che partecipano alla combustione è governata dai materiali, avendo impostato tutte le proprietà necessarie, come spiegato in precedenza.

Di seguito si mostrano i risultati ottenuti dall'analisi realizzata, in particolare si riportano gli andamenti del fumo, della temperatura e della temperatura superficiale, presentando come varia la situazione ad intervalli di tempo regolari. Si vuole precisare che in alcuni punti la visualizzazione dei risultati potrebbe risultare approssimativa e con imprecisioni, dovuto alla dimensione della mesh interna, appositamente scelta per velocizzare la simulazione e porre l'attenzione alla facciata. Un esempio di imprecisione è visibile nell'andamento del fumo, all'istante $t=1000s$, in cui sembra che il fumo fuoriesca dalle pareti, ma in realtà è dovuto all'approssimazione della mesh.



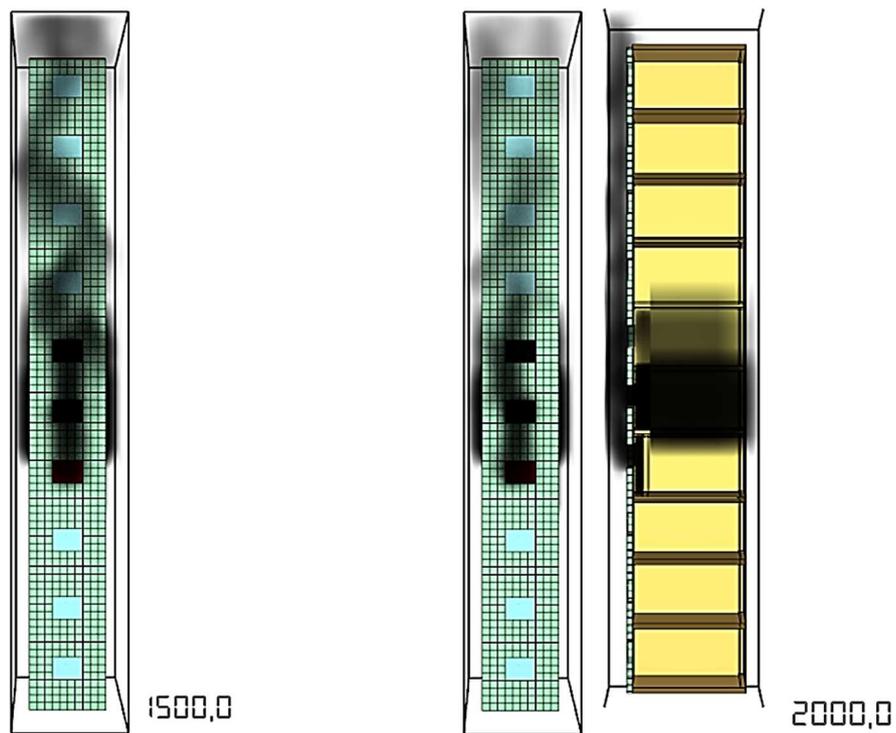


Figura 50 - Andamento del fumo, by material

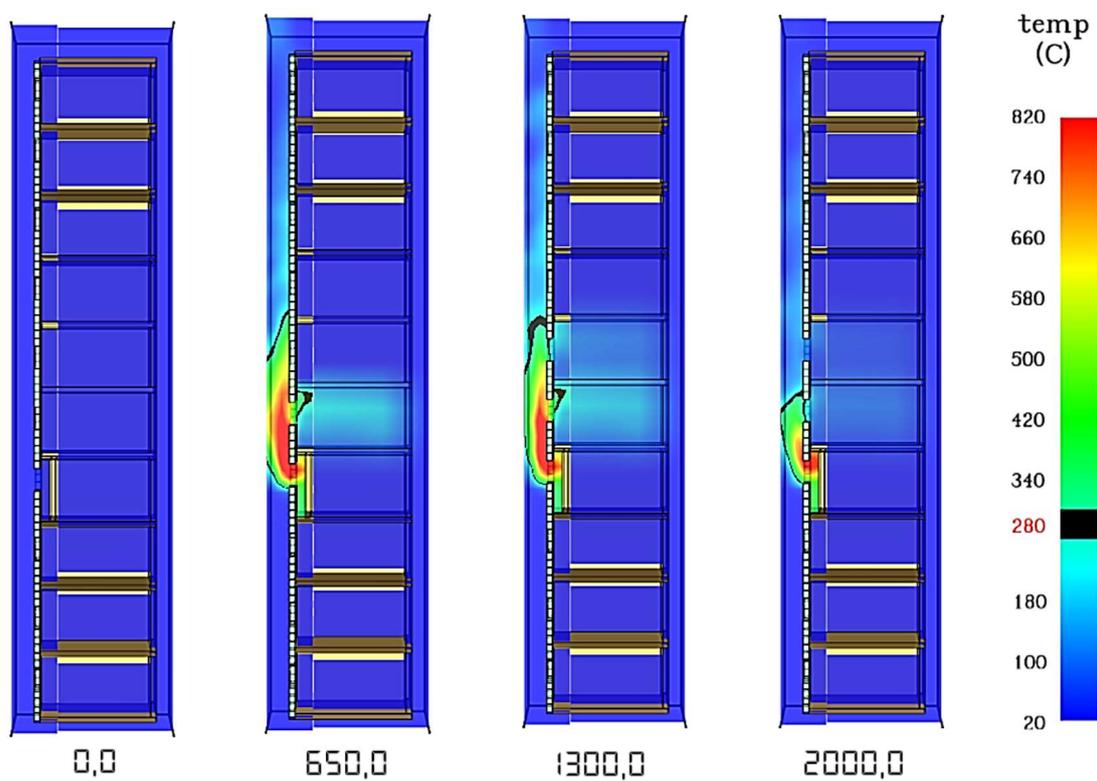


Figura 51 - Andamento della temperatura, by material

Per quanto riguarda la temperatura superficiale, i risultati ottenuti sono i seguenti, in questo caso ottenuti con maggior precisione essendo la mesh costituita da celle più piccole.

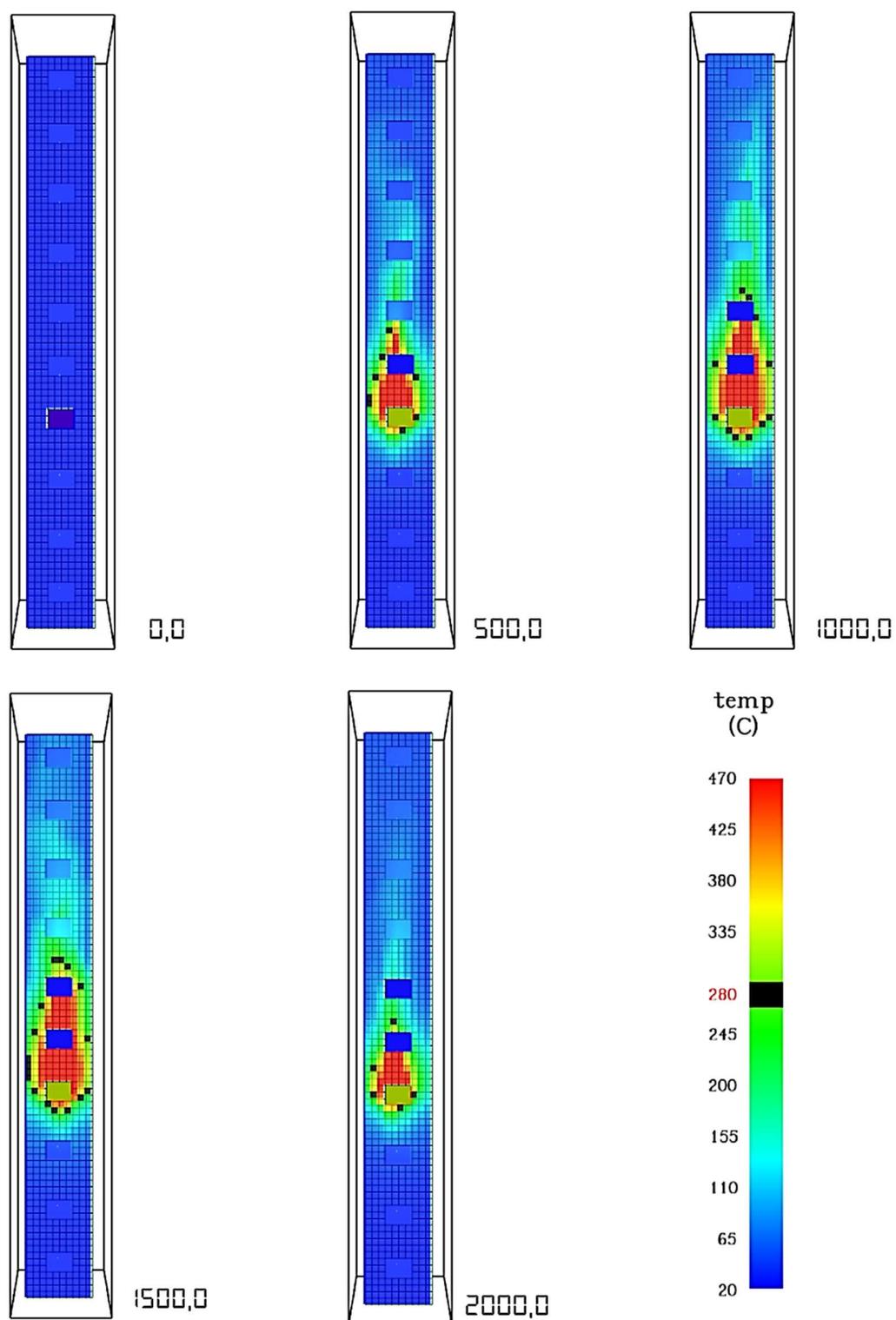


Figura 52 - Andamento della temperatura superficiale, by material

Una volta ottenuti i risultati è possibile notare che l'analisi eseguita non è corretta: il materiale di facciata si presuppone prenda fuoco ma questo non avviene. Per dimostrare ciò è sufficiente soffermarsi su due aspetti che maggiormente evidenziano l'errore, che sono l'andamento della temperatura superficiale e la curva HRR risultante dell'incendio.

Osservando l'andamento della temperatura superficiale si nota come ad un certo punto, in particolare dopo 1500s, essa inizi a decrescere, come se l'incendio stesse decrescendo. Tutto ciò però non dovrebbe accadere, in quanto oltre al focolare interno dovrebbe partecipare alla combustione anche l'isolante di facciata. Questo problema è ancor più evidente se dai risultati restituiti da Pyrosim si estrae la curva HRR risultante dell'incendio, così da verificare se oltre al focolare predefinito anche gli elementi di facciata partecipano alla combustione.

Come mostrato dalla figura successiva, l'incendio è regolato dal solo focolare interno, senza che la superficie esterna partecipi alla combustione, nonostante in superficie si raggiunga il valore della temperatura di ignizione di 280°C.

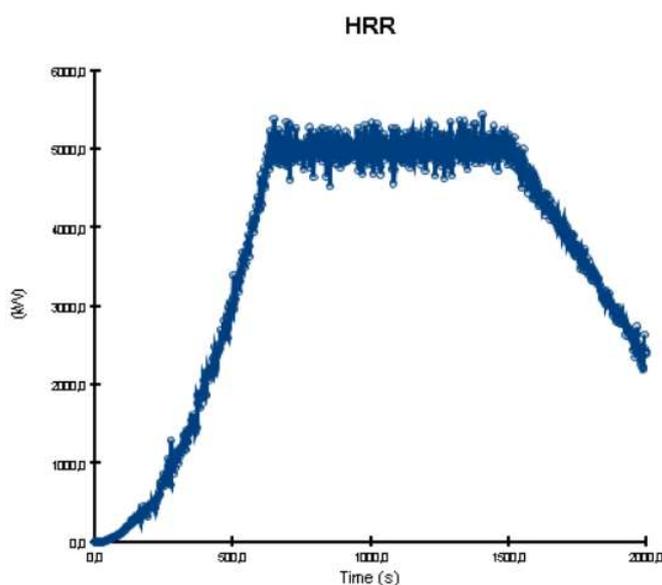


Figura 53 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, by material



Una motivazione per cui l'analisi governata dal materiale risulti errata potrebbe essere il fatto che gli elementi che compongono la facciata sono composti da due materiali, per cui il singolo elemento inizia a bruciare solamente quando entrambi i materiali raggiungono le condizioni necessarie (ad esempio il laterizio non raggiunge la temperatura di ignizione come mostrato nel paragrafo precedente). Per ovviare a questo problema è presente un'unica soluzione, ovvero quella di impostare l'analisi governata manualmente; una seconda possibile soluzione potrebbe essere quella di modellare la facciata con due strati distinti, uno per il laterizio e uno per l'isolante. Anche in questo caso però l'analisi risulterebbe errata in quanto in FDS due elementi a contatto tra loro non comunicano, per cui non ci sarebbe la trasmissione di calore.

Di seguito si riportano dunque i risultati dell'analisi della facciata semplice priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio governata manualmente, andando ad inserire una curva ad andamento costante con valore di picco pari a 71 kW/m^2 e temperatura di ignizione di 280°C , come spiegato in precedenza.

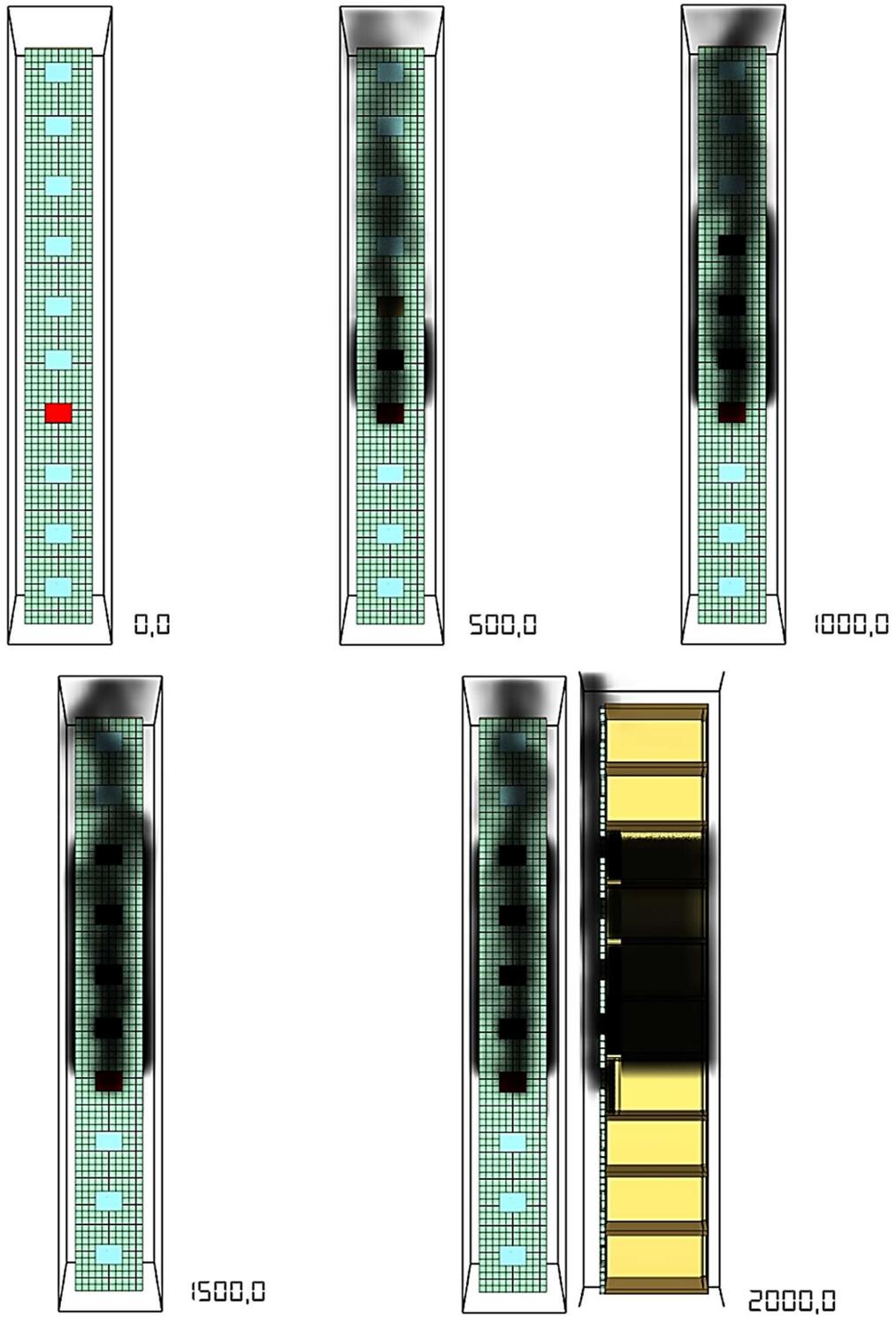


Figura 54 - Andamento del fumo, manual HRR

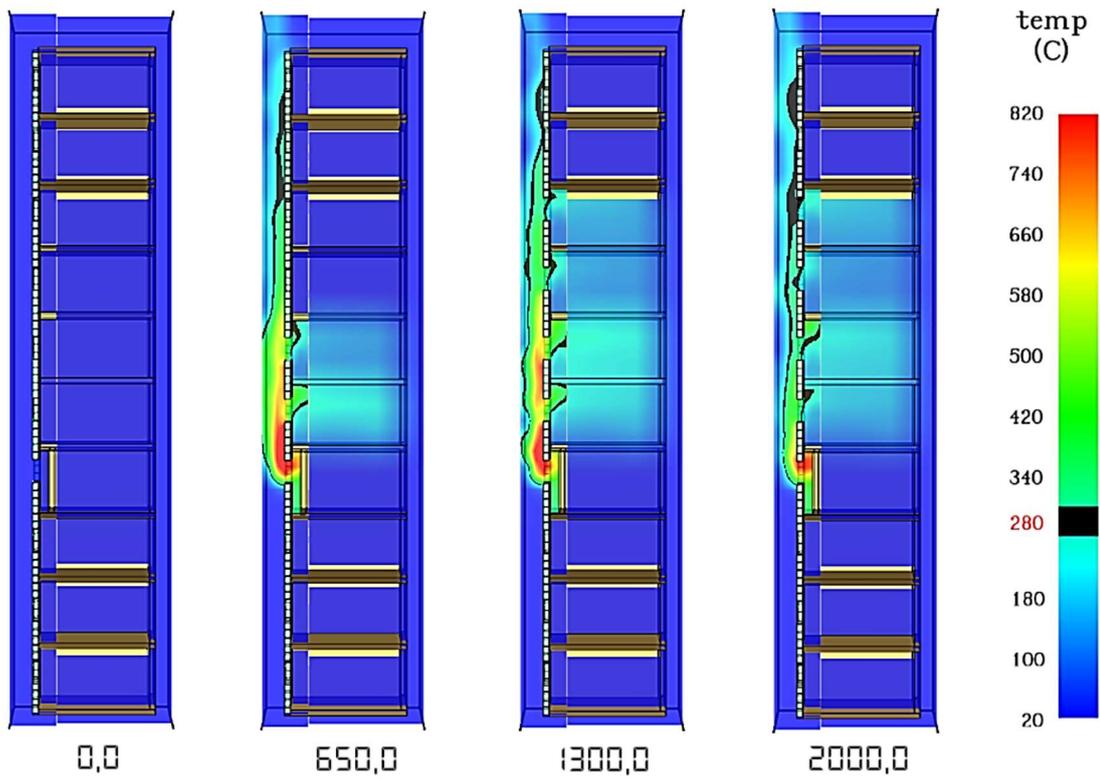
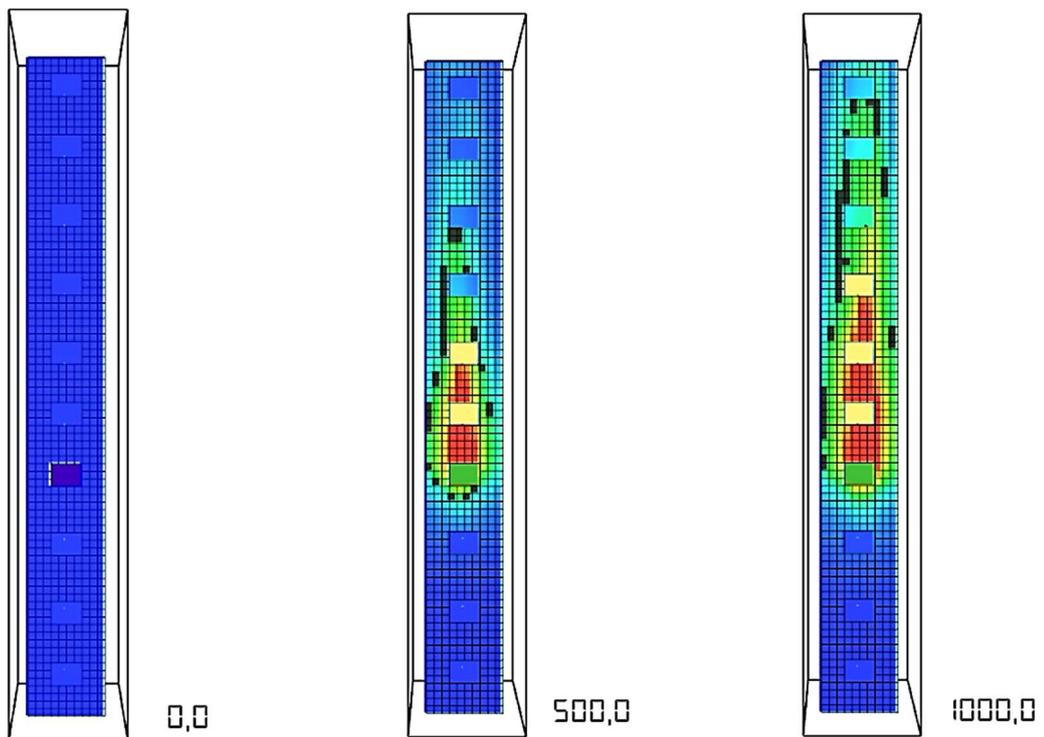


Figura 55 - Andamento della temperatura, manual HRR



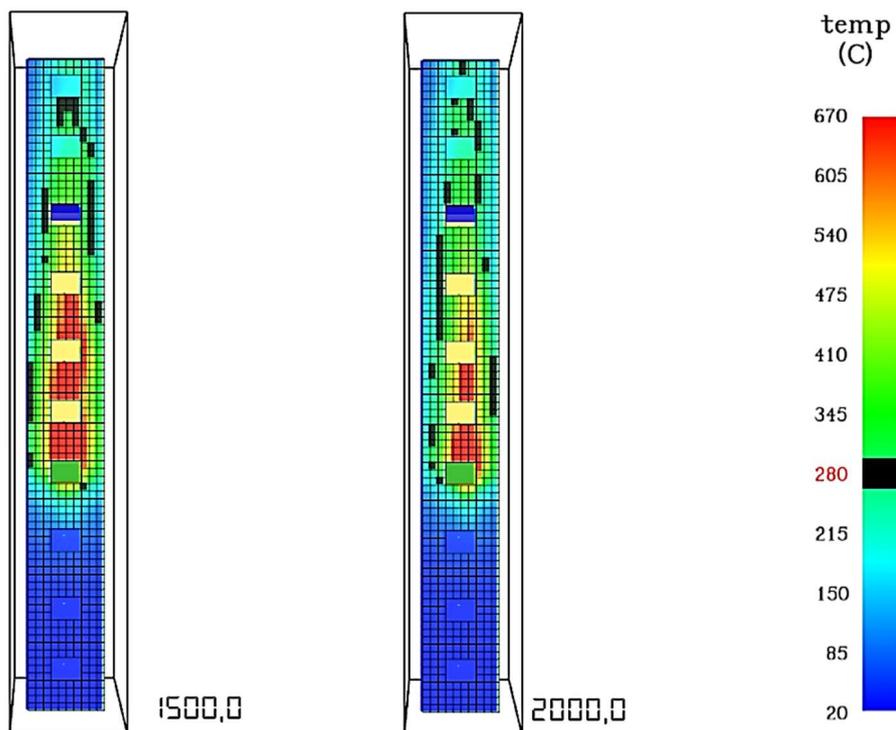


Figura 56 - Andamento della temperatura superficiale, manual HRR

Come è possibile notare dai risultati precedentemente riportati, nel caso di analisi governata manualmente gli elementi che compongono la facciata partecipano alla combustione. Questo è evidente soprattutto osservando l'andamento della temperatura: mentre nel primo caso la temperatura iniziava a decrescere dopo 1500s, in questo caso continua a crescere per tutta l'analisi, e lo si può notare anche dal numero di aperture che si attivano. Ad ulteriore prova del fatto che gli elementi partecipano alla combustione viene riportata la curva HRR risultante dell'incendio, la quale presenta un andamento e un valore di picco ben diversi da quella del focolare, a differenza del caso precedente.

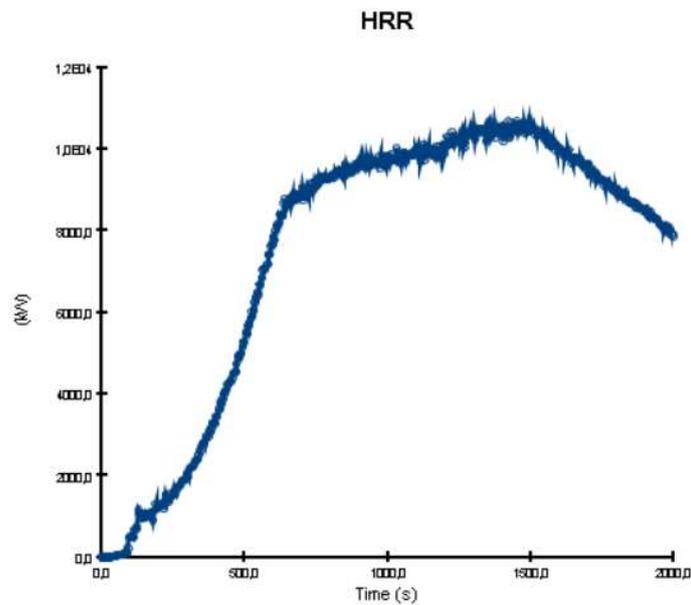


Figura 57 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, manual HRR



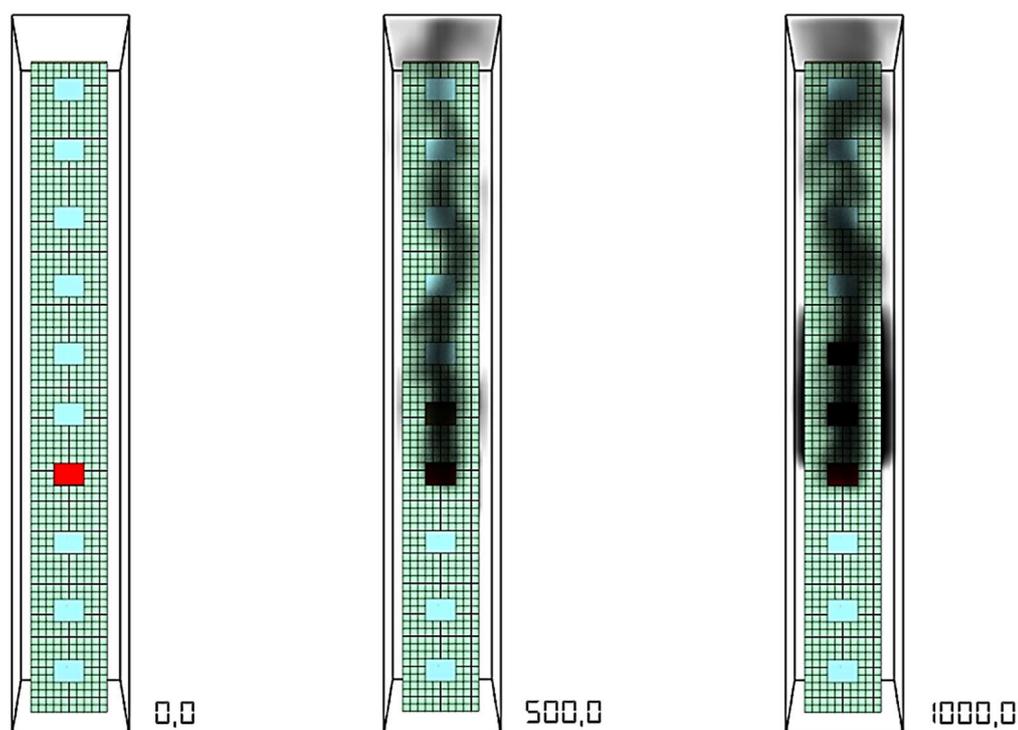
Un'ulteriore verifica del corretto funzionamento dell'analisi consiste nell'eseguire una seconda analisi governata manualmente, ma considerando il valore del tasso di perdita di massa anziché utilizzare il valore di HRR così da confrontare il risultato e, nel caso di analisi corretta, riscontrare risultati simili. Il valore del tasso di perdita di massa utilizzato è pari a $1,59 \text{ g/m}^2 \text{ s}$, valore ottenuto da un test svedese a larga lasca⁹, lo stesso usato per acquisire il valore di HRR di picco.

⁹ Babrauskas, V. (1996) Façade fire tests: Towards an international test standard. Fire Technol 32, 219–230.

Property	Variable	F1 rock wool	F2 EPS	F3 PUR
Ignition time [s]	t_{ign}	3	248	176
Flameout [s]	$t_{flameout}$	0	578	687
Peak HRR [kW m^{-2}]	$\dot{q}_{p,t}''$	13	154	71
Avg HRR, 60 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{60}''	2	43	39
Avg HRR, 180 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{180}''	4	78	52
Avg HRR, 300 s [kW m^{-2}]	\dot{q}_{300}''	6	71	55
Total heat produced [MJ m^{-2}]	THR	4.0	27.9	25
Peak SPR [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	SPR_{max}	*	0.071	0.025
Average SPR [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	SPR_{avg}	*	0.015	0.009
Total smoke produced [m^2]	TSP	0.41	9.54	6.59
Sample mass before test [g]	Mass_0	127.5	69.2	91.5
Avg mass loss rate [$\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	MLR_{avg}	0.56	1.31	1.59
Total mass loss [g]	TML	5.0	8.5	11.5
Eff. heat of comb [MJ kg^{-1}]	ΔH_c	6.9	29.2	19.5
Spec. extinction area [$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$]	SEA_{avg}	83	1135	575

Figura 58 - Valore del tasso di perdita di massa

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, così da poter effettuare un confronto con quelli ottenuti dall'analisi governata manualmente caratterizzata dal valore di HRR di picco inserito così da verificare la correttezza dell'analisi.



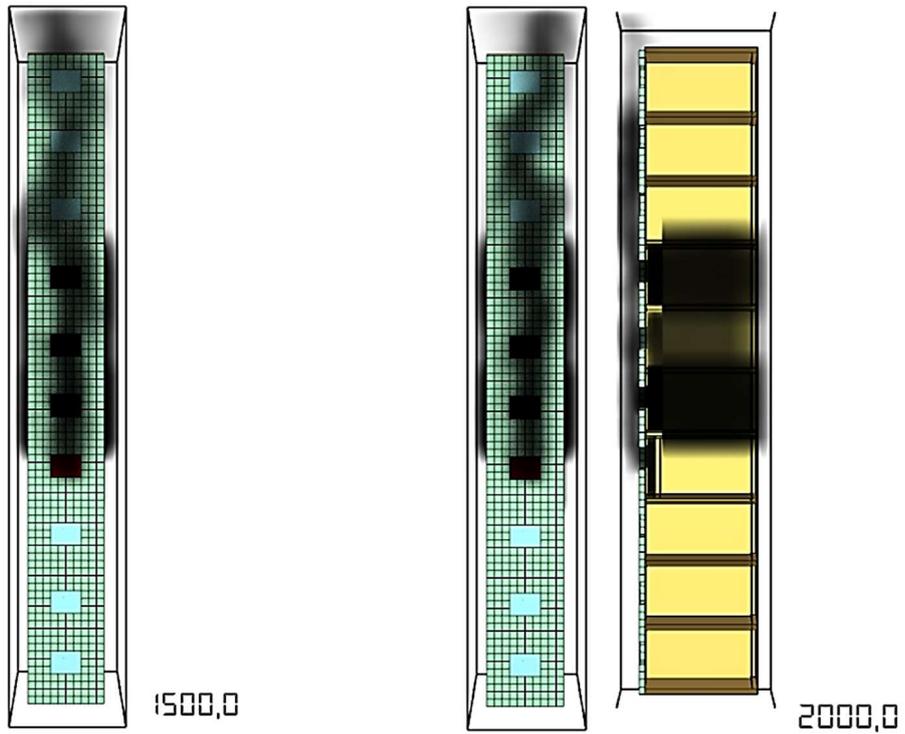


Figura 59 - Andamento del fumo, manual mass loss rate

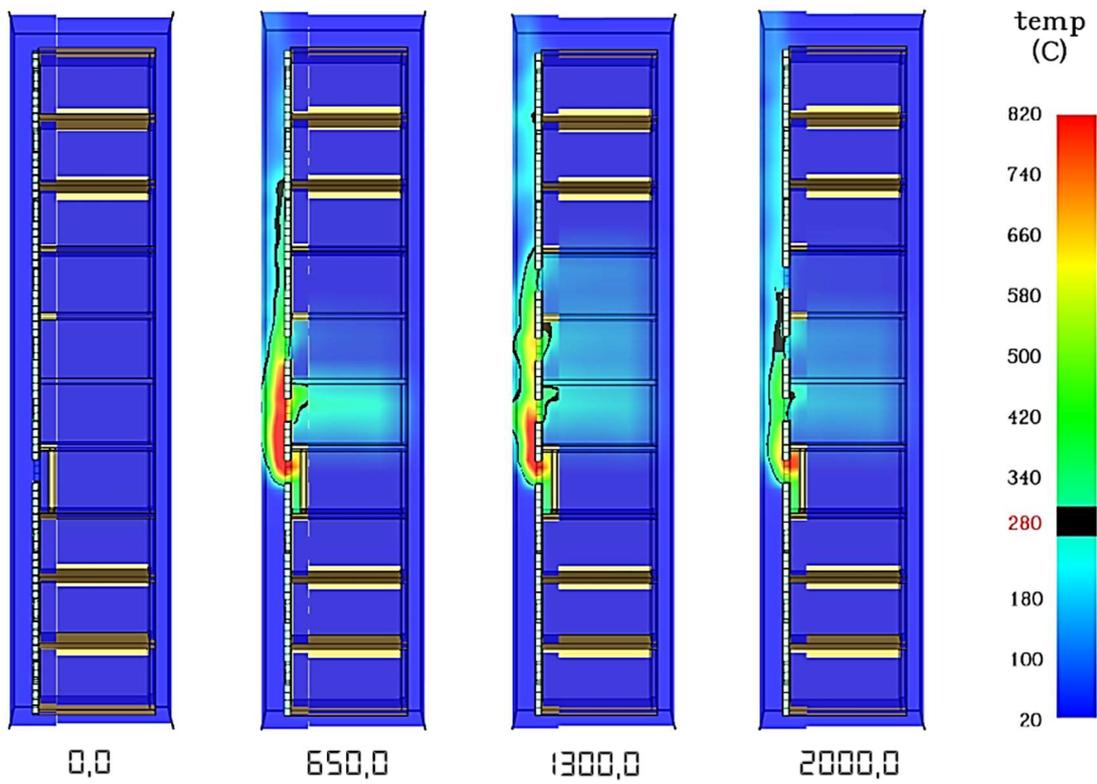


Figura 60 - Andamento della temperatura, manual mass loss rate

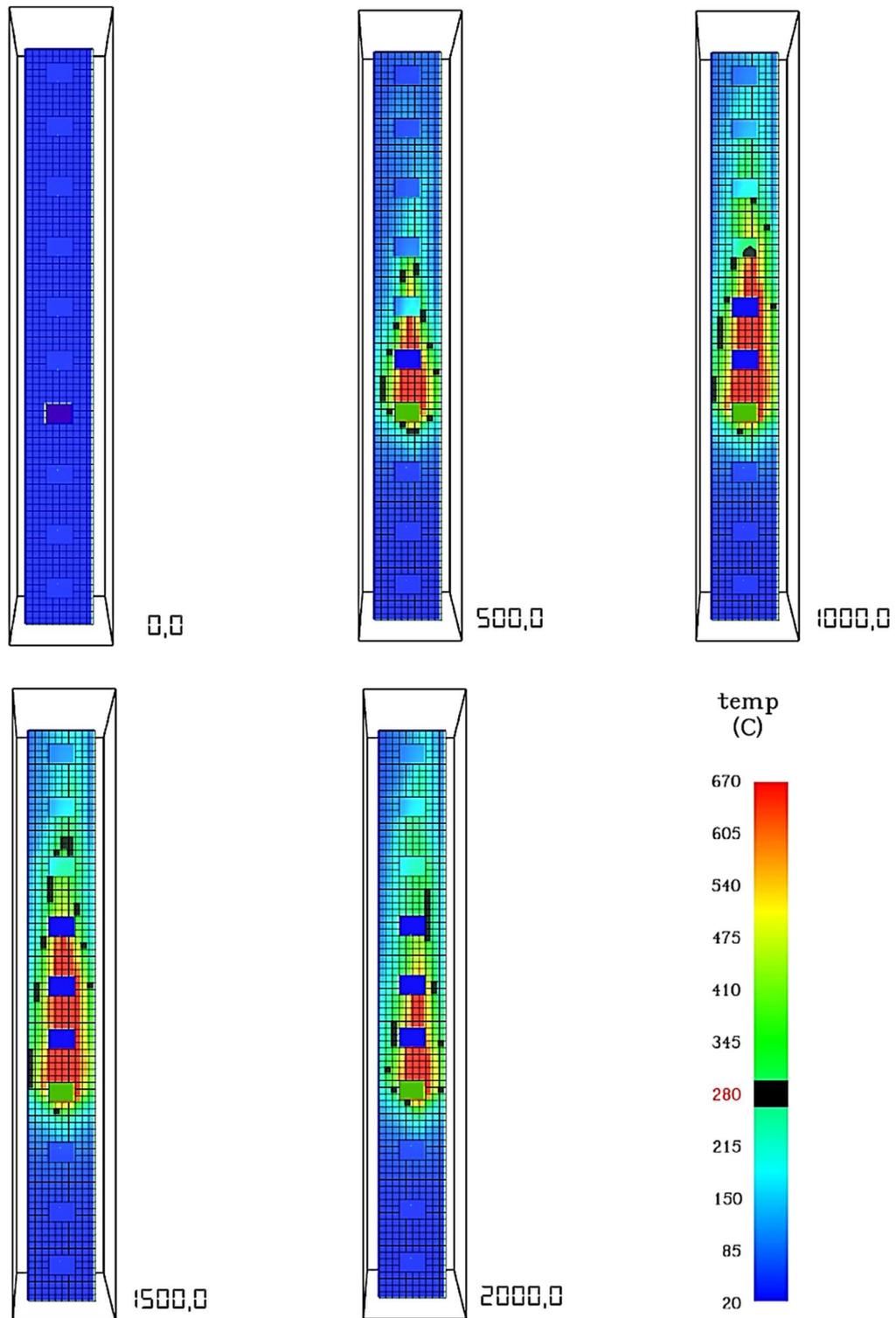


Figura 61 - Andamento della temperatura superficiale, manual mass loss rate

Confrontando i risultati delle due analisi, si intuisce che lo sviluppo dell'incendio nei due casi proposti è simile ma non identico, come è possibile

notare dall'andamento della temperatura superficiale ad esempio. Già dai primi istanti si osserva che la quantità di materiale che prende parte all'incendio è inferiore nel secondo caso, infatti la temperatura superficiale è minore. Questa differenza persiste per tutta l'analisi, nonostante ciò si può affermare che i due casi presentano un andamento simile osservando l'andamento della curva HRR, in particolare i valori di picco raggiunti. Mentre nel primo caso si è arrivati ad un valore di picco di circa 10.000 kW, nel secondo il picco è di 8.000 kW, e questo prova che un minor numero di elementi prende parte all'incendio, che però presenta lo stesso andamento del caso precedente.

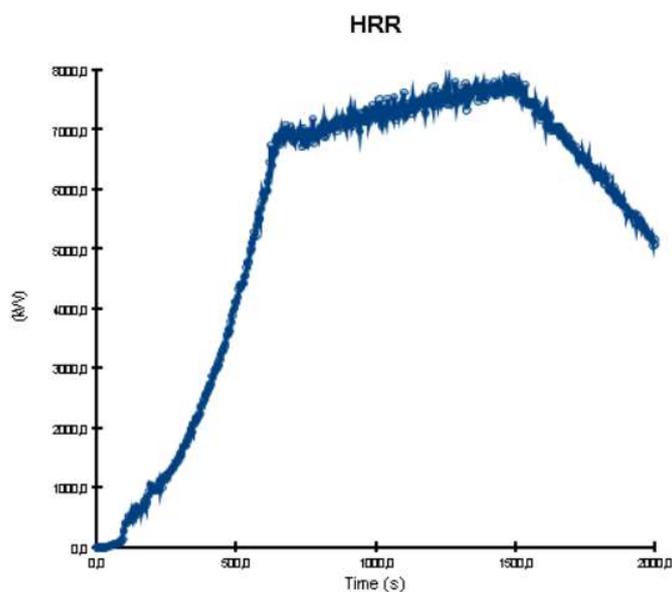
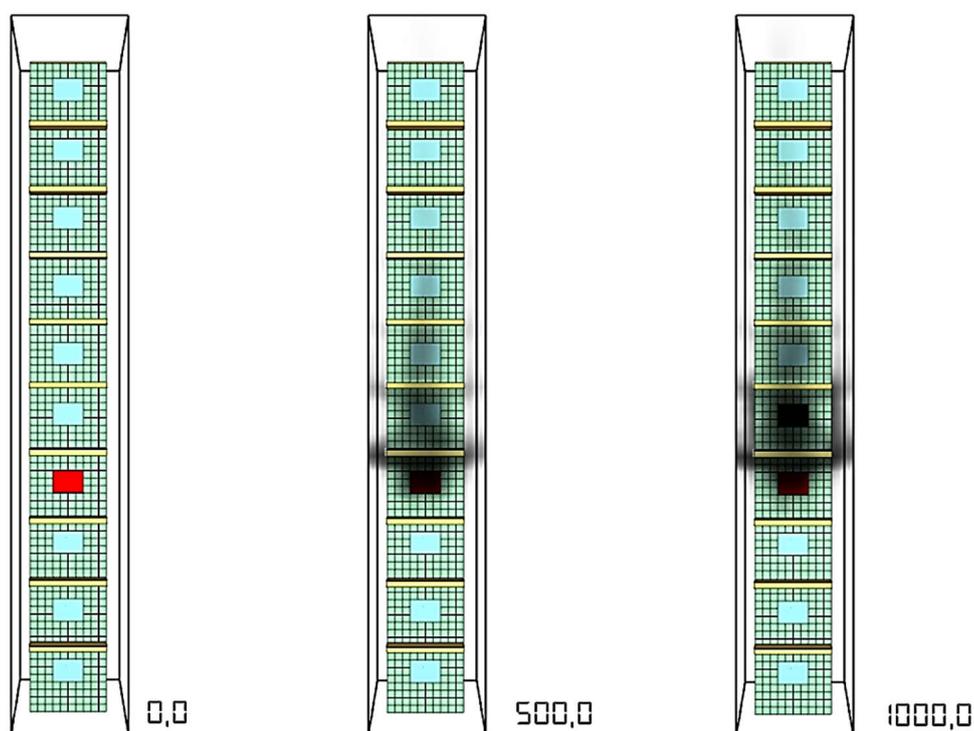


Figura 62 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, manual mass loss rate



3.3 Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 1)

La prima misura atta a limitare la propagazione dell'incendio in facciata analizzata è quella riportata in schema 1, allegato A presentata precedentemente. Come sarà possibile notare dai risultati di seguito riportati, questa misura è molto efficace ai fini di limitare la propagazione verticale dell'incendio, ma crea un ulteriore problema, ovvero la propagazione orizzontale. Il fumo e le fiamme infatti si accumulano sotto la soletta del balcone propagandosi orizzontalmente, per questo motivo questa soluzione dovrebbe essere completata con l'aggiunta di fasce incombustibili di separazione verticale o in alternativa di un'alternanza dei balconi, da preferire a balconi continui, così da evitare un eccessivo accumulo di fumi, che potrebbero così raggiungere aperture adiacenti, e di calore.



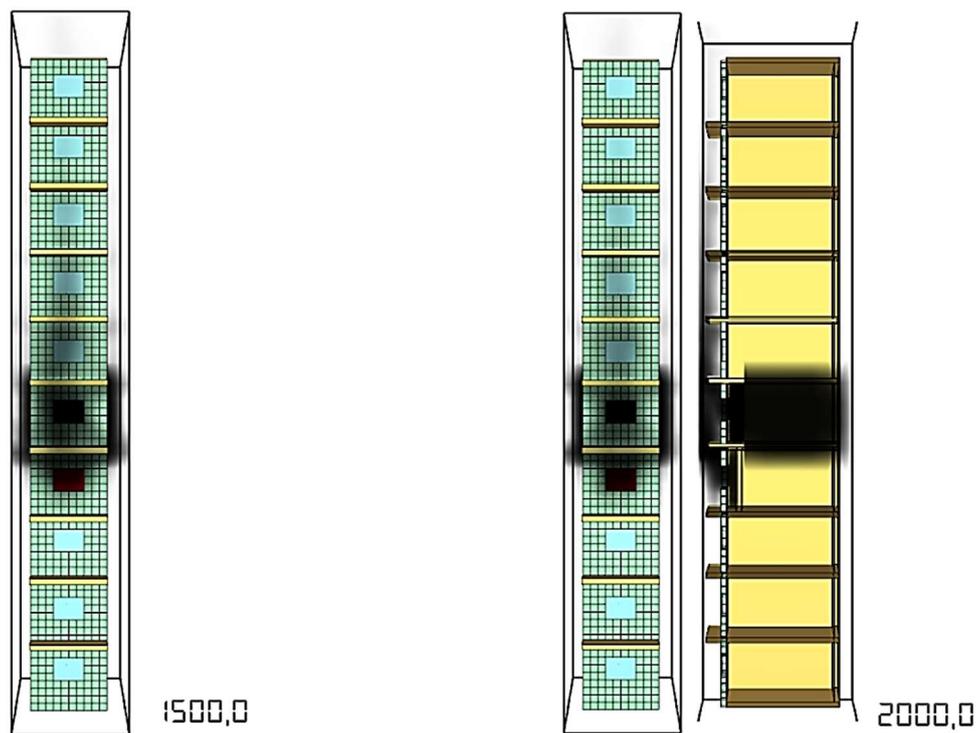


Figura 63 - Andamento del fumo, schema 1

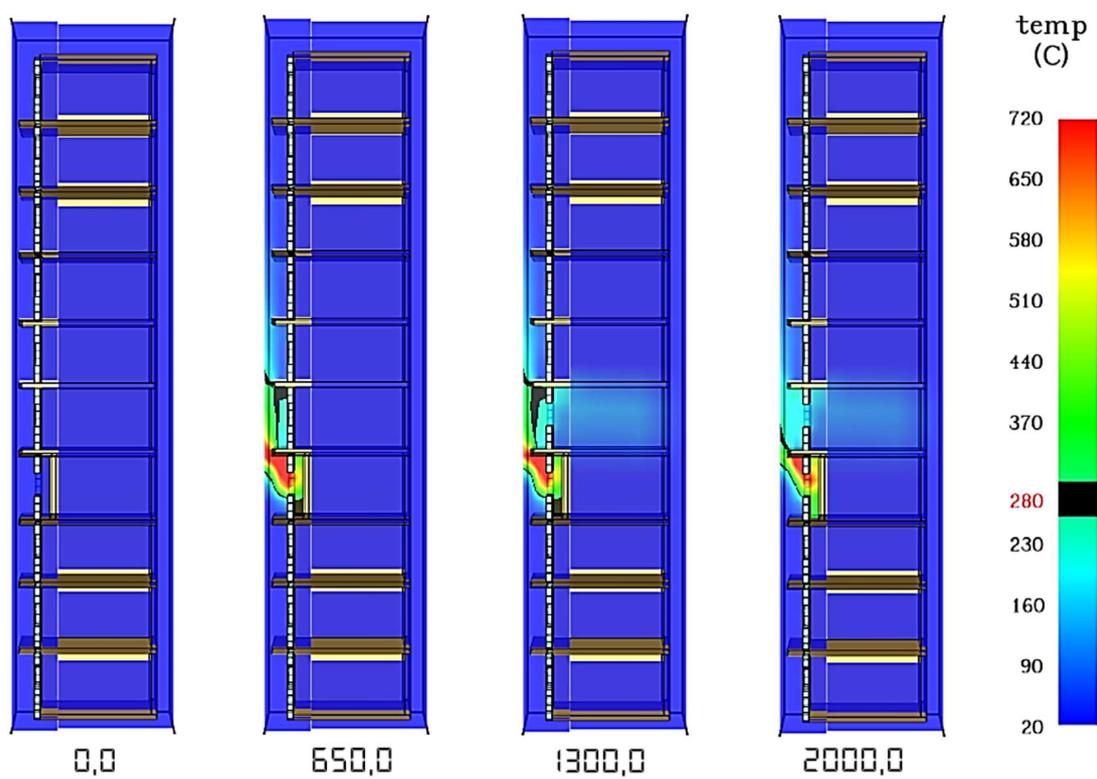


Figura 64 - Andamento della temperatura, schema 1

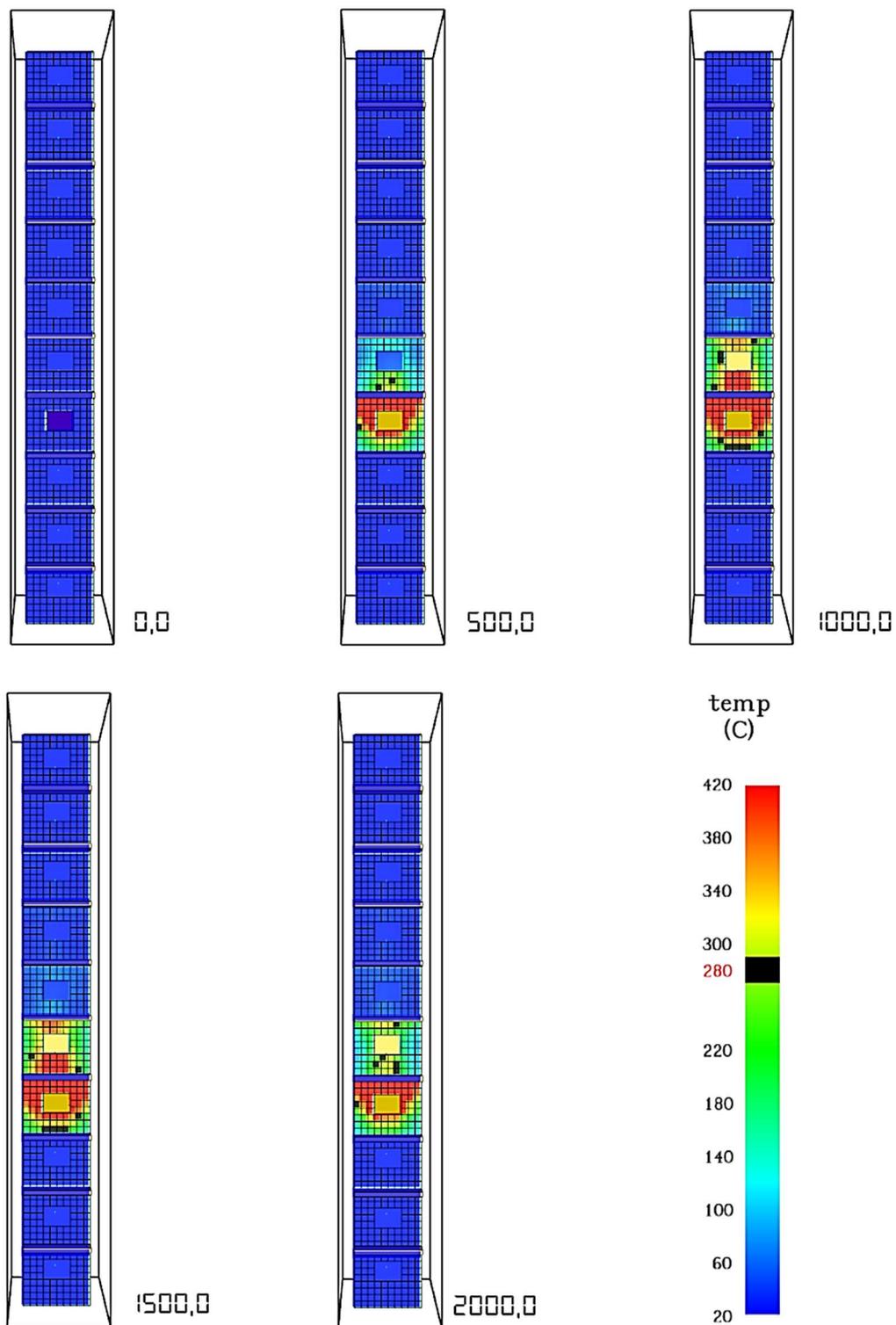


Figura 65 - Andamento della temperatura superficiale, schema 1

Come anticipato in precedenza, la diffusione dell'incendio in facciata è notevolmente ridotta, ed è possibile notarlo anche dall'andamento della curva

HRR risultante dell'incendio, la quale raggiunge un valore di picco di soli 6.000kW, a discapito dei 10.000kW raggiunti dalla soluzione priva di misure atte a prevenire la diffusione dell'incendio.

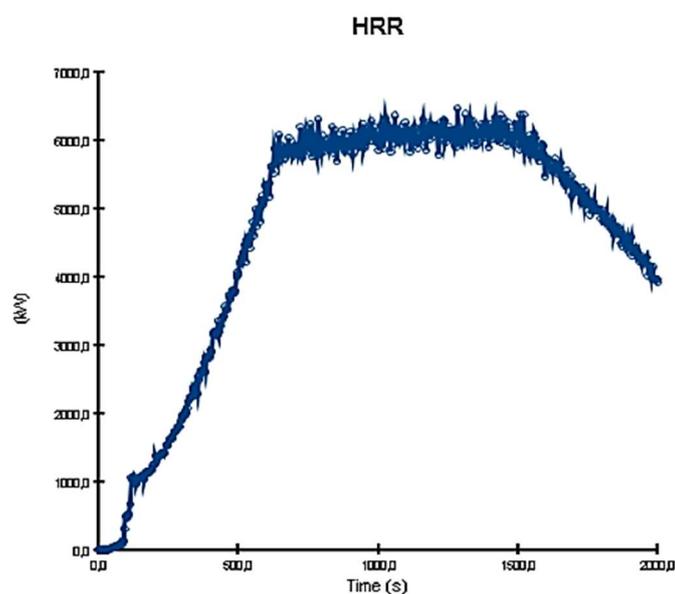


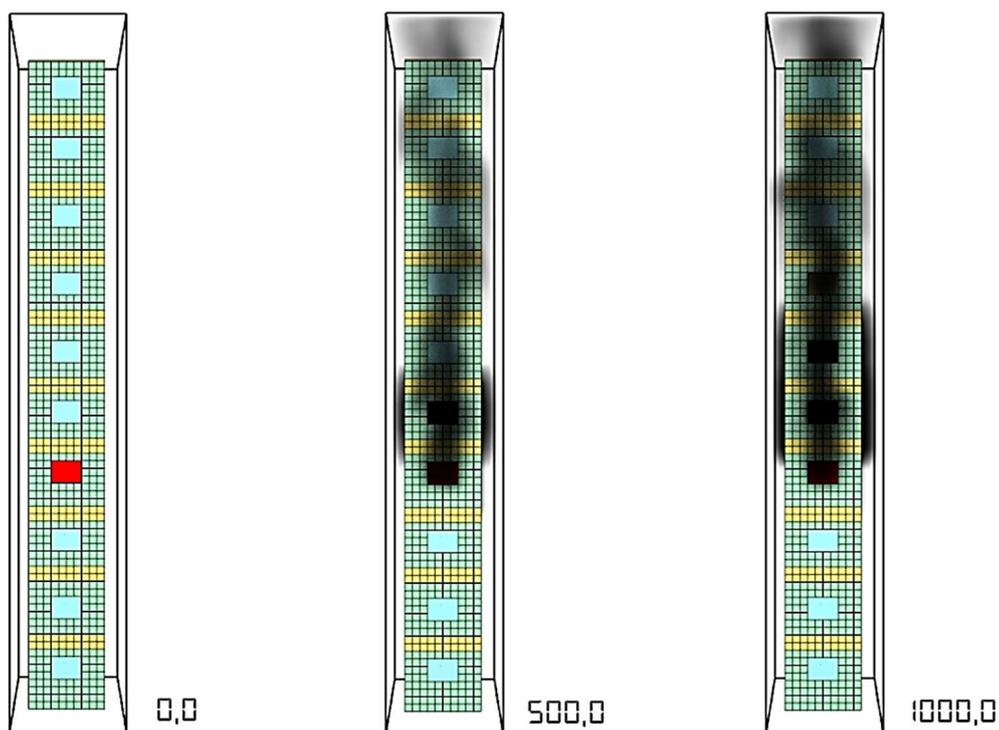
Figura 66 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, schema 1



Il problema che si presenta è la diffusione orizzontale dell'incendio: questa analisi si sofferma su un modello semplificato di facciata per cui non si comprende l'effettivo sviluppo orizzontale, ma anche solo osservando i valori della temperatura superficiale e confrontandoli con la soluzione priva di misure antincendio, si nota una diffusione dell'incendio maggiore sul piano in cui è divampato l'incendio, con il raggiungimento di temperature elevate anche negli elementi più distanti dall'apertura, cosa che prima non accadeva.

3.4 Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 5)

La seconda misura atta a limitare la propagazione dell'incendio in facciata analizzata è quella riportata in schema 5, allegato A presentata precedentemente. Come sarà possibile notare dai risultati di seguito riportati, questa misura non è molto efficace ai fini di limitare la propagazione verticale dell'incendio impostato per quest'analisi. Il fumo e le fiamme prodotte infatti raggiungono facilmente gli elementi soprastanti i quali raggiungono comunque la temperatura di ignizione. Per questo motivo questa soluzione dovrebbe essere completata con l'aggiunta di fasce incombustibili di separazione orizzontale ulteriori così da ritardare il raggiungimento della temperatura di ignizione.



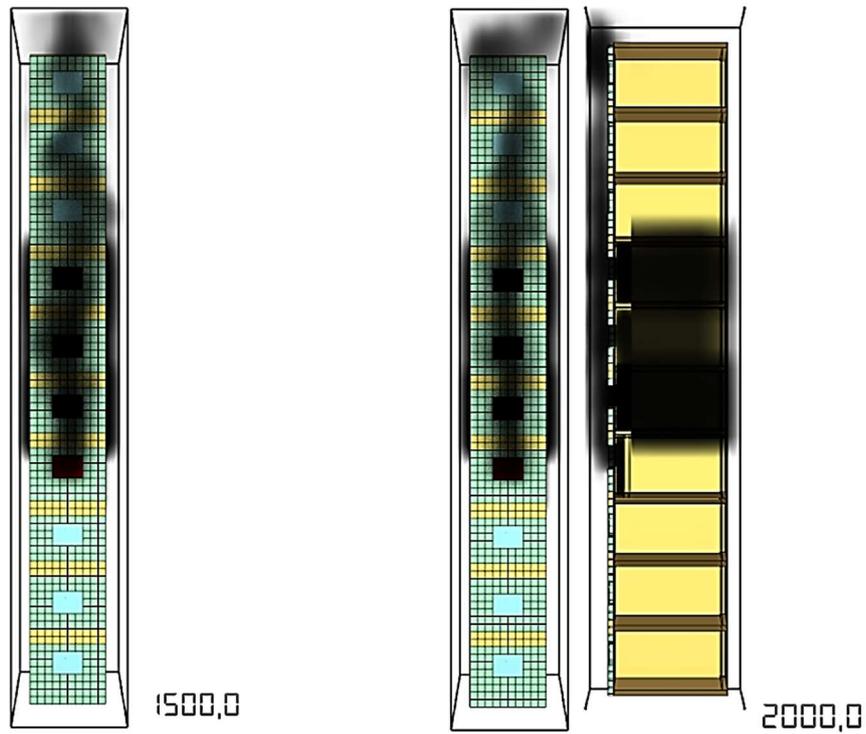


Figura 67 - Andamento del fumo, schema 5

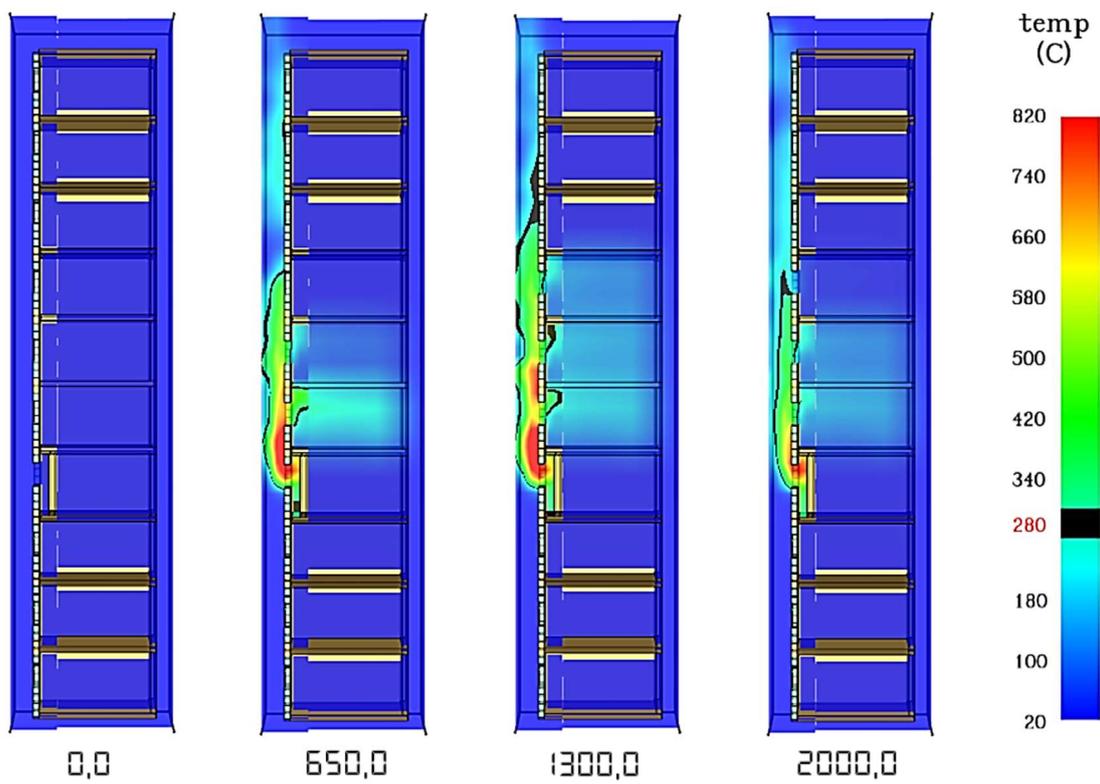


Figura 68 - Andamento della temperatura, schema 5

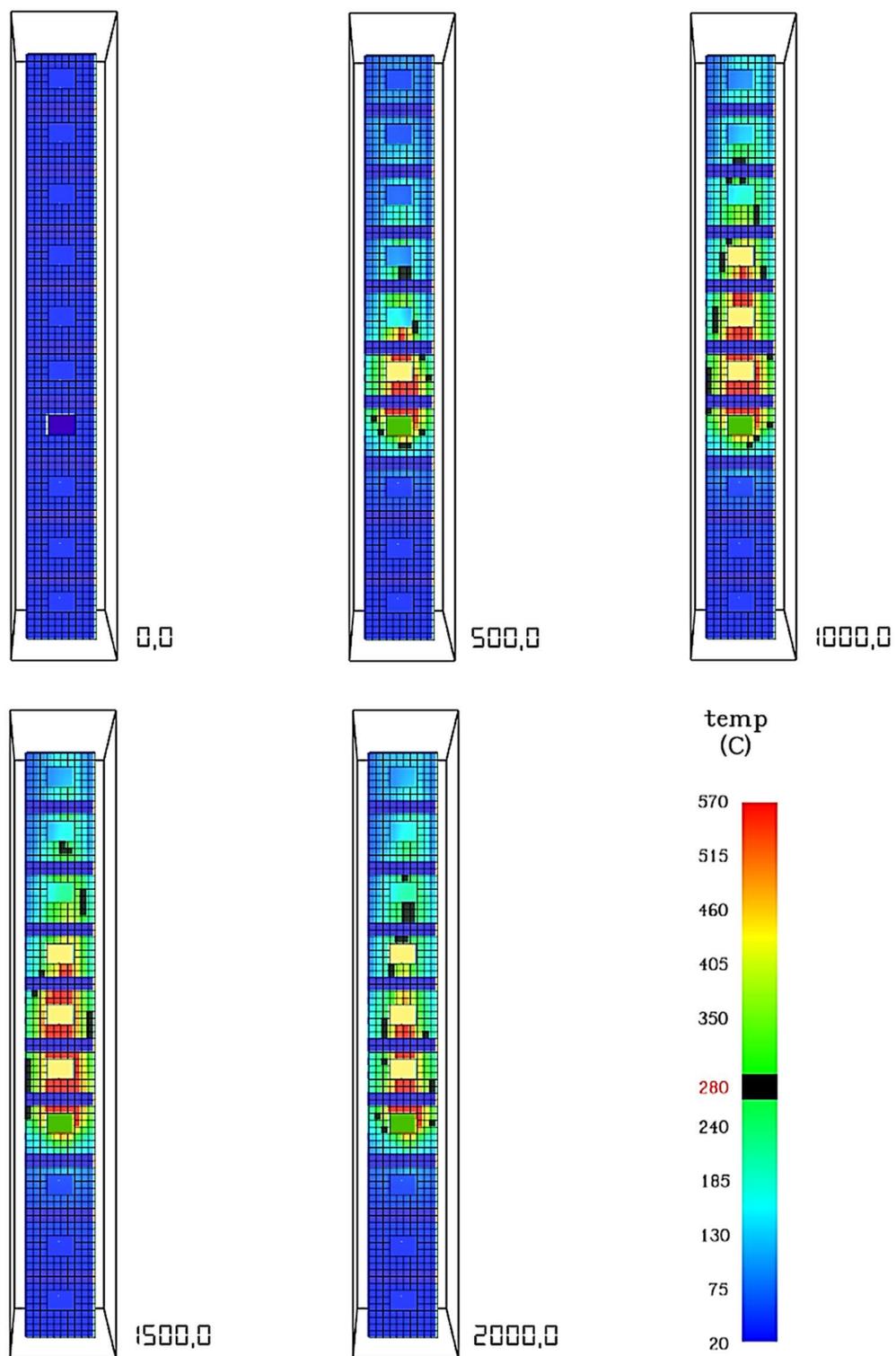


Figura 69 - Andamento della temperatura superficiale, schema 5

Come anticipato in precedenza, la diffusione dell'incendio in facciata è scarsamente ridotta, ed è possibile notarlo anche dall'andamento della curva

HRR risultante dell'incendio, la quale raggiunge un valore di picco di circa 8.500kW, a discapito dei 10.000kW raggiunti dalla soluzione priva di misure atte a prevenire la diffusione dell'incendio.

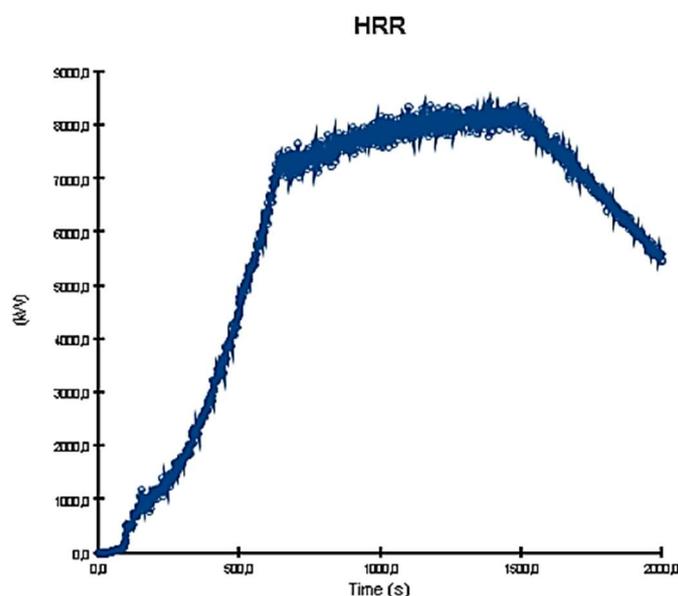


Figura 70 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, schema 5

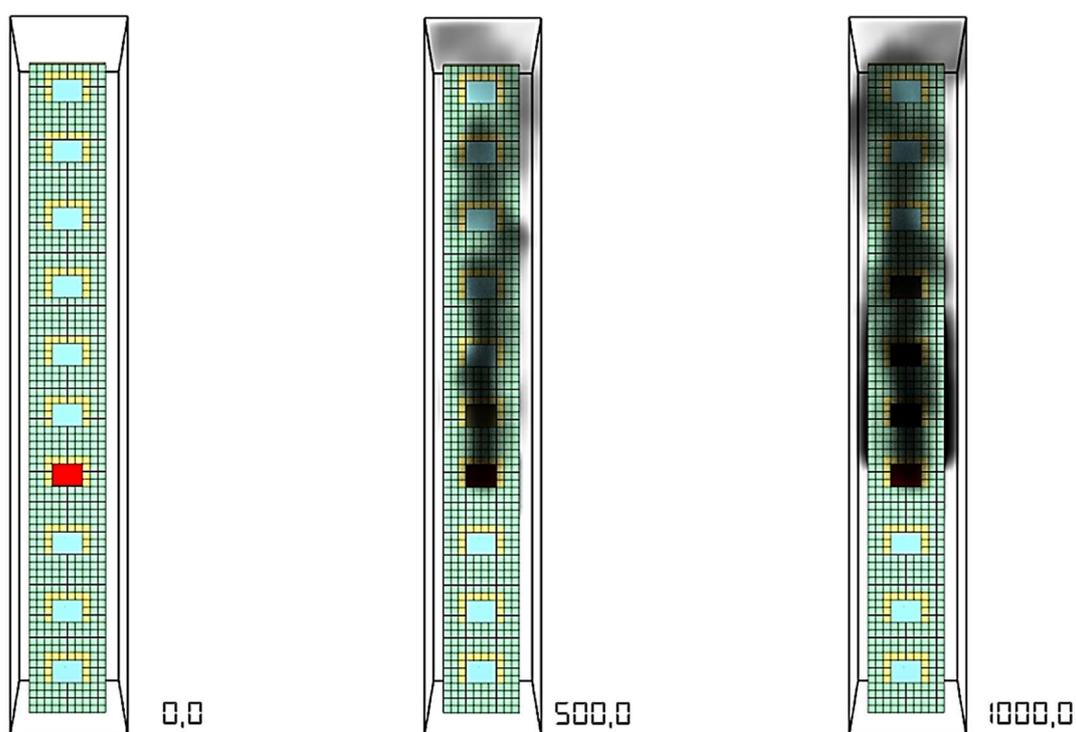


Nel caso di incendio con le stesse caratteristiche di quello utilizzato per quest'analisi la misura preventiva descritta non è sufficiente a limitarne la propagazione in facciata. Per questo motivo bisogna necessariamente intervenire aggiungendo una misura di prevenzione, ad esempio prevedendo in facciata un'alternanza tra fasce incombustibili ed elementi sporgenti, o in alternativa predisporre fasce incombustibili dallo spessore maggiore così da impedire alle fiamme di raggiungere facilmente il materiale combustibile soprastante.

3.5 Soluzione con misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata

Oltre alle possibilità di intervento proposte dalla *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili*, è possibile intervenire in facciata con misure alternative puntuali.

Una delle zone più sollecitate in caso di incendio è il perimetro dell'apertura: il materiale presente è il primo ad entrare in contatto con le fiamme in caso di incendio sviluppatosi all'interno di un ambiente. Per questo motivo è consigliabile prevedere una fascia incombustibile nei pressi delle aperture così da ritardare la combustione dei materiali di facciata. Come sarà possibile notare dai risultati di seguito riportati, questa misura non è sufficiente a contrastare la diffusione dell'incendio in facciata, il fumo e le fiamme prodotte infatti raggiungono facilmente gli elementi soprastanti i quali raggiungono comunque la temperatura di ignizione.



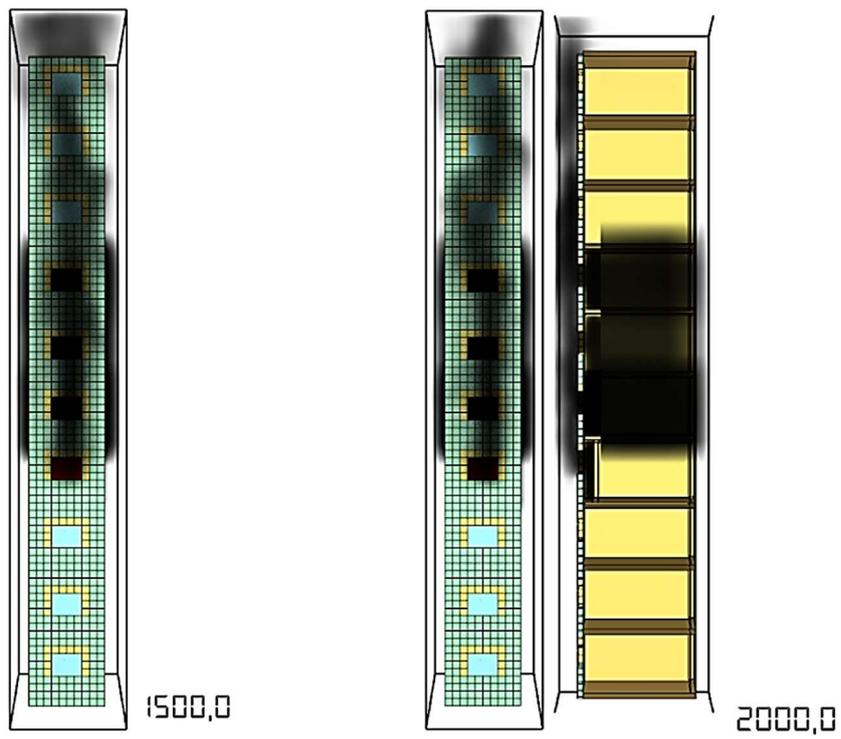


Figura 71 - Andamento del fumo, alternativa

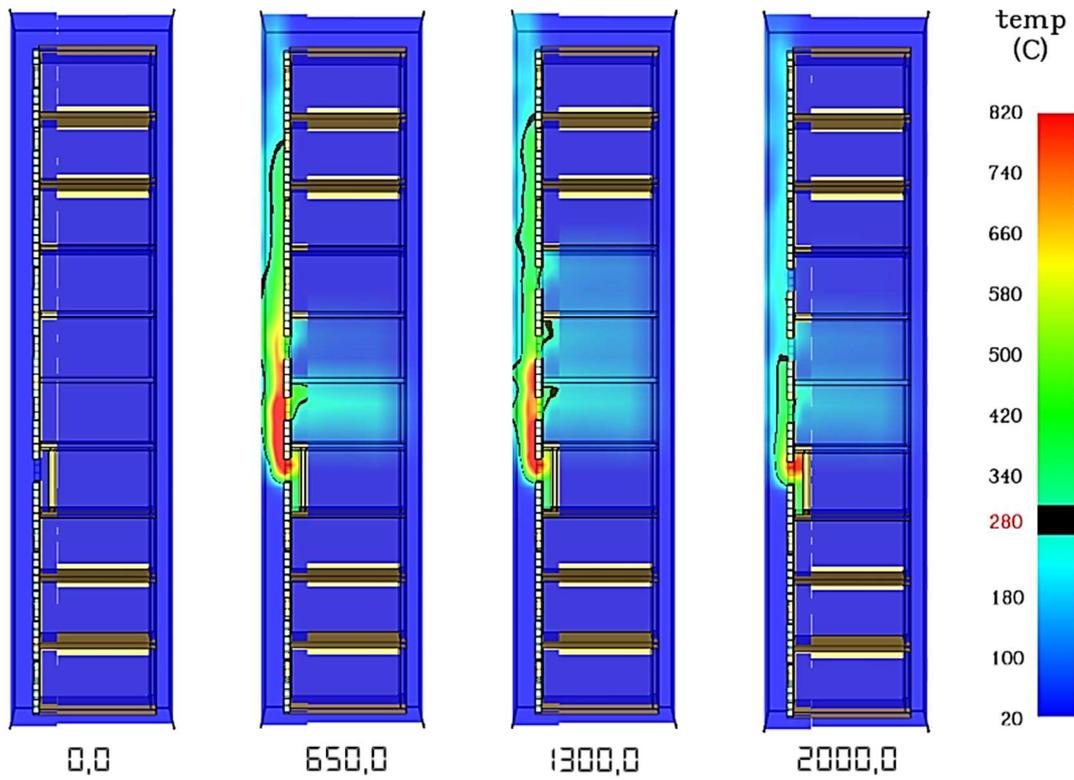


Figura 72 - Andamento della temperatura, alternativa

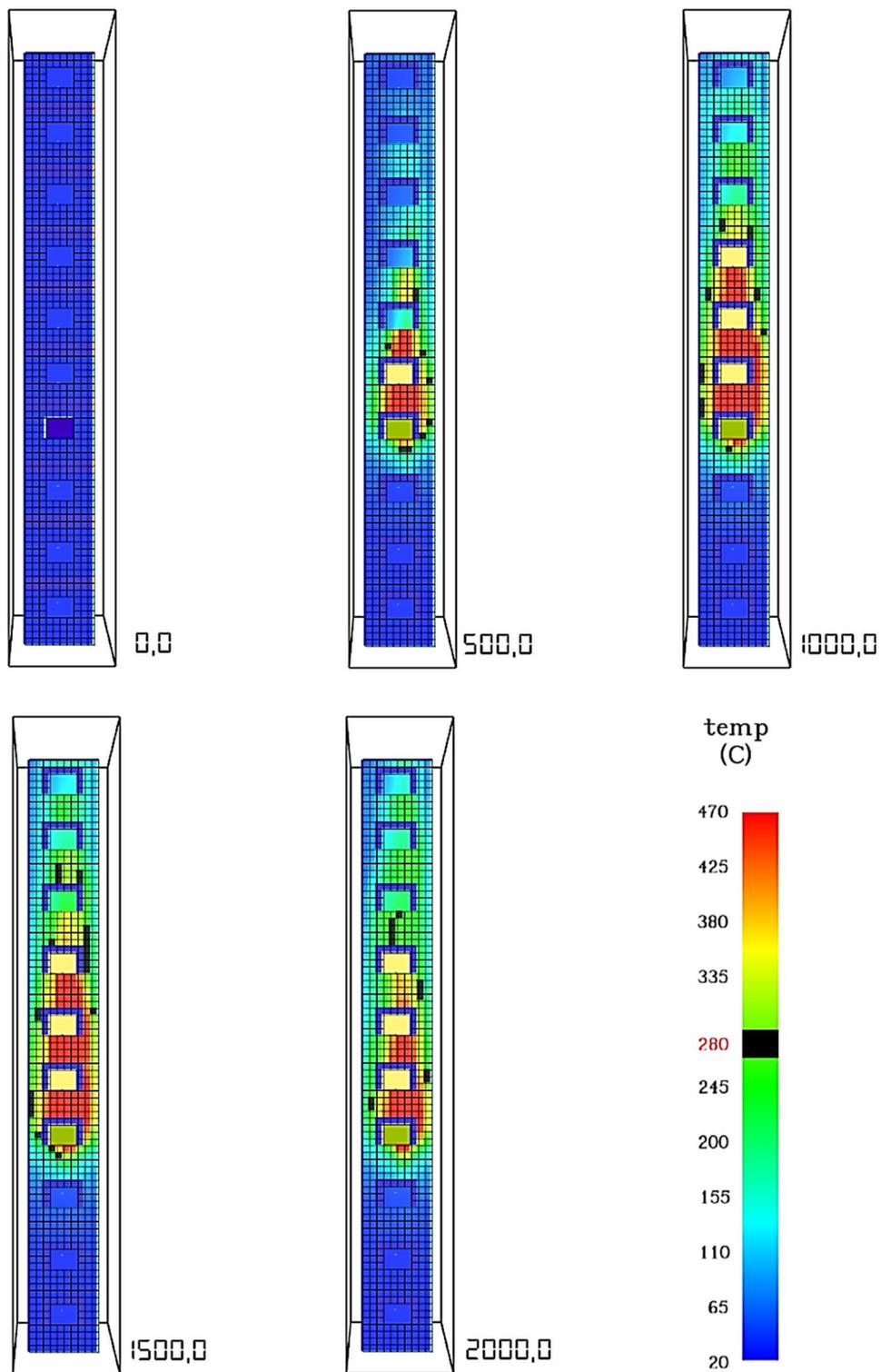


Figura 73 - Andamento della temperatura superficiale, alternativa

Come anticipato in precedenza, la diffusione dell'incendio in facciata è scarsamente ridotta, ed è possibile notarlo anche dall'andamento della curva

HRR risultante dell'incendio, la quale raggiunge un valore di picco di circa 9.000kW, a discapito dei 10.000kW raggiunti dalla soluzione priva di misure atte a prevenire la diffusione dell'incendio.

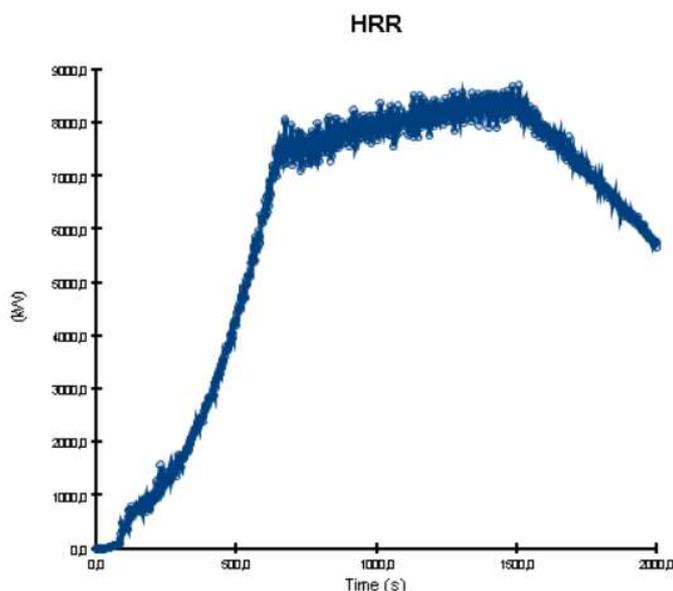


Figura 74 - Curva HRR risultante dell'incendio di facciata, alternativa



Come facilmente intuibile dai risultati la misura proposta ha scarsi risultati se utilizzata da sola; se però unita alle predisposizioni della *Guida* si contrasta notevolmente la diffusione dell'incendio in facciata. Se ad esempio viene combinata a fasce incombustibili orizzontali la propagazione viene doppiamente ritardata: in prima battuta l'incendio impiega più tempo a raggiungere la facciata dall'ambiente interno, e successivamente anche dopo aver raggiunto la facciata la sua diffusione viene ritardata dal materiale incombustibile.

CONCLUSIONI

Lo svolgimento di questo elaborato di tesi ha portato ad un'analisi del comportamento in caso di incendio di diverse configurazioni di facciata semplice di edifici di grande altezza, in modo specifico di facciate semplici con isolante esterno in poliuretano espanso.

Dai risultati ottenuti si evince innanzitutto che l'analisi con strumenti di FDS è un ottimo procedimento per studiare l'andamento di una qualunque tipologia di incendio. Questa tipologia di analisi infatti è un buon metodo da utilizzare nella prima fase di verifica delle misure antincendio adottate in modo tale da riuscire a comprendere quale alternativa risulta essere la migliore. Allo stesso tempo scegliendo questa metodologia è possibile ottenere un risparmio economico ed eventualmente raggiungere un livello superiore di sicurezza se paragonato ai test a larga scala. Allestire ed effettuare un test a larga scala è sicuramente più dispendioso dal punto di vista economico e di tempo rispetto ad una simulazione al pc, ed è anche per questo motivo che avendo la possibilità di effettuare un numero maggiore di prove è possibile ritrovare una configurazione migliore dal punto di vista della sicurezza antincendio.

È importante precisare però che per l'analisi in FDS della facciata scelta come oggetto di studio sono state effettuate una serie di semplificazioni, le quali hanno portato ad ottenere dei risultati approssimativi non completamente fedeli alla realtà, ne sono un esempio quella della stratigrafia, come spiegato nel paragrafo 2.2, o la diffusione interna dell'incendio: il focolare interno infatti è stato considerato completamente rivolto verso l'apertura, senza modellare e valutare lo sviluppo all'interno dell'ambiente, in quanto non rappresenta l'obiettivo di questa analisi.

Per questi motivi, soprattutto nel caso ad esempio di applicazione di un nuovo sistema di facciata, è preferibile come prima cosa effettuare una serie di analisi con le diverse possibili misure da adottare, così da ottenere dei risultati con una

buona approssimazione e solo dopo aver individuato la misura migliore da adottare per il caso specifico, è possibile effettuare un test a larga scala su un campione di facciata, così da comprendere l'andamento reale dell'incendio senza che i risultati siano mitigati dalle approssimazioni del modello, a partire dalle semplificazioni del modello stesso fino ad arrivare alla lettura dei risultati in cui molto spesso è difficile cogliere differenze a causa dell'approssimazione della mesh.

Concludendo: per quanto riguarda la *Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici civili*, essa è un buon punto di riferimento per la progettazione di misure atte a prevenire la diffusione dell'incendio in facciata al fine di limitarne la probabilità di propagazione, ma non sempre le misure in essa contenute sono sufficienti a tale scopo. Ne è un esempio il caso di facciata semplice con fascia di separazione orizzontale applicata seguendo le indicazioni dello schema 1, allegato A della Guida: tale misura è ottima al fine di prevenire la propagazione verticale dell'incendio, ma accelera notevolmente la diffusione orizzontale. Per questo motivo è sempre consigliabile effettuare analisi così da valutare se è necessario intervenire in facciata con misure preventive ulteriori oltre a quelle proposte dalla Guida. Infine, bisogna precisare che la Guida è applicabile solamente agli edifici di tipo civile, in particolare di civile abitazione, per cui non è possibile applicarla ad altre casistiche, come ad esempio edifici di tipo industriale, anche se in molti casi il carico di incendio risulta essere persino superiore, ma nonostante ciò la normativa non prevede misure da applicare.

ALLEGATI

- Allegato 1, cf. pag. 39

Superficie lorda del compartimento [m ²]	δ_{q1}	Superficie lorda del compartimento [m ²]	δ_{q1}
A < 500	1,00	2500 ≤ A < 5000	1,60
500 ≤ A < 1000	1,20	5000 ≤ A < 10000	1,80
1000 ≤ A < 2500	1,40	A ≥ 10000	2,00

Allegato 1 - Parametri per la definizione del fattore δ_{q1}

- Allegato 2, cf. pag. 39

Classi di rischio	Descrizione	δ_{q2}
I	Aree che presentano un basso rischio di incendio in termini di probabilità di innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	0,80
II	Aree che presentano un moderato rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione di un incendio e possibilità di controllo dell'incendio stesso da parte delle squadre di emergenza	1,00
III	Aree che presentano un alto rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	1,20

Allegato 2 - Parametri per la definizione del fattore δ_{q2}

- Allegato 3, cf. pag. 39

Misura antincendio minima		δ_{ni}
Controllo dell'incendio di livello di prestazione III (capitolo S.6)	rete idranti con protezione interna	δ_{n1} 0,90
	rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n2} 0,80
Controllo dell'incendio di livello di prestazione IV (capitolo S.6)	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna	δ_{n3} 0,54
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna	δ_{n4} 0,72
	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n5} 0,48
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n6} 0,64
Gestione della sicurezza antincendio di livello di prestazione II [1] (capitolo S.5)		δ_{n7} 0,90
Controllo di fumi e calore di livello di prestazione III (capitolo S.8)		δ_{n8} 0,90
Rivelazione ed allarme di livello di prestazione III (capitolo S.7)		δ_{n9} 0,85
Operatività antincendio di livello di prestazione IV (capitolo S.9)		δ_{n10} 0,81
[1] Gli addetti antincendio devono garantire la presenza continuativa durante le 24 ore.		

Allegato 3 - Parametri per la definizione del fattore δ_n

- Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata (governata dal materiale)



- Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata (governata manualmente, HRR)



- Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata (governata manualmente, mass loss rate)



- Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 1)



- Facciata con fascia di separazione orizzontale (schema 5)



- Soluzione con misure atte a limitare la propagazione dell'incendio in facciata



BIBLIOGRAFIA

- Anderson J, Bostrom L, McNamee RJ, Milovanovic B (2016) *Uncertainties in facade fire tests—measurements and modeling*. MATEC Web Conf 46:03002
- Agarwal, G, Wang, Y, Dorofeev, S. *Fire performance evaluation of cladding wall assemblies using the 16-ft high parallel panel test method of ANSI/FM 4880*. Fire and Materials. 2021; 45: 609– 623
- Babrauskas, V. (1996) *Façade fire tests: Towards an international test standard*. Fire Technol 32, 219–230.
- Bleyer, Jeremy & Pham, Duc Toan & de Buhan, Patrick. (2015). *Failure design of high-rise concrete panels under fire loading*. Engineering and Computational Mechanics. 168
- Bonner, Matthew & Rein, Guillermo. (2018). *Flammability and multi-objective performance of building façades: Towards optimum design*. International Journal of High-Rise Buildings. 7. 363-374.
- Čolić, A., Pečur, I.B. (2020) *Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades*. Fire Technol 56, 1725–1754
- Giraldo MP, Lacasta A, Avellaneda J, Burgos C (2013) *Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated facade systems*. MATEC Web Conf 9:03002
- Guillaume E, Fateh T, Schillinger R, Chiva R, Ukleja S (2018) *Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method*. Fire Mater 42(5):561–577
- Hirschler, MM. *Façade requirements in the 2021 edition of the US International Building Code*. Fire and Materials. 2021; 45: 586– 597

- Jeffs GMF, Klingelhofer HG, Prager FH, Rosteck H (1986) *Fire-performance of a ventilated facade insulated with a B2-classified rigid polyurethane foam*. Fire Mater 10:79–89
- Lalu, O, Lennon, T, Darmon, R, Anghel, I. *Performance of fire breaks installed within EPS-insulated façade systems*. Fire and Materials. 2021; 45: 638– 647
- Li, G.-Q., Zhang, C., & Jiang, J. (2018). *A Review on Fire Safety Engineering: Key Issues for High-Rise Buildings*. International Journal of High-Rise Buildings, 7(4), 265–285
- Mazzucchelli, Enrico & Lucchini, Angelo & Stefanazzi, Alberto. (2019). *Fire safety issues in high-rise building façades*. Tema. 5. 130-140.
- Morgan J. Hurley, (2016) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer, 718
- Nguyen, Kate & Weerasinghe, Pasindu & Mendis, Priyan & Ngo, Tuan. (2016). *Performance of modern building facades in fire: a comprehensive review*. Electronic Journal of Structural Engineering. 16
- Samuele Sassi, Paolo Setti, Giuseppe Amaro, Lamberto Mazziotti, Giuseppe Paduano, Piergiacomo Cancelliere and Mauro Madeddu, *Fire safety engineering applied to high-rise building facades*, MATEC Web of Conferences, 46 (2016) 04002
- Yuen, ACY, Chen, TBY, Li, A, et al. *Evaluating the fire risk associated with cladding panels: An overview of fire incidents, policies, and future perspective in fire standards*. Fire and Materials. 2021; 45: 663– 689
- Zhou, Biao & Yoshioka, Hideki & Noguchi, Takafumi & Wang, Kai. (2020). *Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite systems masonry façade fire according to JIS A 1310 method*. Fire and Materials. 45. 10.1002/fam.2880.