

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi incendi di facciata in edifici civili di grande altezza con gli strumenti della Fire Safety Engineering

Relatore

Prof. Roberto VANCETTI

Candidata

Alessia Maria DE TRIZIO

Correlatore

Ing. Emiliano CEREDA

Novembre 2024

Post nubila, sol.

Sommario

La presente tesi è volta ad analizzare nel dettaglio il comportamento degli incendi di facciata negli edifici civili di elevate dimensioni, grazie alle avanzate metodologie offerte dalla Fire Safety Engineering (FSE). Il focus è valutare l'efficacia degli strumenti forniti dalla simulazione numerica, come il Fire Dynamics Simulator (FDS), nella modellazione delle facciate degli edifici, con particolare attenzione alla propagazione degli incendi su quelle di edifici in cui si adottano soluzioni di efficientamento energetico ed in cui il rischio associato alla diffusione del fuoco è maggiore.

Infatti l'incremento delle prestazioni energetiche degli edifici, richiesto dalla normativa italiana in merito, comporta che le facciate siano progettate per essere sempre più isolate ed ermetiche da che ne consegue un aumento dei rischi in caso di incendio. Va considerato che, prima dell'introduzione di una regolamentazione specifica, l'aspetto della sicurezza antincendio è stato spesso trascurato rispetto all'obiettivo dell'efficientamento energetico. Negli ultimi anni, invece, il ruolo fondamentale della sicurezza antincendio nelle facciate è diventato fondamentale, soprattutto negli edifici di grande altezza, dove la propagazione verticale del fuoco può avere conseguenze devastanti.

Il lavoro di tesi analizza due interventi distinti di efficientamento energetico applicati a uno stesso edificio residenziale alto: il primo intervento realizzato nel 2009, prima dell'implementazione delle normative antincendio specifiche, e l'altro nel 2024, conforme alle più recenti regolamentazioni. Attraverso l'impiego del Fire Dynamics Simulator, sono riprodotti diversi scenari di incendio per confrontare il comportamento delle facciate in condizioni di presenza ed assenza di misure atte a limitare la propagazione delle fiamme. Le simulazioni includono la valutazione delle curve di rilascio di calore e dell'andamento della temperatura sulle facciate, permettendo di comprendere l'evoluzione temporale e spaziale dell'incendio, in funzione della loro tipologia costruttiva.

I risultati ottenuti dimostrano come le soluzioni costruttive orientate alla prevenzione antincendio, quali l'inserimento di fasce di separazione e barriere, siano efficaci nel limitare la diffusione delle fiamme in senso verticale, perchè riducono significativamente i tempi di propagazione dell'incendio, proteggono gli occupanti e facilitano le operazioni di soccorso. Al contrario, la mancanza di tali soluzioni in facciate progettate solo per il risparmio energetico, può portare a un rapido deterioramento della sicurezza dell'edificio e un aumento esponenziale del rischio.

La ricerca evidenzia l'importanza fondamentale di integrare le strategie di efficientamento energetico con rigorose misure di prevenzione incendi. Solo attraverso un approccio progettuale che tenga conto di entrambi gli aspetti è possibile garantire edifici non solo sostenibili dal punto di vista energetico, ma anche sicuri in caso di incendio, riducendo al minimo le perdite umane e materiali.

Abstract

This thesis aims to analyze in detail the behavior of façade fires in large-scale civil buildings, using the advanced methodologies provided by Fire Safety Engineering (FSE). The focus is to evaluate the effectiveness of tools provided by numerical simulation, such as the Fire Dynamics Simulator (FDS), in modeling building façades, with particular attention to the spread of fire on these façades and the interaction between energy efficiency solutions and the associated fire risk.

The increase in energy performance of buildings, as required by Italian regulations, means that façades are designed to be more and more insulated and airtight, which results in increased risks in the event of a fire. It must be considered that, prior to the introduction of specific regulations, fire safety was often overlooked in favor of energy efficiency goals. In recent years, however, the crucial role of fire safety in façades has become essential, especially in high-rise buildings, where the vertical spread of fire can have devastating consequences.

This thesis analyzes two distinct energy efficiency interventions applied to the same high-rise residential building: the first intervention carried out in 2009, before the implementation of specific fire safety regulations, and the second in 2024, in compliance with the latest regulations. Through the use of the Fire Dynamics Simulator, various fire scenarios are reproduced to compare the behavior of the façades under conditions with and without measures to limit the spread of flames. The simulations include the evaluation of heat release curves and temperature patterns on the façades, allowing for an understanding of the temporal and spatial evolution of the fire based on the construction type.

The results demonstrate how fire prevention-oriented construction solutions, such as the inclusion of separation strips and barriers, are effective in limiting the vertical spread of flames by significantly reducing fire propagation times, protecting occupants, and facilitating rescue operations. In contrast, the absence of such solutions in façades designed solely for energy savings can lead to a rapid deterioration of building safety and an exponential increase in risk.

The research highlights the fundamental importance of integrating energy efficiency strategies with strict fire prevention measures. Only through a design approach that considers both aspects can we ensure buildings that are not only energy-efficient but also safe in the event of a fire, minimizing both human and material losses.

Indice

Sommario	I
Abstract	II
1 Introduzione	1
1.1 Metodologia	1
2 Generalità	6
2.1 Le facciate: tipologie e criteri di resistenza al fuoco	9
2.1.1 Facciata semplice	10
2.1.2 Facciata continua o curtain wall	11
2.1.3 Facciata a doppia parete	13
2.1.4 Kit	17
2.2 Reazione al fuoco	17
3 Caso studio	20
3.1 Edifici di grande altezza	20
3.2 Efficientamento energetico	24
3.3 Modellazione	26
3.3.1 Definizione della curva RHR	27
3.3.2 Facciata priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio	31
3.3.3 Facciata con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio	40
3.3.4 Modellazione del serramento	43
4 Risultati	45
4.1 Focolare al piano 3°	46
4.1.1 Facciata priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio	48
4.1.2 Facciata con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio	57
4.2 Focolare al piano 13°	64
4.3 Facciata con pannello isolante con rivestimento in alluminio	69
4.3.1 Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio	69
4.3.2 Soluzione con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio	76
4.4 Comportamento del serramento	83

5 Conclusioni	98
A Appendice	100
Bibliografia	106

Elenco delle figure

1.1	Esempio modello a zone [2]	2
1.2	Esempio modello di campo [3]	3
1.3	Fasi di una simulazione numerica [1]	5
2.1	Scenari tipici di propagazione dell'incendio sulla facciata degli edifici [5]	7
2.2	Altezze delle fiamme con temperature segnate lungo la facciata in base al flusso d'aria [6]	7
2.3	Facciata semplice costituita da un unico strato di elementi forati [10]	10
2.4	Facciata semplice rivestita con elementi prefabbricati [10]	10
2.5	Facciata semplice in blocchi dotati di camera d'aria non ventilata per l'isolamento termico [10]	11
2.6	Esempio di facciata semplice resistente al fuoco [10]	11
2.7	Facciata continua o curtain wall [10]	12
2.8	Esempio di facciata continua resistente al fuoco [10]	12
2.9	Facciata a doppia parete non ventilata [10]	13
2.10	Facciate a doppia parete ventilate non ispezionabili [10]	13
2.11	Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile [10]	14
2.12	Esempio di parete esterna chiusa con intercapedine interrotta da elementi resistenti al fuoco [10]	15
2.13	Esempio di parete esterna chiusa con intercapedine priva di interruzioni resistente al fuoco [10]	16
2.14	Esempi di pareti esterne aperte resistenti al fuoco [10]	16
2.15	Nomenclatura europea reazione al fuoco [12]	19
3.1	Esempi di altezza antincendio, quote di piano e di compartimento, in sezione [10]	22
3.2	Fasi dell'incendio [18]	27
3.3	Andamento della curva RHR predefinita	31
3.4	Modello 3D dell'edificio esaminato	32
3.5	Modellazione edificio	33
3.6	Stratigrafia della facciata semplice	33
3.7	Modellazione della stratigrafia della facciata semplice	36
3.8	Caratterizzazione del focolare	37
3.9	Definizione della mesh	37
3.10	Posizionamento dei devices	38
3.11	Stratigrafia della facciata con pannello isolante con rivestimento in alluminio	39
3.12	Fasi della modellazione	40

3.13	Esempi di fascia di separazione orizzontale in facciata [10]	42
3.14	Esempi di fascia di separazione verticale in facciata [10]	42
3.15	Modellazione edificio con fasce di separazione	43
3.16	Posizionamento delle finestre	44
4.1	Posizionamento della slice 2D	45
4.2	Curva RHR in PyroSim	46
4.3	Temperatura all'interno dello spessore della parete in laterizio	47
4.4	Andamento della temperatura nel compartimento di innesco	47
4.5	Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	48
4.6	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 0 s	49
4.7	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 200 s	50
4.8	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 400 s	50
4.9	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 600 s	51
4.10	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 800 s	51
4.11	Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 1000 s	52
4.12	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 0 s	53
4.13	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 200 s	53
4.14	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 400 s	54
4.15	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 600 s	54
4.16	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 800 s	55
4.17	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 1000 s	55
4.18	Andamento temperatura gas caldi al 3° piano rilevata dal device	56
4.19	Andamento temperatura gas caldi al 3° piano rappresentata dalla slice	56
4.20	Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	57
4.21	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 0 s	58
4.22	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 200 s	58
4.23	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 400 s	59
4.24	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 600 s	59

4.25	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 800 s	60
4.26	Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 1000 s	60
4.27	Andamento temperatura gas caldi al 3° piano con fasce di separazione	61
4.28	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 0 s	61
4.29	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 200 s	62
4.30	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 400 s	62
4.31	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 600 s	63
4.32	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 800 s	63
4.33	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 1000 s	64
4.34	Propagazione dei fumi dal 13° piano dell'edificio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	65
4.35	Andamento temperatura gas caldi al 13° piano	65
4.36	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 0 s	66
4.37	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 200 s	66
4.38	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 400 s	67
4.39	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 600 s	67
4.40	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 800 s	68
4.41	Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 1000 s	68
4.42	Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio senza soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	69
4.43	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 0 s	70
4.44	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 200 s	70
4.45	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 400 s	71
4.46	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 600 s	71
4.47	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 800 s	72
4.48	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 1000 s	72

4.49	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 0 s	73
4.50	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 200 s	73
4.51	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 400 s	74
4.52	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 600 s	74
4.53	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 800 s	75
4.54	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 1000 s	75
4.55	Andamento temperatura gas caldi al 3° piano con pannello insolante con rivestimento in alluminio rilevata dal device	76
4.56	Andamento temperatura gas caldi al 3° piano con pannello insolante con rivestimento in alluminio rappresentata dalla slice	76
4.57	Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	77
4.58	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0 s	77
4.59	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 200 s	78
4.60	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 400 s	78
4.61	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 600 s	79
4.62	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 800 s	79
4.63	Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 1000 s	80
4.64	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0 s	80
4.65	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 200 s	81
4.66	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 400 s	81
4.67	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 600 s	82
4.68	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 800 s	82
4.69	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 1000 s	83
4.70	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 0 s	84
4.71	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 200 s	85

4.72	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 400 s	85
4.73	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 600 s	86
4.74	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 800 s	86
4.75	Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 1000 s	87
4.76	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello di rivestimento e fasce di separazione a 0 s	87
4.77	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 200 s	88
4.78	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 400 s	88
4.79	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 600 s	89
4.80	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 800 s	89
4.81	Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 1000 s	90
4.82	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 0 s	91
4.83	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 200 s	91
4.84	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 400 s	92
4.85	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 600 s	92
4.86	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 800 s	93
4.87	Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 1000 s	93
4.88	Propagazione dei fumi del modello semplificato a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s	94
4.89	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 0 s	95
4.90	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 200 s	95
4.91	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 400 s	96
4.92	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 600 s	96
4.93	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 800 s	97
4.94	Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 1000 s	97
A.1	Caratteristiche termiche della muratura in blocchi di laterizio alveolato	100

A.2	Caratteristiche termiche dell'isolante termico tipo EPS	101
A.3	Caratteristiche termiche dell'intonaco esterno	101
A.4	Caratteristiche termiche della fascia di separazione	102
A.5	Caratteristiche di reazione della fascia di separazione	102
A.6	Caratteristiche termiche del pannello di rivestimento in alluminio . .	103
A.7	Modellazione della stratigrafia della facciata con pannello di rivesti- mento in alluminio	103
A.8	Caratteristiche termiche del vetro	104
A.9	Impostazione del solid phase device della finestra	104
A.10	Impostazione del controllo della finestra	105

Elenco delle tabelle

2.1	Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento [10]	18
2.2	Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento [10]	18
3.1	Classificazione degli edifici in funzione della loro altezza antincendi [10]	21
3.2	Valori limite di trasmittanza termica [15]	25
3.3	Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache verticali [17]	26
3.4	Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura [17]	26
3.5	Velocità massima di rilascio di calore [19]	28
3.6	Focolari predefiniti [10]	30
3.7	Valori della curva RHR predefinita	31
3.8	Caratteristiche termiche della muratura in blocchi di laterizio alveolato	35
3.9	Caratteristiche termiche dell'isolante termico tipo EPS	35
3.10	Caratteristiche termiche dell'intonaco esterno	35
3.11	Caratteristiche termiche del pannello isolante con rivestimento in alluminio	40
3.12	Gruppi di materiali per la reazione al fuoco degli elementi delle chiusure d'ambito [10]	41
3.13	Caratteristiche termiche della fascia di separazione	42
3.14	Caratteristiche termiche del vetro	44

Capitolo 1

Introduzione

Le architetture contemporanee, caratterizzate da complessità di forme e funzioni, richiedono involucri ad alta efficienza energetica e sistemi di facciata innovativi e ciò vale sia per le nuove costruzioni che per gli edifici esistenti.

Tutto ciò rende gli involucri praticamente ermetici, dove le fiamme trovano condizioni ideali per la loro propagazione. Negli ultimi anni, infatti, gli incendi hanno dimostrato la necessità di migliorare le conoscenze tecniche ed anche le procedure pratiche nella progettazione dei sistemi di facciata, nuovi ed esistenti, per garantire anche la sicurezza antincendio degli stessi. Purtroppo, però, oltre all'aspetto tecnico e progettuale, anche il quadro normativo si è incentrato soprattutto sulla sostenibilità ambientale e soluzioni tecnico-costruttive volte al risparmio energetico. Di conseguenza, è diventato fondamentale un aggiornamento delle normative che regolano la progettazione delle facciate e degli involucri edilizi. Questo ha portato allo sviluppo di nuovi standard che tengono conto della necessità di garantire la sicurezza antincendio senza compromettere l'efficienza energetica degli edifici. Tuttavia, queste normative sono ancora in evoluzione, e spesso si scontrano con la crescente richiesta di edifici sempre più sostenibili ed efficienti dal punto di vista energetico. Di fatto vi è stato un aumento del rischio incendi di facciata per l'adozione di maggiori spessori degli isolanti termici e maggior impiego di materiali combustibili; anche la durata del potenziale incendio ed i tempi di spegnimento sono di conseguenza aumentati e si è incrementato anche il rischio di propagazione del fuoco sulle facciate dell'edificio, verso il suo interno e verso le costruzioni limitrofe.

È facile comprendere come tali incendi possano comportare anche notevoli perdite in termini di vite umane e danni a cose, soprattutto nel caso degli edifici di grande altezza. Ad una maggiore elevazione corrispondono precise problematiche in caso di incendio: maggiore difficoltà nel raggiungere ed evacuare gli ultimi piani; maggior numero di utenti e quindi necessità di un maggior numero di soccorritori; tempistiche differenti per garantire la riuscita dell'intervento ed ancora un più alto fattore di rischio e di conseguenza probabilità di danni maggiori. Ecco perché è diventato centrale lo studio e l'adozione di opportune soluzioni tecniche antincendio riguardo le chiusure opache e trasparenti degli edifici.

1.1 Metodologia

Generalmente nella progettazione di edifici si segue lo schema normativo, volto a garantire un determinato livello di sicurezza; schema di regole tecniche e disposizio-

ni legislative a “maglie larghe” adattabile ad ogni contesto.

La nuova sfida è quella per cui nella progettazione della sicurezza antincendio, invece, occorre seguire un approccio prestazionale più specifico volto al raggiungimento di obiettivi prefissi piuttosto che al rispetto delle prescrizioni normative. Questo modus operandi si traduce nella *Fire Safety Engineering* (FSE) che permette ai progettisti, valutando tutti i rischi associati, di sviluppare soluzioni mirate al raggiungimento delle prestazioni desiderate ed offrendo anche vantaggi economici. Questo metodo è impiegato anche quando l’approccio prescrittivo risulterebbe inapplicabile, come nel caso di edifici storici o strutture complesse.

Questo tipo di progettazione utilizza modelli di calcolo adeguati a predire l’evoluzione degli incendi, come ad esempio il *Fire Dynamics Simulator* (FDS) sviluppato dal *National Institute of Standards and Technology* (NIST). La forza di questo modello è la flessibilità, per cui si possono eseguire simulazioni di incendi molto complessi, imputando vari dati come la geometria dell’area di calcolo, le condizioni di ventilazione, il tipo e la quantità di combustibile e le curve RHR (Heat Release Rate).

I limiti invece sono dati dalla difficile validazione sperimentale dei modelli, a causa della caducità delle prove; la grande varietà di modelli esistenti; l’elevata potenza di calcolo necessaria, non sempre sostenuta dai comuni PC. [1]

I modelli deterministici utilizzati per simulare gli incendi si basano sui principi fondamentali della chimica e della fisica, come la conservazione della massa, dell’energia e della quantità di moto e si dividono in due categorie principali:

- modelli a zone

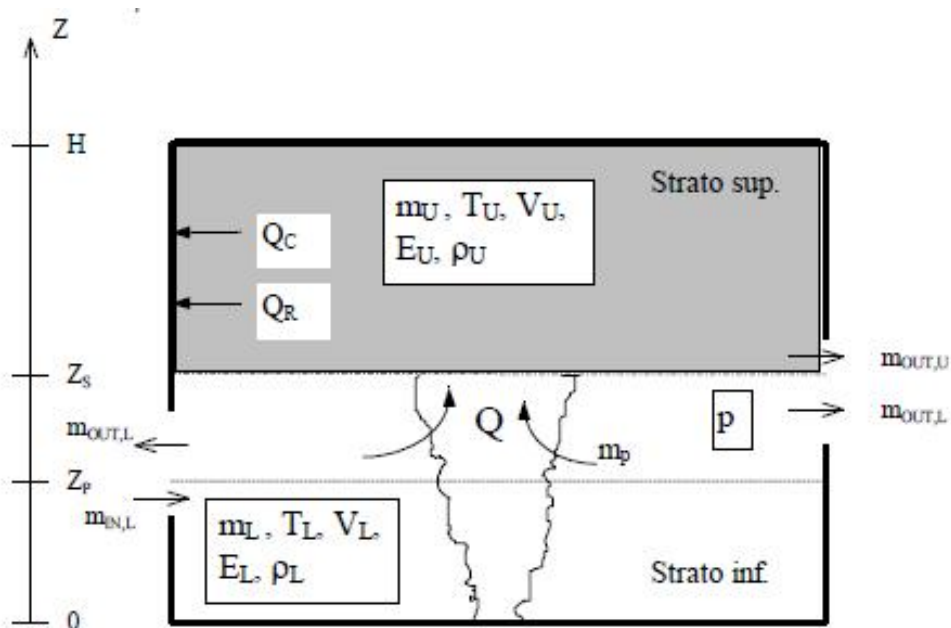


Fig. 3 - Schema di compartimento mediante un modello a due zone

Figura 1.1: Esempio modello a zone [2]

- modelli di campo

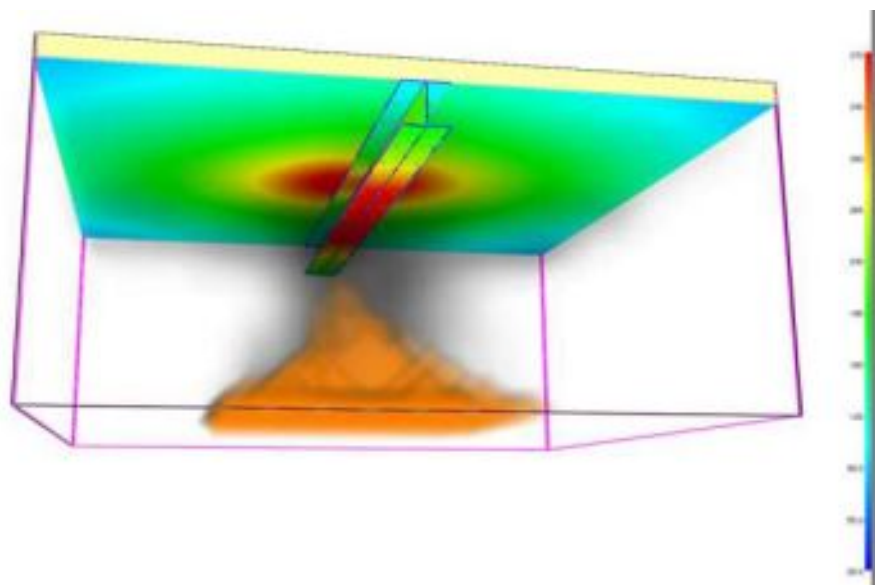


Figura 1.2: Esempio modello di campo [3]

I modelli a zone simulano l'evoluzione di un incendio in spazi confinati risolvendo le equazioni di conservazione della massa e dell'energia per un numero limitato di grandi aree all'interno dell'ambiente. Per applicare le equazioni differenziali ordinarie, che derivano dalle leggi fondamentali della conservazione di massa ed energia, sono necessarie alcune semplificazioni come:

- il pennacchio di fumo funge da pompa di calore, sollevando le particelle di fumo e riscaldando la zona superiore
- il fumo si stratifica in due strati distinti: uno superiore, contenente i prodotti della combustione, ed uno inferiore più fresco e privo di fumo
- non viene considerata la propagazione delle fiamme agli oggetti vicini; invece, gli oggetti brucianti sono modellati utilizzando la loro curva di rilascio termico (RHR)

Questi modelli calcolano nel tempo vari parametri come le temperature medie dei due strati di aria, la posizione dell'interfaccia tra le zone, la concentrazione di ossigeno e monossido di carbonio, la visibilità e il flusso d'aria attraverso le aperture verso l'esterno o altri locali. I modelli a zone sono generalmente applicati ad ambienti con geometrie semplici, anche se interconnessi e con aperture. Rispetto ai modelli di campo, richiedono un numero minore di dati di input, tra cui la geometria del compartimento e le dimensioni delle aperture. Le proprietà termiche delle pareti sono necessarie per stimare la dispersione del calore.

Nei modelli a zone, l'andamento dell'incendio è determinato dalla curva del tasso di rilascio termico (RHR) opportunamente costruita. Al contrario, nei modelli di campo, è il modello stesso a generare la curva di rilascio termico e a costruire la storia dell'incendio. Questi ultimi offrono una rappresentazione più dettagliata dell'ambiente, suddividendo lo spazio in una griglia tridimensionale di volumi di controllo, all'interno dei quali vengono risolte le equazioni per il trasferimento di calore e per i processi di combustione. Questi modelli permettono di studiare geometrie più

complesse rispetto ai modelli a zone, che sono limitati a forme assimilabili a parallelepipedi. I modelli di campo predicono nel tempo la distribuzione dettagliata dei prodotti della combustione (fiamme, fumo, anidride carbonica, monossido di carbonio), le componenti del calore trasmesso, la curva RHR, la temperatura delle pareti, la propagazione del calore attraverso le pareti e le aperture, oltre al movimento del fumo e dell'aria causato dall'incendio, dal vento e dai sistemi di ventilazione.

Entambi i modelli vengono studiati attraverso la fluidodinamica computazionale (CFD), ramo della meccanica dei fluidi, che prevede il comportamento dei fluidi in movimento, il trasferimento di calore e materia e le reazioni chimiche correlate, risolvendo numericamente le equazioni che governano questi fenomeni. Questo tipo di studio utilizza il metodo degli elementi finiti, che suddivide lo spazio in un gran numero di elementi e risolve le equazioni di Navier-Stokes in ciascuno di essi. Maggiore è il numero di elementi, più dettagliata sarà la soluzione.

I codici commerciali di fluidodinamica computazionale sono strutturati generalmente in tre parti principali: pre-processore, solutore e post-processore, ognuna delle quali gestisce una fase della simulazione.

- **Pre-Processore**

Il pre-processore permette di descrivere geometricamente il dominio di integrazione, suddividerlo spazialmente attraverso la generazione di una griglia adeguata e specificare le caratteristiche delle sue frontiere. Questo dominio generato viene poi importato nel solutore.

- **Solutore**

Il solutore consente di impostare le condizioni iniziali e al contorno, effettuare tutte le scelte modellistiche e numeriche necessarie per definire correttamente il problema. Integra numericamente le equazioni di trasporto accoppiate, approssimando le variabili di flusso sconosciute e risolvendo il sistema di equazioni algebriche risultante mediante discretizzazione temporale e spaziale.

- **Post-Processore**

Il post-processore permette di visualizzare ed elaborare i risultati ottenuti. Consente, ad esempio, di visualizzare la geometria del dominio e la sua griglia, rappresentare graficamente i campi vettoriali e scalari, e, per le simulazioni in transitorio, creare animazioni che mostrano l'evoluzione dinamica delle grandezze di interesse.

Nella simulazione di incendi con CFD, i principali input richiesti includono la geometria del dominio di integrazione, le caratteristiche dei materiali delle frontiere e i parametri della curva RHR, che riflette il potenziale termico totale dei materiali combustibili ed anche la velocità di rilascio del calore durante la combustione. I software CFD commerciali possono gestire incendi in ambienti non confinati, confinati con eventuali aperture o semi-confinati. La forma del dominio spesso suggerisce il tipo di griglia più adatto per la discretizzazione. Le proprietà di trasporto dei materiali delle frontiere sono cruciali per valutare la dispersione termica.

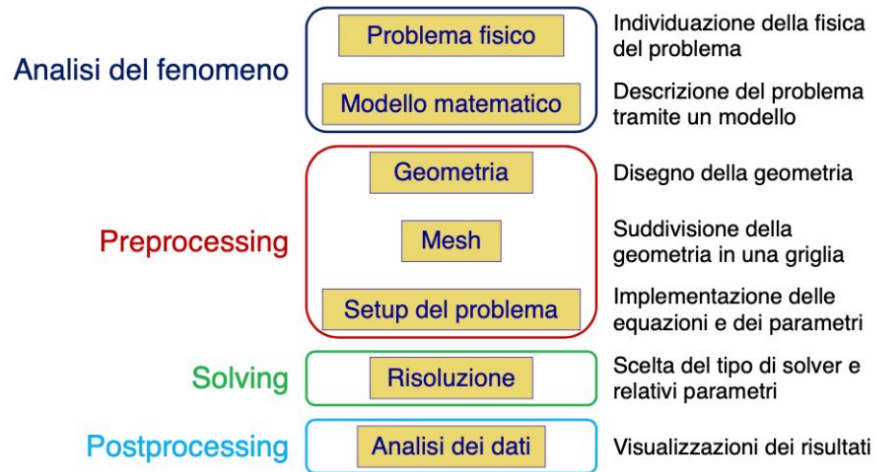


Figura 1.3: Fasi di una simulazione numerica [1]

La Fire Safety Engineering e l'utilizzo di strumenti avanzati come i modelli di simulazione degli incendi e la fluidodinamica computazionale offrono soluzioni innovative per affrontare queste sfide e garantire la sicurezza degli edifici, senza compromettere le prestazioni energetiche e ambientali.

Capitolo 2

Generalità

Il focus sempre più rivolto alle normative in materia di sostenibilità ambientale e l'implementazione di soluzioni tecniche per il risparmio energetico, si riflette anche sulle regolamentazioni per la sicurezza antincendio che vuole garantire una progettazione dell'involucro edilizio responsabile e sicura.

Le chiusure verticali devono assicurare, per un periodo specifico, la protezione dal fuoco della struttura portante e questo si ottiene utilizzando materiali a bassa conducibilità termica, trattati per essere incombustibili, stabili a elevate temperature e resistenti a forti getti d'acqua, garantendo così la sicurezza strutturale.[4]

In Italia, la costruzione degli involucri esterni degli edifici residenziali ha tradizionalmente implicato l'uso di pareti esterne in pietra, laterizio o calcestruzzo, ben ancorate ai solai, i quali erano anche progettati per avere buone proprietà di resistenza al fuoco. Con l'introduzione di nuove tipologie di facciate, per soddisfare le esigenze di comfort termico e risparmio energetico, questi involucri sono spesso rivestiti con materiali isolanti o dotati di intercapedini per garantire la ventilazione necessaria al benessere degli occupanti, e possono anche includere ampie superfici vetrate. Tuttavia, tali facciate potrebbero facilmente essere attraversate dal fuoco e favorire la sua diffusione ad altri compartimenti vicini.

Gli scenari tipici di propagazione dell'incendio sulle facciate con materiali combustibili possono essere suddivisi in tre categorie principali[5]:

1. propagazione dell'incendio esterno per irraggiamento, dall'edificio contiguo separato, alla facciata combustibile
2. propagazione dell'incendio esterno lungo la facciata combustibile da fonti di incendio poste nelle vicinanze della costruzione stessa, per irraggiamento oppure per esposizione diretta alle fiamme (rifiuti sui balconi, autovetture parcheggiate etc.)
3. incendio interno all'edificio, che si propaga attraverso le aperture nella facciata (finestre, porte ecc.) su piani superiori

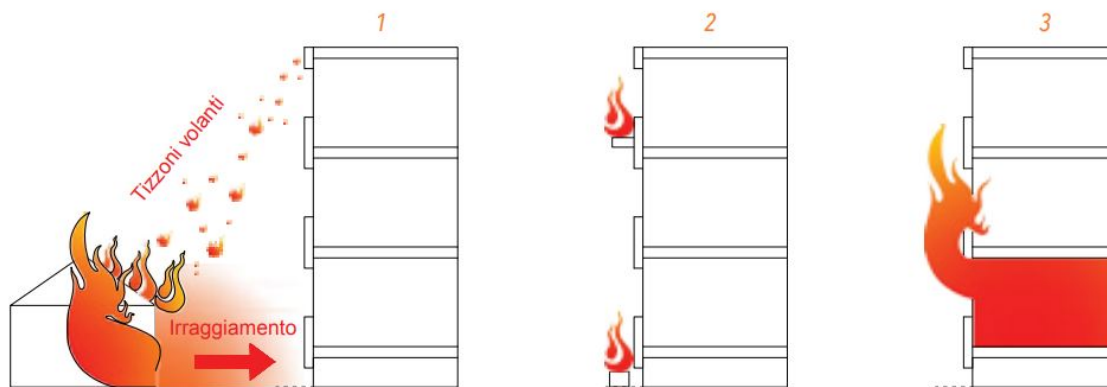


Figura 2.1: Scenari tipici di propagazione dell'incendio sulla facciata degli edifici [5]

Nell'ultimo scenario descritto, se non si interviene rapidamente per spegnere l'incendio, esso può evolvere fino al "flashover" e le fiamme propagarsi velocemente alle facciate attraverso le aperture.

Secondo alcuni studi, dopo la rottura di un vetro di una finestra, le fiamme possono salire fino a 5 m oltre il bordo dell'apertura, a seconda delle specifiche condizioni di flusso d'aria, indipendentemente dal tipo di sistema di facciata e dai materiali impiegati. Successivamente, quando le fiamme raggiungono la superficie esterna della facciata, la loro ulteriore propagazione è fondamentalmente influenzata dalle proprietà e dalle caratteristiche della facciata stessa.[5]

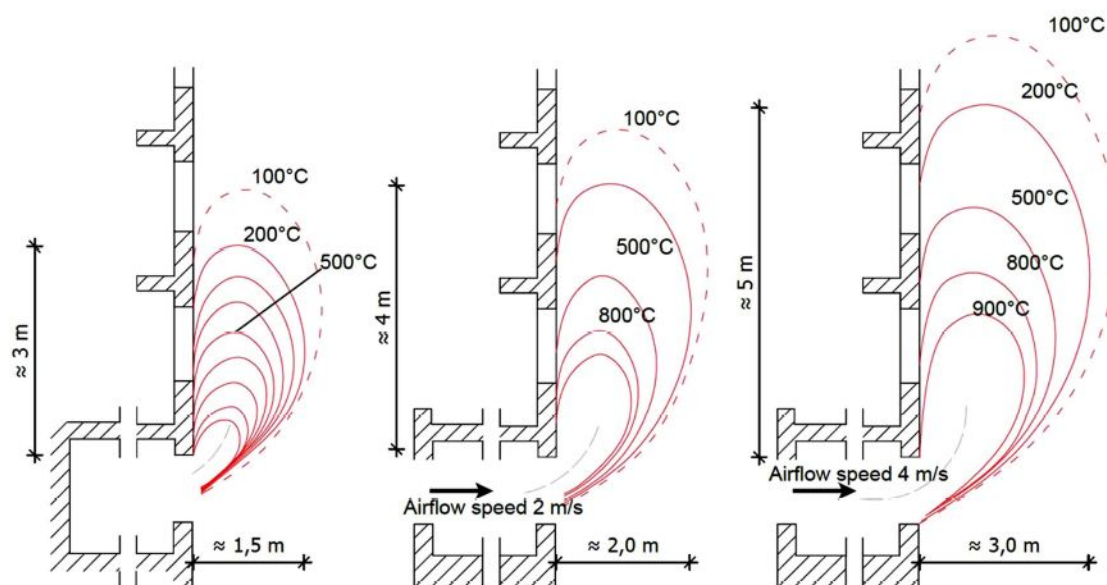


Figura 2.2: Altezze delle fiamme con temperature segnate lungo la facciata in base al flusso d'aria [6]

Le principali modalità di propagazione del fuoco che si verificano quando un incendio origina all'interno di un edificio e coinvolge la facciata possono concretizzarsi in[6]:

- fiamme che si sprigionano all'interno del locale, dopo aver fatto esplodere le superfici vetrate delle aperture, fuoriescono all'esterno e raggiungono i piani superiori, causando potenziali incendi secondari

- fiamme uscite dall'interno dell'edificio si diffondono direttamente lungo la superficie combustibile esterna della facciata
- se la facciata dell'edificio è ventilata, le fiamme possono propagarsi attraverso gli spazi vuoti o intercapedini presenti nella facciata stessa
- nel caso di rivestimenti isolanti esterni applicati all'involucro dell'edificio, le fiamme che escono dall'area incendiata possono, a causa del calore emesso, degradare il materiale di protezione incombustibile e penetrare all'interno del pacchetto isolante, favorendo la propagazione del fuoco e il distacco del rivestimento esterno
- caduta di detriti incandescenti o parti della facciata, a causa del fuoco esterno, generando ulteriori incendi secondari vicino all'edificio

È importante, comunque, fare una distinzione tra incendi poco ventilati o sotto-ventilati (controllati dalla ventilazione) e incendi ben ventilati o sopra-ventilati.

Nel caso di incendi poco ventilati, il combustibile non bruciato all'interno del locale esce dopo la rottura della finestra e può accendersi all'esterno, generando fiamme lungo la facciata dell'edificio. Queste fiamme possono produrre calore sufficiente a propagare l'incendio tra i vari piani dell'edificio.

Al contrario, negli incendi ben ventilati, la maggior parte del combustibile presente ha abbastanza ossigeno per bruciare all'interno del comparto, quindi le fiamme proiettate all'esterno attraverso le aperture sono meno significative rispetto a quelle degli incendi poco ventilati.

In sintesi, un incendio che si verifica in un locale con scarsa ventilazione ha maggiori probabilità di propagarsi tra i piani di un edificio rispetto a un incendio ben ventilato.[7] In ogni caso, quando le fiamme raggiungono lo strato esterno della facciata, l'ulteriore propagazione del fuoco è influenzata dalle caratteristiche dell'involucro e dipendente dai seguenti fattori[8]:

- proprietà di reazione al fuoco dei materiali che compongono il sistema di facciata, le quali influenzano la velocità di propagazione delle fiamme sull'involucro dell'edificio
- aperture di facciata, come le finestre, che spesso causano la diffusione dell'incendio in diversi spazi del fabbricato, sia interni che esterni
- presenza di cavità in quanto possono favorire l'estensione delle fiamme a causa dell'effetto camino. Indipendentemente dalle proprietà dei materiali, se non vengono utilizzate apposite barriere antincendio, questo effetto può provocare una rapida propagazione verticale del fuoco, aggravata dal fatto che inizialmente l'incendio non è visibile poiché nascosto sotto il rivestimento della facciata
- mancanza di barriere alla propagazione dell'incendio sulla facciata e/o sulle facciate adiacenti

- presenza di caratteristiche geometriche e di ventilazione nella facciata che possono agevolare la diffusione dell'incendio e la sua propagazione sia verso l'alto che in direzione orizzontale
- possibilità di distacco di parti bruciate della facciata e coinvolgimento di sezioni ancora intatte

2.1 Le facciate: tipologie e criteri di resistenza al fuoco

Per comprendere meglio il fenomeno della propagazione degli incendi in facciata è necessario analizzare le diverse tipologie di facciate che possono costituire l'involucro esterno degli edifici. La loro definizione si trova all'interno della *Lettera Circolare del 15 aprile 2013 n°5043 - Guida tecnica su "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili"*, documento redatto al fine di limitare la possibilità che un incendio iniziato all'interno dell'edificio si propaghi ad altri compartimenti tramite fiamme o fumi che escono da aperture, cavità verticali o interstizi tra la facciata e la struttura dell'edificio, sia in senso orizzontale che verticale.

Lo stesso documento dà direttive al fine di ridurre il rischio che un incendio esterno, come quello di un edificio vicino o a livello stradale, incendi la facciata e si diffonda ulteriormente, e per evitare o minimizzare la caduta di parti della facciata che potrebbero ostacolare l'evacuazione sicura degli occupanti e l'intervento delle squadre di soccorso.

Si definisce facciata: *"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."*[9]

Per ridurre il rischio di propagazione del fuoco su una facciata, è possibile adottare diverse misure come:

- utilizzare materiali che abbiano una buona reazione al fuoco, preferibilmente incombustibili
- progettare elementi ignifughi per suddividere l'edificio in compartimenti, con un'attenzione particolare al loro collegamento con i sistemi di facciata e di copertura
- implementare misure che limitino la propagazione del fuoco attraverso le aperture della facciata

La *Guida*¹ stabilisce innanzitutto le regole generali sui requisiti di resistenza al fuoco e compartimentazione. In particolare, non sono richiesti requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi della facciata appartenenti a compartimenti con un carico d'incendio specifico, esclusi gli isolanti presenti, pari o inferiore a 200 MJ/mq.

Inoltre, non sono necessari requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi della facciata di compartimenti con un carico d'incendio specifico superiore a 200 MJ/mq, se questi compartimenti sono dotati di un sistema di spegnimento ad attivazione automatica.

¹Lettera Circolare del 15 aprile 2013 n°5043 - Guida tecnica su "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili"

Di seguito, viene presentata un'analisi delle diverse tipologie di facciata, esaminando il loro comportamento al fuoco e le possibili strategie di intervento.

2.1.1 Facciata semplice

La *Lettera Circolare n°5043* definisce la facciata semplice come una struttura, anche multistrato, i cui strati ed elementi funzionali sono assemblati in continuità senza intercapedini d'aria. Sono considerati un unico strato gli elementi forati come laterizi, blocchetti in calcestruzzo, vetro-camera, ecc.

Le facciate semplici includono anche quelle rivestite con elementi prefabbricati, fissati con legante umido o a secco, aderenti alla parete esistente sottostante. Questo comprende i cappotti termici, in cui il materiale isolante è applicato sulla superficie esterna con materiale collante o tasselli appositi, e le facciate in mattoni o blocchi con camera d'aria per l'isolamento termico.

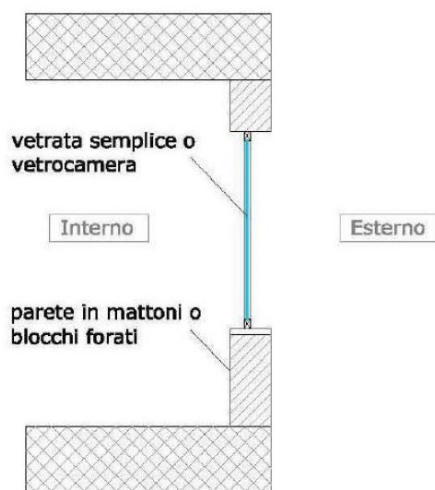


Figura 2.3: Facciata semplice costituita da un unico strato di elementi forati [10]

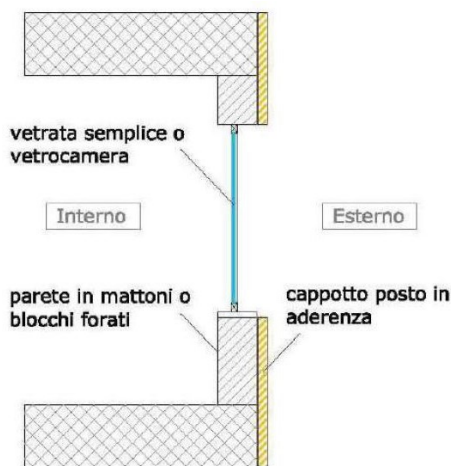


Figura 2.4: Facciata semplice rivestita con elementi prefabbricati [10]

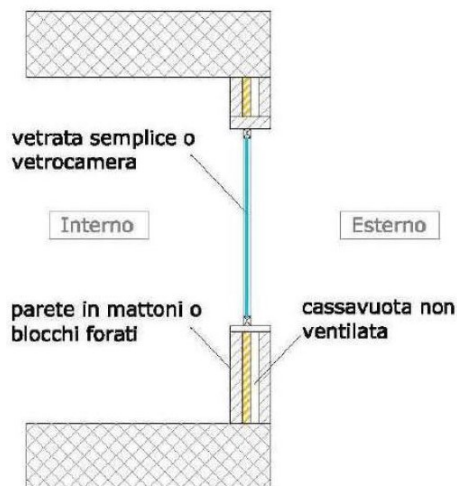


Figura 2.5: Facciata semplice in blocchi dotati di camera d'aria non ventilata per l'isolamento termico [10]

Per questa specifica tipologia di facciata, è necessario installare, in corrispondenza di ogni solaio e muro trasversale, una fascia composta da uno o più elementi costruttivi con classe di resistenza al fuoco E60-ef.[9]

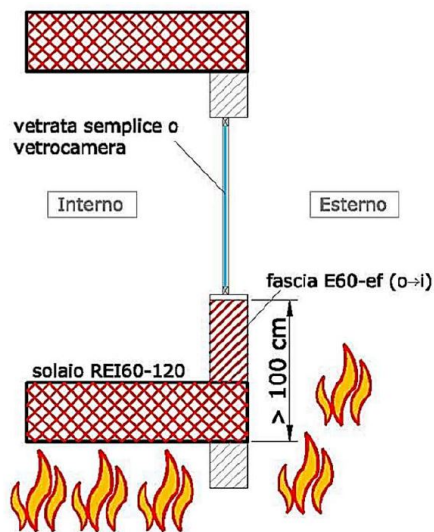


Figura 2.6: Esempio di facciata semplice resistente al fuoco [10]

2.1.2 Facciata continua o curtain wall

La facciata continua è caratterizzata da una facciata esterna non portante, indipendente dall'ossatura strutturale dell'edificio e viene solitamente installata davanti alla testa dei solai e dei muri trasversali. Una facciata continua comprende telai, pannelli, superfici vetrate, sigillature, sistemi di fissaggio, giunti e membrane di tenuta, tra gli altri elementi.

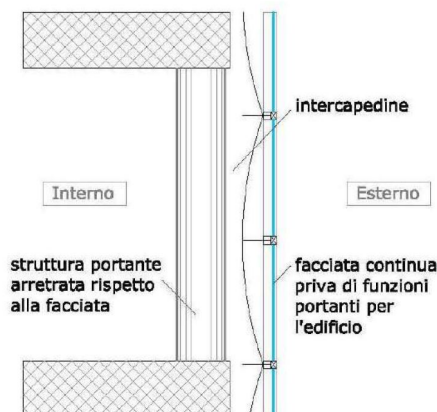


Figura 2.7: Facciata continua o curtain wall [10]

Essa è generalmente costituita da una intelaiatura di elementi strutturali lineari interconnessi, fissata alla struttura di supporto dell'edificio e riempita per formare una pelle continua leggera che svolge tutte le normali funzioni di una parete esterna senza avere un ruolo portante. La facciata continua mantiene una continuità con l'involucro dell'edificio, che di solito è arretrato rispetto al piano della facciata.² Solitamente progettata con una struttura in alluminio estruso, ma può anche essere realizzata con intelaiatura in legno, acciaio, PVC o altri materiali, la facciata continua è spesso tamponata con pannelli di vetro. Altre opzioni comuni per il rivestimento includono materiali come pietra, pannelli metallici o in legno, strisce di vari materiali come persiane o frangisole e finestre apribili. Per le facciate di tipo curtain walls, o in tutti i casi in cui l'elemento di facciata non è direttamente supportato dal solaio, è richiesto che il collegamento della facciata ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti abbia una resistenza al fuoco di classe EI60. Le sezioni della facciata che devono soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco possono includere aperture, a condizione che, in caso di incendio, siano dotate di serrande tagliafuoco automatiche o sistemi equivalenti che garantiscano lo stesso livello di resistenza al fuoco previsto per le altre parti della facciata.[9]

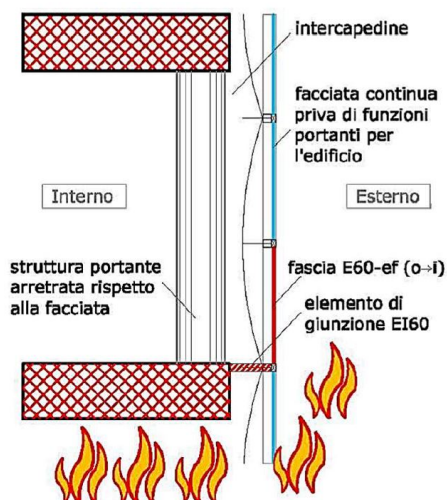


Figura 2.8: Esempio di facciata continua resistente al fuoco [10]

²UNI-EN 13119:2007, EN 13830

2.1.3 Facciata a doppia parete

Si definisce facciata a doppia parete una facciata multistrato, in cui gli strati e/o gli elementi funzionali sono separati da una cavità o intercapedine d'aria, chiamata "corridoio d'aria" o "spazio intermedio". Le facciate a doppia parete possono essere ventilate o non ventilate, con pareti opache o vetrate. In particolare, le facciate ventilate si suddividono ulteriormente in ispezionabili e non ispezionabili. Dal punto di vista della sicurezza antincendio, la facciata a doppia parete non ventilata è paragonabile a una facciata semplice.

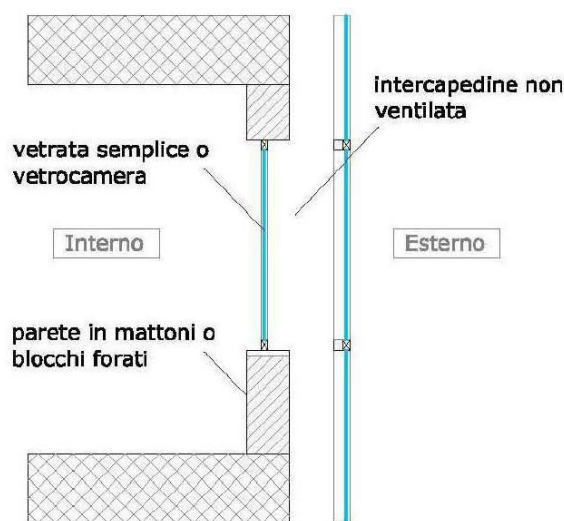


Figura 2.9: Facciata a doppia parete non ventilata [10]

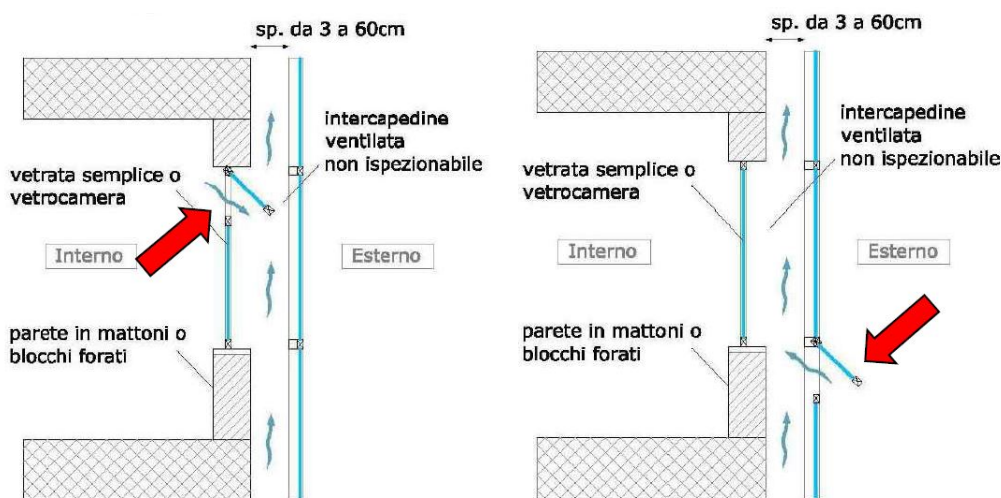


Figura 2.10: Facciate a doppia parete ventilate non ispezionabili [10]

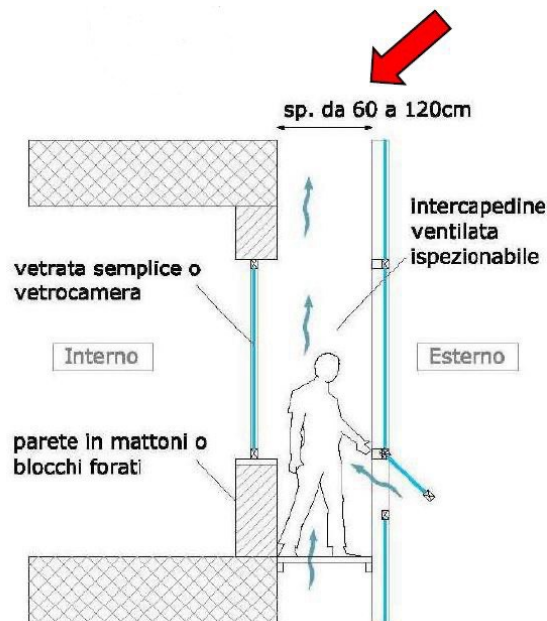


Figura 2.11: Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile [10]

Il distinguo tra la facciata ventilata non ispezionabile ed ispezionabile sta nello spessore dell'intercapedine. Per la prima tipologia, con circolazione d'aria nell'intercapedine di tipo meccanico e/o naturale, l'intercapedine può avere spessori variabili tra 3 cm e 60 cm, con uno spessore tipico compreso tra 5 e 10 cm. Questo tipo di facciata può avere una doppia parete verticale sia verso l'interno che verso l'esterno. Nella parte ventilata ispezionabile, l'intercapedine d'aria può avere spessori superiori a 60 cm. Quando questa supera i 120 cm, le due pareti sono considerate, dal punto di vista della sicurezza antincendio, come due sistemi facciata indipendenti. In questo caso la facciata è generalmente costituita da una parete esterna vetrata e una parete interna, che può essere semplice con o senza infissi. L'intercapedine tra le due pareti è attrezzata per permettere il passaggio del personale addetto alle operazioni di manutenzione.

Il rischio nelle facciate ventilate è amplificato dalla loro conformazione, che riproduce un camino verticale. Diverse caratteristiche della facciata influenzano significativamente la probabilità di propagazione dell'incendio ai piani superiori, tra cui la larghezza della cavità, la presenza e la dimensione degli aggetti, e il tipo di ventilazione. I fattori che influenzano la proiezione delle fiamme e il profilo di temperatura all'esterno dipendono dall'area e dall'altezza delle finestre, dalla geometria della stanza, dal carico d'incendio e dalla velocità di combustione, nonché dalla velocità del vento. Per quanto riguarda i requisiti di resistenza al fuoco e compartimentazione, le facciate a doppia parete ventilate non ispezionabili si suddividono in due categorie:

- **parete esterna chiusa:** se l'intercapedine è dotata di elementi di interruzione non combustibili e resistenti al fuoco in corrispondenza di ogni vano per finestra e porta-finestra, e di ogni solaio, la parete interna deve rispettare le stesse norme delle facciate semplici. Non è necessario installare elementi orizzontali di interruzione sui solai se l'intercapedine contiene esclusivamente materiale isolante classificato almeno come Bs3d0 o se la parete interna ha una resistenza al fuoco EI30 su tutta l'altezza e tutti i piani. Nel caso in cui la parete

interna sia di tipo Curtain Walls è inoltre richiesto che l'elemento di giunzione della facciata ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti sia di classe di resistenza al fuoco EI60

- **parete esterna aperta:** la parete interna deve avere requisiti di resistenza al fuoco simili a quelli delle facciate semplici se l'intercapedine contiene solo materiale isolante classificato almeno Bs3d0. In caso contrario, se l'intercapedine contiene materiale isolante con una classificazione di reazione al fuoco inferiore, la parete interna deve garantire una resistenza al fuoco EI30 su tutta l'altezza e tutti i piani

Nel caso delle facciate a doppia parete ventilate ispezionabili, si distinguono tre categorie:

- **parete esterna chiusa con intercapedine interrotta da elementi resistenti al fuoco:** se l'intercapedine è interrotta da solai o setti di compartimentazione E60 per ciascun piano, la parete esterna o interna deve rispettare le stesse normative delle facciate semplici. È possibile praticare aperture nei solai e nei setti resistenti al fuoco per consentire la circolazione dell'aria nell'intercapedine, a condizione che la compartimentazione di interpiano sia mantenuta tramite dispositivi automatici di chiusura con resistenza al fuoco E60 in caso di incendio

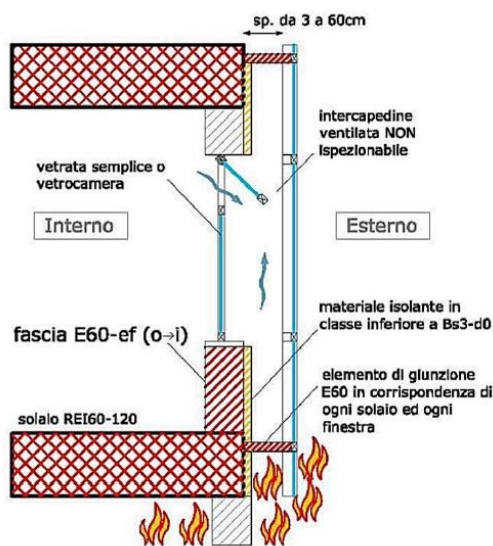


Figura 2.12: Esempio di parete esterna chiusa con intercapedine interrotta da elementi resistenti al fuoco [10]

- **parete esterna chiusa con intercapedine priva di interruzioni:** se l'intercapedine non presenta interruzioni orizzontali, la parete interna deve garantire una resistenza al fuoco EW30 su tutta l'altezza e per tutti i piani

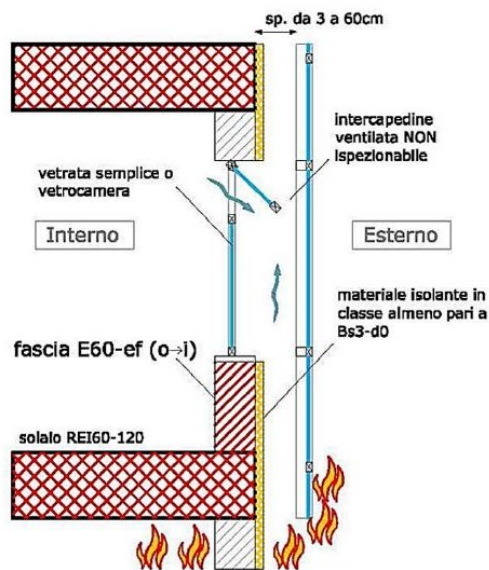


Figura 2.13: Esempio di parete esterna chiusa con intercapedine priva di interruzioni resistente al fuoco [10]

- **parete esterna aperta:** la parete interna deve soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici

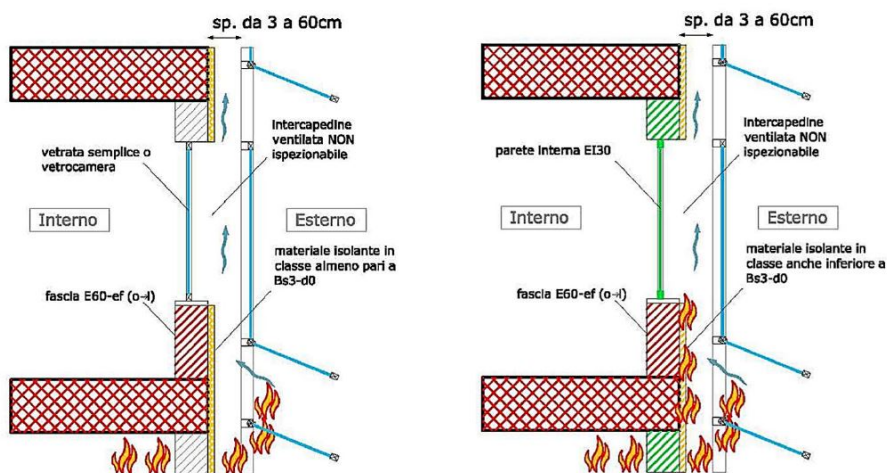


Figura 2.14: Esempi di pareti esterne aperte resistenti al fuoco [10]

Alternativamente alle prescrizioni sopra indicate, è possibile installare un sistema automatico di spegnimento ad acqua all'interno delle due pareti, progettato per garantire una densità di scarica di almeno 10 l/minm^2 sulle pareti interne, che possono includere superfici vetrate in vetro temperato trattato HST (Heat Soak Test). La portata del sistema deve essere tale da assicurare il funzionamento simultaneo degli ugelli del piano superiore a quello interessato dall'incendio, con una durata di scarica di almeno 60 minuti. Il sistema deve essere controllato da un'apposita rete di rivelazione incendi per ciascun piano e gli erogatori devono essere orientati verso la parete interna. Inoltre, l'intercapedine deve essere dotata di un sistema di evacua-

zione dei fumi, con una ventilazione naturale nella parte alta e bassa della facciata, pari al 10% della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.[9]

2.1.4 Kit

Secondo la Direttiva Prodotti da Costruzione (DPC) e il nuovo Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR), un kit è considerato equivalente a un prodotto da costruzione se comprende almeno due componenti separati che devono essere assemblati per essere installati permanentemente nelle opere. Per essere conforme alla DPC (o al CPR), il kit deve essere venduto come un'unica transazione da un singolo fornitore, permettendo all'acquirente di acquistarlo tutto in una volta; oltre ad avere caratteristiche che garantiscano che le opere in cui è incorporato soddisfino i requisiti essenziali previsti dalle normative applicabili.

Esistono due categorie di kit: quelli con un numero e tipo di componenti predefiniti e costanti, e quelli in cui numero, tipo e disposizione dei componenti variano a seconda delle specifiche applicazioni.[9]

2.2 Reazione al fuoco

Al fine di perseguire gli obiettivi di sicurezza antincendio, definiti nel paragrafo 2.1, il documento normativo stabilisce misure che riguardano la reazione al fuoco ed i criteri di resistenza al fuoco dei diversi elementi costruttivi, per ogni tipo di facciata.[11]

Secondo quanto riportato dal *D.M. 18 ottobre 2019 "Modifiche all'allegato 1 del Codice prevenzione incendi"*, la reazione al fuoco è una misura di protezione passiva che agisce principalmente nella fase iniziale dell'incendio, mirando a ridurre l'innesco dei materiali e la propagazione del fuoco. Essa valuta il comportamento al fuoco dei materiali nelle loro condizioni d'uso reali, con particolare attenzione al loro contributo all'incendio durante le prove standardizzate. Tali requisiti sono applicati negli ambiti in cui si desidera limitare la combustione dei materiali e rallentare la diffusione dell'incendio.

Le classi di reazione al fuoco si suddividono come segue:

- **classi italiane:** secondo il D.M. 26 giugno 1984³, queste classi, indicate con [Ita], rappresentano i requisiti minimi per ciascun livello di prestazione
- **classi europee:** secondo il D.M. 10 marzo 2005⁴, queste classi, indicate con [EU], sono applicabili esclusivamente ai prodotti da costruzione. Le classi europee comprendono classi principali e classi aggiuntive (s, d, a) e rappresentano i requisiti minimi per ciascun livello di prestazione. Sono accettabili classi con numeri cardinali o lettere precedenti nell'alfabeto rispetto a quelli specificati in tabella (ad esempio, se è accettata la classe C-s2,d1, sono ammesse anche le classi B-s2,d1, C-s1,d1, C-s2,d0, ecc.)

In particolare, vengono presentate le classi di reazione al fuoco per i materiali da rivestimento e completamento, nonché per i materiali isolanti.[10]

³D.M. 26 giugno 1984 "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi"

⁴D.M. 10 marzo 2005 "Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio"

Descrizione dei materiali	GM1	GM2	GM3
	UE	UE	UE
Rivestimenti a soffitto [1]	A2-s1,d0	B-s2,d0	C-s2,d0
Controsoffitti, materiali di copertura [2], pannelli di copertura [2], lastre di copertura [2]			
Pavimentazioni sopraelevate (superficie nascosta)			
Rivestimenti a parete [1]			
Partizioni interne, pareti, pareti sospese	B-s1,d0		
Rivestimenti a pavimento [1]	B _f -s1	C _f -s1	C _f -s2
Pavimentazioni sopraelevate (superficie calpestabile)			
[1] Qualora trattati con prodotti vernicianti ignifughi omologati ai sensi del DM 6 marzo 1992, questi ultimi devono essere idonei all'impiego previsto e avere la classificazione indicata di seguito (per classi differenziali da A2): GM1 e GM2 in classe 1; GM3 in classe 2; per i prodotti vernicianti marcati CE, questi ultimi devono avere indicata la corrispondente classificazione. [2] Si intendono tutti i materiali utilizzati nell'intero pacchetto costituente la copertura, non soltanto i materiali esposti che costituiscono l'ultimo strato esterno.			

Tabella 2.1: Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento [10]

Descrizione materiali	GM1		GM2		GM3	
	Ita	UE	Ita	UE	Ita	UE
Isolanti protetti [1]	2	C-s2,d0	3	D-s2,d0	4	E
Isolanti lineari protetti [1], [3]		C _L -s2,d0		D _L -s2,d2		E _L
Isolanti in vista [2]	0	A2-s1,d0	1	B-s2,d0	1	B-s3,d0
Isolanti lineari in vista [2], [3]	0-1	A _L 2-s1,d0	0-1	B _L -s3,d0	1-1	B _L -s3,d0
[1] Protetti con materiali non metallici del gruppo GM0 oppure prodotti di classe di resistenza al fuoco K 10 e classe minima di reazione al fuoco B-s1,d0. [2] Non protetti come indicato nella nota [1] della presente tabella. [3] Classificazione riferita a prodotti a forma lineare destinati all'isolamento termico di condutture di diametro massimo comprensivo dell'isolamento di 300 mm.						

Tabella 2.2: Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento [10]

Classi principali

❖ Grado di combustibilità

- ❖ **A1** = incombustibile, nessun contributo all'incendio
- ❖ **A2** = combustibilità limitata, contributo all'incendio molto limitato
- ❖ **B** = combustibile, contributo limitato all'incendio
- ❖ **C** = combustibile, basso contributo all'incendio
- ❖ **D** = combustibile, medio contributo all'incendio
- ❖ **E** = combustibile, elevato contributo all'incendio
- ❖ **F** = combustibile, estremamente infiammabile

Classi complementari

❖ Produzione di fumo

- ❖ **s1** = emissione di fumi molto limitata, bassa velocità
- ❖ **s2** = emissione di fumi moderata, media velocità
- ❖ **s3** = emissione di fumi elevata, alta velocità

❖ Gocciolamento

- ❖ **d0** = assenza di gocciolamento
- ❖ **d1** = gocciolamento limitato
- ❖ **d2** = non classificato
- ❖ **a1 - a2 - a3** = fumi acidi
- ❖ **L** = isolanti termici lineari
- ❖ **ca** = cavi elettrici o di segnalazione
- ❖ **fl** = pavimentazioni
- ❖ **ROOF** = coperture (con t1 - t2 - t3 - t4: metodo di prova)

Figura 2.15: Nomenclatura europea reazione al fuoco [12]

I materiali classificati come A1 (per la classe italiana 0) risultano incombustibili, mentre quelli certificati come A2, B, C, D, E e F (Ita da 1 a 5) bruciano in ordine crescente. La classificazione europea include anche la categorizzazione dei fumi (*s*) e del gocciolamento (*d*), con valori che vanno da 0 (assente) a 3 (elevato).

Analogamente al sistema italiano, il sistema di classificazione europeo si fonda su test di laboratorio, che includono quattro tipologie di prove su piccola scala e un test di riferimento su larga scala. Questi test permettono di classificare i prodotti misurando i parametri rilevanti per la partecipazione all'incendio.

Oltre al rispetto delle normative vigenti, è essenziale utilizzare prodotti da costruzione con una classe di reazione al fuoco adeguata perché:

- riducono la velocità di propagazione dell'incendio
- limitano la possibilità che la fiamma coinvolga altri materiali combustibili
- non compromettono i tempi di evacuazione delle persone

Capitolo 3

Caso studio

Al fine di perseguire lo scopo di questo elaborato, si rende necessaria la definizione di *edificio a grande altezza* secondo la Normativa Italiana, considerando la conformazione della struttura in esame. Nella fattispecie, la torre analizzata è un edificio di civile abitazione, costituito da 24 piani fuori terra. La sua altezza e la sua funzione residenziale lo collocano all'interno delle categorie di edifici a grande altezza, soggetti a normative specifiche per garantire la sicurezza e la salute degli occupanti. Nel corso degli anni, l'edificio ha subito interventi di efficientamento energetico, eseguiti a distanza di tempo. In particolare, i lavori realizzati nel 2009 non hanno rispettato le prescrizioni in materia di sicurezza antincendio. Questo è un aspetto critico, poiché gli interventi di miglioramento energetico, se non progettati e realizzati in conformità con le normative vigenti, possono compromettere la sicurezza strutturale e la capacità di resistenza al fuoco dell'edificio stesso. La mancanza di attenzione verso le normative antincendio durante il primo intervento può aver lasciato vulnerabilità che potrebbero rivelarsi problematiche in caso di emergenze. L'analisi di questi interventi diventa ancora più interessante considerando il secondo intervento di efficientamento energetico, realizzato nel 2024. A differenza del primo, quest'ultimo ha tenuto conto delle normative antincendio, rispettando così le prescrizioni in materia di sicurezza. Questo cambiamento rappresenta un'opportunità significativa per esaminare l'efficacia delle normative antincendio nel contesto dell'efficientamento energetico.

In sintesi, l'analisi dell'edificio di civile abitazione di 24 piani offre l'opportunità di riflessione su come le normative antincendio siano state integrate (o meno) nel processo di efficientamento energetico. La valutazione comparativa degli interventi del 2009 e del 2024 evidenzia l'importanza di un approccio olistico nella progettazione e nella ristrutturazione degli edifici, in cui la sicurezza e l'efficienza energetica devono coesistere armoniosamente. Questo studio non solo contribuisce alla comprensione delle sfide e delle opportunità nel settore dell'edilizia, ma fornisce anche indicazioni utili per futuri progetti e normative.

3.1 Edifici di grande altezza

Il primo documento a livello nazionale che fornisce indicazioni sulla classificazione degli edifici è il *D.M. del 16 febbraio 1983*. Questo decreto definisce gli edifici in base alla loro altezza di gronda, ossia la distanza dal suolo alla linea di gronda. Tuttavia,

con l’emanazione del *D.M. del 16 maggio 1987 n°246*, il criterio di classificazione per gli edifici civili è stato modificato, come riportato nella Tabella 3.1, sostituendo l’altezza di gronda con l’altezza antincendio, definita come la distanza massima misurata dal livello inferiore dell’apertura più alta dell’ultimo piano abitabile e/o agibile (escludendo i vani tecnici) al livello del piano esterno più basso.[13]

Ad oggi il nuovo codice di prevenzione incendi, il cui allegato tecnico è stato aggiornato attraverso il *D.M. 18 ottobre 2019*, fa riferimento ad un’altra definizione di altezza antincendio ovvero la massima quota dei piani dell’attività, escludendo i piani con presenza occasionale e di breve durata di personale addetto.[10]

Tipo di edificio	Altezza antincendi	Massima superficie del compartimento (m ²)	Massima superficie (m ²) di competenza di ogni scala per piano	Tipo di vani scala e di almeno un vano ascensore	Caratteristiche "REF" dei vani scala e ascensore, filtri, porte, elementi di suddivisione tra i compartimenti
a	da 12 m a 24 m	8000	500	Nessuna prescrizione	60 (**)
				Almeno protetto se non sono osservati i requisiti del punto 2.2.1.	60
				Almeno a prova di fumo interno	60
				A prova di fumo	60
b	da oltre 24 m a 32 m	6000	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
c	da oltre 32 m a 54 m	5000	500	Almeno a prova di fumo interno	90
d	da oltre 54 m a 80 m	4000	500	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore 0,36 m ²	90
e	oltre 80 m	2000	350 (*)	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore 0,36 m ³	120

(*) Con un minimo di 2 scale per ogni edificio. Sulla copertura dell’edificio deve essere prevista una area per l’atterraggio ed il decollo degli elicotteri di soccorso raggiungibile da ogni scala.

(**) Solo per gli elementi di suddivisione tra i compartimenti.

Tabella 3.1: Classificazione degli edifici in funzione della loro altezza antincendi [10]

Si riportano di seguito esempi di altezza antincendio, contenuti nel *capitolo G1* del *Codice di prevenzione incendi*.

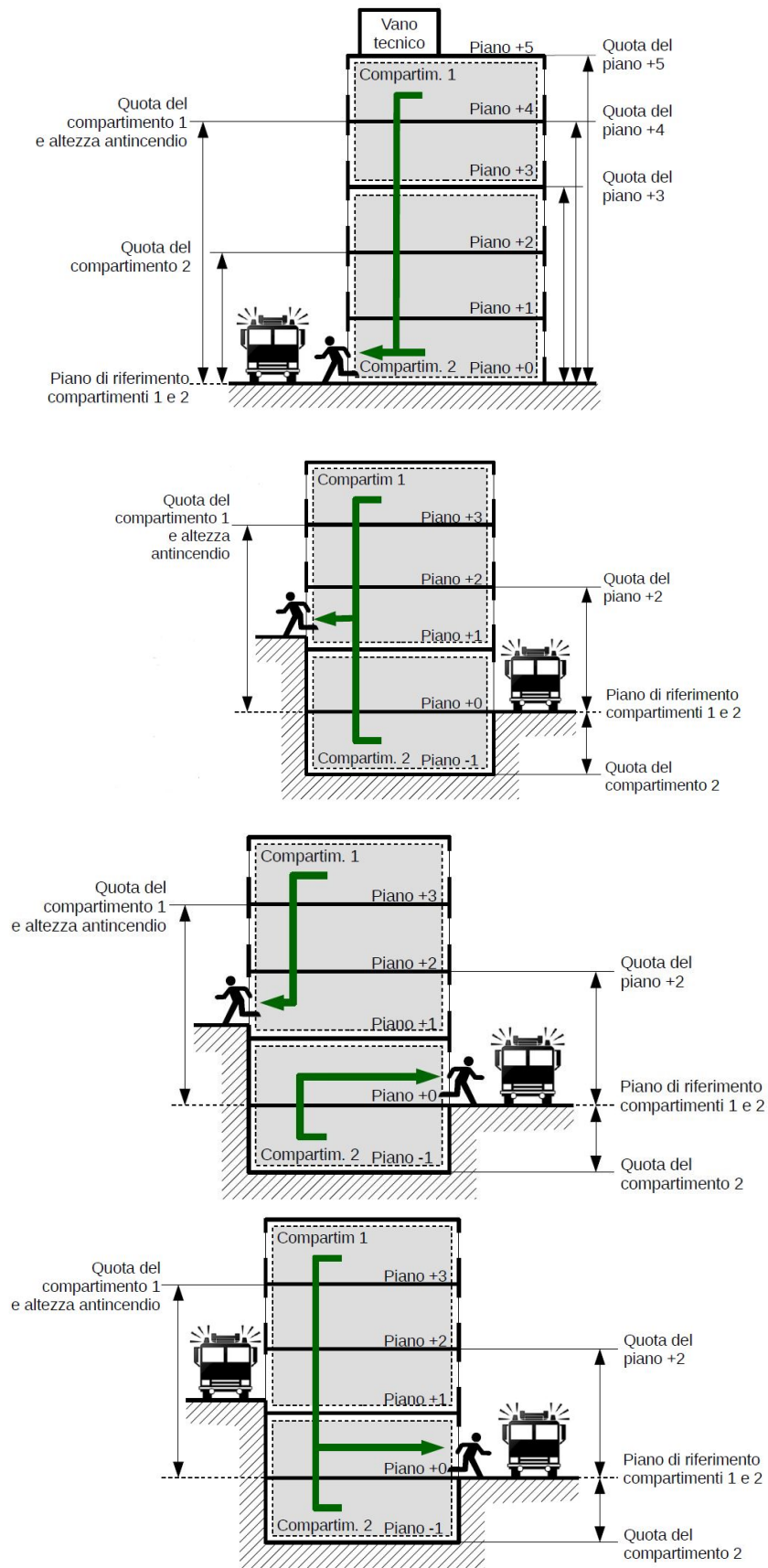


Figura 3.1: Esempi di altezza antincendio, quote di piano e di compartimento, in sezione [10]

Questa classificazione è fondamentale in quanto implica l'adozione di rigorosi requisiti di sicurezza antincendio. Gli edifici a grande altezza devono essere progettati e costruiti per garantire un'adeguata resistenza al fuoco delle strutture portanti, prevenendone il collasso. Devono essere dotati di sistemi di evacuazione sicuri e ben segnalati, compresi ascensori antincendio e scale di emergenza protette e collegate a spazi calmi, funzionali alle operazioni di soccorso. È cruciale progettare canali sicuri che collegano il piano terra alla sommità dell'edificio.[14]

È importante anche disporre di depositi per il materiale in posizioni adeguate e organizzare la sicurezza interna con personale qualificato che conosca i luoghi e gli impianti, oltre a gestire e monitorare le attività.

È necessaria una sala di controllo per centralizzare i segnali di sicurezza e gli allarmi dei dispositivi di emergenza. Inoltre, questi edifici devono prevedere impianti di rilevazione e allarme antincendio efficaci, nonché sistemi di spegnimento automatico come sprinkler. In base al *Decreto n°246*¹, tali impianti devono essere dotati di colonne montanti per il collegamento con le motopompe dei Vigili del fuoco. È essenziale che l'edificio disponga già di attrezzature principali, tenendo conto che l'altezza dell'edificio complica le operazioni di soccorso. Devono anche essere garantite vie di accesso adeguate per i mezzi di soccorso e le operazioni di spegnimento, con riserve idriche sufficienti per alimentare gli impianti antincendio.

L'implementazione di queste misure è fondamentale per ridurre i rischi associati agli incendi, proteggendo la vita degli occupanti e facilitando le operazioni dei soccorritori in caso di emergenza. Gli interventi di efficientamento energetico devono quindi essere pianificati e realizzati considerando attentamente queste normative per garantire che l'edificio mantenga o migliori il suo livello di sicurezza.

Il quadro normativo per gli edifici alti è definito dal *Decreto 246/87*, che fa parte delle normative successivamente introdotte rispetto al *Decreto 16/2/82*². Questo decreto presenta un approccio piuttosto tradizionale alla sicurezza antincendi, fondato sui concetti di resistenza al fuoco delle strutture e di compartimentazione, ovvero la limitazione delle dimensioni dei singoli compartimenti. In sostanza, il piano di evacuazione si configura come un esodo verticale semplice, basato sulla sicurezza delle persone nel raggiungere le scale, considerate spazi sicuri e resistenti al fumo, per garantire l'arrivo al piano terra entro i tempi previsti. Questo approccio, però, considera solo l'altezza dell'edificio, senza tenere conto delle dimensioni complessive o del numero massimo di persone potenzialmente presenti, e non prevede classificazioni particolari in base all'affollamento. Inoltre, non sono previsti impianti specifici per la rilevazione degli incendi, che viene affidata a sistemi occasionali. Va anche sottolineato che non esistono prescrizioni riguardanti la gestione delle emergenze, infatti, non sono richiesti piani di emergenza specifici, squadre di emergenza dedicate e sale di controllo. L'edificio è considerato a uso civile, senza ulteriori classificazioni o destinazioni particolari che potrebbero influenzare le prescrizioni di sicurezza.

Nel contesto del soccorso in edifici alti, è fondamentale considerare che non è possibile effettuare l'intervento esclusivamente dall'esterno; è necessario organizzare operazioni di soccorso all'interno dell'edificio stesso. Questo implica la gestione di situazioni in cui potrebbero essere presenti persone non autosufficienti, come in alberghi, abitazioni, aree affollate, uffici e magazzini, così come individui con capacità motoria

¹D.M. 16 maggio 1987 n°246 "Norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione"

²D.M. 16 febbraio 1982 "Modificazioni del decreto ministeriale 27 settembre 1965, concernente la determinazione delle attività soggette alle visite di prevenzione incendi"

ridotta o impedita. Pertanto, i soccorritori devono operare in condizioni di sicurezza all'interno dell'edificio.

L'evoluzione tecnologica, come i sistemi di monitoraggio ambientale e le tecniche di ingegneria della sicurezza, può certamente essere di grande aiuto; tuttavia, non è possibile trascurare i principi fondamentali di protezione passiva.

3.2 Efficientamento energetico

Tra gli elementi distintivi degli edifici a grande altezza, la facciata riveste un ruolo cruciale, soprattutto in ambito energetico. Essa deve infatti cercare di ridurre l'apporto della radiazione solare incidente e, al contempo, garantire un adeguato isolamento termico. Questo isolamento è essenziale sia durante l'inverno per prevenire la perdita eccessiva di calore dall'interno verso l'esterno, sia durante l'estate per evitare il surriscaldamento degli spazi interni.

In senso più generale l'efficientamento energetico negli edifici è un tema di grande rilevanza nella società odierna, in quanto può comportare significativi risparmi economici e un impatto ambientale positivo, contribuendo alla lotta al cambiamento climatico e al miglioramento della qualità dell'aria. È importante comprendere i benefici di questi interventi e promuovere una maggiore conoscenza dell'argomento. L'evoluzione normativa in questo settore ha seguito un percorso di crescente rigore e specificità, integrando le migliori pratiche tecnologiche e scientifiche per migliorare la sostenibilità ambientale e il benessere abitativo.

In Italia, le prime regolamentazioni in materia di efficienza energetica sono emerse in seguito alla crisi energetica degli anni '70. Queste normative si concentravano principalmente sull'isolamento termico degli edifici, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e migliorare l'efficienza energetica delle abitazioni. La *legge 30 aprile 1976 n°373*³ ha introdotto per la prima volta i principi del contenimento dei consumi e del risparmio energetico in edilizia, stabilendo concetti relativi alla progettazione degli impianti e all'isolamento termico degli edifici. Successivamente, la *legge 9 gennaio 1991 n°10*⁴ ha chiarito che il risparmio energetico non deve limitarsi al miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro, ma deve essere ottenuto anche attraverso la riduzione dei consumi e l'aumento dell'uso di fonti rinnovabili di energia. Si è inoltre posta attenzione al rendimento degli impianti e alle dispersioni dell'edificio, imponendo per la prima volta ai progettisti l'obbligo di verificare l'efficacia energetica delle loro soluzioni.

Un significativo progresso è stato compiuto nel 2002, quando l'Unione Europea ha adottato la *Direttiva 2002/91/CE* sul rendimento energetico nell'edilizia, nota come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Questa direttiva stabilisce requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi ed esistenti, introducendo il concetto di certificazione energetica e promuovendo la realizzazione di edifici a basso consumo energetico. In Italia, la direttiva è stata recepita attraverso il *Decreto Legislativo 192/2005*⁵, che ha introdotto l'obbligo di certificazione energetica

³Legge 30 marzo 1976 n°373 "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici"

⁴Legge 9 gennaio 1991 n°10 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia"

⁵D.lgs. 19 agosto 2005 n°192 "Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza

per gli edifici. Il successivo *Decreto Legislativo 311/2006*⁶ ha integrato e revisionato il precedente decreto, correggendo errori e colmando lacune. Questo decreto regola l'intero ambito energetico in edilizia, definendo i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, le metodologie di calcolo per la valutazione delle prestazioni energetiche e la certificazione energetica degli edifici.

Di seguito si riportano i valori minimi di trasmittanza termica che devono essere rispettati negli interventi di ristrutturazione totale o parziale dell'involucro edilizio.

Trasmissione termica (W/m ² K)						
Zona climatica	Struttura verticale opaca	Copertura	Pavimenti	Finestre	Sistema di ventilazione	Pareti divisorie verticali e orizzontali
A	0,80	0,49	0,84	5,98	4,81	0,80
B	0,62	0,49	0,64	3,90	3,51	
C	0,52	0,49	0,55	3,38	2,73	
D	0,47	0,41	0,47	3,12	2,47	
E	0,44	0,39	0,43	2,86	2,21	
F	0,33	0,38	0,41	2,60	1,69	

Tabella 3.2: Valori limite di trasmittanza termica [15]

Analogamente a quanto previsto dalla *Direttiva europea*, le leggi devono essere applicate in modo diverso per gli edifici nuovi e per quelli esistenti. Per questi ultimi, il legislatore prevede un rispetto graduale dei requisiti minimi di efficienza energetica, a seconda del tipo di fabbricato e di intervento. In generale, per interventi di consistente importanza occorre operare sull'intero edificio, invece per piccole opere di ristrutturazione e/o ampliamento, la legge richiede di intervenire solo sull'involucro tramite l'uso di misure passive.[16]

L'ultimo aggiornamento dei requisiti minimi è stato introdotto dal *Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015*⁷ descritto nell'*Appendice B*. Questo decreto specifica i valori limite dei parametri caratteristici, in termini di trasmittanza termica, per gli elementi edilizi negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica. In base al caso di studio, vengono riportati solo i valori relativi alle strutture opache verticali e alle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura che sono rivolte verso l'esterno e soggette a riqualificazione.

energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia”

⁶D.lgs. 29 dicembre 2006 n°311 ”Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n. 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia”

⁷D.M. 26 giugno 2015 ”Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”

Zona climatica	Trasmissione termica (W/m ² K)
	dal 1 gennaio 2012 per tutti gli edifici
A e B	0,40
C	0,36
D	0,32
E	0,28
F	0,26

Tabella 3.3: Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache verticali [17]

Zona climatica	Trasmissione termica (W/m ² K)
	dal 1 gennaio 2012 per tutti gli edifici
A e B	0,32
C	0,32
D	0,26
E	0,24
F	0,22

Tabella 3.4: Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura [17]

3.3 Modellazione

Al fine di valutare come le prescrizioni di legge relative alla sicurezza antincendio portino ad una limitazione della propagazione degli incendi in facciata, scopo della tesi proposta, si procede con la modellazione di entrambe le strutture analizzate.

Nello specifico, si tratta di uno stesso edificio con caratteristiche diverse, in termini di metodologia nella realizzazione delle facciate, a causa di due interventi di riqualificazione energetica avvenuti in due momenti differenti.

Per la modellazione si fa riferimento alla *sezione M* del Codice di Prevenzione Incendi, che descrive le procedure per identificare gli scenari di incendio ed ottenerne un'analisi quantitativa. Quest'ultima persegue lo scopo di verificare che gli obiettivi siano raggiunti, adottando un approccio progettuale basato esclusivamente sulle prestazioni. La sezione si articola in tre parti principali:

- M.1: metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio
- M.2: scenari di incendio per la progettazione prestazionale
- M.3: protezione della vita nella progettazione prestazionale

Il primo capitolo introduce la metodologia da seguire, con un'analisi preliminare volta a definire gli obiettivi della progettazione antincendio e gli standard di sicurezza

da raggiungere, in base alle specifiche esigenze dell'attività in esame. Questi obiettivi vengono poi tradotti in parametri prestazionali misurabili.

Nella seconda parte è illustrato il processo per identificare e quantificare gli scenari di incendio più critici che potrebbero ragionevolmente verificarsi nell'attività. Vengono analizzati in termini quantitativi lo sviluppo dell'incendio e la diffusione dei prodotti della combustione, tenendo conto di fattori come:

- posizione e geometria dell'attività, dimensioni e distribuzione degli ambienti interni
- caratteristiche dei materiali strutturali e non strutturali
- dimensione, posizione e stato delle aperture di ventilazione
- barriere che influenzano il movimento dei fumi
- presenza di impianti di spegnimento automatico

Tuttavia, per raggiungere gli obiettivi di questa tesi, si adottano ipotesi semplificate, evitando un'analisi dettagliata dei vari scenari di incendio. Si considerano come casi di riferimento, quelli che prevedono l'innesco all'interno di un compartimento dell'edificio, situato rispettivamente al 3° e al 13° piano, di un focolare predefinito conforme al *capitolo M.2* del Codice.

Infine, l'ultimo capitolo è dedicato alla protezione delle persone, con l'obiettivo prioritario di assicurare che gli occupanti dell'edificio possano evacuare in modo sicuro o essere adeguatamente protetti fino all'intervento dei soccorsi. Vengono esaminati i percorsi di fuga, la gestione dei flussi durante l'evacuazione, il controllo dei fumi e la capacità strutturale di resistere al fuoco. Sono definiti parametri quantitativi per verificare se le soluzioni progettuali adottate garantiscono in maniera adeguata la tutela della vita umana in situazioni di emergenza, anche se questo aspetto viene trascurato in questa sede in quanto non rilevante per gli scopi di studio.

3.3.1 Definizione della curva RHR

Si procede con la quantificazione del fenomeno dell'incendio tramite le curve RHR che ne rappresentano l'evoluzione dinamica nel tempo e permettono di stimarne la potenza termica rilasciata nelle diverse fasi: propagazione, stazionaria e di decadimento.[18]

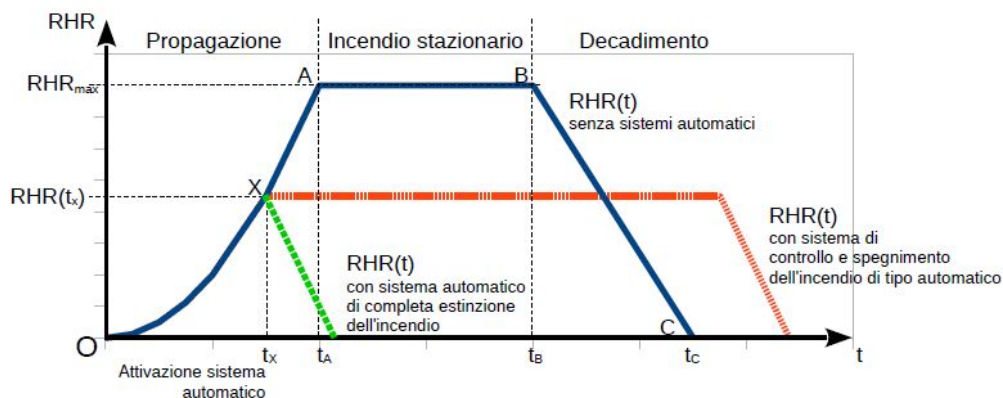


Figura 3.2: Fasi dell'incendio [18]

Questo andamento è descritto dalla seguente relazione:

$$RHR(t) = m_c(t) \cdot H \quad (3.1)$$

dove m_c ed H rappresentano, rispettivamente, la velocità di combustione [m/s] ed il potere calorifico [kJ/kg].

Possono essere impiegate anche le curve temperatura-tempo che descrivono l'andamento della temperatura dei gas di combustione nel tempo vicino agli elementi strutturali.

Il Codice, all'interno del capitolo M.2, fornisce le linee guida per calcolare la variazione della potenza termica durante ciascuna delle fasi.

Fase di propagazione

Durante la fase di crescita parabolica, la potenza termica rilasciata dall'incendio al variare del tempo è rappresentata dalla relazione:

$$RHR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t_a} \right)^2 \quad \text{per } t < t_A \quad (3.2)$$

dove:

- $RHR(t)$ è la potenza termica rilasciata dall'incendio [kW]
- t è il tempo [s]
- t_a è il tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga il valore di 1000 kW [s]

Il Codice individua quattro curve predefinite in relazione alla velocità caratteristica prevalente dell'incendio t_a distinta in lenta, media, rapida e ultra rapida. Inoltre, per alcune attività il valore del tempo necessario al raggiungimento di 1000 kW per la potenza termica può essere desunto dai prospetti dell'*appendice E dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2*.

Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_a [s]	$RHR(t)$ [kW/m ²]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Tabella 3.5: Velocità massima di rilascio di calore [19]

Sulla base di dati certi, ricavati da prove di laboratorio o eventi verificatisi nella realtà, è possibile determinare il valore di t_a per tutte le restanti attività.[18]

Fase intermedia stazionaria

La fase di crescita si considera conclusa al raggiungimento del t_A , corrispondente al picco massimo di potenza termica rilasciata (RHR_{\max}) dall'incendio all'interno del compartimento antifluoco. Noto tale valore, il tempo di inizio della fase di incendio stazionario è determinabile come segue:

$$t_A = \sqrt{RHR_{\max} \frac{t_a^2}{1000}} \quad (3.3)$$

La fase intermedia termina nell'istante t_B , in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile viene rilasciata nel compartimento. Tuttavia è necessario accertarsi che l'energia termica inizialmente disponibile sia sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione e raggiunga la potenza termica massima, cioè:

$$70\%q_f A_f \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3 \quad (3.4)$$

Allora risulta che il tempo a cui corrisponde la fine della fase di incendio stazionario è pari a:

$$t_B = t_A + \frac{70\%q_f A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3}{RHR_{\max}} \quad (3.5)$$

In caso contrario, la curva RHR raggiunge solo per qualche istante il valore massimo, il che significa che in queste condizioni si passa direttamente dalla fase di propagazione alla fase di decadimento ($t_A=t_B$).[18]

Fase di decadimento

La fase finale dell'incendio corrisponde allo spegnimento, determinato dal graduale esaurimento del combustibile, dalla mancanza di ossigeno o dall'intervento di estinzione. In questa fase si stima che venga consumato circa il 30% dell'energia inizialmente disponibile[18], per cui risulta che:

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\%q_f A_f}{RHR_{\max}} \quad (3.6)$$

Durante la fase di decadimento l'andamento della potenza prodotta dall'incendio è lineare, dunque è possibile determinare la sua evoluzione tramite la seguente relazione:

$$RHR(t) = RHR_{\max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B} \quad (3.7)$$

Il Codice di Prevenzione Incendi, al *paragrafo M.2.7*, fornisce indicazioni riguardanti focolari predefiniti, utilizzabili anch'essi nella quantificazione degli incendi. Nel caso specifico in esame, è possibile impiegare i focolari predefiniti poiché è soddisfatta l'ipotesi che questi ultimi siano più critici di quelli che potrebbero verificarsi.

Sarebbe opportuno analizzare i diversi scenari di incendio che potrebbero ragionevolmente interessare la struttura esaminata, associando a ciascuno di essi una curva RHR. Tuttavia, dovendo analizzare solo la propagazione dell'incendio in facciata

non anche la sua origine, si semplifica la modellazione considerando solo il focolare predefinito.

È quindi indispensabile fare riferimento alle indicazioni contenute nella tabella 3.6, che forniscono non solo le caratteristiche relative alla velocità di crescita e sviluppo dell'incendio, ma anche le proprietà dei prodotti della combustione, con particolare attenzione ai valori di resa in particolato e monossido di carbonio.

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_a	150 s (fast)	75 s (ultra-fast)
RHR _{max} totale RHR _{max} per m ² di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m ²	50 MW 500-1000 kW/m ²
Resa in particolato Y_{soot}	Pre flashover: 0,07 kg/kg Post flashover: 0,14 kg/kg	Pre flashover: 0,18 kg/kg Post flashover: 0,36 kg/kg
Resa in particolato Y_{CO}	Pre flashover: 0,10 kg/kg Post flashover: 0,40 kg/kg	
Calore di combustione effettivo ΔH_C	20 MJ/kg	
Resa in biossido di carbonio Y_{CO_2}	15 kg/kg	
Resa in acqua Y_{H_2O}	0,82 kg/kg	
Frazione di RHR in irraggiamento	35%	

Tabella 3.6: Focolari predefiniti [10]

La curva RHR predefinita associata al focolare predefinito descrive lo sviluppo della potenza nel tempo e consente di tracciare l'evoluzione dell'incendio, individuando il momento del flashover. Come indicato nella tabella 3.7, quest'ultimo viene raggiunto a 335,41 secondi, momento in cui la potenza raggiunge il valore massimo di 5000,00 kW.

t [s]	t _a [s]	RHR [kW]	Frazione
0,00	150,00	0,00	0,00
30,00	150,00	40,00	0,01
60,00	150,00	160,00	0,03
90,00	150,00	360,00	0,07
120,00	150,00	640,00	0,13
150,00	150,00	1000,00	0,20
180,00	150,00	1440,00	0,29
210,00	150,00	1960,00	0,39
240,00	150,00	2560,00	0,51
270,00	150,00	3240,00	0,65
300,00	150,00	4000,00	0,80
330,00	150,00	4840,00	0,97
335,41	150,00	5000,00	1,00
1000,00	150,00	5000,00	1,00

Tabella 3.7: Valori della curva RHR predefinita

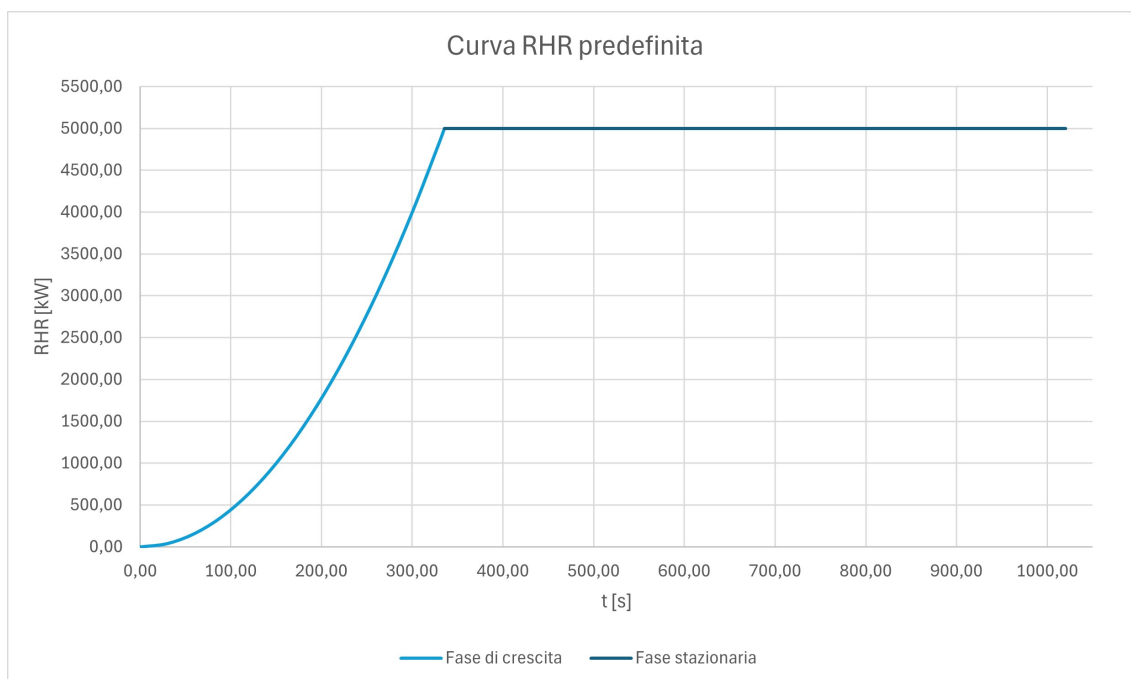


Figura 3.3: Andamento della curva RHR predefinita

3.3.2 Facciata priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio

L'analisi di una facciata semplice, caratterizzata da un sistema di rivestimento a cappotto, è scelta in risposta al crescente numero di progetti di riqualificazione

energetica osservati negli ultimi anni soprattutto in ambito residenziale. Questa soluzione è apprezzata non solo per la sua capacità di ridurre le dispersioni energetiche e i costi di riscaldamento, ma anche per il suo buon rapporto costo-beneficio e la facilità di installazione.

Si parte, quindi, dall'edificio mostrato in figura 3.5: una torre residenziale di 24 piani fuori terra.



Figura 3.4: Modello 3D dell'edificio esaminato

Per un minor onere computazionale la struttura è modellata seguendo diverse ipotesi semplificative, tra cui considerare una pianta uniforme su tutta l'altezza, caratterizzata dalle opportune aperture realmente presenti. La modellazione delle finestre con materiali effettivamente utilizzati, come il vetro, non è effettuata in quanto non rappresenta un elemento rilevante per gli scopi di questo elaborato. Tuttavia, nei paragrafi successivi viene illustrato brevemente il comportamento di tali materiali nel contesto della casistica esaminata.

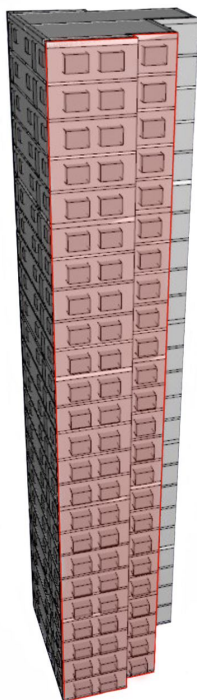


Figura 3.5: Modellazione edificio

Per analizzare in dettaglio gli effetti dell'incendio, si seleziona la facciata orientata a ovest, evidenziata in rosso nella figura 3.5, poiché nella realtà è priva di balconi che potrebbero ostacolare la diffusione del fenomeno. Questa, assieme alle altre facciate, è modellata attraverso tre strati che, dall'interno verso l'esterno, risultano essere:

- muratura in blocchi di laterizio alveolato (sp.30 cm)
- isolante termico di tipo EPS (sp.14 cm)
- intonaco esterno (sp. 1 cm)

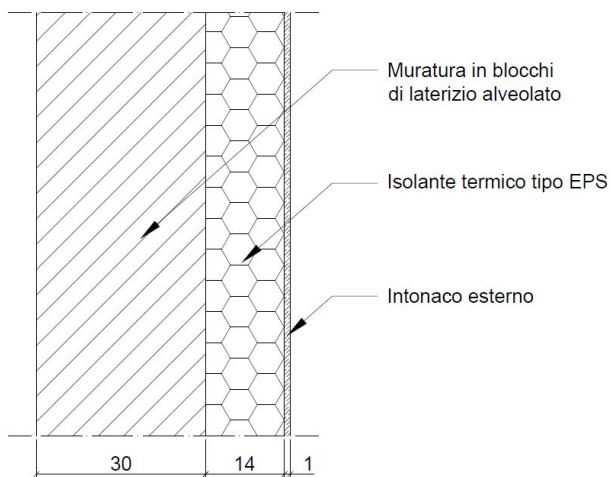


Figura 3.6: Stratigrafia della facciata semplice

I principali motivi che conducono ad una semplificazione della stratigrafia sono legati alla visualizzazione dei risultati e al livello di dettaglio dei calcoli FDS.

La scelta degli strati deriva da un'accurata ricerca di materiali impiegati nell'ambito edilizio, che rispettino le prescrizioni indicate nella tabella 3.2, trattandosi di un intervento di riqualificazione energetica realizzato nel 2009.

La lastra isolante è composta da Polistirene Espanso Sinterizzato (EPS) additivato con grafite, un materiale progettato per migliorare le prestazioni isolanti grazie alle proprietà fisiche e chimiche della grafite stessa. La produzione della lastra avviene a partire da blocchi di EPS precedentemente stagionati, un processo che consente di stabilizzare il materiale e migliorarne la qualità strutturale.

L'aggiunta di polveri di grafite al materiale base contribuisce in modo significativo a ridurre il trasferimento di calore per irraggiamento. Questo effetto è ottenuto grazie alla capacità della grafite di assorbire e riflettere la radiazione infrarossa, migliorando così l'efficienza termica complessiva della lastra.

Dal punto di vista della reazione al fuoco, le lastre di EPS rientrano nella classe E secondo la normativa europea EN 13501-1, il che indica che il materiale è infiammabile ma può autoestinguersi una volta rimossa la fonte di ignizione.[20]

Nel modello FDS le superfici vengono impiegate per definire le proprietà degli oggetti solidi e tramite la tipologia *layered* è possibile modellare superfici stratificate, come nel caso della facciata in esame. Inoltre, per simulare una superficie composta da solidi conduttori di calore o da materiali combustibili, è necessario specificare un materiale che descriva le proprietà termiche e il comportamento di pirolisi per ogni strato che la compone.[21]

Per ciascun materiale solido è necessario specificare:

- la densità [kg/m³]
- il calore specifico [kJ/(kgK)]
- la conduttività [W/(mk)]
- l'emissività, ossia il rapporto tra l'energia irradiata dalla superficie del materiale e quella irradiata da un emettitore perfetto (corpo nero) alla stessa temperatura e lunghezza d'onda e nelle stesse condizioni di ventilazione, il cui valore predefinito è pari a 0,9
- il coefficiente di assorbimento, che stima la radiazione penetrante che è assorbita dal materiale, il cui valore predefinito è pari a 5,00E+4 1/m

Per descrivere il fenomeno della pirolisi che laterizio alveolato e isolante termico subiscono per effetto della combustione, invece, sono forniti i valori di calore di combustione che sono rispettivamente 21,10 MJ/kg[22] e 40,00 MJ/kg[23].

Di seguito, quindi, si riportano i dati di input che specificano le caratteristiche termiche dei materiali costituenti i tre strati della facciata:

- Muratura in blocchi di laterizio alveolato

Densità	590.00 kg/m ³
Calore specifico	1.00 kJ/(kgK)
Conduktività	0.20 W/(mK)
Emissività	0.90
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m

Tabella 3.8: Caratteristiche termiche della muratura in blocchi di laterizio alveolato

- Isolante termico tipo EPS

Densità	17.00 kg/m ³
Calore specifico	1.45 kJ/(kgK)
Conduktività	0.03 W/(mK)
Emissività	0.90
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m

Tabella 3.9: Caratteristiche termiche dell'isolante termico tipo EPS

- Intonaco esterno[24]

Densità	1450.00 kg/m ³
Calore specifico	1.00 kJ/(kgK)
Conduktività	0.49 W/(mK)
Emissività	0.90
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m

Tabella 3.10: Caratteristiche termiche dell'intonaco esterno

Definiti i materiali, si procede con la modellazione della facciata stratificata, come riportato nella figura 3.7. Questi sono applicati seguendo un approccio *outward-in*, ciò significa che il materiale indicato nella prima riga della tabella rappresenta lo strato più esterno rispetto alla direzione normale della superficie, mentre ogni riga successiva corrisponde a uno strato posizionato "sotto" quello precedente.

Surface ID: FACCIATA

Description:

Tags:

Color: Appearance:

Surface Type: Layered

Geometry | Reaction | Species Injection | Particle Injection | Advanced

Material Layers | Surface Props | Thermal

Heat Transfer

Model: 1D

Cell Size: 0,25 m

Material Layers

Layer Divide: 0,0

	Thickness (m)	Material Composition	Edit
1	0,01 m	1,0 Intonaco	Edit...
2	0,14 m	1,0 "Isolante tipo EPS"	Edit...
3	0,3 m	1,0 "Blocchi in laterizio alve..."	Edit...
*			Edit...

Insert Row
Remove Row
Move Up
Move Down
Copy
Paste
Cut

Figura 3.7: Modellazione della stratigrafia della facciata semplice

Questa operazione può essere quindi realizzata nella maniera appena descritta oppure specificando, per una singola riga rappresentante l'intera parete, il rapporto tra la massa del materiale e quella totale. Nel campo dati *surface props* → *backing* della superficie si esplicita la modalità di trasferimento del calore tra i vari strati costituenti. Questa può essere:

- air gap, intercapedine d'aria nello spazio retrostante lo strato
- insulated, impedisce la perdita di calore dal retro del materiale
- exposed, permette il trasferimento di calore nello spazio retrostante il materiale

Nel caso in esame, si utilizza la modalità *exposed* per garantire il trasferimento del calore all'interno della stratigrafia delle tamponature.

Successivamente alla definizione dell'involucro dell'edificio con le opportune prese d'aria, è necessario precisare la superficie dell'elemento tridimensionale che rappresenta l'incendio vero e proprio, per questo detta *burner*. Questa è caratterizzata quantitativamente attraverso i dati riportati nella tabella 3.7 ed è posizionato a 0,50 m dall'apertura della facciata esaminata.

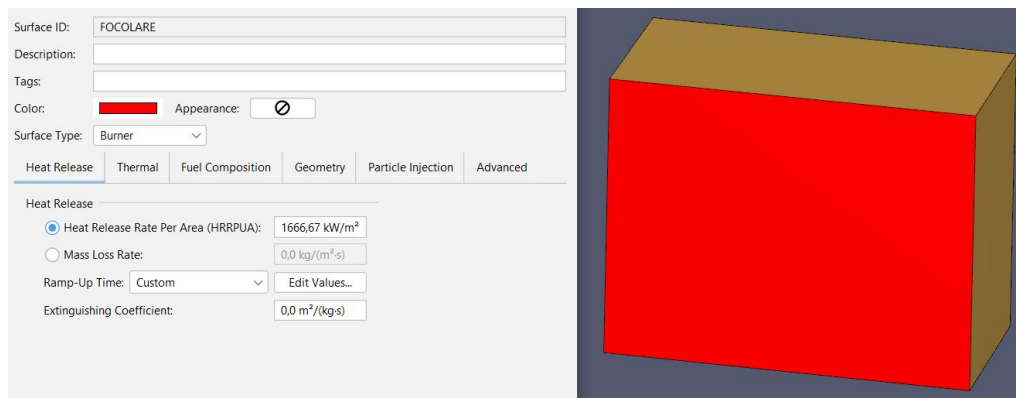


Figura 3.8: Caratterizzazione del focolare

Il modello di combustione utilizzato da FDS prevede un'unica specie di combustibile costituita da C, H, O e N, che reagisce con l'ossigeno in una fase controllata dalla miscela, generando H₂O, CO₂, fuliggine e CO. Di conseguenza, è necessario definire la *reaction*, ossia la reazione al fuoco della superficie. Si può fare riferimento alle reazioni presenti nella libreria del software PyroSim per simulare una superficie con caratteristiche simili a quelle di un bruciatore e, nel caso in esame, si fa riferimento alla reazione del poliuretano.[21]

Tutti i calcoli FDS vengono effettuati all'interno di mesh computazionali, alle quali devono adattarsi tutti gli oggetti presenti nella simulazione. Per garantire un'accurata precisione della stessa, è fondamentale che le celle della mesh abbiano dimensioni simili lungo ciascuno dei tre assi. Nello specifico, come indicato in figura 3.9, si utilizzano celle di dimensioni pari a 0.25x0.25x0.25 m.

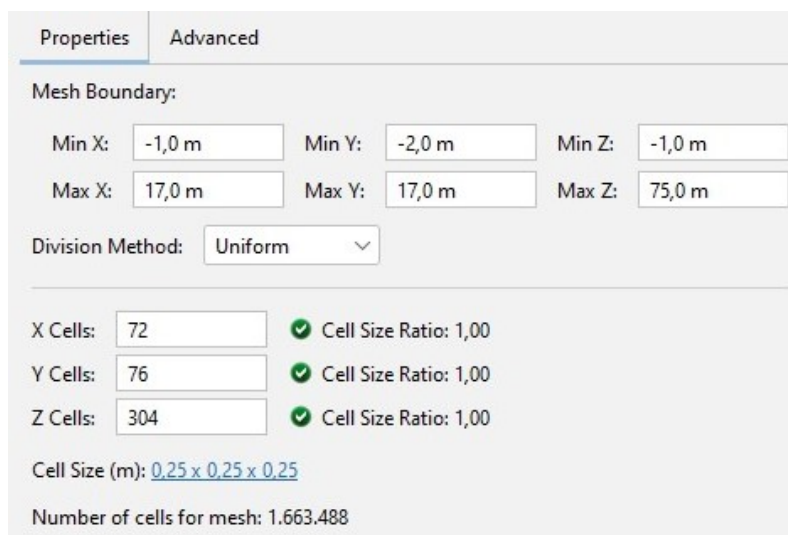


Figura 3.9: Definizione della mesh

Per ottimizzare i tempi di computazione si procede con la ripartizione della mesh, in funzione delle prestazioni processore (CPU) utilizzato, sfruttando l'analisi "FDS Parallel". Nel caso specifico la ripartizione è avvenuta in 6 sezioni, riducendo i tempi di calcolo di più del 70%.

Per analizzare l'evoluzione dell'incendio sulla facciata, si monitora l'andamento della temperatura, impostando la visualizzazione della *wall temperature* come condizione

di output. L'analisi FDS consente di inserire nell'ambiente di calcolo dei sensori, chiamati *device*, che servono a misurare con precisione una determinata grandezza fisica, nel caso specifico la temperatura interna del compartimento. Per ciascuno di essi, è necessario specificare le coordinate spaziali e la variabile da monitorare. In particolare sono introdotti devices di tipo *solid-face* nello spessore della parete del compartimento interessato dall'incendio e dei sette piani sovrastanti; invece, sono inseriti *gas-phase devices* direttamente sulla superficie esterna della facciata a livello del piano di interesse dell'evento dannoso.

La differenza tra i due risiede nel fatto che i primi rilevano le proprietà dei materiali solidi, come la temperatura delle superfici o il calore assorbito e rilasciato dai solidi, monitorando elementi come pareti, mobili, pavimenti e altre strutture nella simulazione. Questo è fondamentale per comprendere il comportamento dei materiali esposti al fuoco, inclusi la combustione, la resistenza termica e il trasferimento di calore. Al contrario, un *gas-phase device* misura le caratteristiche dei gas, come temperatura, velocità del flusso, concentrazione di specie chimiche, densità del fumo e pressione, fornendo dati sull'aria e i gas nella simulazione.

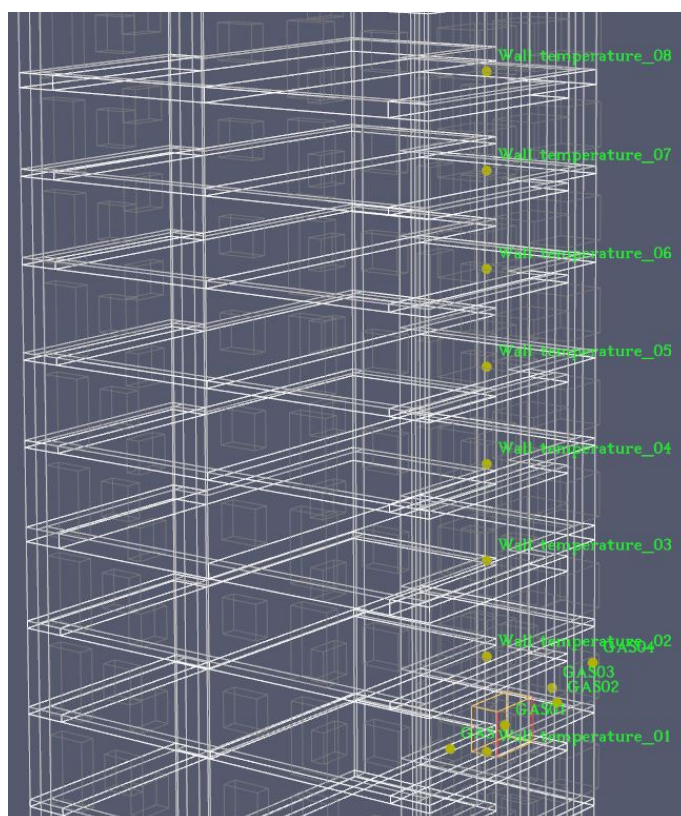


Figura 3.10: Posizionamento dei devices

Al termine della simulazione, il software produce un file contenente i valori rilevati dal sensore nel corso del tempo.

È inoltre attivato il comando che consente agli elementi di scomparire una volta esaurito il materiale combustibile, per facilitare una migliore comprensione del fenomeno. Tuttavia, poiché la stratigrafia include anche i blocchi di laterizio alveolato, per osservarne la scomparsa sarebbe necessario prolungare l'analisi fino alla completa combustione di quest'ultimo, il che comporterebbe tempi di simulazione eccessivamente lunghi e non rilevanti per gli scopi di questo studio.

Sebbene l'intuizione suggerisca che l'inserimento di fasce ignifughe dovrebbe produrre risultati sensibilmente diversi rispetto a una soluzione che ne è priva, si suppone che l'effettivo comportamento del sistema risulti sorprendentemente stabile, soprattutto quando si utilizza il laterizio come materiale di base. Il laterizio, grazie alla sua struttura e composizione, possiede una naturale e notevole resistenza al fuoco, tanto da essere classificato come un materiale altamente incombustibile.

Questo significa che, anche in assenza di fasce di separazione incombustibili, l'impatto sulla propagazione del fuoco lungo la facciata è pressoché trascurabile. Le fasce ignifughe, solitamente impiegate per prevenire la diffusione delle fiamme in determinati contesti costruttivi, non apportano grandi benefici quando il laterizio è l'elemento predominante. La sua capacità di resistere all'azione del fuoco riduce in modo significativo la necessità di barriere aggiuntive.

Pertanto, anche qualora queste fasce fossero assenti, non si riscontra un aumento marcato del rischio d'incendio, poiché la diffusione delle fiamme risulta naturalmente limitata. Questo riduce sensibilmente il disagio che deriverebbe dall'assenza di tali fasce, poiché la sicurezza strutturale rimane comunque garantita da questa resistenza naturale del laterizio.

In base a quanto detto, si sceglie di adottare un rivestimento per la parete che offra proprietà di resistenza al fuoco notevolmente superiori rispetto a quelle fornite dal solo materiale isolante EPS. La scelta è ricaduta su un sistema di rivestimento costituito da un film di alluminio combinato con uno strato isolante, capace di migliorare significativamente le prestazioni in termini di sicurezza antincendio, pur mantenendo le caratteristiche di leggerezza e isolamento termico richieste. Questo approccio consente di rispettare i requisiti normativi per le facciate, garantendo al contempo un'elevata protezione del sistema edilizio contro il rischio di propagazione del fuoco. L'adozione del film di alluminio offre anche vantaggi aggiuntivi, come una maggiore durabilità e una barriera efficace contro l'umidità e la corrosione. Nonostante l'integrazione di queste caratteristiche avanzate, la configurazione complessiva della facciata rimane semplice[25], come illustrato nel modello rappresentato nella figura A.7, facilitando l'implementazione e il mantenimento delle specifiche progettuali.

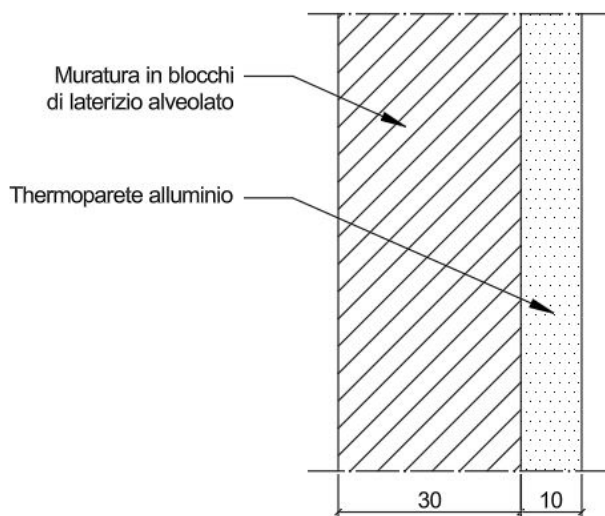


Figura 3.11: Stratigrafia della facciata con pannello isolante con rivestimento in alluminio

Questa scelta viene effettuata per valutare come, mantenendo costanti il numero di celle computazionali e le dimensioni del modello, un materiale predominante con una maggiore resistenza al fuoco influenzi la propagazione delle fiamme. L'obiettivo principale è verificare se l'inserimento di fasce di separazione incombustibili offra un miglioramento significativo rispetto alla loro assenza. L'analisi si concentra sul comportamento della facciata in condizioni meno critiche, dove il materiale predominante presenta una migliore reazione al fuoco.

Nel caso di un isolante rivestito in alluminio, l'efficacia della protezione al fuoco dipende dall'interazione tra il materiale isolante e il rivestimento metallico. L'alluminio, essendo un buon riflettente del calore, aiuta a rallentare la propagazione delle fiamme sulla superficie, offrendo una protezione termica aggiuntiva.

Questo approccio mira a comprendere se l'adozione delle fasce di separazione rappresenti un intervento efficace per incrementare la sicurezza antincendio in modo tangibile. Di seguito si riportano le caratteristiche termiche del materiale adottato:

Densità	1632.00 kg/m ³
Calore specifico	1.29 kJ/(kgK)
Conducibilità	1.00 W/(mK)
Emissività	0.70
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m
Calore di combustione	1.50E+4 J/kg

Tabella 3.11: Caratteristiche termiche del pannello isolante con rivestimento in alluminio

In figura 3.12 si riportano, in maniera sintetizzata, le fasi consequenziali per la creazione del modello in esame.



Figura 3.12: Fasi della modellazione

3.3.3 Facciata con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio

Tutte le impostazioni descritte nel paragrafo 3.3.2 sono applicate nella modellazione dell'edificio oggetto di un intervento di riqualificazione energetica previsto per il 2024, integrate dalle normative vigenti in materia di prevenzione incendi.

Trattandosi di un'attività soggetta al controllo dei vigili del fuoco, in quanto ai sensi del *D.P.R. 151/2011* si tratta dell'*attività n.77 "edifici destinati ad uso civile, con*

altezza antincendio superiore a 24 m”[26] ed anche normata, si fa riferimento al *D.M. 30 marzo 2022: nuovo capitolo V.13 “Chiusure d’ambito degli edifici civili”,* in vigore dal 7/7/2022.

Gli obiettivi di sicurezza antincendio perseguiti alla RTV.13 del Codice di Prevenzione Incendi sono[10]:

- limitare la probabilità di propagazione di un incendio originato all’interno dell’edificio, attraverso le sue chiusure d’ambito
- limitare la probabilità di propagazione di un incendio, originato all’esterno dell’edificio attraverso le sue chiusure d’ambito, come ad esempio nel caso di un incendio in edificio adiacente, a livello stradale o alla base dell’edificio
- evitare o limitare la caduta di parti della chiusura d’ambito dell’edificio come frammenti di facciata o altre parti comunque disgregate o incendiate, che possano compromettere l’esodo degli occupanti o l’operatività delle squadre di soccorso

Per chiusura d’ambito dell’edificio si intende la frontiera esterna dello stesso ad andamento orizzontale o verticale, costituita da strati anche realizzati con più materiali. È possibile classificare la chiusura d’ambito del caso specifico nella tipologia *”SC: chiusure d’ambito di altri edifici”*, date le caratteristiche dell’edificio su cui è installata. In termini di reazione al fuoco, la Regola Tecnica Verticale stabilisce che i componenti delle facciate di questo tipo, a prescindere da come siano realizzati, devono possedere i requisiti definiti nel capitolo S.1 del Codice di Prevenzione Incendi, di cui alla tabella 3.12.

Chiusura d’ambito	Gruppo di materiali
SB	GM2
SC	GM1

Tabella 3.12: Gruppi di materiali per la reazione al fuoco degli elementi delle chiusure d’ambito [10]

Per quanto definito precedentemente nelle tabelle 2.1 e 2.2, è necessario impiegare materiali di rivestimento a parete con classe B-s1,d0, mentre per la copertura e gli isolanti in vista si ha classe A2,s1-d0.

Trattandosi dello studio di una facciata semplice, devono essere realizzate anche fasce di separazione in corrispondenza delle proiezioni degli elementi costruttivi di compartimentazione orizzontale e verticale sulle chiusure d’ambito. Queste ultime si definiscono come porzioni di chiusura d’ambito costituite da uno o più elementi costruttivi, aventi classe di resistenza al fuoco determinata e materiali classificati per reazione al fuoco, al fine di limitare la propagazione orizzontale o verticale dell’incendio. Tali fasce devono essere realizzate anche in corrispondenza delle proiezioni degli elementi costruttivi di compartimentazione orizzontale e verticale sulla copertura.[10]

Nel capitolo V.13 del Codice vengono fornite le indicazioni relative alla realizzazione di tali fasce di separazione, che devono:

- in facciata, essere realizzate con materiali in classe di reazione al fuoco non inferiore a A2-s1,d0, costituite da uno o più elementi costruttivi aventi classe di resistenza al fuoco E 30-ef (o→i) o RE 30-ef (o→i) se portanti

- in copertura, avere una classe di comportamento al fuoco esterno BROOF (t2), BROOF (t3), BROOF (t4) o una resistenza al fuoco EI 30

Inoltre, le porzioni di chiusura d'ambito incluse nelle fasce di separazione, così come eventuali altre protezioni, possono presentare aperture solo se dotate di serrande tagliafuoco o di un sistema equivalente con chiusura automatica in caso di incendio, con gli stessi requisiti di resistenza al fuoco delle fasce stesse; oppure devono essere testate in configurazione completa come previsto dalla norma *EN 1364-3*. [10] In facciata, per limitare la propagazione verticale dell'incendio, si realizza la fascia di separazione orizzontale garantendone uno sviluppo almeno pari ad 1,00 m in totale.

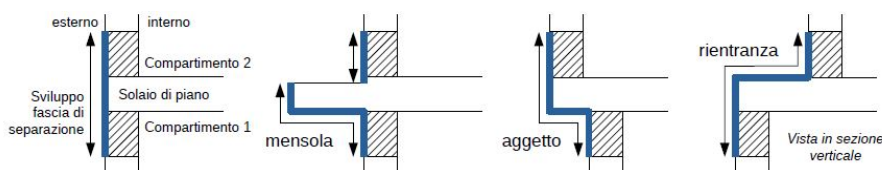


Figura 3.13: Esempi di fascia di separazione orizzontale in facciata [10]

Il medesimo principio è seguito per la realizzazione delle fasce di separazione verticali, sia in facciata che in copertura, che limitano la propagazione orizzontale dell'incendio.

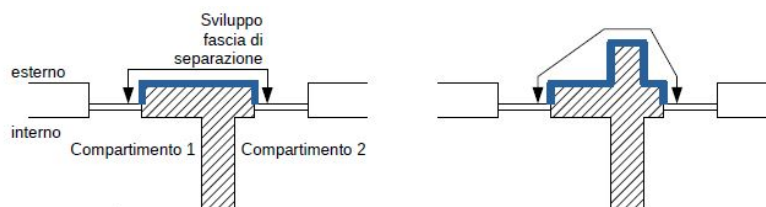


Figura 3.14: Esempi di fascia di separazione verticale in facciata [10]

La modellazione di tali fasce di separazione, nel programma PyroSim, avviene tramite l'impiego di materiale con caratteristiche REI, ossia con classe di reazione al fuoco A1 non combustibile, opportunamente disposto in corrispondenza dei solai, quali elementi di compartimentazione orizzontale; la tabella 3.13 ne riporta le caratteristiche termiche.

Densità	1150.00 kg/m ³
Calore specifico	0.84 kJ/(kgK)
Conduktività	0.35 W/(mk)
Emissività	0.90
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m

Tabella 3.13: Caratteristiche termiche della fascia di separazione

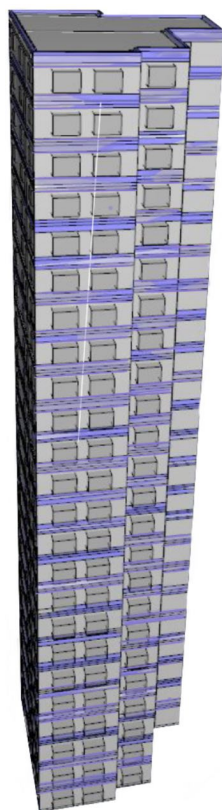


Figura 3.15: Modellazione edificio con fasce di separazione

3.3.4 Modellazione del serramento

Riprendendo quanto anticipato nel paragrafo 3.3.2 si farà cenno all'effettivo comportamento delle finestre in caso di incendio. La loro condotta durante un incendio è cruciale sia per la sicurezza delle persone all'interno di un edificio sia per l'evoluzione dell'incendio stesso.

Le finestre in vetro, specie quelle non resistenti al fuoco, tendono a rompersi a causa del rapido aumento della temperatura, il vetro si espande in modo disomogeneo a causa del calore e quando si infrange l'aria esterna entra nell'ambiente, alimentando l'incendio con ossigeno e accelerandone la propagazione. Si crea così una corrente d'aria che può trasformarsi in un effetto camino. Questo fenomeno è particolarmente pericoloso in edifici alti o in ambienti chiusi con aperture limitate.

Le finestre chiuse, invece, possono aiutare a confinare il fuoco in un'area, almeno per un certo periodo, limitando l'afflusso di ossigeno. Tuttavia, la durata di questa "barriera" ovviamente dipende dal tipo di finestra e dal materiale di costruzione.

Quando una finestra si rompe, oltre all'aria in entrata vi è anche il problema del fumo che fuoriesce dall'edificio, altrettanto pericoloso quanto il fuoco stesso, poiché riduce la visibilità, ostacola l'evacuazione, può essere tossico e si può disperdere in altri ambienti.

Per rendere osservabile quanto detto, si procede con una modellazione semplificativa in cui il materiale vetro possiede le seguenti caratteristiche termiche:

Densità	2579.00 kg/m ³
Calore specifico	0.84 kJ/(kgK)
Conducibilità	1.00 W/(mk)
Emissività	0.90
Coefficiente di assorbimento	5.00E+4 1/m

Tabella 3.14: Caratteristiche termiche del vetro

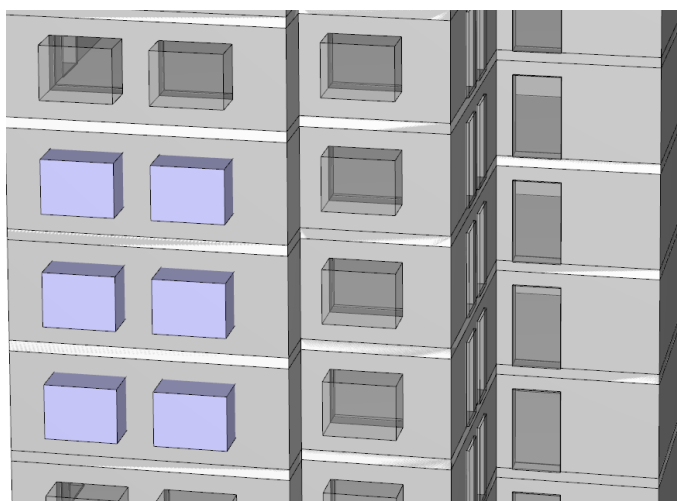


Figura 3.16: Posizionamento delle finestre

Creato il materiale vetro ed attribuito agli elementi che fungono da finestra, occorre impostare i sensori e i controlli necessari. In particolare si utilizza il *solid phase device*, le cui impostazioni sono descritte nella figura A.9, che permette di misurarne la temperatura superficiale. Successivamente occorre attribuire alle aperture i *controlli* (A.10) che andranno a regolamentare l'attivazione o meno delle stesse e che possono essere di diverso tipo, a seconda del tipo di input e di azione che devono eseguire, ovvero attivazione e disattivazione.

Si ha la possibilità, inoltre, di creare un comando personalizzato per ciascuna apertura come ad esempio l'attivazione dell'apertura di riferimento quando il sensore rileva una temperatura di 180°C, considerata la massima temperatura di servizio del vetro.

Capitolo 4

Risultati

Nel presente capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari precedentemente descritti, ponendo particolare attenzione su come un incendio si inneschi e propaghi attraverso le aperture all'interno del compartimento e come si diffonda sulla facciata.

Per ogni scenario sono valutati:

- la distribuzione delle temperature dei fumi caldi uscenti dal locale di innesco
- la distribuzione delle temperature sulla facciata
- la propagazione delle fiamme sulla facciata

In particolare, la distribuzione delle temperature dei fumi caldi che escono dal locale di innesco tramite la finestra, per ciascuno scenario, relativa al terzo e al tredicesimo piano, è rappresentata attraverso l'utilizzo della funzione *2D slice* nel modello. Questa funzione consente di visualizzare graficamente, tramite una mappa cromatica, l'andamento delle temperature su un piano all'interno del dominio computazionale.

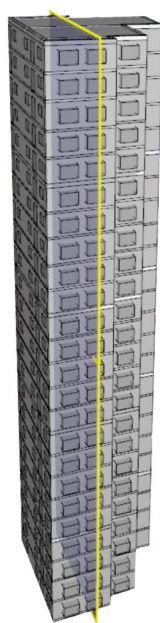


Figura 4.1: Posizionamento della slice 2D

La distribuzione delle temperature sulla facciata dell'edificio, invece, è rappresentata tramite una vista frontale della stessa, in cui viene riportata la temperatura raggiunta da ogni cella della mesh in diversi istanti temporali.

Infine, la propagazione delle fiamme sulla facciata viene illustrata con la stessa vista frontale, mostrando una rappresentazione tridimensionale dell'evoluzione delle fiamme che si propagano dal locale di innesco in vari momenti temporali.

La figura 4.2 evidenzia una corrispondenza precisa tra la curva HRR ottenuta con i calcoli analitici, seguendo le equazioni del Codice, e quella generata dal software Pyrosim sulla superficie burner. Le due curve mostrano lo stesso andamento nel tempo confermando che l'incendio, non incontrando materiali combustibili sulla facciata, conserva la medesima evoluzione del focolare, quindi dell'unica fonte di combustibile disponibile.

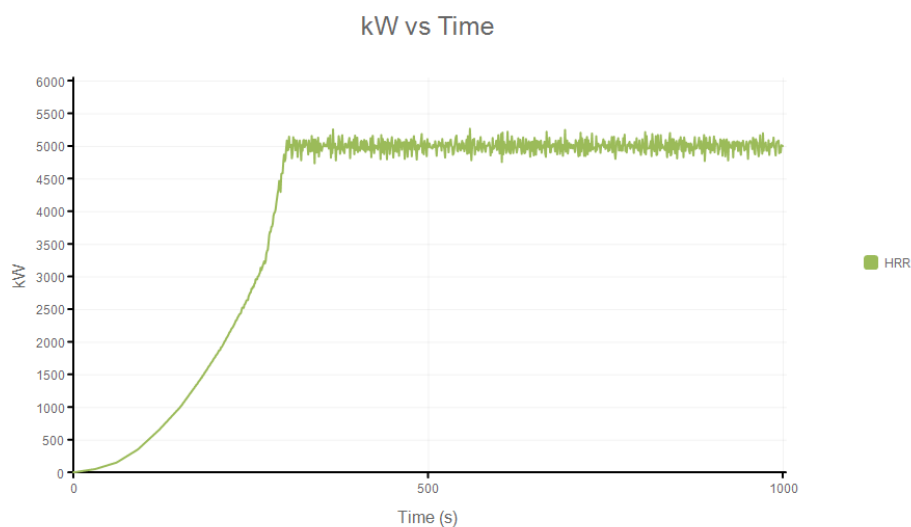


Figura 4.2: Curva RHR in PyroSim

Le prime analisi si concentrano su una facciata priva di sistemi per limitare la propagazione dell'incendio, in cui la combustione è governata esclusivamente dai materiali coinvolti. Nei paragrafi 4.1 e 4.2 vengono presentati i risultati relativi alla diffusione del fumo e all'andamento delle temperature, insieme a una simulazione tridimensionale dell'incendio, per due piani specifici: il 3° e il 13°. Questi due livelli vengono scelti per confrontare le stesse condizioni dell'evento scatenante e comprendere eventuali differenze tra un incendio che si sviluppa ai piani inferiori e uno che si verifica ai piani superiori dell'edificio.

4.1 Focolare al piano 3°

L'edificio analizzato nel caso studio presenta una struttura a telaio portante con tamponature realizzate in mattoni forati dello spessore di 0,30 m, appartenenti generalmente alla classe di reazione al fuoco Euroclasse A1 o A2, il che li rende classificabili come materiali non combustibili.

A conferma di tale classificazione, i dati rilevati dai sensori di temperatura posizionati al centro dello spessore della facciata mostrano che la temperatura rimane

stabile intorno ai 20°C per almeno i sette piani sovrastanti il compartimento di innesco, questo perchè PyroSim utilizza il tipo di superficie FDS predefinito, ovvero *INERT*, con temperatura costante pari a *TMPA*, cioè la Temperatura Ambiente nel modello. Se si definissero le proprietà termiche della parete, aspetto non rilevante per questa analisi, il grafico non sarebbe più fisso a 20°C.

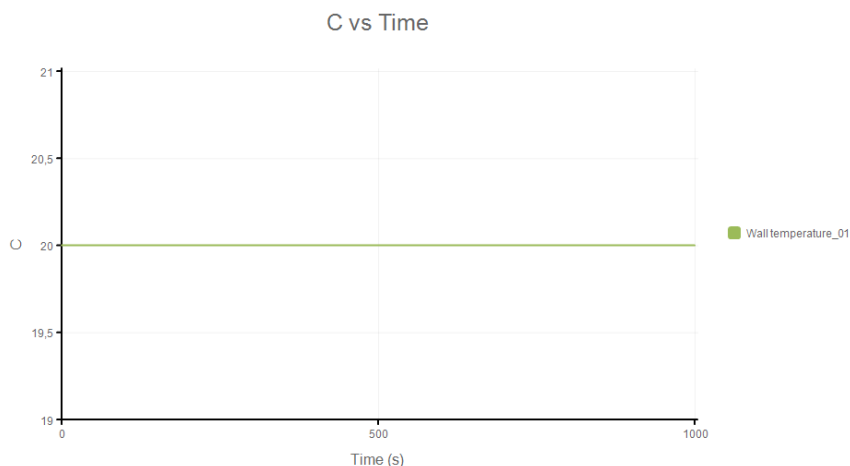


Figura 4.3: Temperatura all'interno dello spessore della parete in laterizio

È interessante osservare che, grazie a un rilevatore di temperatura posizionato pressoché al centro del soffitto del compartimento di innesco, è rilevata una temperatura massima di circa 200°C.

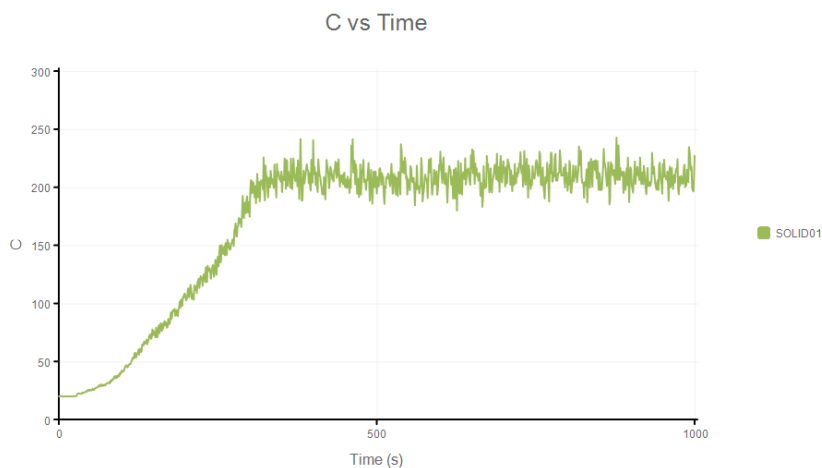


Figura 4.4: Andamento della temperatura nel compartimento di innesco

L'analisi dell'andamento delle temperature interne al compartimento dimostra che il valore osservato non rappresenta un limite massimo; al contrario, in specifiche condizioni temporali e spaziali, le temperature possono salire fino a 600°C. Questa rappresenta una condizione pericolosa in cui i gas e i materiali infiammabili presenti nell'ambiente raggiungono simultaneamente il punto di combustione, provocando un rapido propagarsi delle fiamme. Tale escalation termica avviene quando il calore irradiato si accumula a tal punto da creare un ambiente completamente avvolto

dal fuoco, rendendo estremamente difficile il controllo delle fiamme e aumentando significativamente il rischio per la sicurezza di persone e strutture.

Questi dati sono cruciali per comprendere meglio la relazione tra temperatura e comportamento dell'incendio in facciata, consentendo di ottimizzare le misure di prevenzione e controllo.

4.1.1 Facciata priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio

Prima di analizzare l'andamento delle temperature sulla facciata, è utile esaminare il comportamento dell'incendio simulato all'interno della struttura. In particolare, è importante rappresentare la dinamica della propagazione dei fumi prodotti dall'incendio in diversi momenti temporali, concentrandosi sul comparto in cui l'innesco ha luogo. Questo passaggio preliminare permette di comprendere meglio come il fumo si diffonda dall'interno degli spazi confinati, fornendo indicazioni utili per interpretare i dati sulle temperature e valutare l'impatto delle condizioni interne sulla possibile propagazione dell'incendio verso l'esterno.



Figura 4.5: Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

La figura 4.5 illustra chiaramente come i fumi caldi si propagano rapidamente dall'interno verso l'esterno dell'edificio, diffondendosi in tempi brevi ai piani superiori. In particolare, si osserva un'intensificazione del fenomeno che culmina nel raggiungimento della parte più alta della struttura entro 400 secondi. Questa rapida diffusione dei fumi rappresenta un notevole ostacolo per le operazioni di soccorso e di evacuazione, creando condizioni estremamente pericolose per i soccorritori e aumentando il rischio per la sicurezza degli occupanti, che potrebbero essere esposti a gravi conseguenze dovute all'inalazione di fumi tossici o alla mancanza di visibilità. Di seguito viene mostrata la rappresentazione temporale dell'andamento delle temperature sulla facciata, utile per comprendere il comportamento, in termini di rea-

zione al fuoco, del materiale principale della parete in risposta all'esposizione al fuoco.

Di seguito viene mostrata la rappresentazione dell'andamento delle temperature sulla facciata, utile per comprendere in modo dettagliato come il materiale reagisce al calore. Si osserva chiaramente, in linea con quanto descritto nel paragrafo 3.3.2, che grazie alla natura incombustibile del laterizio, le temperature massime si concentrano principalmente nella zona superiore dell'apertura situata in prossimità del punto di innesco dell'incendio. Questo comportamento conferma l'efficacia del materiale nel limitare la diffusione del calore. Sebbene la propagazione delle temperature interessi anche i quattro piani superiori dell'edificio, l'intensità del calore diminuisce progressivamente man mano che ci si allontana dalla fonte dell'incendio. Questo graduale calo di temperatura indica una riduzione dell'effetto termico, dimostrando come il laterizio contribuisca a contenere l'espansione delle alte temperature e a limitare il rischio di danni ai piani superiori.

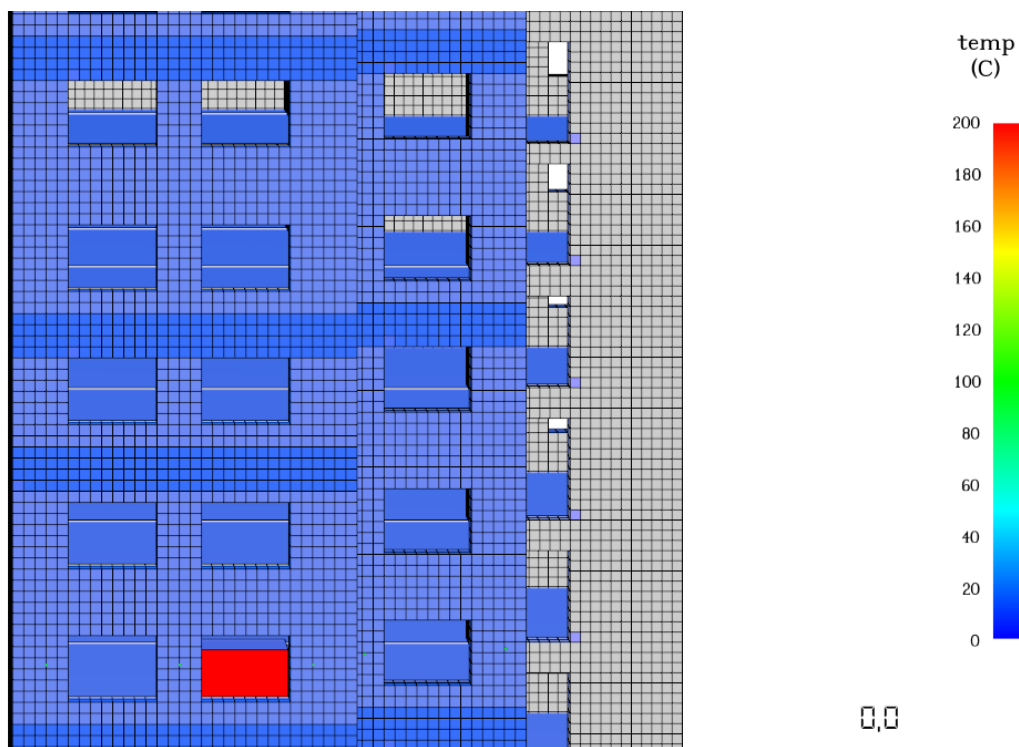


Figura 4.6: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 0 s

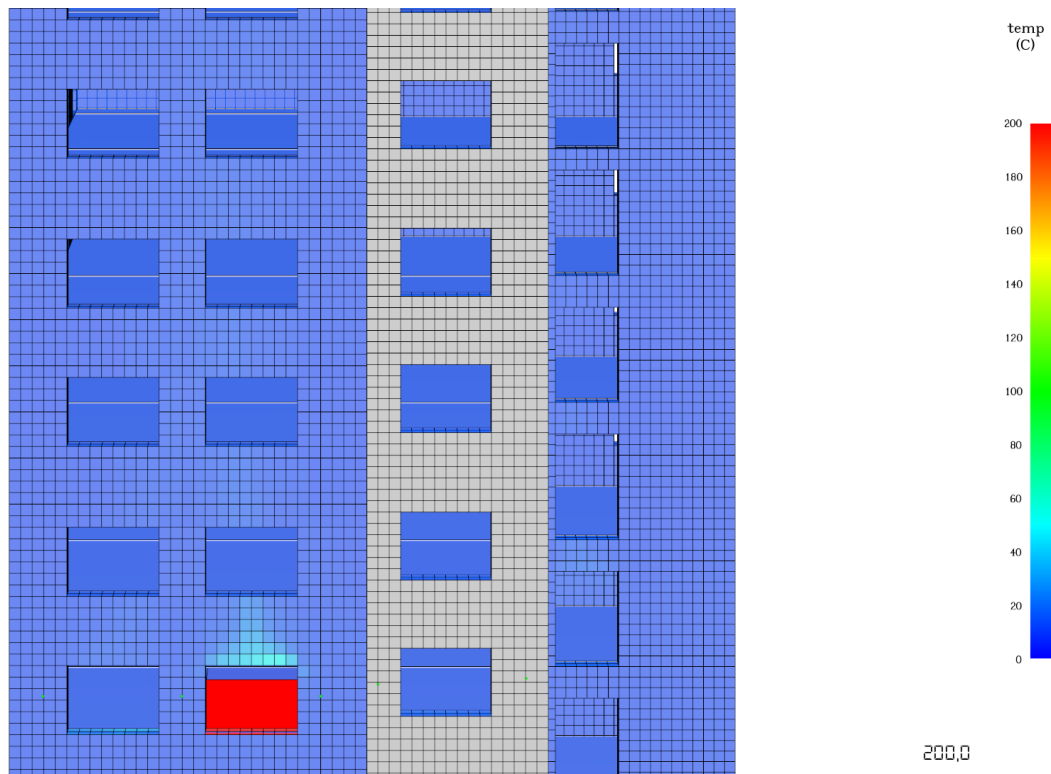


Figura 4.7: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 200 s

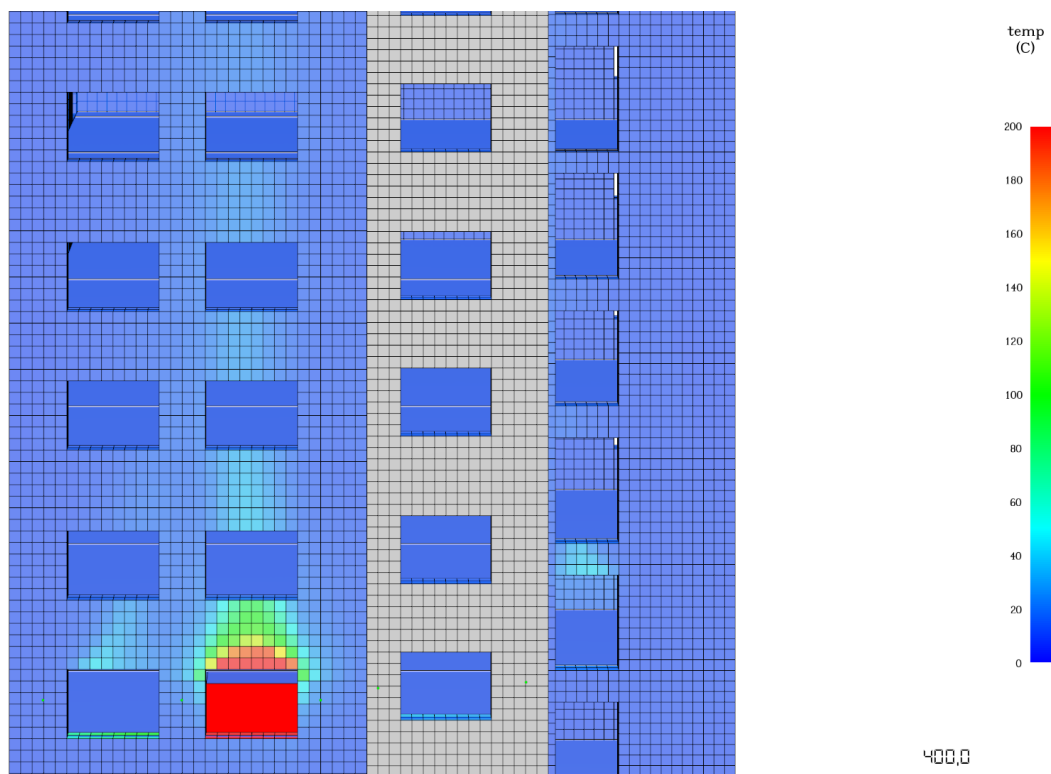


Figura 4.8: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 400 s

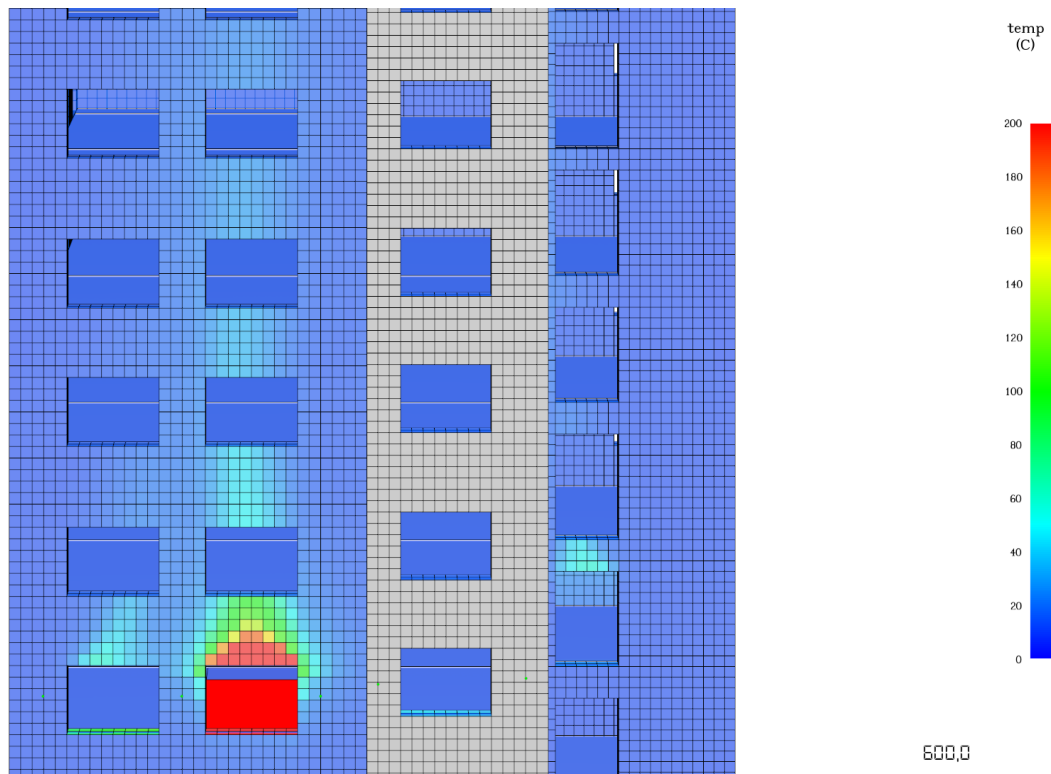


Figura 4.9: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 600 s

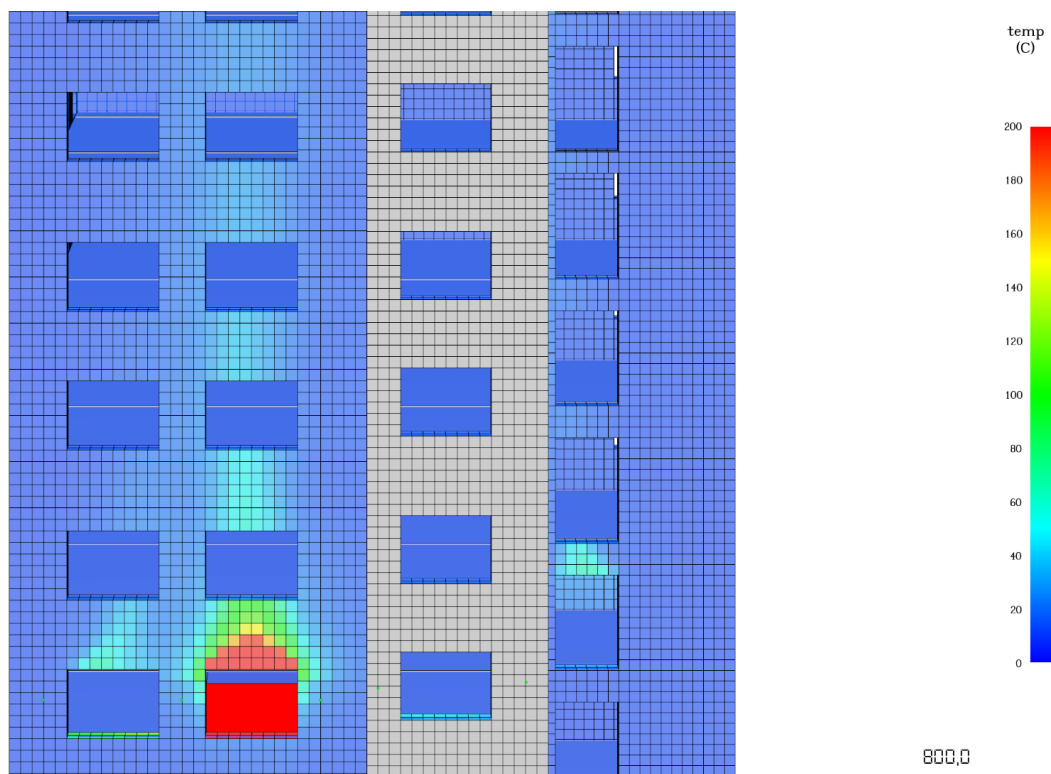


Figura 4.10: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 800 s

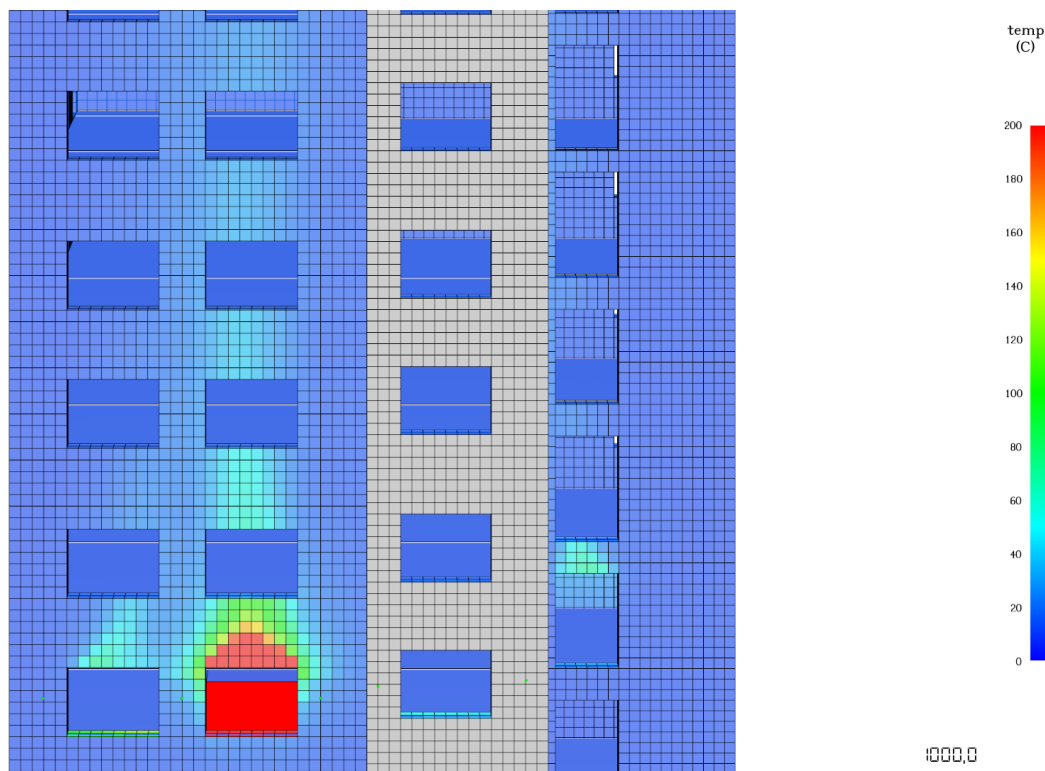


Figura 4.11: Andamento della temperatura del materiale senza soluzioni antincendio a 1000 s

Nelle figure precedenti si evidenzia come l'incendio sia determinato esclusivamente dal focolare interno, senza che la parte esterna della struttura contribuisca alla combustione. Una possibile spiegazione dell'inadeguatezza di un'analisi basata solo sulle caratteristiche del materiale risiede nella complessità dei componenti della facciata. Infatti, i diversi materiali presenti negli strati della facciata possiedono caratteristiche di combustione eterogenee: ogni elemento si attiva nella combustione solo dopo che tutti i materiali circostanti hanno raggiunto simultaneamente le condizioni termiche e chimiche necessarie per innescare il processo di combustione. Questa peculiarità dei materiali compositi rende l'incendio dipendente dall'equilibrio termico di tutti i materiali, spiegando così la mancanza di partecipazione della superficie esterna alla propagazione del fuoco fino al raggiungimento di specifiche condizioni combinate.

Per ottenere una rappresentazione grafica più dettagliata e visivamente efficace, si potrebbe modellare la facciata dell'edificio suddividendo la facciata in strati distinti, ciascuno corrispondente a un diverso materiale che la compone. Questa soluzione consentirebbe di visualizzare in modo più chiaro e immediato l'andamento dei risultati. Tuttavia, tale approccio comprometterebbe l'accuratezza della soluzione analitica del problema, poiché nel modello verrebbe meno la condizione di trasmissione continua del calore tra i vari materiali.

Infatti, in FDS ogni elemento o strato modellato viene trattato come unità separata e non permette una corretta interazione termica tra materiali in contatto. Di conseguenza, dividere la facciata in strati distinti impedirebbe al calore di essere trasmesso in modo realistico tra i materiali adiacenti, producendo un risultato che, pur essendo visivamente informativo, non rispecchierebbe fedelmente il comportamento fisico della facciata sotto l'effetto del calore.

Per comprendere meglio come la temperatura si propaghi in facciata si riporta anche l'andamento di quella relativa ai fumi caldi ai vari istanti temporali.

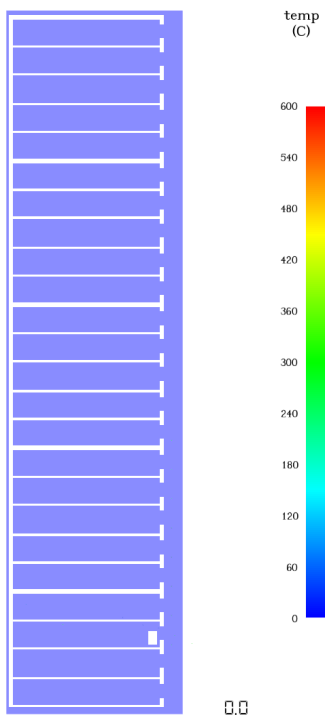


Figura 4.12: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 0 s

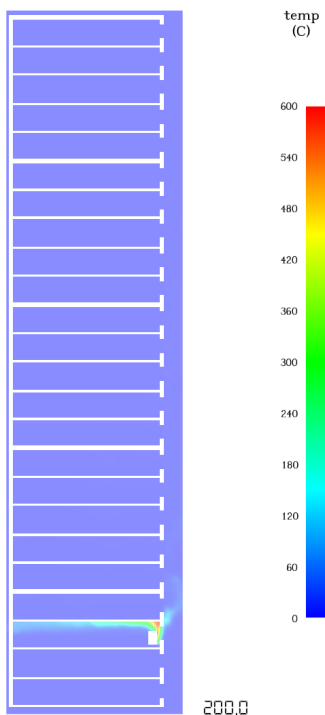


Figura 4.13: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 200 s

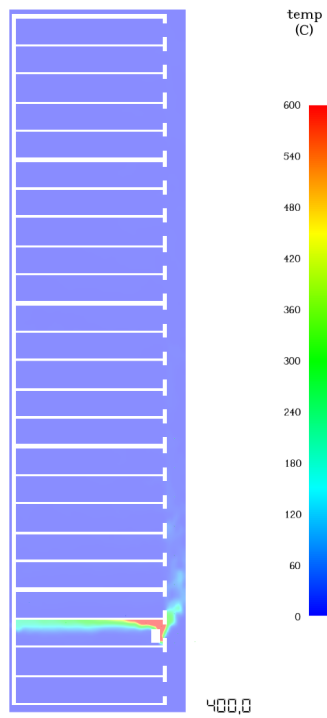


Figura 4.14: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 400 s

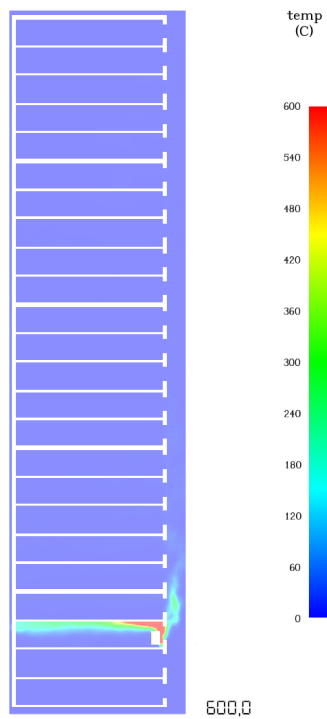


Figura 4.15: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 600 s

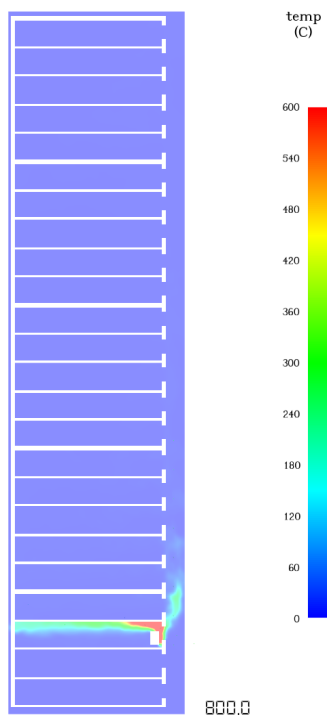


Figura 4.16: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 800 s

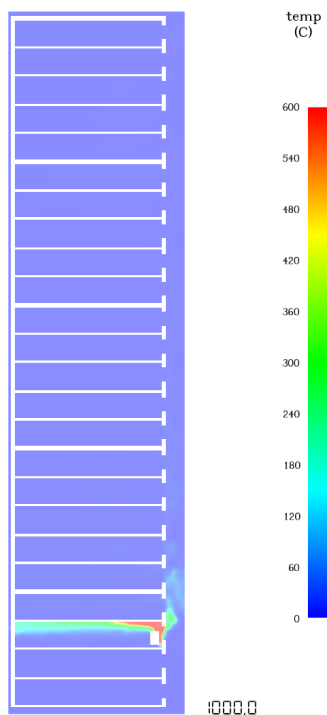


Figura 4.17: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio senza soluzioni antincendio a 1000 s

I sensori collocati a 0,25 m dalla facciata, in vari punti corrispondenti al piano di innesco, registrano temperature non particolarmente elevate. Il dispositivo di

rilevazione della fase gassosa posizionato nei pressi dell'apertura dove si trova il focolare misura una temperatura massima compresa tra 35 e 40°C.

Tuttavia, questo risultato sembra essere in contrasto con le temperature visualizzate dalla *slice* (figura 4.19) , che mostrano valori differenti rispetto a quelli registrati dai sensori. Tale discrepanza potrebbe essere dovuta alla risoluzione della mesh, cioè alla dimensione delle celle in cui lo spazio è suddiviso nel modello di simulazione.

Nel contesto della simulazione, una mesh con celle di dimensioni relativamente grandi potrebbe non essere in grado di catturare con precisione le variazioni di temperatura, specialmente nelle vicinanze di un'apertura o di un punto specifico come quello nel caso del sensore "GAS01". Questo limite può portare a una rappresentazione semplificata o sfalsata del campo termico. In altre parole, le celle più grandi riducono la granularità dei dati, causando una sorta di "sfocatura" nelle variazioni locali di temperatura e generando, di conseguenza, differenze tra le temperature rilevate dai sensori e quelle mostrate nelle *slice 2D*.

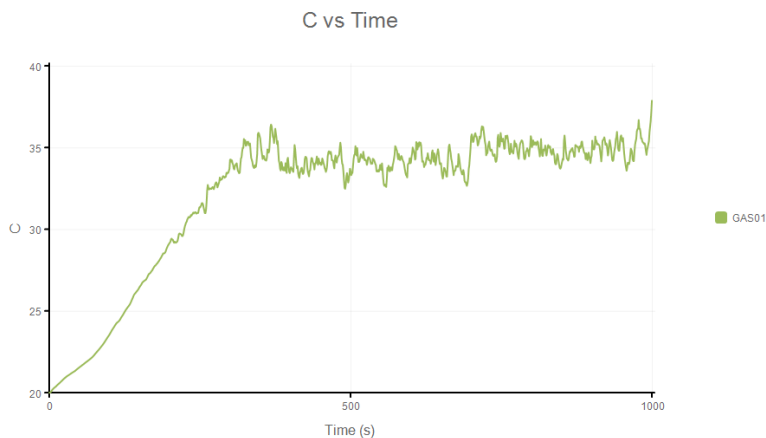


Figura 4.18: Andamento temperatura gas caldi al 3°piano rilevata dal device

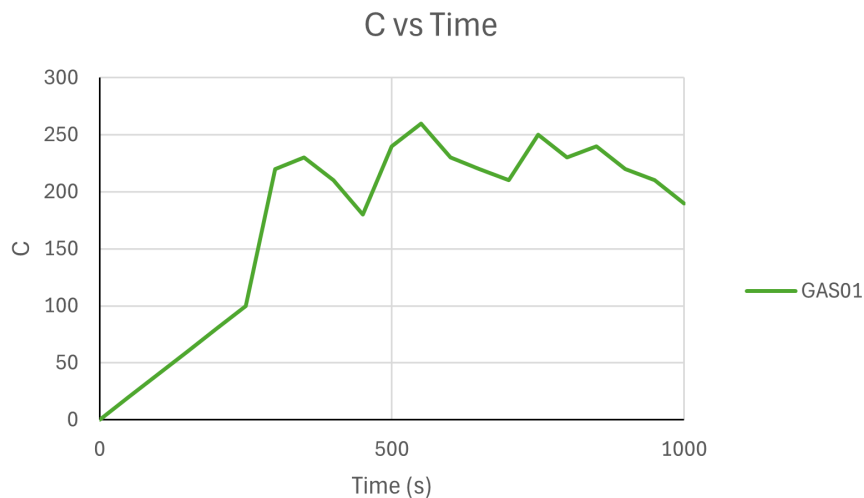


Figura 4.19: Andamento temperatura gas caldi al 3°piano rappresentata dalla slice

4.1.2 Facciata con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio

Nel contesto di un intervento di riqualificazione energetica realizzato nel 2024, è fondamentale conformarsi alla Regola Tecnica Verticale 13¹ del Codice di Prevenzione Incendi. Tale normativa stabilisce le misure di sicurezza antincendio per gli edifici e risulta particolarmente rilevante nel caso di progetti di miglioramento energetico che coinvolgano elementi potenzialmente a rischio, come le facciate.

Nel caso specifico, i risultati dello scenario analizzato riguardano l'installazione di fasce di separazione realizzate con materiali incombustibili, posizionate in corrispondenza delle proiezioni degli elementi costruttivi di compartimentazione orizzontale, quali solai. Come descritto precedentemente, vengono analizzati sia la propagazione dei fumi generati dall'incendio che l'andamento delle temperature sulla facciata, al fine di valutare la reazione al fuoco dei materiali coinvolti. Inoltre, viene esaminata la variazione delle temperature dei fumi caldi per identificare eventuali differenze tra i due scenari considerati.



Figura 4.20: Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

¹D.M. 30 marzo 2022 - Chiusure d'ambito degli edifici civili

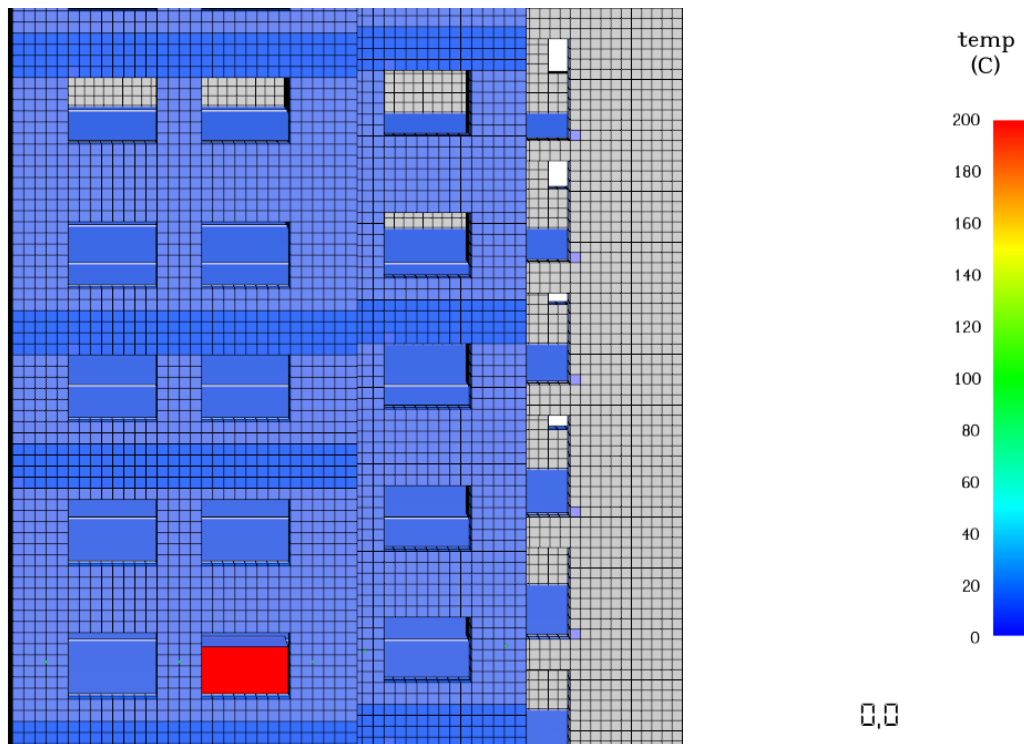


Figura 4.21: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 0 s

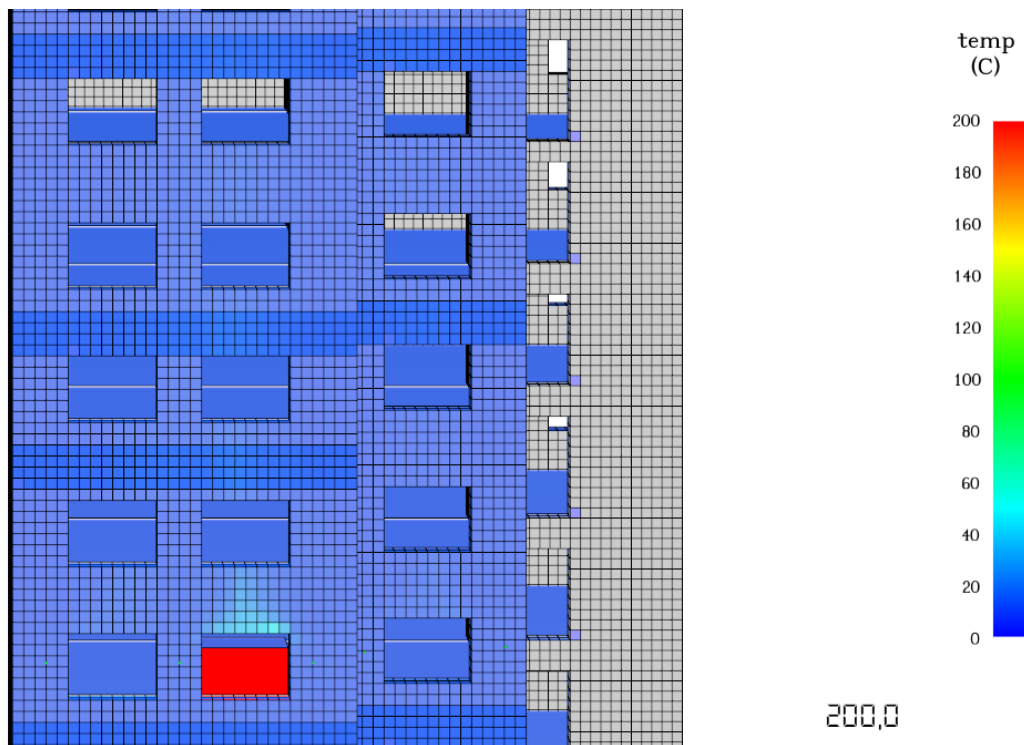


Figura 4.22: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 200 s

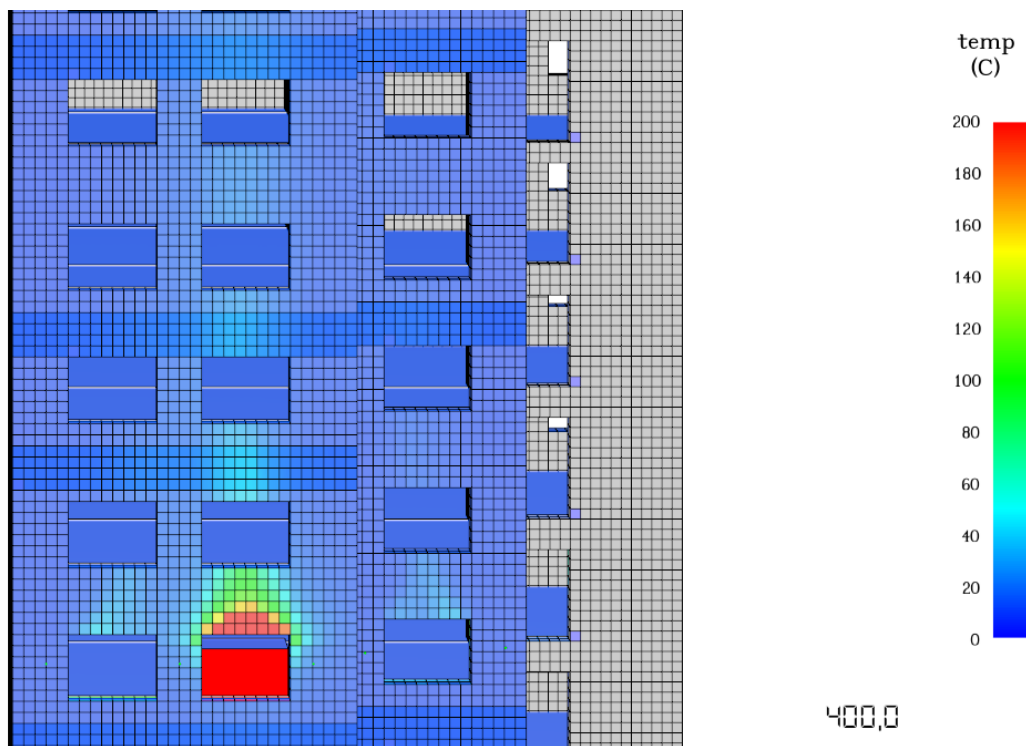


Figura 4.23: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 400 s

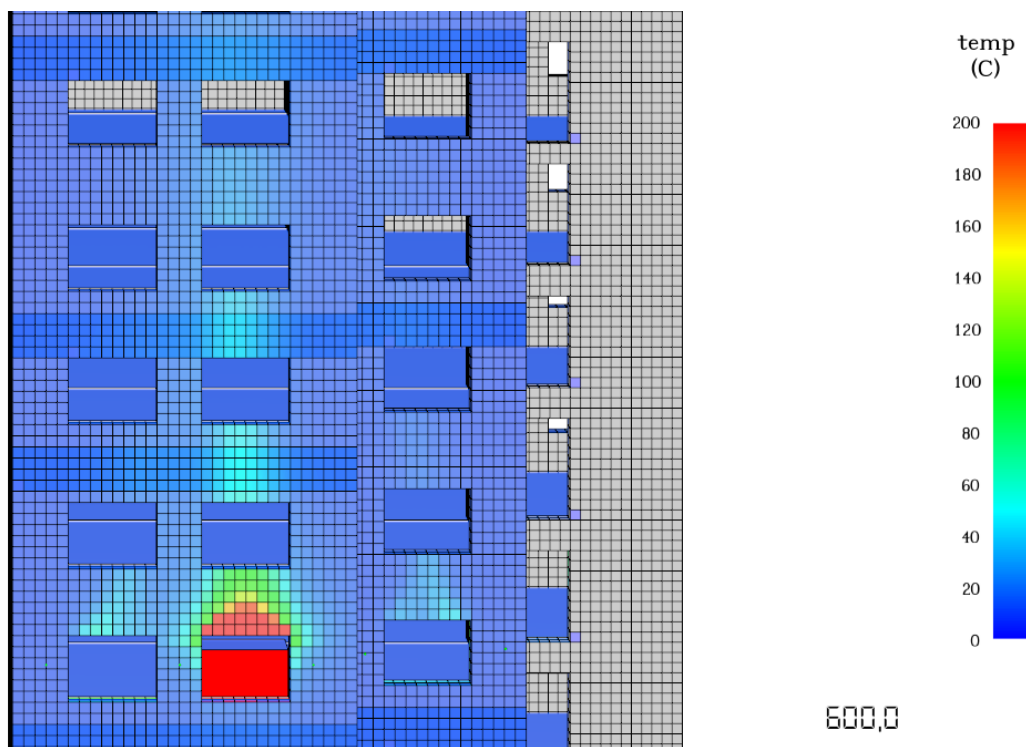


Figura 4.24: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 600 s

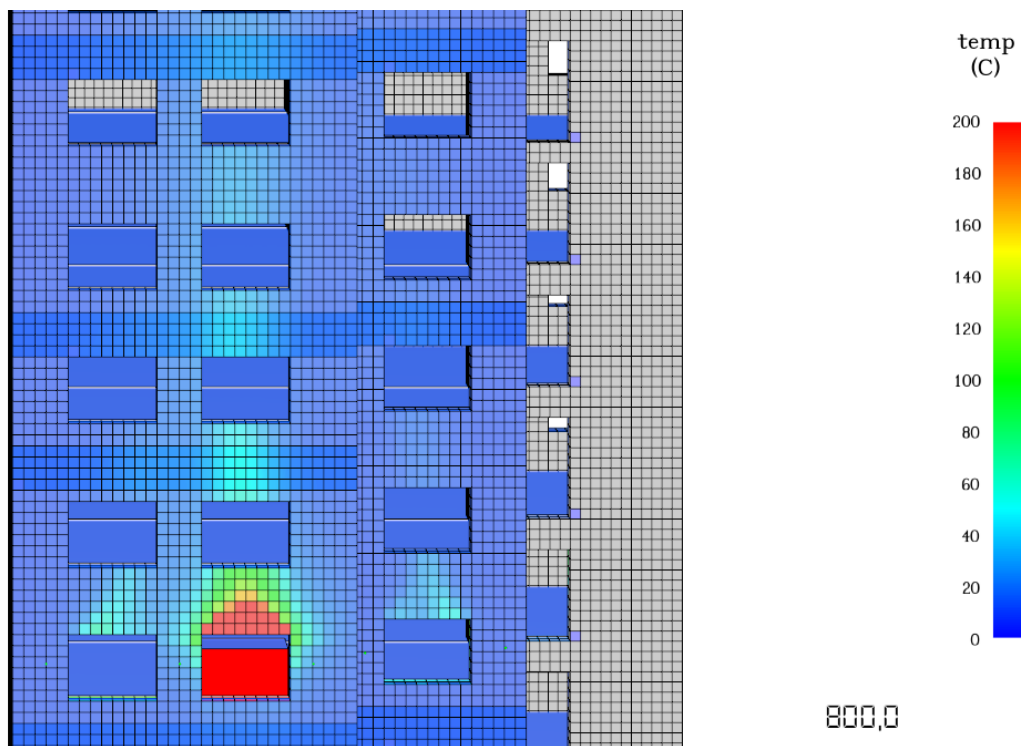


Figura 4.25: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 800 s

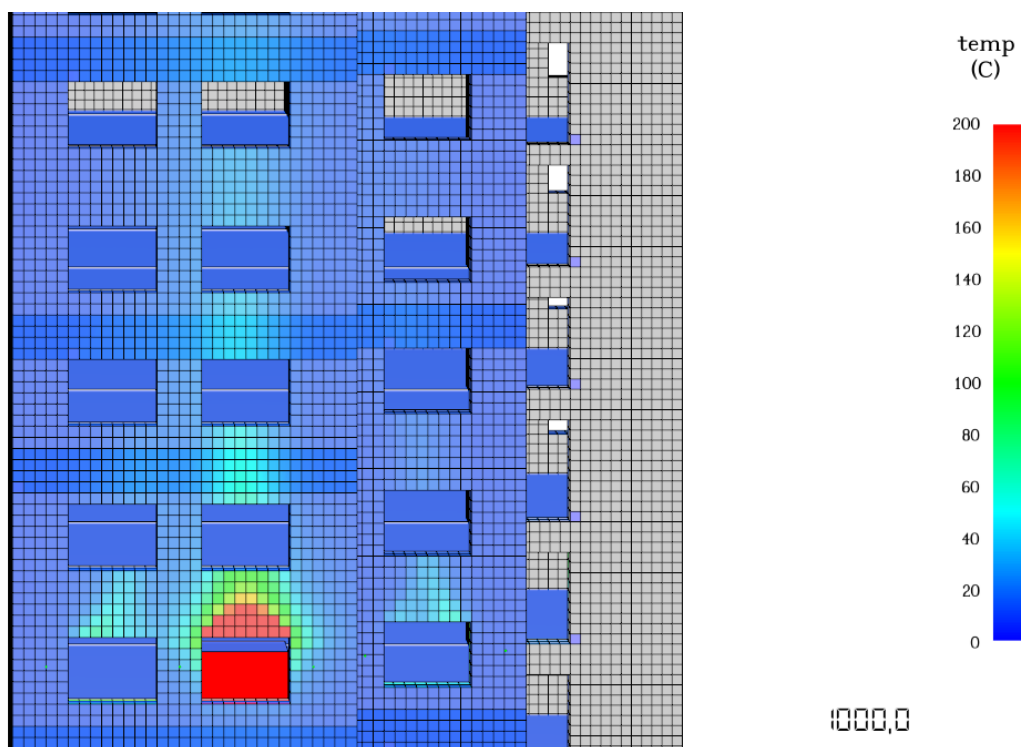


Figura 4.26: Andamento della temperatura del materiale con fasce di separazione a 1000 s

Si può osservare che l'intrinseca incombustibilità del laterizio offre una protezione già efficace contro la propagazione del fuoco, riducendo la necessità di adottare

ulteriori misure, come le fasce di separazione, che risultano meno indispensabili rispetto a quanto accade con materiali più vulnerabili alle alte temperature. Anche l'andamento delle temperature dei gas caldi è coerente con il comportamento descritto, non mostrando differenze significative rispetto allo scenario privo di specifiche misure di prevenzione antincendio.

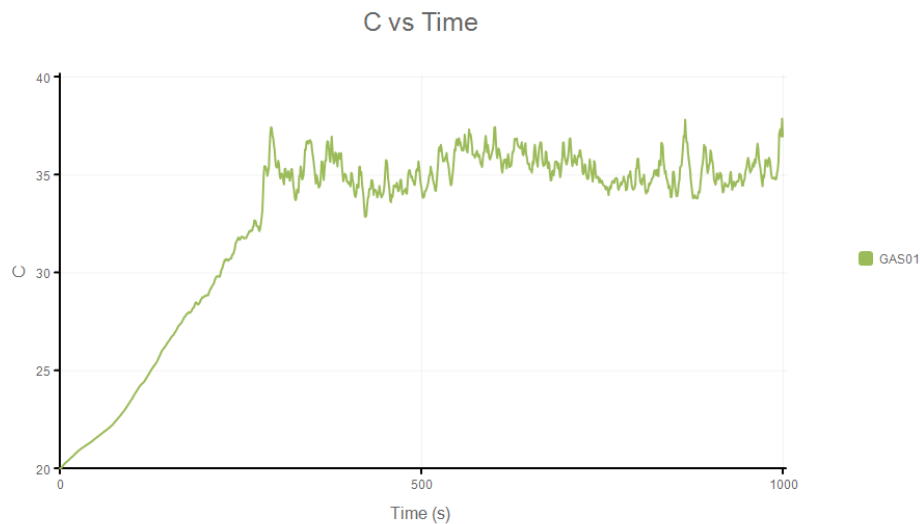


Figura 4.27: Andamento temperatura gas caldi al 3° piano con fasce di separazione

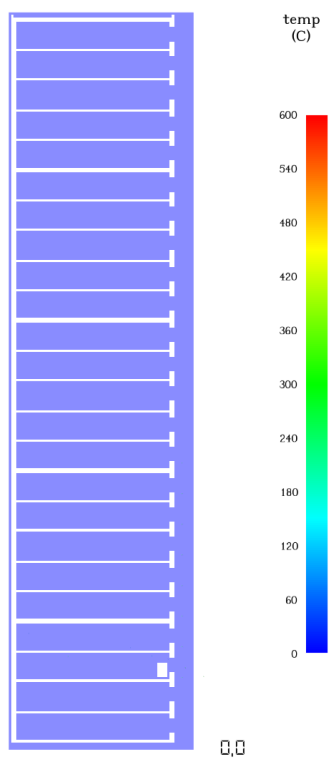


Figura 4.28: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 0 s

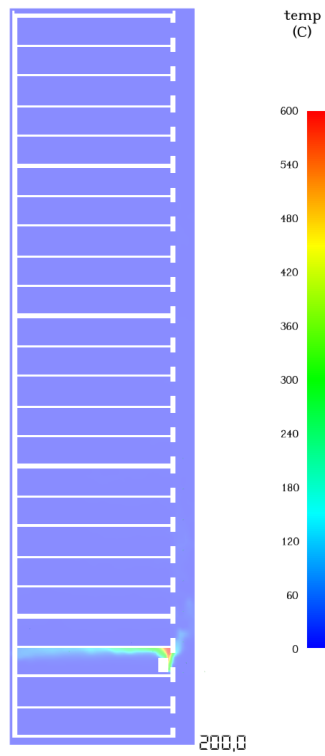


Figura 4.29: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 200 s

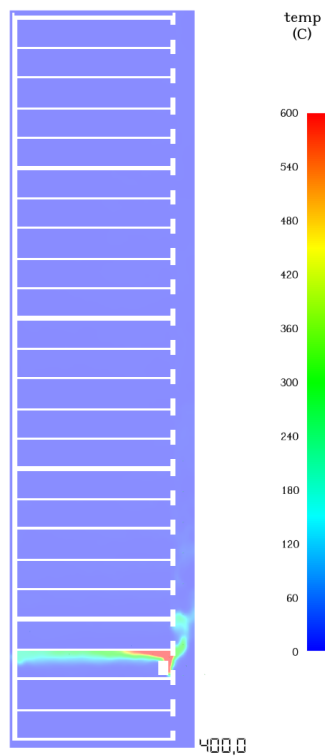


Figura 4.30: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 400 s

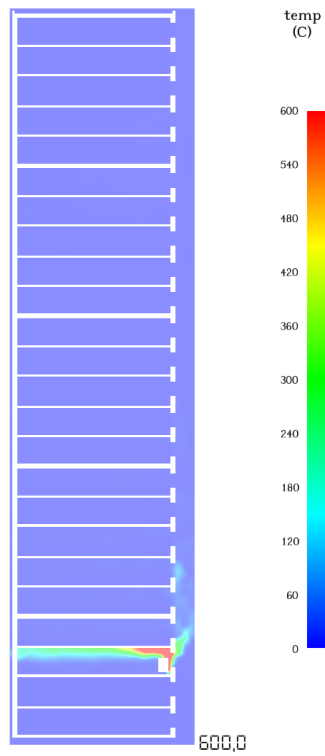


Figura 4.31: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 600 s

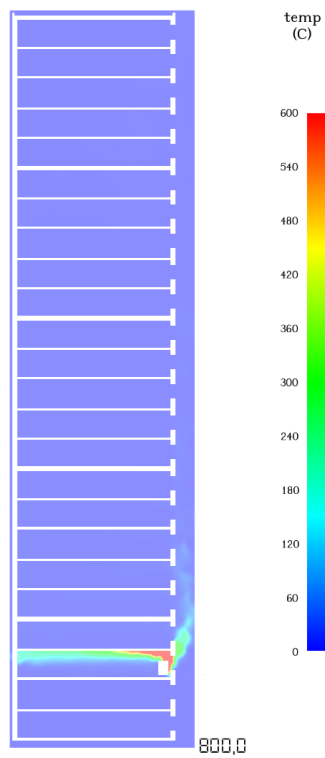


Figura 4.32: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 800 s

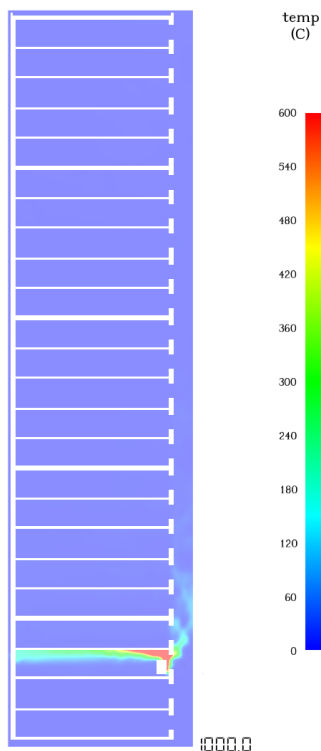


Figura 4.33: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 3° piano dell'edificio con fasce di separazione a 1000 s

4.2 Focolare al piano 13°

Sulla base dei risultati discussi nel paragrafo 4.1, si procede ora con la presentazione dei dati relativi allo scenario in cui la fonte di innesco è posizionata al 13° piano dell'edificio oggetto di analisi. L'obiettivo principale è valutare eventuali differenze, non tanto nel comportamento del materiale coinvolto, che rimane lo stesso nei vari scenari, ma piuttosto nella gestione operativa dei soccorsi e delle procedure di evacuazione.

In particolare, l'altezza elevata del 13° piano potrebbe influenzare la rapidità e l'efficacia delle operazioni di salvataggio e evacuazione rispetto ai piani inferiori. Tali variabili includono la disponibilità e l'accessibilità delle vie di fuga, la velocità di propagazione dei fumi e la facilità di intervento dei soccorritori. Sebbene il comportamento del materiale costruttivo non subisca variazioni significative, è essenziale comprendere come la posizione dell'innesco ad una maggiore altezza possa incidere sulle tempistiche e sull'efficacia della risposta di emergenza, fattori determinanti per la sicurezza complessiva dell'edificio in caso di incendio.

A tal fine, la figura 4.34 mostra il flusso dei fumi caldi evidenziando i piani coinvolti.

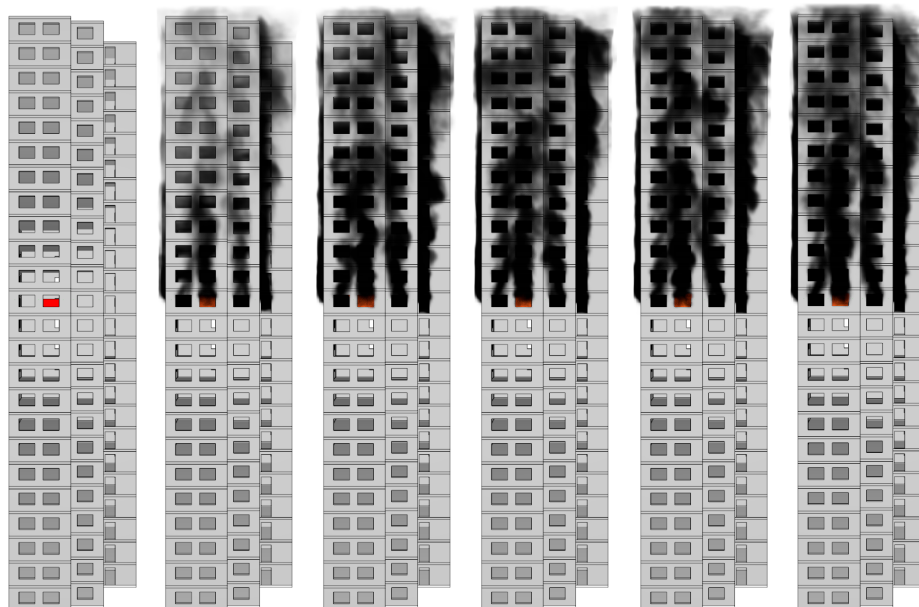


Figura 4.34: Propagazione dei fumi dal 13° piano dell’edificio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

Risulta evidente che, rispetto allo scenario illustrato nella figura 4.5, un incendio che si sviluppa ai piani alti di una struttura con medesime caratteristiche composizionali offre condizioni di evacuazione più efficienti e sicure per gli occupanti. Questo avviene poiché i fumi caldi, che rappresentano una delle principali cause di mortalità negli incendi per via della loro tossicità e della limitazione di visibilità che provocano, tendono naturalmente a salire verso l’alto. Di conseguenza, ai piani inferiori, non direttamente coinvolti dal propagarsi dei fumi, si riducono i rischi ed è facilitato l’intervento dei soccorsi. Per completezza, nella figura 4.35 è riportato l’andamento dei gas caldi rilevato dal dispositivo *gas-phase* posizionato vicino all’apertura da cui fuoriescono i fumi dell’incendio, mostrando una dinamica molto simile a quella osservata nello scenario con innesco al 3° piano.

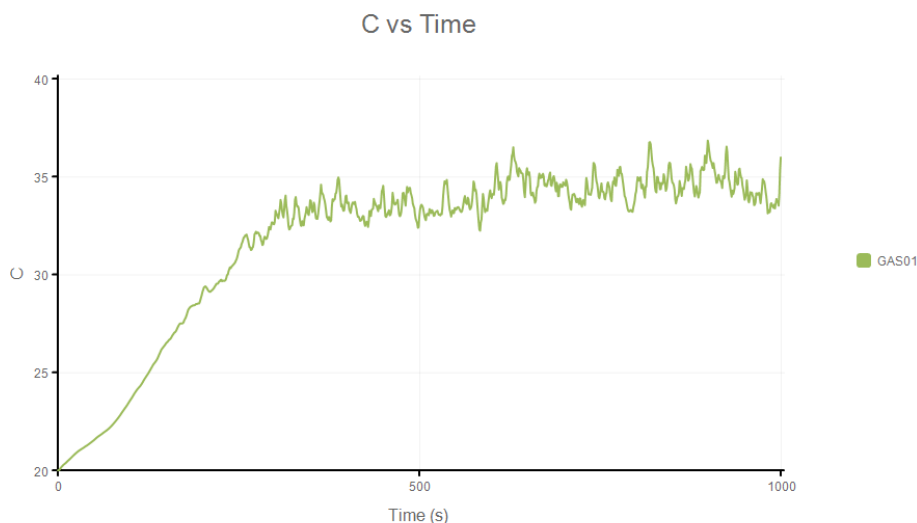


Figura 4.35: Andamento temperatura gas caldi al 13° piano

Viene inoltre rappresentata la distribuzione delle temperature sulla facciata nel caso di innesco al 13° piano, senza tuttavia considerare il comportamento del materiale, poiché rimane invariato rispetto alla situazione precedente.

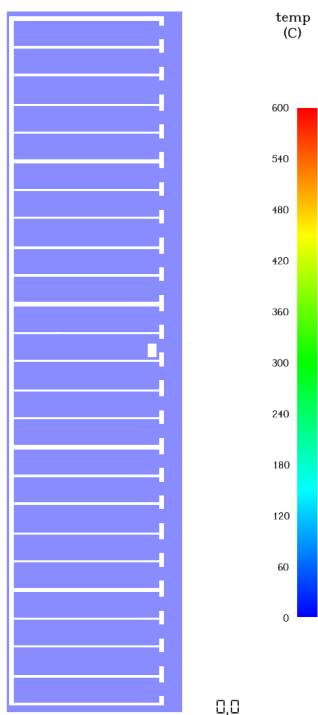


Figura 4.36: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 0 s

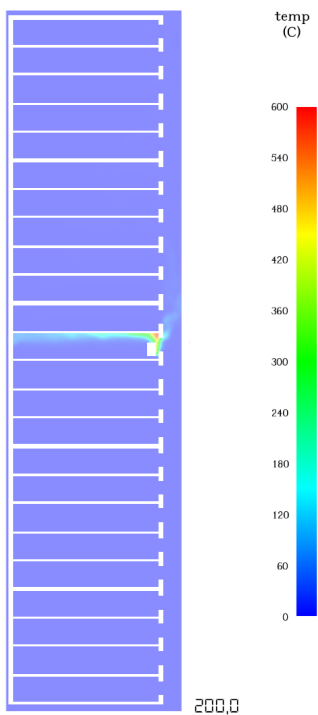


Figura 4.37: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 200 s

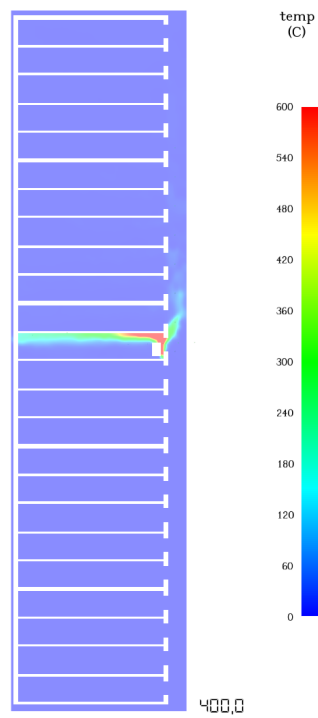


Figura 4.38: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 400 s

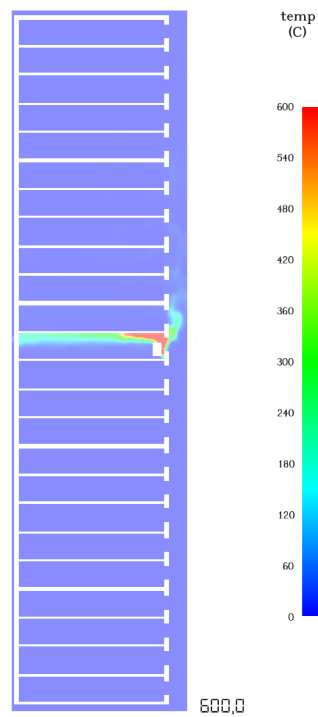


Figura 4.39: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 600 s

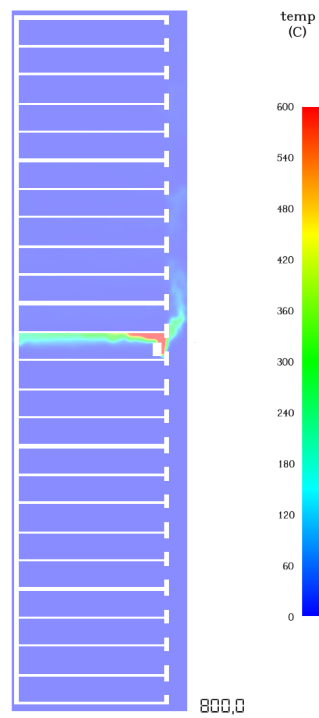


Figura 4.40: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 800 s

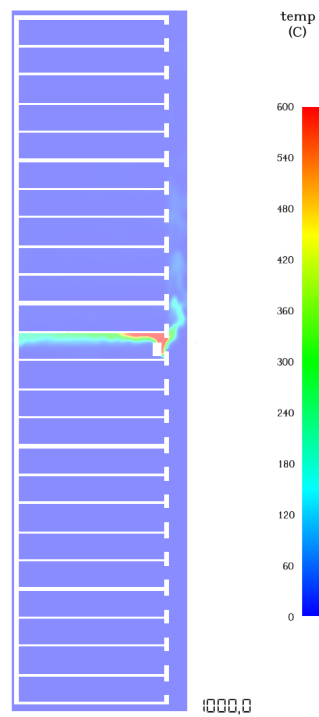


Figura 4.41: Distribuzione temporale delle temperature con innesco al 13° piano dell'edificio a 1000 s

4.3 Facciata con pannello isolante con rivestimento in alluminio

Alla luce dei risultati esposti nel paragrafo 4.1, si evidenzia che il laterizio, materiale principale dell'edificio, è intrinsecamente incombustibile. Anche con l'intonaco presente, questa caratteristica riduce significativamente i rischi di propagazione dell'incendio lungo la facciata, compensando l'assenza di fasce di separazione. In particolare, si opta per un pannello di rivestimento isolante in alluminio, che consenta di evidenziare con maggiore chiarezza le differenze di comportamento rispetto alla conformità o meno alla normativa antincendio.

4.3.1 Soluzione priva di misure atte a limitare la propagazione dell'incendio

In vista di un intervento di riqualificazione energetica dell'edificio oggetto di studio, programmato per il 2009, si sceglie di non considerare le specifiche prescrizioni normative relative alla sicurezza antincendio, concentrandosi esclusivamente sugli aspetti di efficienza energetica. Vengono quindi analizzati i risultati della simulazione, ottenuti attraverso FDS, per studiare e comprendere la dinamica di propagazione di un incendio sulla facciata dell'edificio. Analogamente ai casi studio precedenti, vengono riportati gli output relativi a:

- diffusione dei fumi

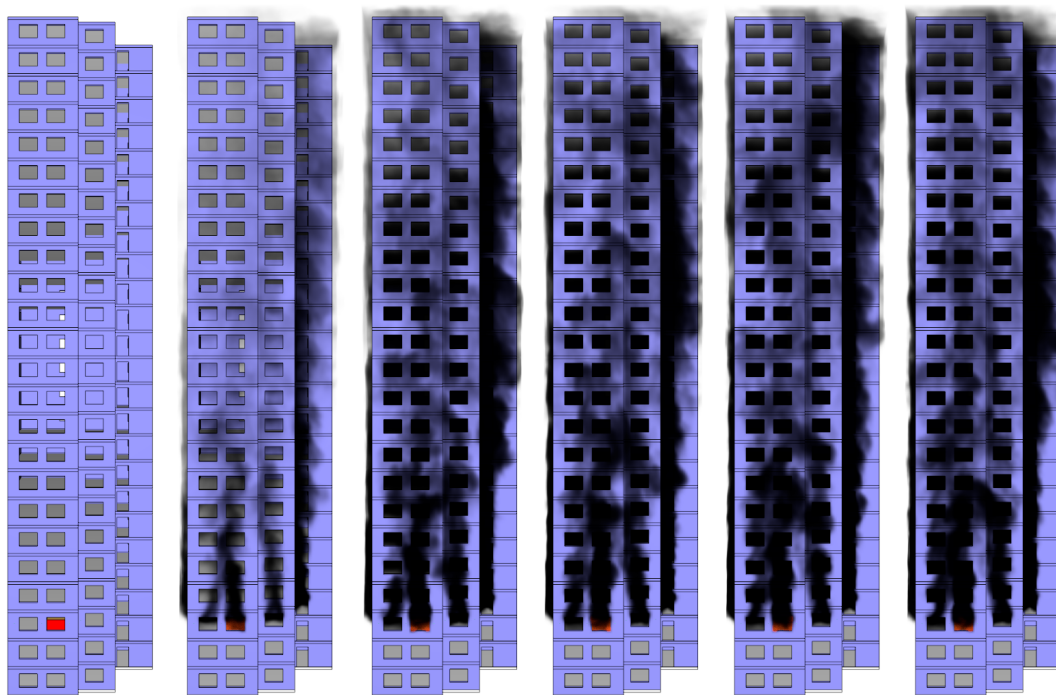


Figura 4.42: Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con pannello isolante con rivestimento in alluminio senza soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

- reazione al fuoco dei materiali utilizzati

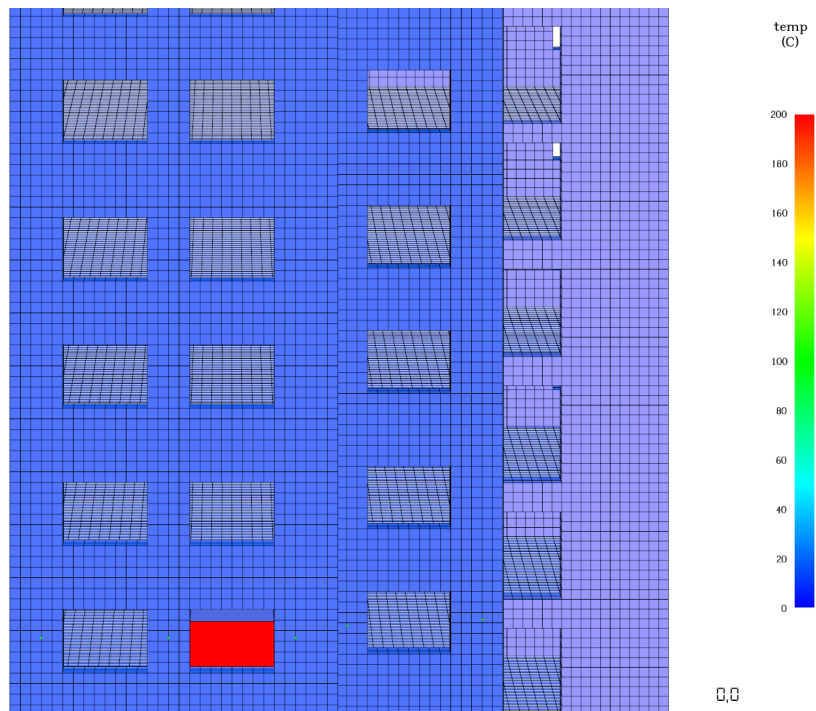


Figura 4.43: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 0 s

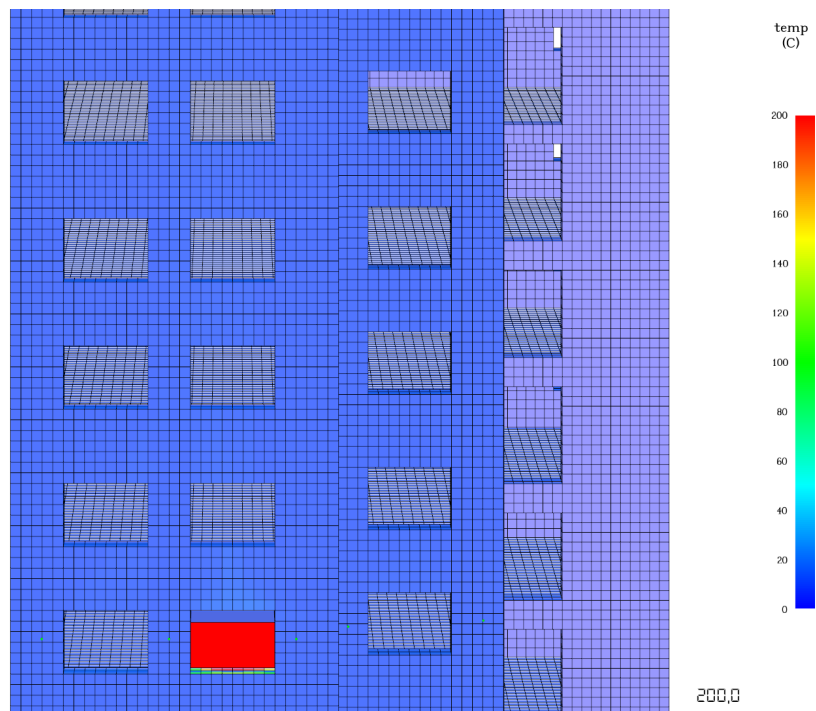


Figura 4.44: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 200 s

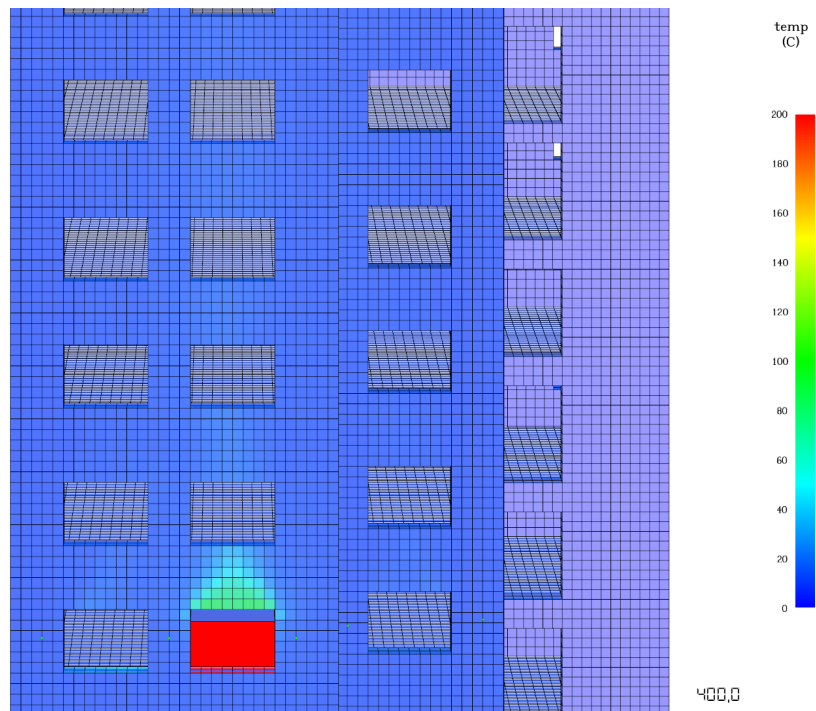


Figura 4.45: Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 400 s

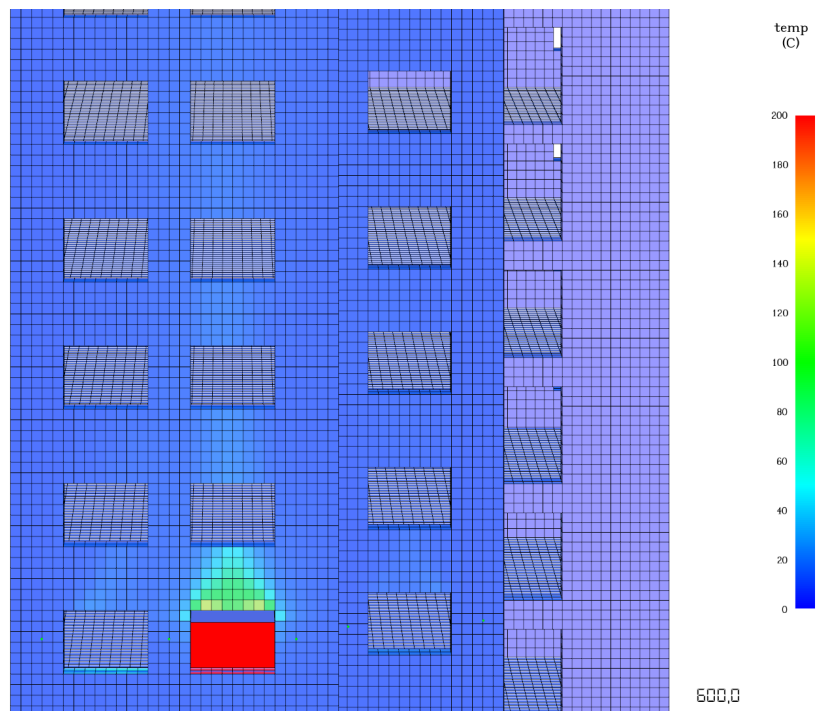


Figura 4.46: Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 600 s

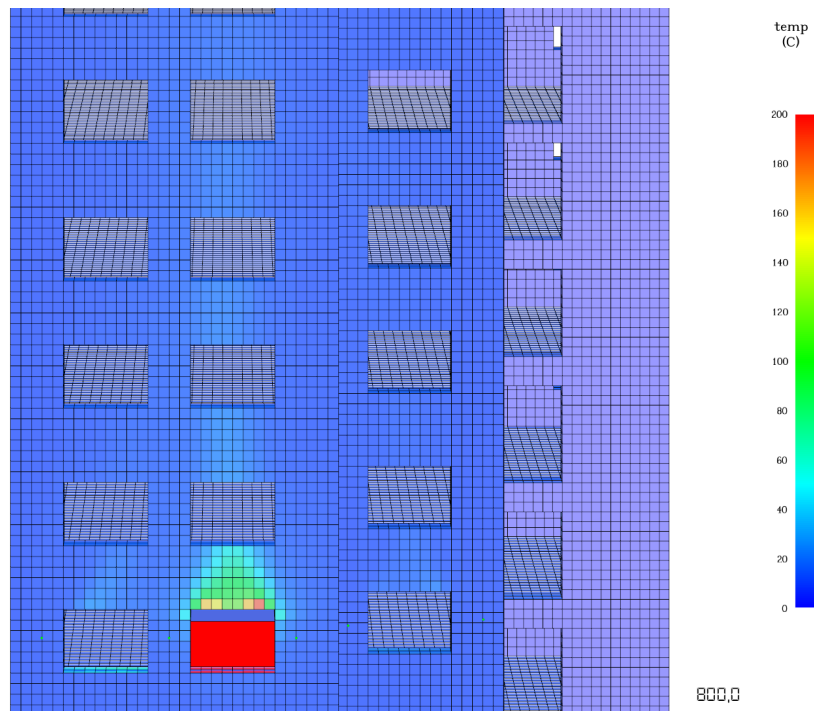


Figura 4.47: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 800 s

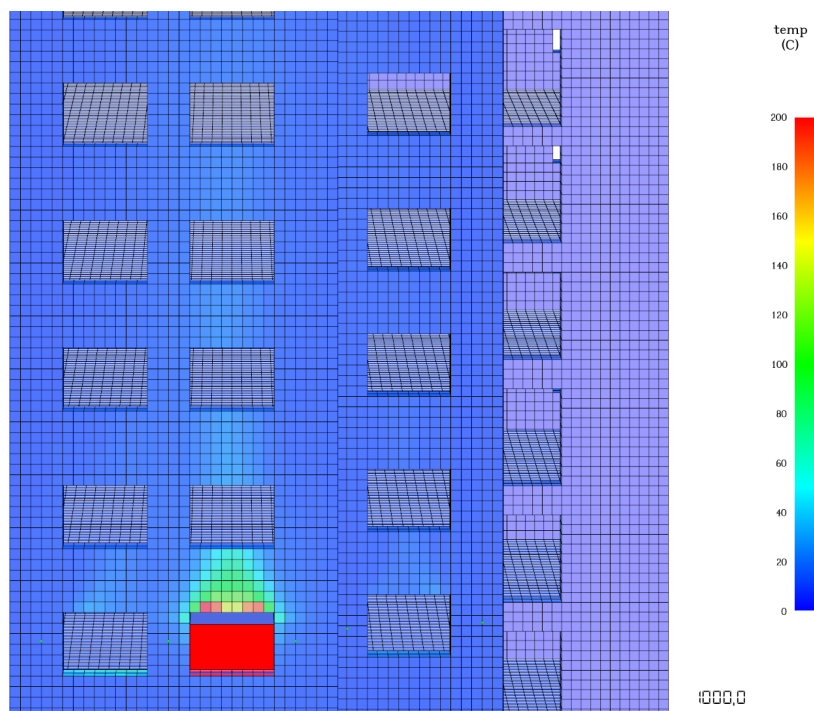


Figura 4.48: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 1000 s

- andamento delle temperature sulla superficie esterna della facciata

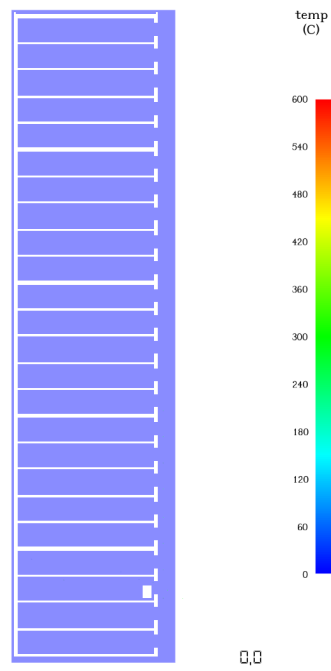


Figura 4.49: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 0 s

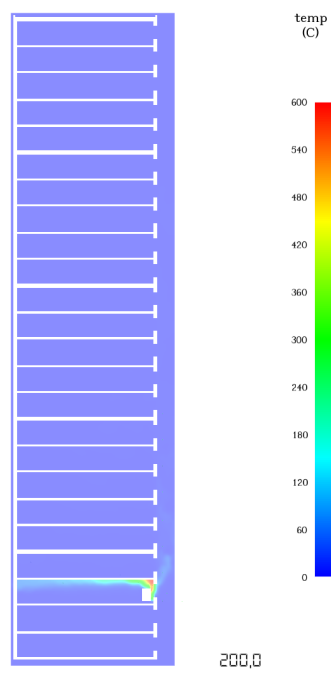


Figura 4.50: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 200 s

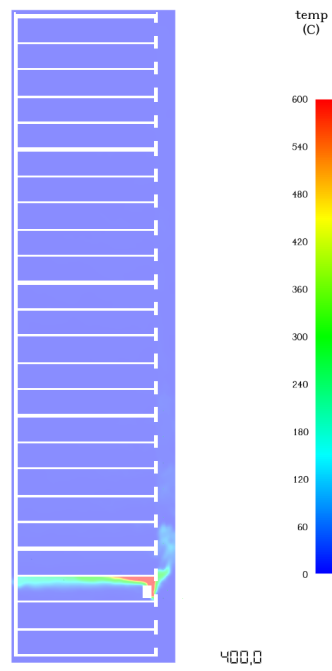


Figura 4.51: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 400 s

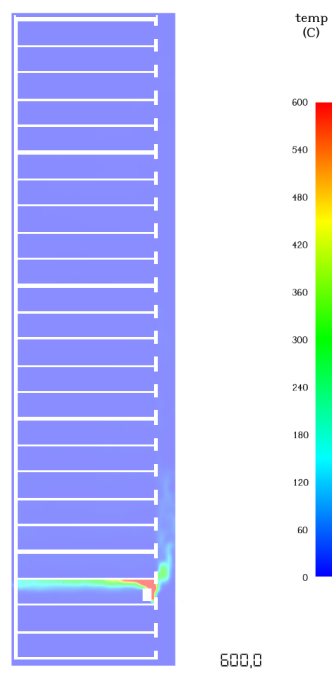


Figura 4.52: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 600 s

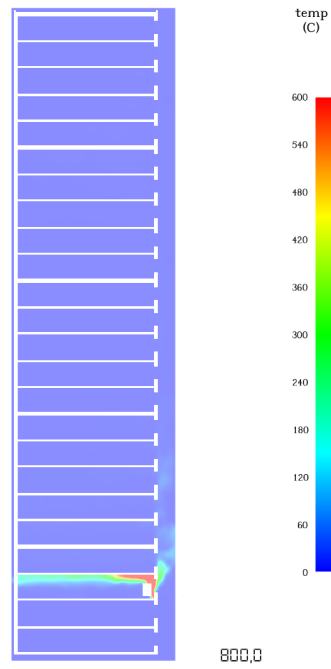


Figura 4.53: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 800 s

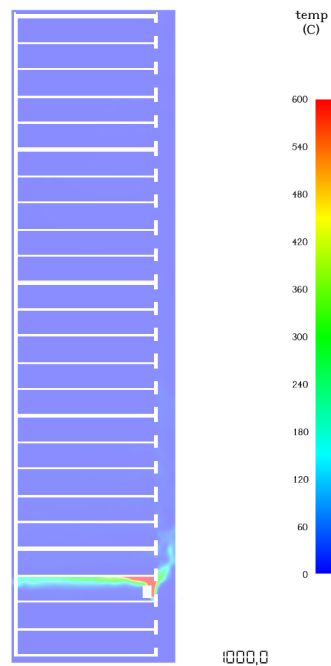


Figura 4.54: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento senza soluzioni antincendio a 1000 s

Anche in questo caso si ha una discrepanza tra i valori della temperatura rilevati dall'apposito device, posto in prossimità della facciata, e il loro andamento rappresentato dalla *slice 2D*. Tale discrepanza è sempre imputabile ad una dimensione troppo grande delle celle in cui è suddiviso il dominio computazionale.

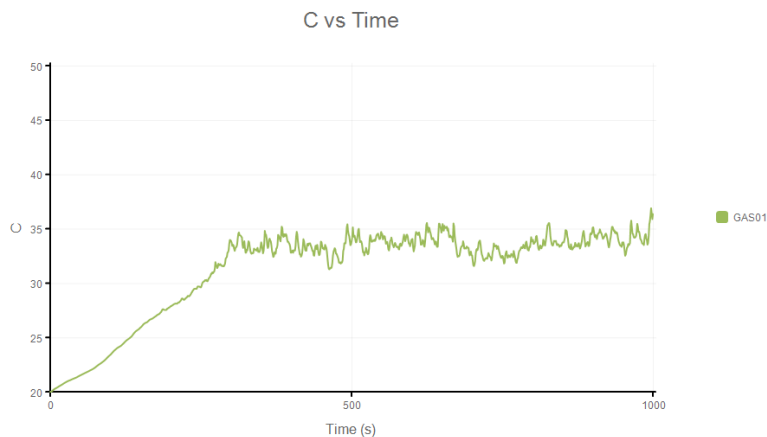


Figura 4.55: Andamento temperatura gas caldi al 3°piano con pannello insolante con rivestimento in alluminio rilevata dal device

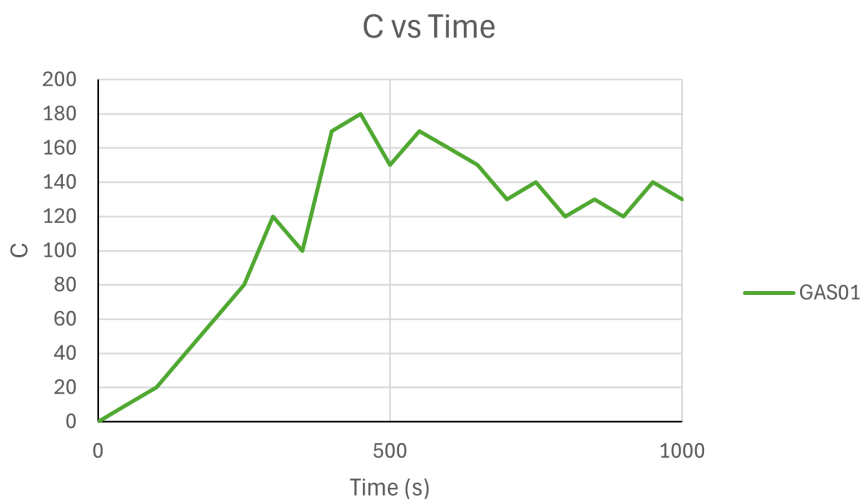


Figura 4.56: Andamento temperatura gas caldi al 3°piano con pannello insolante con rivestimento in alluminio rappresentata dalla slice

4.3.2 Soluzione con caratteristiche idonee a limitare la propagazione dell'incendio

L'ultimo scenario analizzato considera un intervento di riqualificazione energetica programmato per il 2024, seguendo le indicazioni fornite nel paragrafo 4.1.2. Anche in questa situazione, i risultati sono presentati in relazione a tre aspetti principali: la propagazione dei fumi, la reazione al fuoco dei materiali e l'andamento delle temperature sulla facciata.

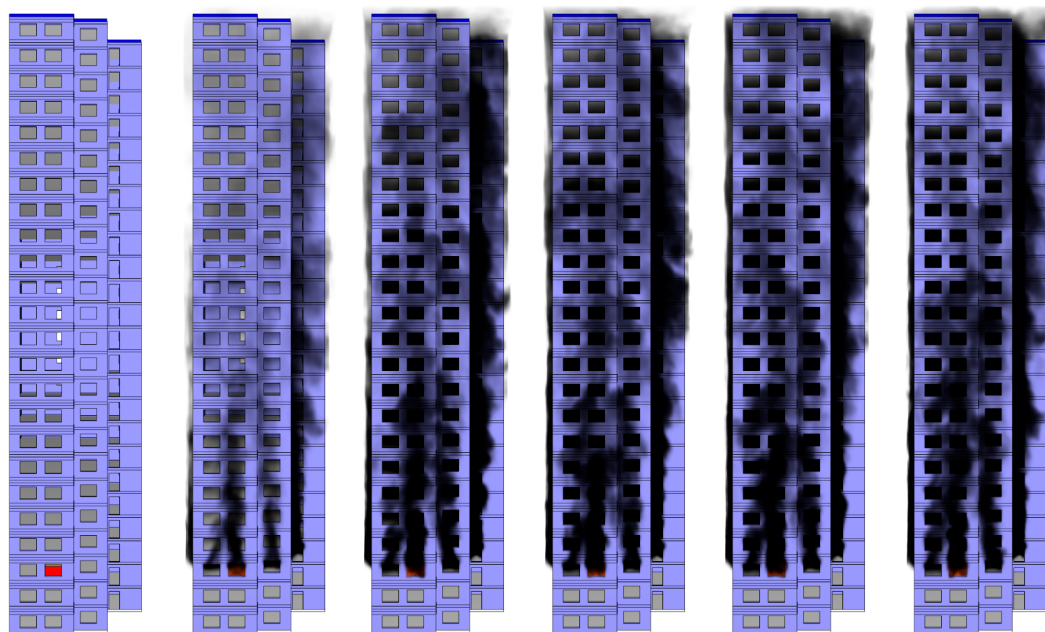


Figura 4.57: Propagazione dei fumi dal 3° piano dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

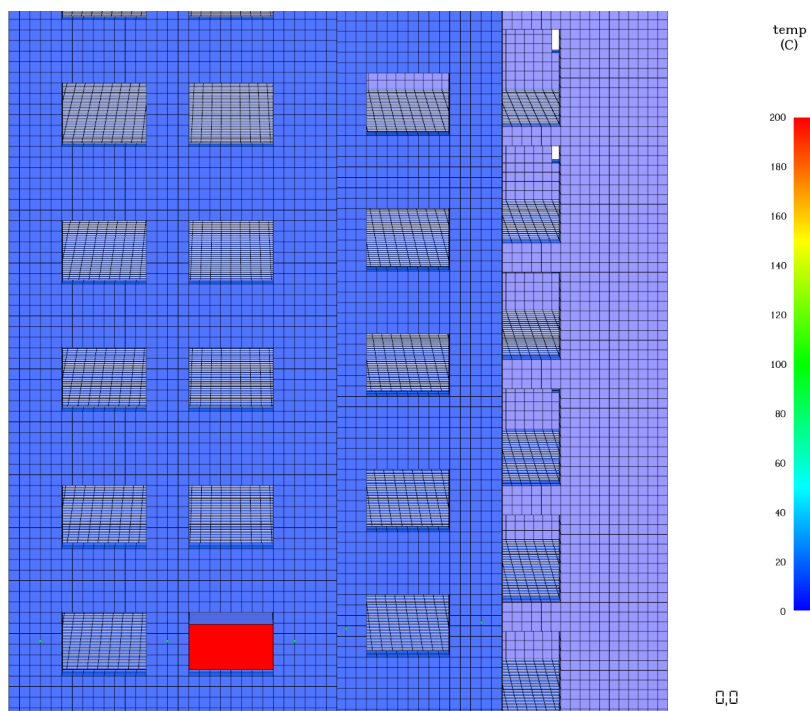


Figura 4.58: Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0 s

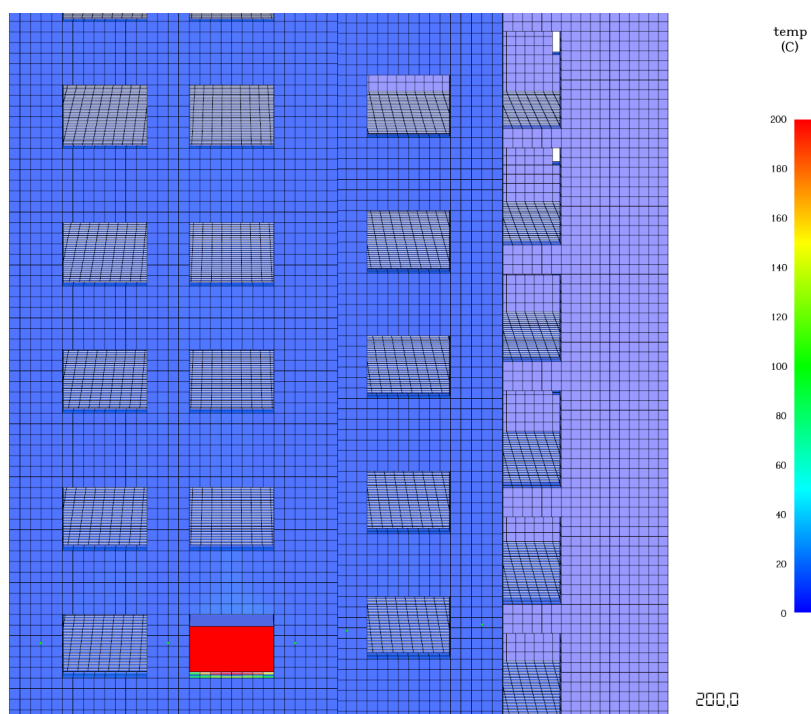


Figura 4.59: Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 200 s

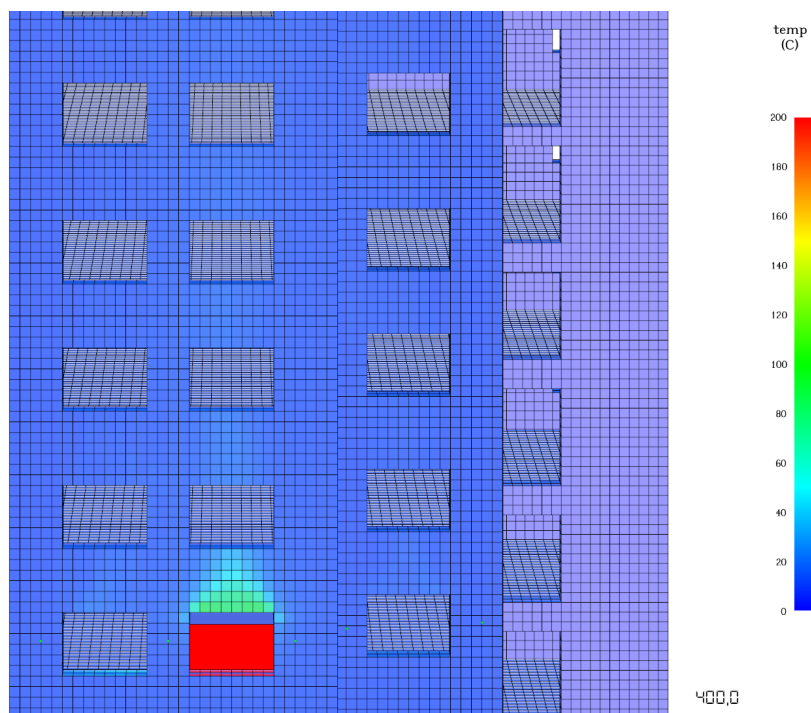


Figura 4.60: Andamento della temperatura del pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 400 s

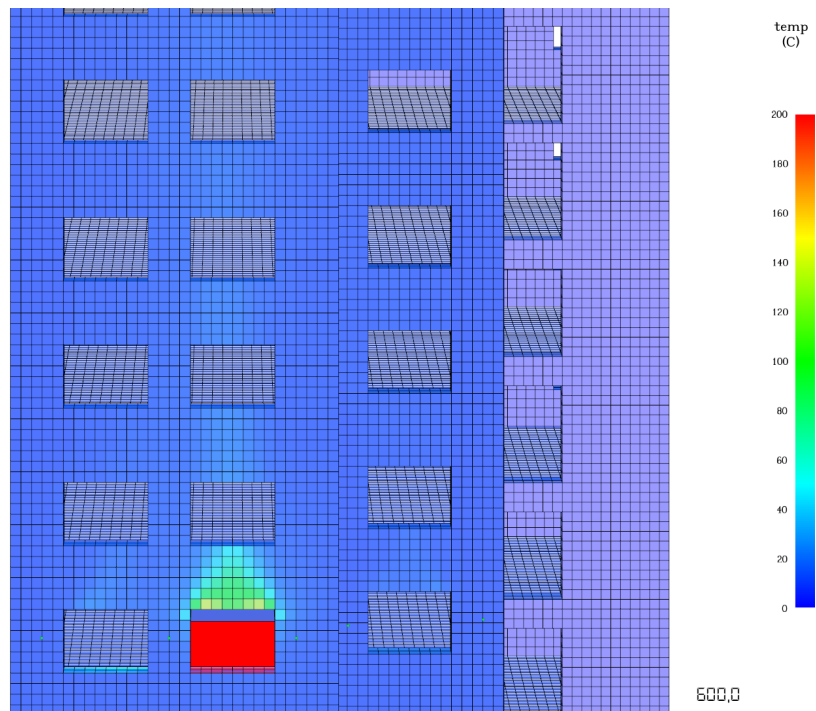


Figura 4.61: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 600 s

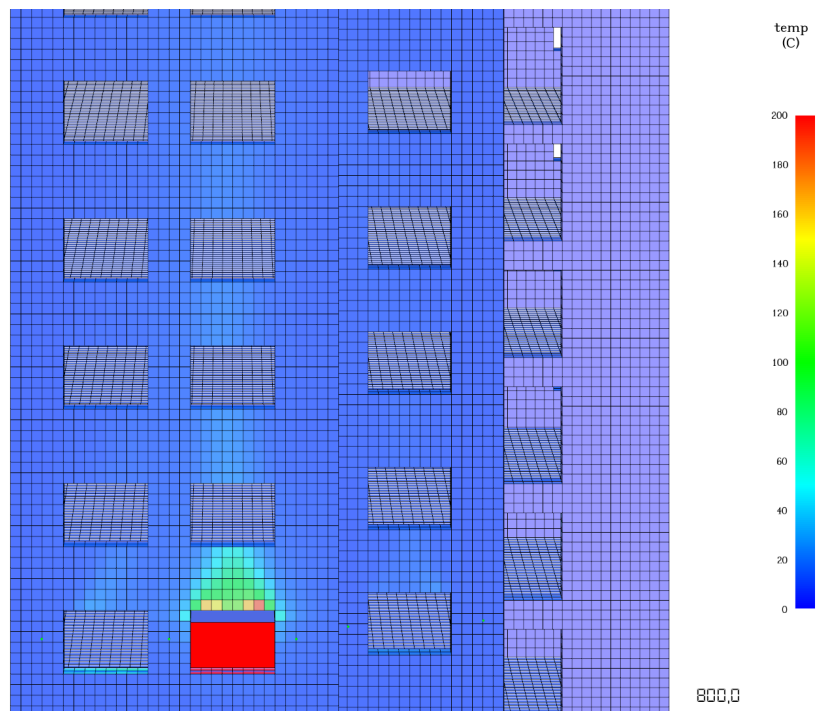


Figura 4.62: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 800 s

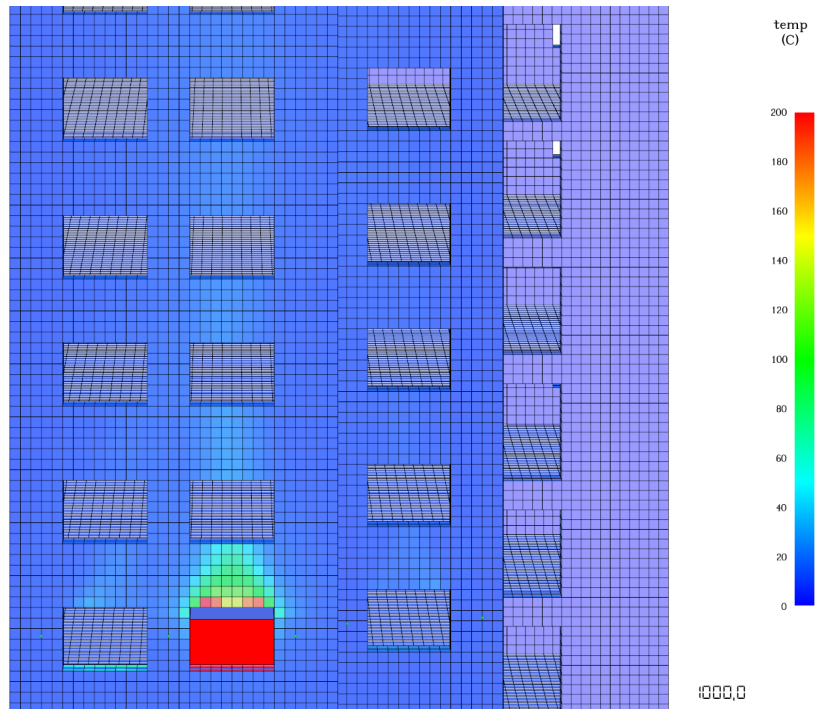


Figura 4.63: Andamento della temperatura del pannello isolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 1000 s

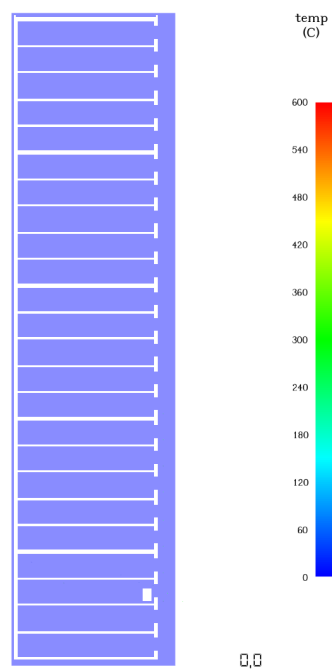


Figura 4.64: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello isolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 0 s

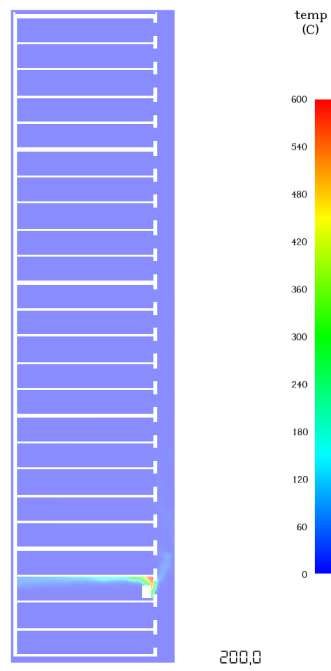


Figura 4.65: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 200 s

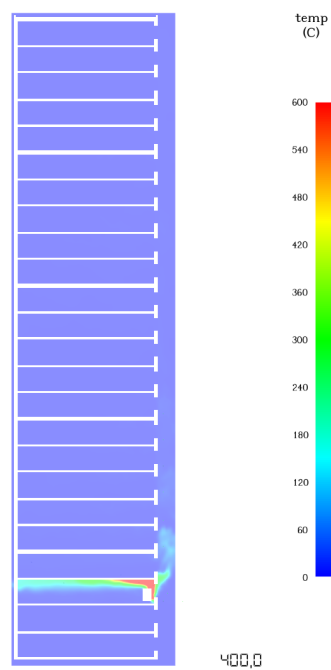


Figura 4.66: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 400 s

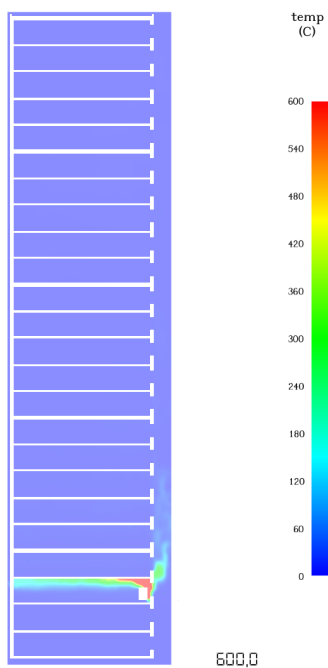


Figura 4.67: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 600 s

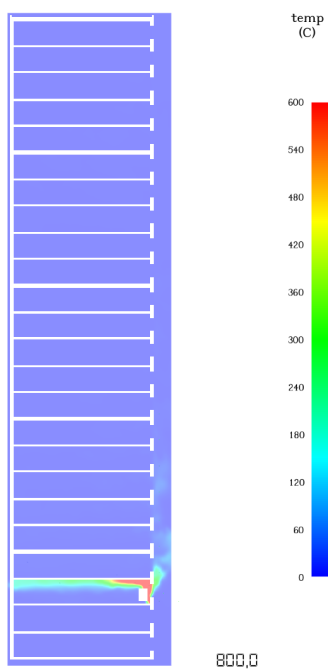


Figura 4.68: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 800 s

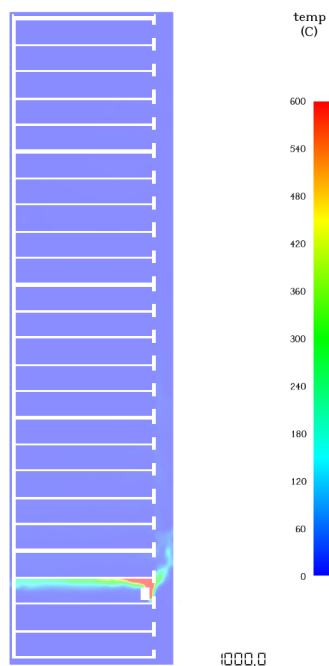


Figura 4.69: Distribuzione temporale delle temperature dell’edificio con pannello insolante con rivestimento in alluminio con soluzioni antincendio a 1000 s

Dall’analisi dei risultati emerge come il software abbia alcune limitazioni nel rappresentare accuratamente il comportamento dei materiali in condizioni di incendio. Queste derivano dal modo in cui la facciata viene modellata, ossia come un sistema stratificato. Per mantenere l’accuratezza analitica, PyroSim calcola una media delle proprietà termiche dei diversi materiali, di conseguenza l’elemento complessivo inizia a bruciare solo quando tutti i materiali che lo compongono raggiungono le condizioni di innesco, senza considerare eventuali variazioni di combustibilità tra i singoli strati.

Questo approccio limita la capacità del software di simulare la reazione differenziata dei materiali più combustibili come l’alluminio rispetto a quelli meno reattivi. In pratica, ciò si traduce in un comportamento uniforme della facciata, in cui non emergono differenze tra le simulazioni che rispettano le prescrizioni antincendio e quelle che le trascurano. Il risultato è quindi una perdita di dettaglio nella rappresentazione delle dinamiche di incendio, soprattutto in contesti dove le proprietà specifiche dei materiali, come l’elevata infiammabilità, dovrebbero manifestarsi in modo distinto e influenzare l’evoluzione del fuoco.

4.4 Comportamento del serramento

Eliminando l’ipotesi semplificativa di edificio ”forato”, che considera le aperture come semplici vuoti senza alcuna distinzione di materiale, e introducendo invece degli elementi che rappresentano con maggiore precisione i materiali reali che costituiscono le finestre, si osserva un cambiamento significativo nel comportamento del modello. Con questa modifica, il comportamento della facciata e della struttura durante l’incendio risulta nettamente diverso rispetto alle simulazioni precedenti. In particolare, l’introduzione delle finestre come elementi fisici veri e propri consente di

simulare in modo più realistico l'effetto delle temperature elevate e dell'interazione tra il fuoco e i materiali che compongono le finestre, come il vetro o i telai. Questo approccio migliora la previsione della propagazione del calore e delle condizioni di stress termico, offrendo una rappresentazione più accurata dell'evoluzione dell'incendio nelle stesse condizioni iniziali.

Si osserva che la propagazione dell'incendio sulla facciata è contrastata dalla presenza dei vetri, che rappresentano le finestre chiuse. Questi contribuiscono a confinare il fuoco in una determinata area, almeno per un certo periodo di tempo, limitando l'afflusso di ossigeno necessario per alimentare la combustione. Di seguito si riportano gli andamenti nel tempo, rispettivamente, del comportamento dei materiali e delle temperature in facciata.

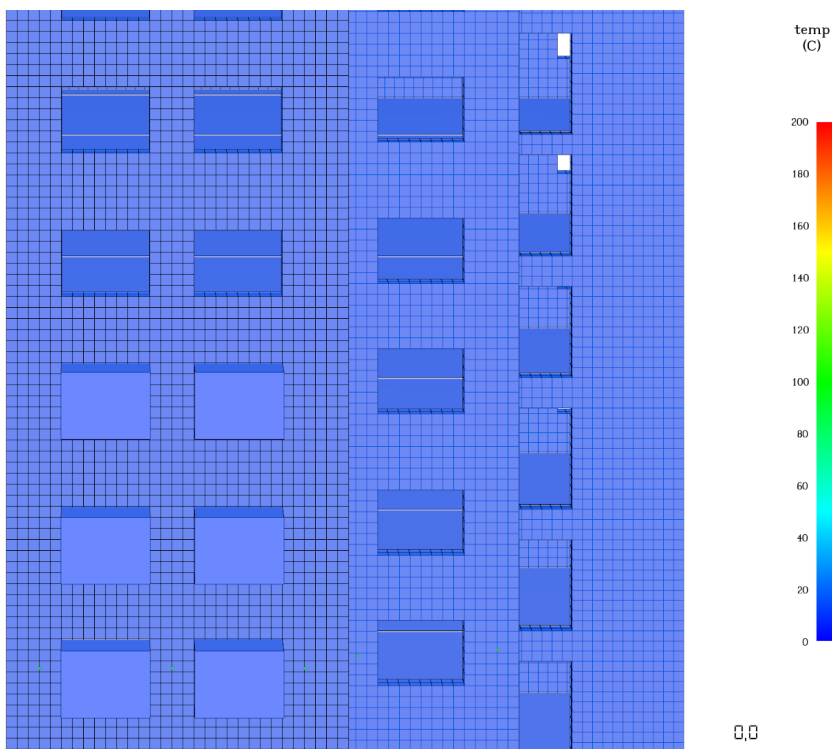


Figura 4.70: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 0 s

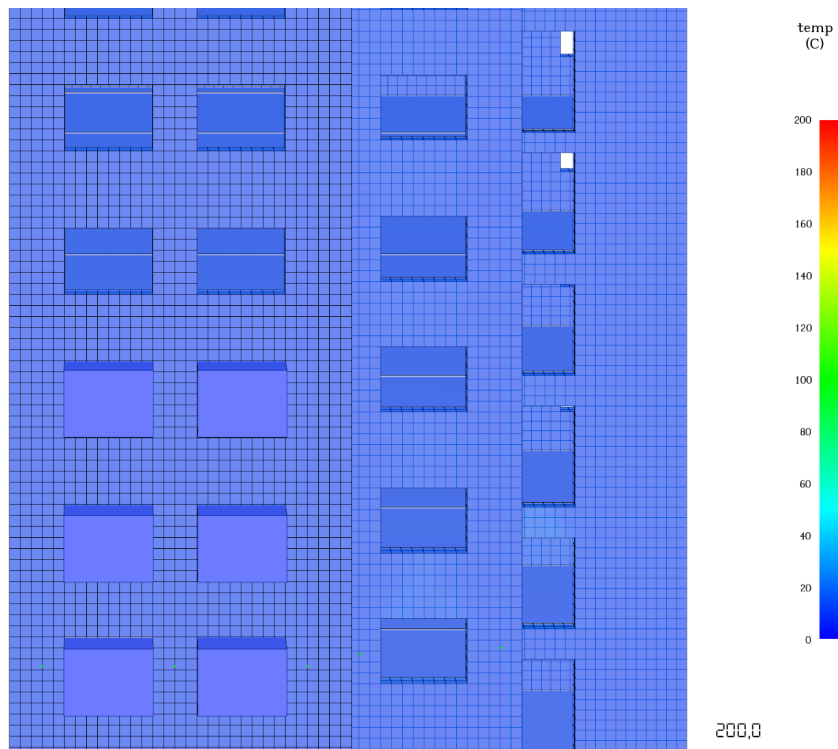


Figura 4.71: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 200 s

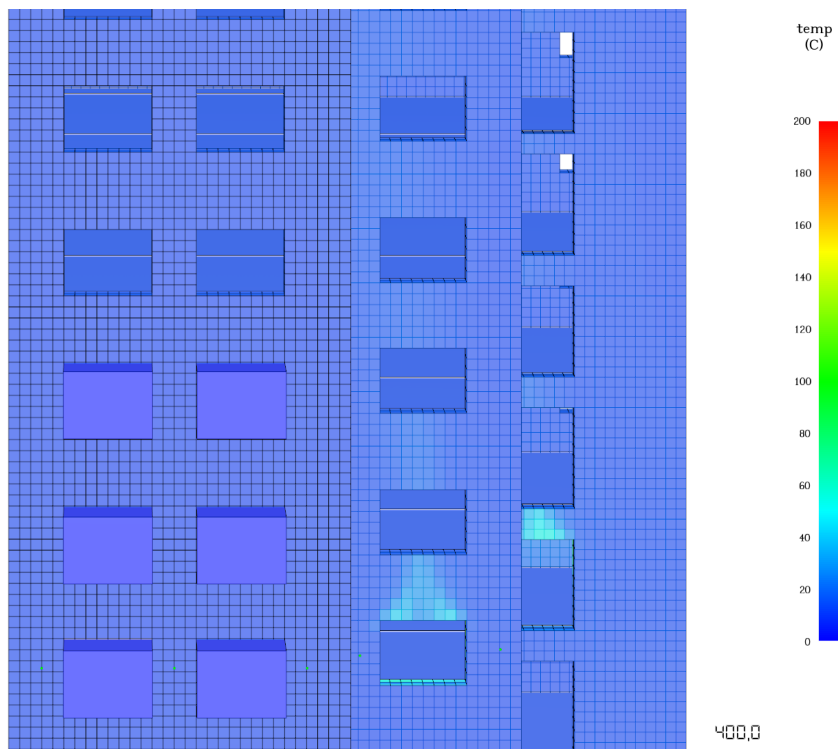


Figura 4.72: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 400 s

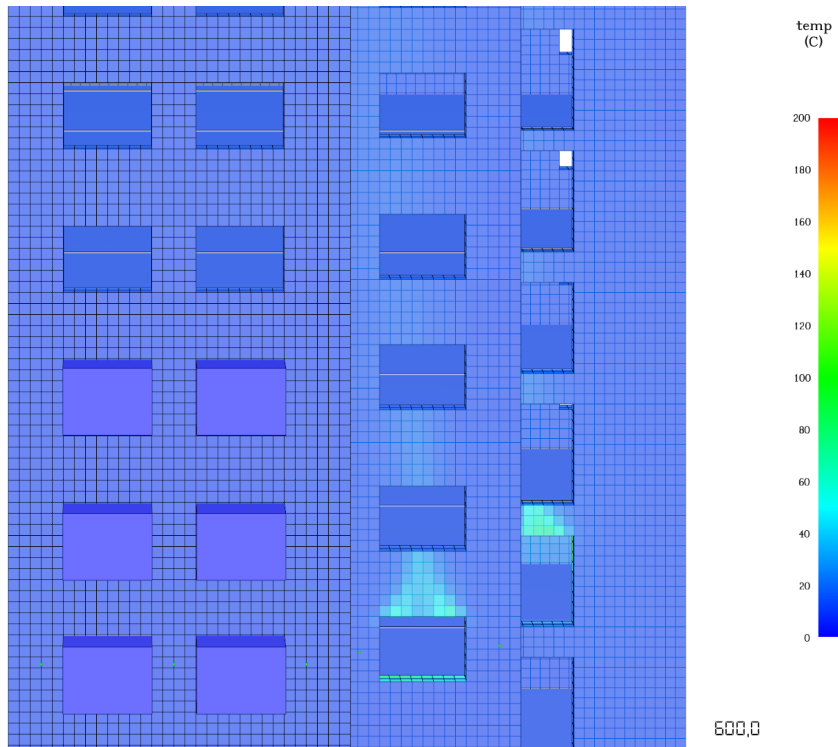


Figura 4.73: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 600 s

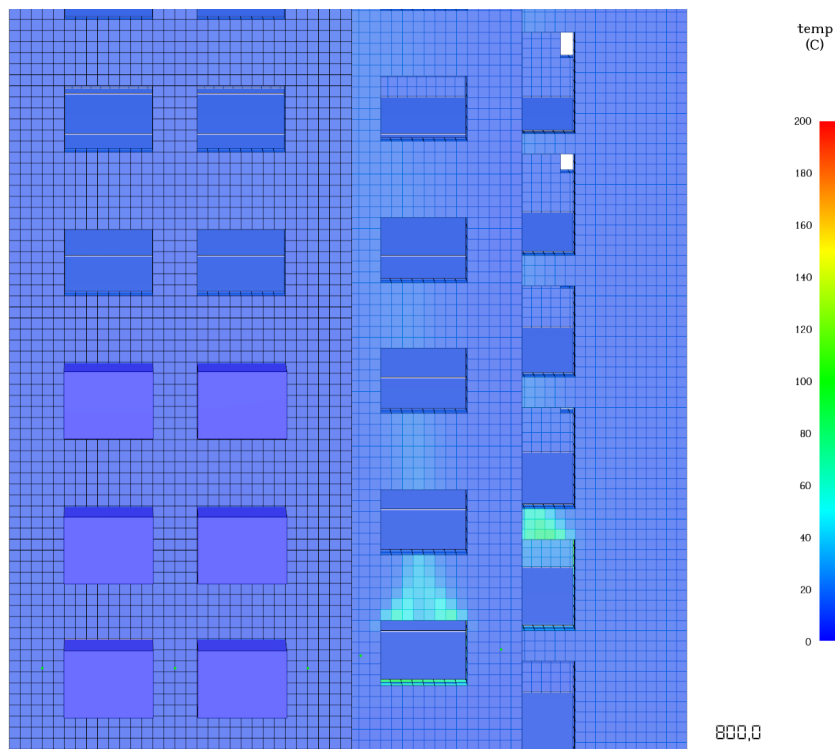


Figura 4.74: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 800 s

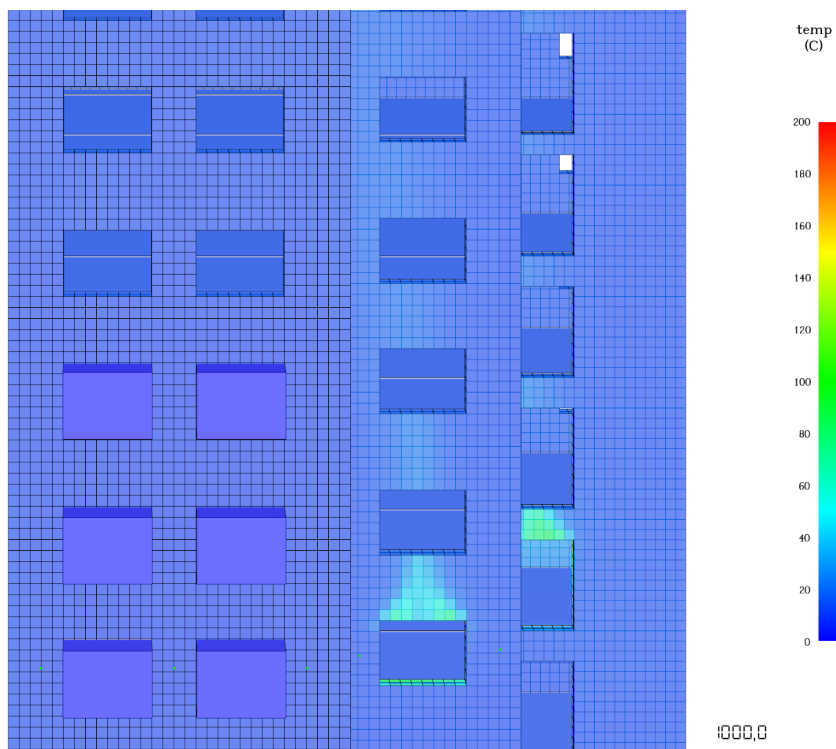


Figura 4.75: Andamento della temperatura del materiale scenario con finestre a 1000 s

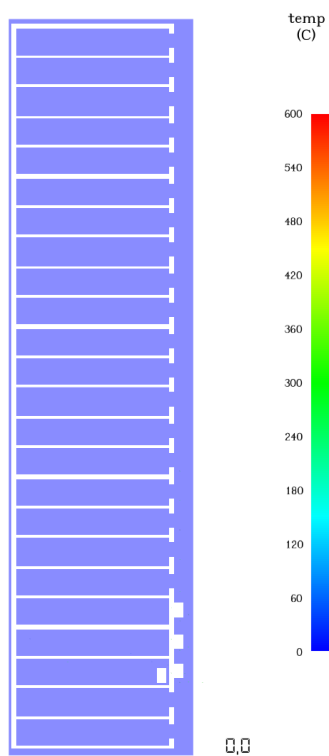


Figura 4.76: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con pannello di rivestimento e fasce di separazione a 0 s

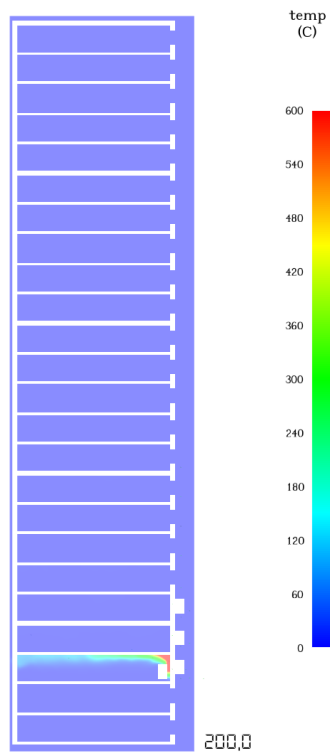


Figura 4.77: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 200 s

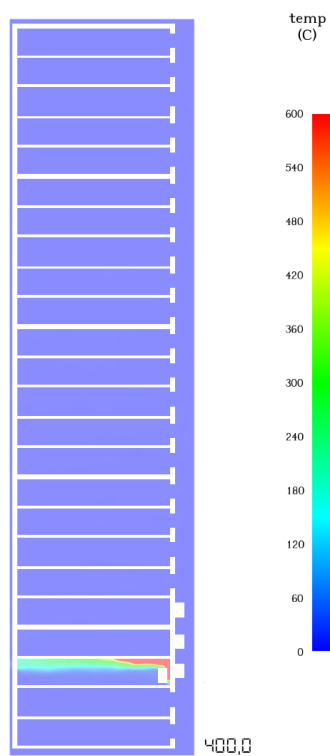


Figura 4.78: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 400 s

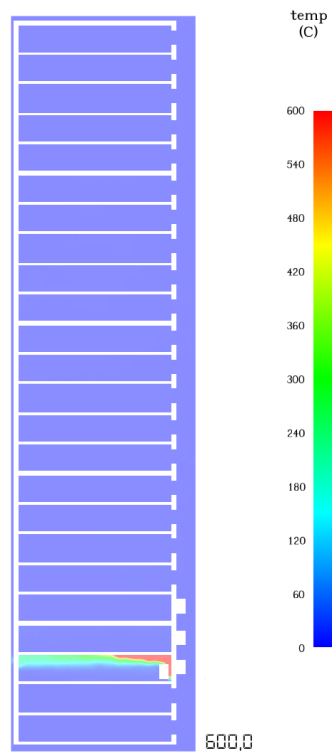


Figura 4.79: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 600 s

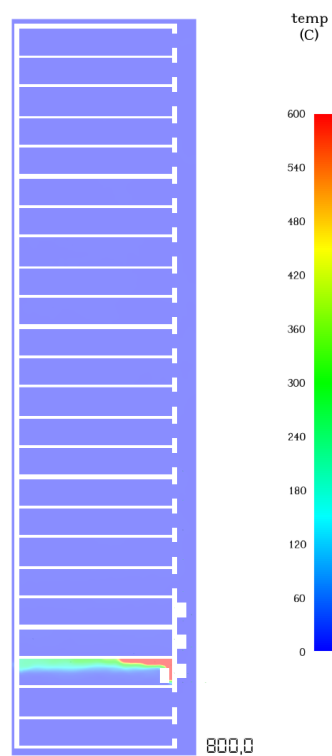


Figura 4.80: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 800 s

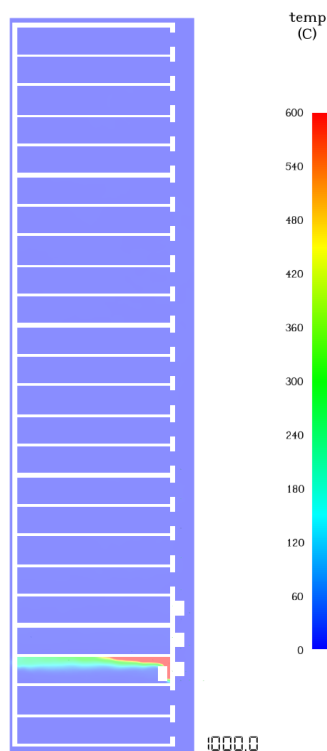


Figura 4.81: Distribuzione temporale delle temperature dell'edificio con finestre a 1000 s

Tuttavia, i risultati ottenuti si discostano dalle aspettative, poiché si prevede una rottura del vetro non appena viene raggiunta la temperatura di servizio del materiale, ma ciò non accade. La causa di questo comportamento risiede nel fatto che il sensore, associato al controllore che ha il compito di "rompere" il vetro, non rileva la temperatura critica necessaria. Questo può avvenire perché la grandezza delle celle della mesh impedisce una rilevazione sufficientemente accurata della temperatura in prossimità della superficie del vetro, compromettendo così la simulazione del suo comportamento in condizioni di incendio.

Per affrontare efficacemente il problema, si opta per una modellazione semplificata dell'edificio, riducendo il numero complessivo di piani a 5 e diminuendo le dimensioni delle celle computazionali, portandole a 0,10x0,10x0,10 m. Questa strategia di semplificazione del modello si rende necessaria per mitigare il considerevole onere computazionale richiesto dalla simulazione di un edificio a tutta altezza. La riduzione della complessità geometrica e l'adozione di una griglia computazionale più fine consentono non solo di rendere il calcolo più gestibile, ma anche di ottenere risultati con un maggiore grado di accuratezza e fedeltà rispetto al comportamento reale. In questo modo, si bilanciano le esigenze di precisione degli output con i limiti imposti dalle risorse computazionali disponibili, migliorando la qualità complessiva delle analisi effettuate.

Di seguito sono presentati gli esiti ottenuti, riguardanti l'andamento delle temperature e dei fumi, nonché la distribuzione delle temperature sulla facciata, che risultano significativamente differenti rispetto agli scenari modellati con mesh meno dettagliate.

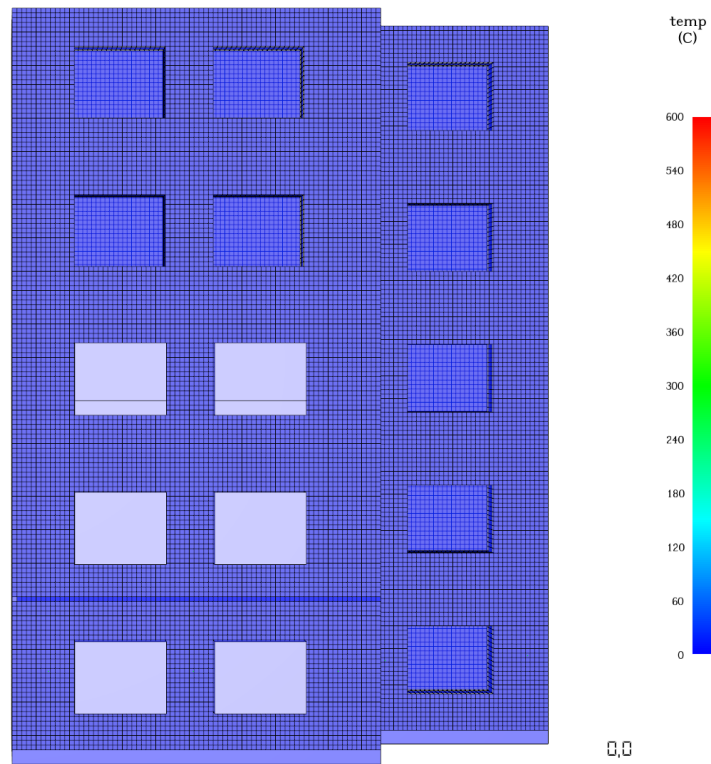


Figura 4.82: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 0 s

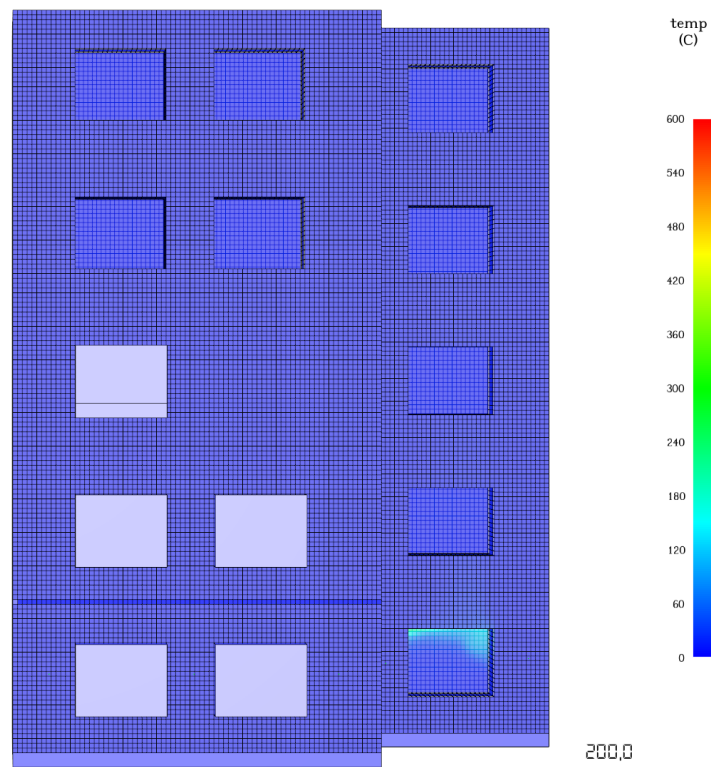


Figura 4.83: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 200 s

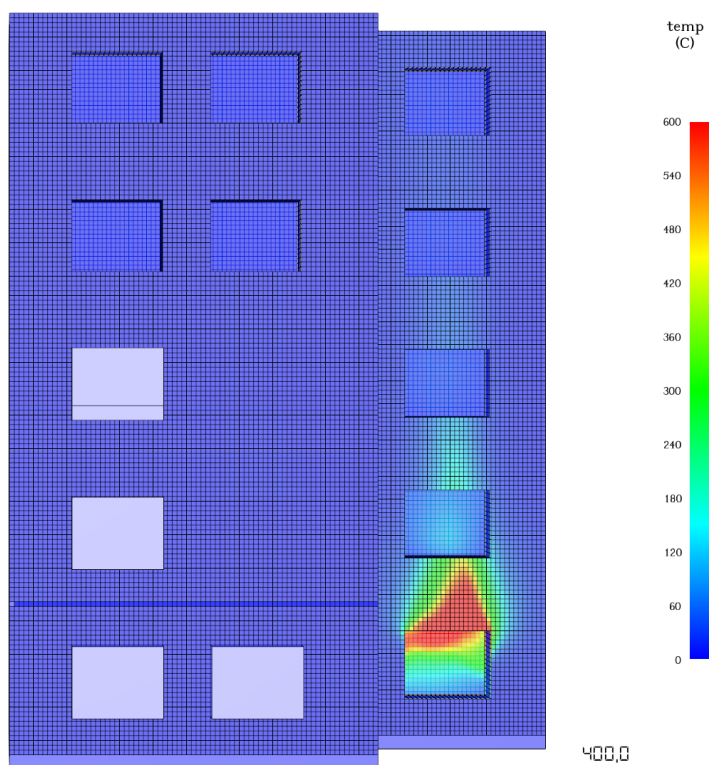


Figura 4.84: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 400 s

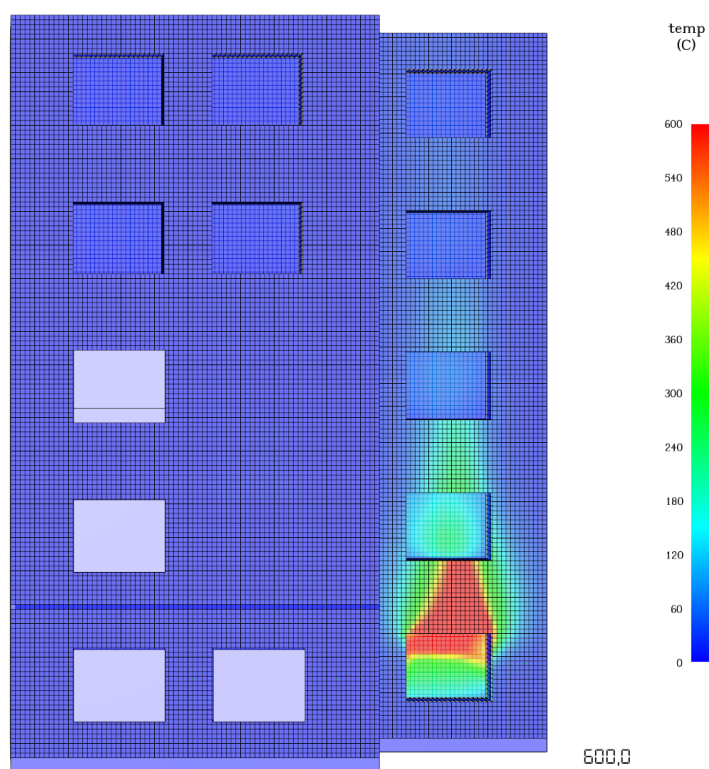


Figura 4.85: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 600 s

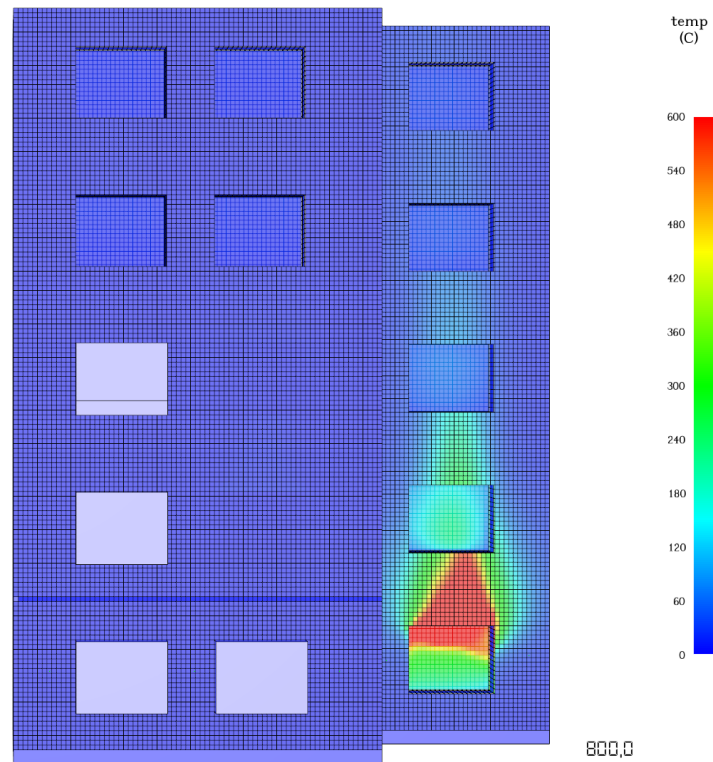


Figura 4.86: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 800 s

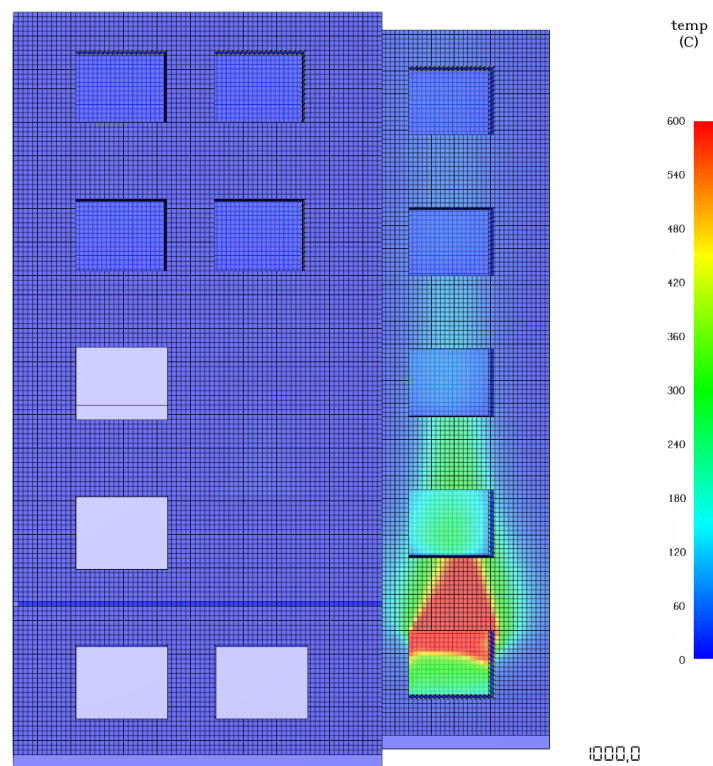


Figura 4.87: Andamento della temperatura del materiale del modello semplificato a 1000 s

Si può osservare come l'andamento delle temperature del materiale risulti maggiormente conforme alla realtà, mostrando una più alta corrispondenza con le aspettative previste. Questo mette in evidenza che, rispetto agli scenari analizzati in precedenza, si raggiungono effettivamente temperature più elevate. Tuttavia, anche in questa simulazione non si verifica la combustione del materiale. Questa discrepanza è attribuibile ad una limitazione intrinseca del software utilizzato: esso applica un criterio di mediazione tra le condizioni critiche dei diversi materiali che compongono la facciata. In altre parole, le condizioni necessarie per innescare la combustione vengono simulate solo quando anche il laterizio, materiale considerato ignifugo, raggiunge temperature e condizioni sufficientemente elevate da permettere l'innescò, risultando in una rappresentazione meno precisa del comportamento effettivo dei materiali combustibili coinvolti.

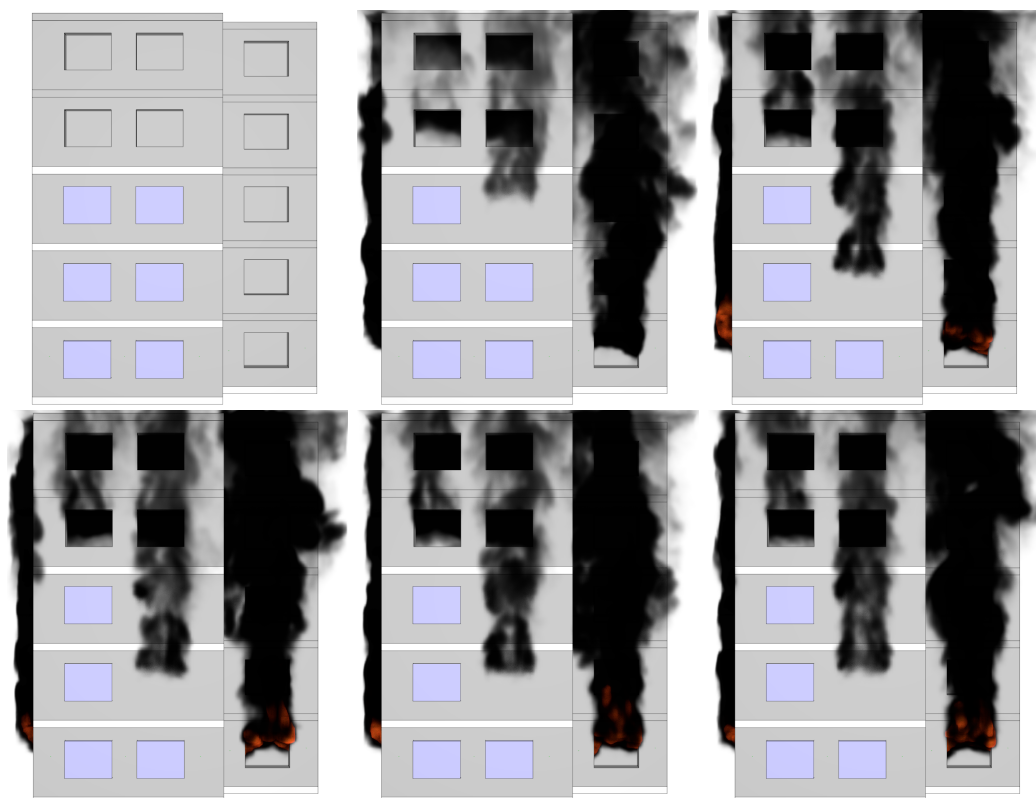


Figura 4.88: Propagazione dei fumi del modello semplificato a 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 s

L'analisi di questo modello semplificato permette anche di evidenziare il contributo positivo, descritto nel paragrafo 3.3.4, offerto dalla presenza delle finestre. Queste ultime svolgono un ruolo significativo nel limitare la propagazione dei fumi e, di conseguenza, nel contenere l'innalzamento delle temperature sulla facciata, contribuendo così a ritardare gli effetti più gravosi legati alla propagazione dell'incendio.

Non è possibile analizzare con precisione la distribuzione temporale delle temperature sulla facciata, poiché la posizione della *slice 2D*, mantenuta identica agli altri scenari per coerenza, intercetta l'area occupata dalla finestra. Di conseguenza, risulta che i gas caldi non sembrano fuoriuscire dal compartimento, influenzando l'accuratezza della valutazione.

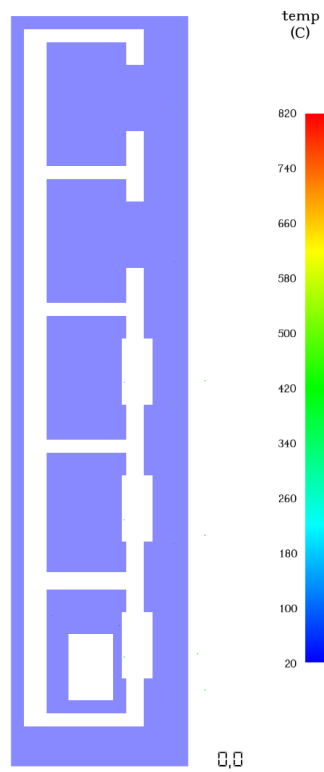


Figura 4.89: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 0 s

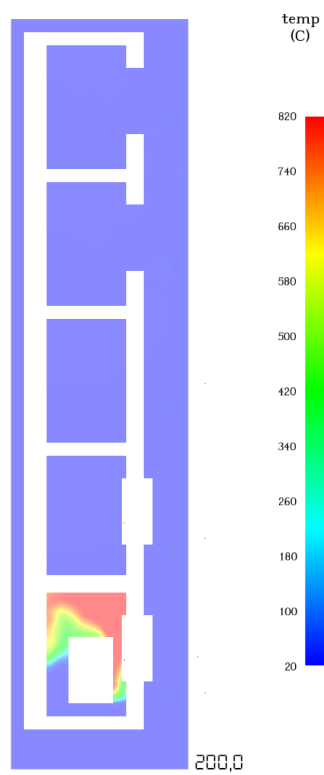


Figura 4.90: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 200 s

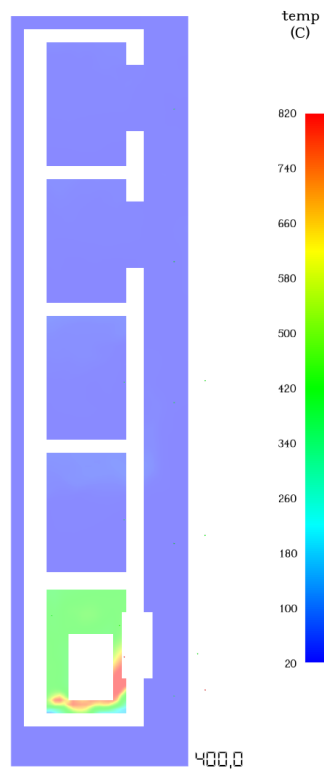


Figura 4.91: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 400 s

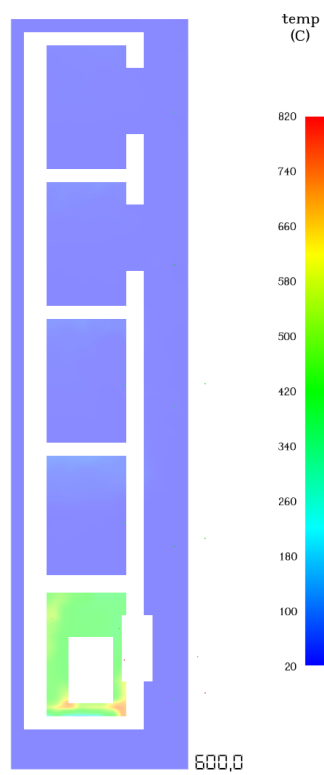


Figura 4.92: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 600 s

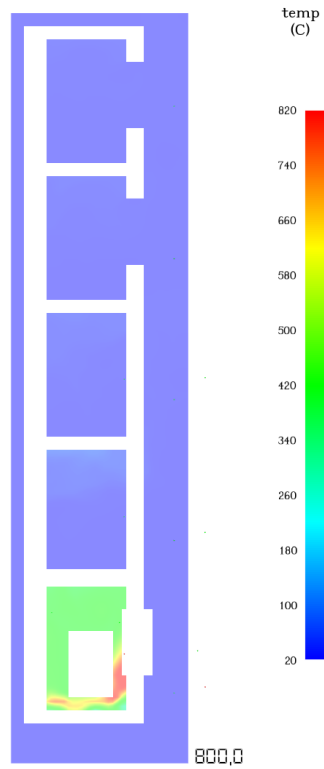


Figura 4.93: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 800 s

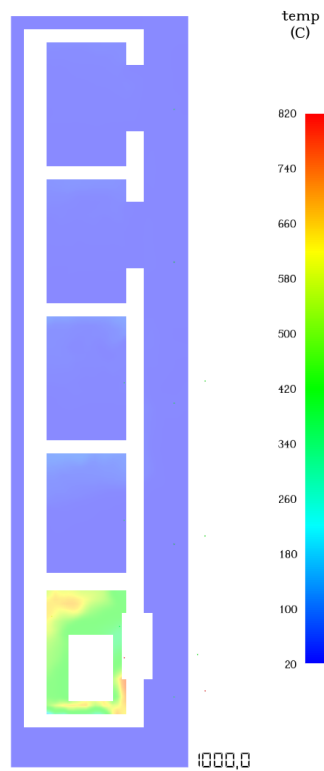


Figura 4.94: Distribuzione temporale delle temperature del modello semplificato a 1000 s

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo principale di questa ricerca, su cui si fonda l'intero elaborato di tesi, consiste nell'esaminare in modo approfondito il comportamento delle facciate degli edifici civili di grande altezza in caso di incendio. Questa analisi si concentra sulla capacità di simulare il comportamento reale delle facciate in caso di incendio, al fine di comprendere l'interazione tra le moderne soluzioni progettuali, volte a migliorare l'efficienza energetica e le normative antincendio. L'intento è esplorare come questi aspetti possano influenzarsi reciprocamente e individuare un equilibrio che ottimizzi sia la sicurezza che la sostenibilità.

Dall'analisi condotta emerge che l'uso di strumenti avanzati di fluidodinamica computazionale, come il software PyroSim, rappresenti una metodologia efficace per studiare l'evoluzione e la dinamica di diversi scenari di incendio. Questo tipo di analisi risulta particolarmente utile soprattutto nelle fasi iniziali della ricerca, in quanto consente di esplorare varie soluzioni progettuali e confrontarle per individuare quella ottimale. Tale approccio, inoltre, comporta benefici sia in termini economici che di sicurezza rispetto ai test su strutture a grandezza reale, che richiederebbero risorse ingenti e comporterebbero rischi elevati.

Va sottolineato, tuttavia, che nella modellazione delle facciate oggetto di studio è stato necessario adottare una serie di semplificazioni, principalmente per limitare il carico computazionale. Tali semplificazioni, benché funzionali, introducono una certa approssimazione nei risultati ottenuti, che non sempre possono rispecchiare appieno le condizioni reali. Tra queste approssimazioni, rientrano le scelte legate alla stratigrafia dei materiali, descritte nel paragrafo 3.3.2, e alla configurazione del focolare interno, orientato interamente verso l'apertura. Anche la scelta di rappresentare un edificio senza sporti e con aperture che rappresentano semplicemente fori contribuisce a una modellazione semplificata.

Un altro aspetto critico emerso dall'analisi riguarda la dimensione delle celle in cui viene suddiviso il dominio computazionale. Per ottenere risultati bilanciati tra accuratezza e tempi di calcolo, si è cercato di adottare una griglia di celle con dimensioni pari a $0,25 \times 0,25 \times 0,25$ m. È evidente che, soprattutto in relazione alle temperature della facciata, queste dimensioni non garantiscono una precisione sufficiente affinché i risultati possano essere considerati del tutto realistici e affidabili; affidabilità che risulta inoltre influenzata dai limiti intrinseci di FDS: PyroSim, ad esempio, non considera le differenze specifiche nelle proprietà termiche dei materiali che compongono le facciate multistrato, generando un valore medio che non riflette il comportamento individuale di ogni materiale fino al raggiungimento di condizioni critiche.

Questa limitazione si manifesta chiaramente nel confronto tra scenari diversi, caratterizzati cioè dalla presenza o meno delle fasce di separazione antincendio. In entrambi i casi, le differenze nei comportamenti osservati sono risultate minime, nonostante la presenza di materiali con differenti proprietà combustive. La modellazione proposta non è quindi in grado di evidenziare appieno l'impatto che materiali altamente combustibili possono avere sulla propagazione del fuoco, rispetto a quelli non combustibili come il laterizio o l'acquapanel.

Per superare i limiti, presentatisi nel corso dello studio, e rendere i risultati sempre più coerenti con le aspettative e più vicini al comportamento reale della facciata, si è deciso di adottare una modellazione più accurata dell'edificio, riducendone il numero di piani e aumentando il numero di celle nel dominio computazionale portandole ad una dimensione di 0,10x0,10x0,10 m.

Anche l'introduzione di elementi aggiuntivi nella modellazione, come la rappresentazione dei serramenti consente di sviluppare modelli sempre più aderenti alla realtà, ma d'altro canto comporta un aumento significativo dell'onere computazionale richiesto. Questi componenti, come illustrato nel paragrafo 3.3.4, svolgono un ruolo cruciale nel contenimento temporaneo delle fiamme e contribuiscono significativamente alla limitazione della propagazione verticale del fuoco verso i piani superiori. In conclusione, per poter addivenire ad una stima sempre più orientata verso la necessità di garantire la sicurezza antincendio anche per costruzioni sempre più eco-sostenibili, è indispensabile proseguire con una ricerca continua e rigorosa esplorando e valutando una gamma diversificata di ipotesi e soluzioni progettuali. Nello studio particolare è più utile iniziare l'analisi con una porzione limitata della facciata, mantenendo le stesse caratteristiche stratigrafiche di quella a tutta altezza, così da utilizzare celle più piccole, che permettano di ottenere risultati più accurati, con un minor impegno computazionale rispetto all'analisi di un edificio a piena altezza. Questi risultati potrebbero poi essere estesi a modelli di edifici appartenenti alla categoria degli edifici a grande altezza ma anche all'analisi di geometrie diverse e/o facciate di tipologie differenti rispetto a quella definita "semplice" attualmente considerata, come le facciate ventilate o continue, soluzioni sempre più diffuse negli ultimi anni per le loro prestazioni in termini di isolamento ed estetica.

La sfida del futuro è sicuramente ricercare un equilibrio tra l'adozione di elevate prestazioni energetiche ed il mantenimento di standard ottimali di sicurezza antincendio nella progettazione degli edifici, al fine di tutelare l'incolumità degli occupanti e garantire un accesso rapido e sicuro ai soccorsi durante le emergenze. In tale contesto, le simulazioni di fluidodinamica si rivelano lo strumento più efficace per avanzare nella ricerca.

Appendice A

Appendice

Material ID:	Blocchi in laterizio alveolato	
Description:		
Tags:		
Material Type:	Solid <input type="button" value="v"/>	
	Thermal Properties	Pyrolysis
	Advanced	
Density:		590,0 kg/m ³
Specific Heat	Constant <input type="button" value="v"/>	1,0 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant <input type="button" value="v"/>	0,2 W/(m·K)
Emissivity:		0,9
Absorption Coefficient:		5,0E+4 1/m

Figura A.1: Caratteristiche termiche della muratura in blocchi di laterizio alveolato

Material ID:	Isolante tipo EPS	
Description:		
Tags:		
Material Type:	Solid <input type="button" value="v"/>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Thermal Properties Pyrolysis Advanced </div>		
Density:	17,0 kg/m ³	
Specific Heat	Constant <input type="button" value="v"/>	1,45 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant <input type="button" value="v"/>	0,03 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E+4 1/m	

Figura A.2: Caratteristiche termiche dell'isolante termico tipo EPS

Material ID:	Intonaco	
Description:		
Tags:		
Material Type:	Solid <input type="button" value="v"/>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Thermal Properties Pyrolysis Advanced </div>		
Density:	1450,0 kg/m ³	
Specific Heat	Constant <input type="button" value="v"/>	1,0 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant <input type="button" value="v"/>	0,49 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E+4 1/m	

Figura A.3: Caratteristiche termiche dell'intonaco esterno

Material ID:	Fascia di separazione	
Description:		
Tags:		
Material Type:	Solid	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Thermal Properties Pyrolysis Advanced </div>		
Density:	1150,0 kg/m ³	
Specific Heat:	Constant	0,84 kJ/(kg·K)
Conductivity:	Constant	0,35 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E+4 1/m	

Figura A.4: Caratteristiche termiche della fascia di separazione

Surface ID:	AQUAPANEL		
Description:			
Tags:			
Color:		Appearance:	<input type="checkbox"/>
Surface Type:	Layered		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Material Layers Surface Props Thermal </div>			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Geometry Reaction Species Injection Particle Injection Advanced </div>			
<input type="radio"/> Governed by Material <input checked="" type="radio"/> Governed Manually			
Heat Release			
<input type="radio"/> Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 1000,0 kW/m ² <input checked="" type="radio"/> Mass Loss Rate: 1,0E-3 kg/(m ² ·s)			
Ramp-Up Time: Default 1,0 s			
Extinguishing Coefficient: 0,0 m ² /(kg·s)			
Ignition			
<input type="radio"/> Burn Immediately <input checked="" type="radio"/> Ignite at: 650,0 °C <input type="checkbox"/> Heat of Vaporization: 0,0 kJ/kg			
<input checked="" type="checkbox"/> Allow obstruction to burn away			

Figura A.5: Caratteristiche di reazione della fascia di separazione

Material ID: ALLUMINIO-PE

Description:

Tags:

Material Type: Solid

Thermal Properties | Pyrolysis | Advanced

Density: 1632,0 kg/m³

Specific Heat: Constant 1,29 kJ/(kg·K)

Conductivity: Constant 1,0 W/(m·K)

Emissivity: 0,7

Absorption Coefficient: 5,0E+4 1/m

Figura A.6: Caratteristiche termiche del pannello di rivestimento in alluminio

Surface ID: PANNELLO

Description:

Tags:

Color: Appearance: \emptyset

Surface Type: Layered

Geometry | Reaction | Species Injection | Particle Injection | Advanced

Material Layers | Surface Props | Thermal

Heat Transfer

Model: 1D

Cell Size: 0,25 m

Material Layers

Layer Divide: 0,0

	Thickness (m)	Material Composition	Edit
1	0,1 m	1,0 "Pannello in alluminio"	Edit..
2	0,3 m	1,0 "Blocchi in laterizio alve..."	Edit..
*			Edit..

Figura A.7: Modellazione della stratigrafia della facciata con pannello di rivestimento in alluminio

Material ID:	Vetro	
Description:		
Tags:		
Material Type:	Solid ▼	
Thermal Properties Pyrolysis Advanced		
Density:	2579,0 kg/m ³	
Specific Heat	Constant ▼	0,84 kJ/(kg·K)
Conductivity	Constant ▼	1,0 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E+4 1/m	

Figura A.8: Caratteristiche termiche del vetro

🔥 Solid-phase Device
✕

Properties
Advanced

Name:

Tags:

Freeze Output: <Never> ▼

Quantity: Wall Temperature ▼

Enable Setpoint:

Trigger only once

Initially activated

Trip Direction: Ascending ▼

Location X: Y: Z:

Normal of Solid X: Y: Z:

Rotation:

&DEVIC ID="Glass temperature_01", QUANTITY="WALL TEMPERATURE",
 XYZ=5.25,0.557692,7.9, IOR=-3, SETPOINT=180.0/

Figura A.9: Impostazione del solid phase device della finestra

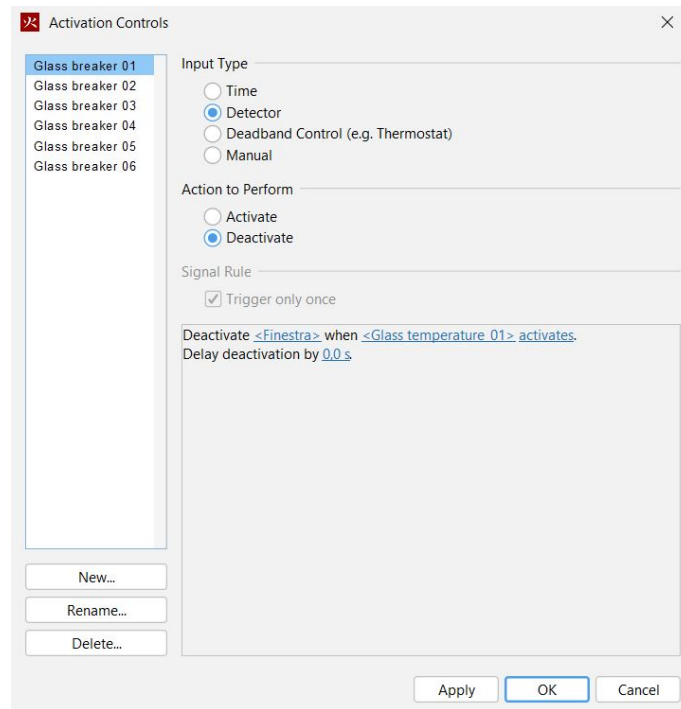


Figura A.10: Impostazione del controllo della finestra

Bibliografia

- [1] Giada Basile. *SIMULATORE FDS PER LA FIRE SAFETY ENGINEERING*. 2024.
- [2] Bontempi Pustorino et al. "Verifica e validazione dei criteri di calcolo per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico". URL: https://www.infobuild.it/approfondimenti/sicurezza-strutturale-caso-incendio/?fb_comment_id=397321043704557_1862134%7D.
- [3] Ing. D. de Silva Prof. Ing. E. Nigto. "Il progetto delle strutture in caso di incendio".
- [4] Minutoli Fabio et al. «"Riflessioni sulla sicurezza antincendio dell'involucro edilizio"». In: *ANTINCENDIO 2* (2017), pp. 44–50.
- [5] Marija Jelčić Rukavina, Milan Carević e Ivana Banjad Pečur. "SICUREZZA ANTINCENDIO DELLE FACCIATE NEGLI EDIFICI". 2017.
- [6] Enrico Sergio Mazzucchelli, Angelo Lucchini, Alberto Stefanazzi et al. «"Fire safety issues in high-rise building façades"». In: *Tema 5.1* (2019), pp. 130–140.
- [7] Lamberto Mazziotti. "Incendi nelle facciate di edifici multipiano: il calcolo della distanza tra le aperture di piano". 2018.
- [8] Ingenio. "Test di comportamento al fuoco di facciata (LEPIR2). Sicurezza antincendio a 360° con ISOTEX". 2022. URL: <https://www.ingenio-web.it/articoli/test-di-comportamento-al-fuoco-di-facciata-lepir2-sicurezza-antincendio-a-360-con-isotex/#:~:text=Una%20volta%20che%20il%20fuoco,performance%20antiincendio%20dei%20materiali%20usati>.
- [9] Lettera circolare 15 aprile 2013 n°5043. *Guida tecnica su "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili"*. URL: <https://www.vigilfuoco.it/servizi-le-aziende-e-i-professionisti/prevenzione-incendi/norme-di-prevenzione-incendi?title=&arg=&tipo=All&date=2013-04-15>.
- [10] D.M. 18 ottobre 2019. "Modifiche all'allegato 1 del Codice prevenzione incendi". URL: <https://www.vigilfuoco.it/servizi-le-aziende-e-i-professionisti/prevenzio%5C%5Cne-incendi/testi-coordinati-di-prevenzione/codice-prevenzione-incendi>.
- [11] Lamberto Mazziotti. "Involucri edilizi: la progettazione antincendio e il rischio caduta di parti della facciata". 2017.

- [12] UNI EN 1350-1: *"Reazione al fuoco dei prodotti da costruzione"*. URL: <https://www.certifico.com/normazione/209-documenti-riservati-normazione/organismi-normazione/documenti-uni/6473-uni-en-13501-1-reazione-al-fuoco-dei-prodotti-da-costruzione>.
- [13] D.M. 30 novembre 1983. *"Termini, definizioni, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi"*. URL: <https://www.indicenormativa.it/sites/default/files/1983.11.30.pdf>.
- [14] Fabio Minutoli et al. «"Le criticità progettuali antincendio negli edifici di grande altezza: quali le soluzioni tecniche?"» In: *ANTINCENDIO* (2017).
- [15] D.L. 311/2006. *"Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia"*. URL: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2007/02/01/007G0007/sg>.
- [16] Elena Lucchi e Valeria Pracchi. «Efficienza energetica e patrimonio costruito». In: *Maggioli, Santarcangelo di Romagna* (2013).
- [17] D.M. 26 giugno 2015. *"Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici"*. URL: https://www.mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi_appendiceB.pdf.
- [18] Antifuoco.it. *"Dal carico d'incendio alla stima della curva RHR"*. URL: <https://antifuoco.it/dal-carico-dincendio-alla-stima-della-curva-rhr/>.
- [19] EC 1-2010 UNI EN 1991-1-2:2004. *"Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco"*.
- [20] Fassa Bortolo. *SCHEDA TECNICA LASTRA ISOLANTE IN EPS GRAFITE 030*. URL: https://www.fassabortolo.it/documents/10179/2856538/FASSA_STE_IT_LASTRA-ISOLANTE-IN-EPS-GRAFITE-030_2023-06.pdf/1612ffe4-17cc-4cdc-bbd1-e9bb5f4824a7.
- [21] ThunderHead Eng. *"PyroSim user manual"*. 2022.
- [22] Consorzio POROTON Italia. *"Blocchi forati leggeri F.O."* URL: <https://www.poroton.it/mattoni-laterizi/blocchi-leggeri-f-o/>.
- [23] Associazione Italiana Polistirene Espanso. *"Sicurezza all'incendio di edifici realizzati con EPS - Vol 3"*. URL: <https://www.aipe.biz/mondo-eps/wp-content/uploads/sites/2/2014/11/VOL3-COMPORTAMENTO-AL-FUOCO.pdf>.
- [24] Fassa Bortolo. *SCHEDA TECNICA INTONACO 700*. URL: https://www.fassabortolo.it/documents/10179/532089/FASSA_STE_IT_INTONACO-700_2023-11.pdf/59b5e407-e50f-4b74-8cd4-c4c190eef35a.
- [25] UTherm. *SCHEDA TECNICA Utherm Wall A FRA*. URL: https://aem.mohawkind.com/content/dam/insulation/products/brochure-docs/technical-datasheet/utherm/it_IT_DOC_TB_Utherm_Wall_A.pdf.
- [26] D.P.R. 151/2011. *Elenco delle attività soggette ai controlli dei Vigili del Fuoco ai sensi del D.P.R. 151/2011*. URL: <https://vigilfuoco.it/sites/default/files/Comando%20Palermo/Elenco%20delle%20attivit%C3%A0%20soggette%20al%20D.P.R.%20151-2011.pdf>.