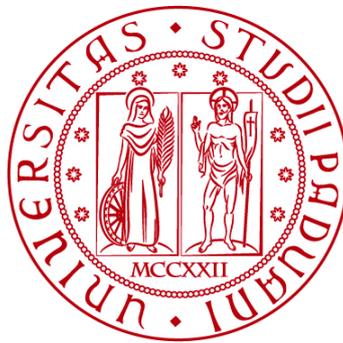


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza
Civile e Industriale**



TESI DI LAUREA

**Efficientamento energetico e sicurezza antincendio.
Valutazione del rischio negli interventi di efficientamento
energetico in edifici pluripiano ad uso civile residenziale
attraverso la Fire Safety Engineering**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Angelo Bertolazzi

Correlatore:

Ing. Paolo Mocellin

Laureando:

Federico Camellini
2050652

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 - Inquadramento normativo degli interventi di riqualificazione energetica	3
1.1 Il percorso normativo dell'Unione Europea	4
1.2 Il percorso normativo italiano.....	7
1.2.1 Legge del 17 luglio 2020, n. 77 - Ecobonus 110%	9
Capitolo 2 - I sistemi di isolamento termico negli edifici	13
2.1 I sistemi di isolamento termico esterno	16
2.2 Normativa vigente in materia di sicurezza dei materiali	18
2.2.1 Requisiti di reazione al fuoco nella Circolare 5043 del 15 aprile 2015	20
2.2.2 Requisiti di reazione al fuoco ai sensi della Regola Tecnica Verticale 13: Chiusure d'ambito degli edifici civili.....	23
Capitolo 3 - Analisi del rischio di incendio secondo il D.M. 3 agosto 2015.....	27
3.1 Valutazione del rischio di incendio.....	29
3.1.1 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana 30	
3.1.2 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici	31
3.1.3 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dell'ambiente	32
3.1.4 Valutazione del rischio di incendio per l'attività di tipo residenziale	32
3.1.5 Analisi storica dei casi di incendio propagatisi sulla facciata dell'edificio	34
Capitolo 4 - Approccio alla modellazione del caso di studio	39
4.1 Illustrazione del caso di studio	39
4.2 Descrizione dello scenario di incendio e curva HRR.....	41
4.3 Modellazione del caso studio	45
4.3.1 Caratterizzazione della superficie del bruciatore	47

4.3.2	Caratterizzazione dei materiali.....	49
4.3.3	Caratterizzazione delle superfici.....	51
4.3.4	Creazione della mesh.....	56
4.3.5	Scelta e posizionamento dei sensori e dei controlli.....	57
4.4	Scenari simulati.....	59
Capitolo 5 - Risultati.....		61
5.1	Scenario 1: Struttura allo stato di progetto.....	63
5.2	Scenario 2: isolamento in poliuretano espanso (PUR).....	70
5.3	Scenario 3: isolante in polistirene espanso sinterizzato (EPS).....	77
5.3.1	Scenario 3 con l'implementazione di fasce di separazione.....	85
5.4	Riepilogo dei risultati ottenuti.....	92
Conclusioni.....		95
Bibliografia.....		97

Introduzione

Il presente elaborato di tesi tratta il tema dell'analisi della variazione delle prestazioni in caso di incendio, in edifici civili pluripiano ad uso residenziale sottoposti a interventi di efficientamento energetico. In particolare, è stata rivolta l'attenzione agli edifici definiti sottosoglia, ovvero non soggetti al Decreto Ministeriale del 3 agosto 2015, Codice di prevenzione incendi, sottoposti a interventi di riqualificazione energetica mediante l'installazione di materiale isolante applicato esternamente.

Questi edifici non rientrando nel campo di applicazione della normativa italiana in materia di prevenzione incendi, non rispondono a particolari requisiti normativi al fine di limitare le conseguenze dell'incendio agli occupanti, ai beni e all'ambiente.

Parallelamente allo scenario descritto, negli ultimi anni, hanno avuto particolare risalto alcune scelte politiche dell'Unione Europea e nazionali in materia di efficientamento energetico per la riduzione dei consumi. Gli edifici civili ad uso residenziale, rientrando tra gli edifici energivori hanno beneficiato di sistemi di incentivazione finalizzati al miglioramento del rendimento energetico degli stessi.

Nel primo capitolo dell'elaborato è stata riportata una ricerca introduttiva delle principali normative in tema di efficientamento energetico. In primo luogo, quelle comunitarie e successivamente il recepimento a livello nazionale allo scopo di stabilire i principali interventi effettuati nel costruito italiano.

Stabiliti gli interventi di maggiore diffusione, è stata svolta l'analisi del rischio di incendio e del suo sviluppo, condotta per mezzo delle metodologie del Codice di Prevenzione Incendi, nelle attività precedentemente menzionate. L'analisi del rischio incendio ha lo scopo di stabilire le principali criticità e quindi gli scenari da indagare con i metodi della *Fire Safety Engineering*.

Successivamente, si è provveduto a riassumere i passaggi fondamentali della creazione del modello per l'analisi degli scenari d'incendio ottenuti in precedenza. Questa è stata svolta con l'utilizzo del software Pyrosim. La creazione del modello è stata descritta partendo dalla quantificazione del focolare di primo innesco, proseguendo con le proprietà inserite nel software, condizioni al contorno per lo svolgimento dell'analisi.

Infine, sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi degli scenari modellati, andando a confrontarli con lo stato di progetto dell'edificio, ovvero precedente agli interventi di riqualificazione. Valutando la variazione delle prestazioni di reazione al fuoco negli interventi efficientamento energetico.

Capitolo 1

Inquadramento normativo degli interventi di riqualificazione energetica

Al fine di svolgere l'analisi di scenari di incendio in edifici civili pluripiano ad uso residenziale soggetti a interventi di riqualificazione energetica, si rendono necessarie: un'analisi preliminare del patrimonio edilizio nazionale e un'indagine della normativa vigente e degli incentivi proposti nel panorama italiano, nonché, successivamente, stabilire le tipologie e le caratteristiche dei principali interventi di riqualificazione.

Lo *stock* edilizio residenziale italiano, secondo i dati elaborati dal Cresme, ente che fornisce al settore privato e alle istituzioni pubbliche informazioni per descrivere e prevedere l'andamento dell'economia e del mercato delle costruzioni, conta principalmente edifici ad uso residenziale costruiti nel periodo 1961-1980 (Ministero dello sviluppo economico, 2020). Si riportano i dati del periodo di costruzione degli edifici residenziali a uso civile in tabella 1.1.

Gli edifici a destinazione d'uso residenziale risultano pari a 12,42 milioni, con circa 32 milioni di abitazioni. Oltre il 65% di questo parco edilizio ha più di 45 anni, di conseguenza è stato progettato e costruito in un periodo di minore attenzione alle tematiche di riduzione dei consumi essendo precedente alla Legge n. 373 del 1976, la prima norma italiana in materia di risparmio energetico.

Il 25% dei 12,42 milioni di edifici registra consumi energetici annui nell'intervallo tra i 160 kWh/m² e i 220 kWh/m²; consumi che inseriscono tali edifici nella classe G della classificazione energetica A.P.E., di cui al §1.3, ovvero lo standard più basso previsto.

Inoltre, i dati evidenziano che nel 2022 sono state emesse 948.086 certificazioni A.P.E. di immobili ad uso residenziale, tali certificazioni sono state emesse nell'80% in quanto obbligatorie per il passaggio di proprietà o locazione dell'immobile. Di queste certificazioni quelle appartenenti alle classi di prestazione F e G sono circa il 55% (ENEA, 2023).

Le classi A.P.E. F e G non sono compatibili con gli obiettivi da raggiungere entro il 2033 proposti dall'Unione Europea nel progetto di riforme dal titolo "Pronti per il 55%" esposto in seguito.

Tabella 1.1 Censimento degli edifici ad uso civile residenziale per epoca di costruzione (fonte: Ministero dello sviluppo economico, 2020)

Epoca di costruzione	Numero di edifici	Percentuale [%]
< 1919	1.832.503	14,75
1919-1945	1.327.007	10,68
1946-1960	1.700.834	13,70
1961-1970	2.050.830	16,51
1971-1980	2.117.649	17,05
1981-1990	1.462.766	11,78
1991-2000	871.017	7,01
2001-2005	465.092	3,75
2006-2010	359.991	2,90
2011-2018	232.714	1,87

Alla luce di questi dati è emersa nel tempo la necessità di prevedere piani di riqualificazione energetica degli edifici, quest'ultima si traduce in Direttive dell'Unione Europea e Leggi nazionali riportate nei paragrafi seguenti.

1.1 Il percorso normativo dell'Unione Europea

Identificate le caratteristiche principali del costruito italiano, in termini di anno di costruzione e di consumi energetici, il presente paragrafo riporta una breve panoramica della legislazione europea nell'ambito dell'efficientamento energetico.

Il 25 ottobre 2022 il Consiglio dell'Unione Europea (UE) ha raggiunto l'accordo sul pacchetto di Direttive dal titolo "Pronti per il 55%"; titolo che si riferisce all'obiettivo dell'UE di ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030.

L'insieme di proposte contenute nel pacchetto è volto a modificare e aggiornare le normative precedentemente emanate, al fine di garantire che le politiche dell'Unione siano in linea con gli obiettivi climatici concordati dal Consiglio e dal Parlamento europeo, anche in materia di prestazione energetica degli edifici.

Nel documento si stima che i consumi energetici degli edifici all'interno dell'Unione Europea rappresentino il 40% del consumo di energia e il 36% delle emissioni di gas a effetto serra (Consiglio Europeo, 2023).

L'obiettivo fissato per le nuove costruzioni è quello di essere a emissioni zero: entro il 2028 per gli edifici pubblici ed entro il 2030 per tutti gli altri edifici.

In materia di edifici esistenti si utilizza l'approccio di introdurre norme minime di prestazione energetica, corrispondenti al massimo fabbisogno annuo di energia primaria al per metro quadro di superficie. In particolare, per gli edifici residenziali esistenti, gli Stati membri hanno convenuto di fissare soglie minime di prestazione energetica sulla base di traiettorie nazionali che prevedano la progressiva ristrutturazione del parco immobiliare, con l'obiettivo di renderlo a emissioni zero entro il 2050.

Il monitoraggio dei risultati ottenuti dalle politiche nazionali avverrà attraverso punti di controllo intermedi, quali:

- entro il 2033 il consumo medio di energia primaria dovrà essere equivalente alla classe energetica D;
- entro il 2040 il consumo medio di energia primaria dovrà essere pari a un valore determinato a livello nazionale, derivato da un graduale calo del consumo medio di energia primaria dal 2033 al 2050, in linea con la trasformazione del parco immobiliare residenziale in un parco immobiliare a emissioni zero;
- entro il 2050 tutti gli edifici dovranno essere a emissioni zero ad eccezione di:
 - edifici storici;
 - luoghi di culto o destinati ad attività religiose;
 - edifici indipendenti con superficie inferiore a 50 m²;
 - edifici di proprietà delle forze armate e utilizzati a scopo di difesa;
 - siti industriali, officine ed edifici agricoli non residenziali.

La Direttiva attualmente in vigore a livello comunitario, avente lo scopo di classificare gli edifici attraverso la valutazione delle prestazioni energetiche degli stessi, è la Direttiva 2018/844/UE - *Energy Performance of Building Directive*, EPBD.

Questa Direttiva si inserisce in un percorso iniziato nell'anno 2002 con la Direttiva 2002/91/CE, ad oggi abrogata, e integra gli obiettivi delle Direttive precedentemente emanate:

la Direttiva 2010/31/UE e la Direttiva 2012/27/UE. Si precisa che ad oggi il Parlamento Europeo ha approvato l'aggiornamento nella versione 2023, di cui si sta discutendo la versione definitiva.

L'innovazione principale del percorso delineato dalle Direttive comunitarie è l'introduzione di un indice di prestazione energetica degli edifici. Si tratta di un criterio utile e fondamentale per la pianificazione degli interventi di efficientamento allo scopo di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza entro il 2050, obiettivo coerente con i principi esposti in precedenza.

La Direttiva EPBD stabilisce altresì l'obbligatorietà di effettuare una diagnosi energetica, possibilmente con una modellazione di tipo dinamico-oraria attraverso appositi software di calcolo, in modo tale da proporre degli interventi di efficientamento che abbassino non soltanto i fabbisogni ma anche e soprattutto i consumi.

Nei casi di edifici la cui diagnosi rivelasse prestazioni non idonee, la Direttiva propone due possibili scenari:

- la riqualificazione nei casi di edifici datati, fissando soglie prestazionali atte a ridurre i fabbisogni energetici e parallelamente abbassarne o eliminarne le emissioni;
- la demolizione nei casi di edifici tecnologicamente arretrati, laddove una riqualificazione non fosse economicamente sostenibile e dove non siano presenti vincoli di pregio storico o artistico.

Come detto precedentemente, l'approccio nei confronti degli edifici esistenti prevede soglie minime prestazionali basate sull'energia primaria che gli edifici utilizzano: anticipando il prossimo paragrafo, la normativa italiana, per esempio, prevede che essa venga rapportata alle classi climatiche e valutata per metro quadro di superficie, attraverso l'introduzione di un parametro definito indice di prestazione energetica primaria non rinnovabile in condizioni standard ($EP_{gl, nren, standard 2019/21}$) che racchiude in sé tali informazioni.

Trattandosi di una Direttiva, si tratta di prescrizioni che ogni stato membro deve recepire, a livello italiano ciò è avvenuto con il D.lgs. n. 48/2020 del 10 giugno 2020.

La Commissione europea valuta la pertinenza, l'efficacia, l'efficienza e la coerenza dei piani nazionali e in caso di valutazione positiva adotta una decisione di esecuzione e conclude un accordo con lo stato membro (Ufficio Rapporti con l'Unione Europea, 2021).

1.2 Il percorso normativo italiano

Il percorso legislativo italiano, in materia di risparmio energetico, ha inizio nel 1991 con la Legge numero 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", e con i decreti attuativi della stessa, attraverso i quali, per esempio, è stato introdotto il calcolo del Fabbisogno Energetico Normalizzato, FEN. Parametro che esprime il fabbisogno di energia di un edificio per la climatizzazione invernale.

In particolare, il decreto attuativo D.P.R. 412 del 26 agosto 1993 n. 412, che introduce tale parametro, indica anche una suddivisione del territorio nazionale in sei zone climatiche, da A a F, prevedendo la verifica del FEN sulla base del calcolo dei Gradi Giorno (GG) per mezzo dell'equazione 1.1.

$$GG = \sum_{n=1}^n (T_0 - T_e) \quad (1.1)$$

dove:

n : numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento;

T_0 : temperatura ambientale convenzionale;

T_e : temperatura media esterna giornaliera, da considerare se $T_e < T_0$.

I Gradi Giorno, pur essendo un'unità di misura teorica, servono per definire la zona climatica di una località. Sono calcolati ipotizzando una temperatura degli ambienti T_0 pari a 20°C e valutandone la differenza con la temperatura media giornaliera, se questa differenza risulta positiva. Il fine di questo indice è quello di tenere conto delle differenze climatiche della nazione nella stima dei fabbisogni e nella pianificazione degli interventi di efficientamento energetico.

Si riportano in tabella 1.2 i dati Cresme relativi alla distribuzione del costruito residenziale nelle diverse zone climatiche individuate. La zona climatica A corrisponde al minimo valore energetico per la climatizzazione invernale, la F alle zone più severe.

Tabella 1.2 Distribuzione degli edifici per zona climatica (Ministero dello sviluppo economico, 2020)

	Attribuzione	Numero di edifici	Superficie [m ²]
Zona climatica A	$GG < 600$	5.217	170.118.357
Zona climatica B	$600 \leq GG < 900$	710.079	615.468.151
Zona climatica C	$9001 \leq GG < 1400$	2.737.222	734.707.925
Zona climatica D	$1401 \leq GG < 2100$	2.896.204	1.383.758.265
Zona climatica E	$2101 \leq GG < 3000$	731.009	12.420.403
Zona climatica F	$GG > 3000$	3.049.806.184	
	Totale	12.420.403	3.049.806.184

Un altro riferimento nella legislazione italiana in materia di prestazioni energetiche degli edifici è rappresentato dal Decreto Legislativo del 19 agosto 2015 numero 192, aggiornato il 10 giugno 2020. Esso recepisce a livello nazionale la Direttiva Europea 2018/844, di cui al §1.2, e pone come principali obiettivi in materia di risanamento energetico degli edifici quelli di:

- migliorare le prestazioni energetiche degli edifici mediante l'introduzione di requisiti minimi di prestazione per le nuove costruzioni per edifici sottoposti ad interventi di ristrutturazione;
- favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici;
- determinare i criteri generali per il calcolo della prestazione energetica, per la certificazione della prestazione energetica degli edifici e per il trasferimento delle relative informazioni in sede di compravendita e locazione;
- conseguire gli obiettivi nazionali in materia energetica e ambientale nel settore degli edifici, definendo strategie nazionali di lungo termine per la ristrutturazione del parco immobiliare nazionale.

Il terzo tra gli obiettivi riportati nell'elenco precedente viene sviluppato attraverso il Decreto del 26 giugno 2015 "Adeguamento delle linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici" al cui Allegato 1 sono definiti due possibili iter per la determinazione della classificazione energetica:

- metodo di calcolo di progetto: ad esempio attraverso la norma UNI/TS 11300 - Prestazioni energetiche degli edifici, metodologia di larga diffusione;

- metodo di calcolo da rilievo sull'edificio: con rilievo in sito o con metodo semplificato.

Mediante questi approcci, si arriva a determinare l'indice di prestazione globale non rinnovabile, $EP_{gl,nren}$, a partire dal quale in seguito, si attribuisce la classe energetica confrontando il valore ottenuto con l'indice di prestazione globale non rinnovabile standard, $EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$, come indicato in tabella 1.3.

Tabella 1.3 Scala di classificazione A.P.E.

	Classe A4	$\leq 0,40 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$0,40 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe A3	$\leq 0,60 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$0,60 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe A2	$\leq 0,80 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$0,80 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe A1	$\leq 1,00 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$1,00 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe B	$\leq 1,20 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$1,20 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe C	$\leq 1,50 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$1,50 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe D	$\leq 2,00 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$2,00 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe E	$\leq 2,60 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$2,60 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe F	$\leq 3,50 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21}$
$3,50 EP_{gl,nren, rif, standard 2019/21} <$	Classe G	

L'obiettivo europeo, concordato dagli stati membri, ha pianificato il raggiungimento della classe media minima pari alla classe D entro il 2033.

1.2.1 Legge del 17 luglio 2020, n. 77 - Ecobonus 110%

Dai paragrafi precedenti si evince che la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio rappresenta una fra le principali sfide legate al raggiungimento degli obiettivi comunitari di riduzione delle emissioni dei gas serra e al contrasto del cambiamento climatico.

In linea con gli orientamenti internazionali e, in particolare, comunitari, anche i governi italiani hanno emanato specifiche norme per aumentare il risparmio energetico e parallelamente messo in atto azioni di sostegno e di incentivo alle famiglie e agli investimenti delle imprese, con il duplice obiettivo di ridurre i consumi energetici e dare slancio all'economia, soprattutto nel settore dell'edilizia.

La ristrutturazione degli edifici si stima che porterebbe a una riduzione del consumo energetico totale del 5-6% nel bilancio dell'Unione Europea. Tuttavia, in media, meno

dell'1% del parco immobiliare è oggetto di ristrutturazione ogni anno, l'incremento di questa percentuale è spesso ostacolato dai costi degli interventi di efficientamento energetico. A livello comunitario si è stabilita la necessità di emanare nuove norme che facilitino anche l'accesso ai finanziamenti per migliorare il parco immobiliare.

In linea con la politica comunitaria di prevedere finanziamenti per l'incentivo di una crescente ristrutturazione degli immobili esistenti, il Decreto Legge n. 34/2020, anche denominato "Decreto Rilancio", convertito in legge con la Legge n. 77/2020 e recante misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all'economia, nonché di politiche sociali connesse all'emergenza epidemiologica da COVID-19, approva la detrazione fiscale del 110% per alcune categorie di interventi di efficientamento energetico, riduzione del rischio sismico, installazione di impianti fotovoltaici e di colonnine di ricarica per veicoli elettrici.

Lo strumento di incentivazione, tramite detrazione fiscale, previsto dalla Legge 77/2020 specificatamente per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici prende il nome di Ecobonus 110%.

La Legge 77/2020, all'articolo 119, suddivide gli interventi di efficientamento energetico in due macrocategorie: interventi principali (anche detti trainanti) ed interventi aggiuntivi (anche detti trainati).

In particolare, si tratta di interventi principali o trainanti nei casi di:

- interventi di isolamento termico sugli involucri;
- sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale sulle parti comuni;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale sugli edifici unifamiliari o sulle unità immobiliari di edifici plurifamiliari funzionalmente indipendenti;
- interventi antisismici;

mentre si parla di interventi aggiuntivi o trainati nei casi di:

- interventi di efficientamento energetico, ad esempio la sostituzione degli infissi;
- installazione di impianti solari fotovoltaici e sistemi di accumulo;
- infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici;
- interventi di eliminazione delle barriere architettoniche.

Lo strumento di incentivazione pone come condizione di accesso alla detrazione nella misura del 110%, per le spese sostenute negli interventi sia trainanti che aggiuntivi effettuate nel periodo luglio 2020 e 30 dicembre 2023, il miglioramento, certificato da dichiarazione asseverata, di almeno due classi energetiche APE, §1.3. La detrazione per gli interventi è prevista con aliquote decrescenti fino al 31 dicembre 2025.

I dati ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, evidenziano la buona adesione che tale misura ha suscitato, indicando la presentazione di 461.433 asseverazioni, dato aggiornato al 31 dicembre 2023 (ENEA, 2023).

Analizzata la necessità e la volontà dei legislatori di emanare direttive o leggi al fine di attuare il risanamento energetico degli edifici, lo strumento di incentivazione di larga diffusione a livello italiano negli ultimi anni è l'Ecobonus 110%.

Gli interventi sia trainanti che trainati, precedentemente esposti, possono introdurre cambiamenti significativi a livello di rischio incendio, nonché nello sviluppo o alla propagazione dello stesso in caso di innesco.

Un esempio può essere fatto considerando l'installazione di impianti fotovoltaici: essendo essi composti da sistemi di elettronica di potenza e potendo prevedere la presenza di accumulatori elettrochimici, se non realizzati a regola d'arte possono rappresentare una fonte di innesco negli edifici civili luogo di installazione. Sullo stesso piano rientrerebbero anche i sistemi di riscaldamento a pompa di calore, anche questi ultimi se non correttamente installati potrebbero favorire una nuova fonte di innesco.

Nel seguente studio, se pur di grande importanza, gli aspetti legati alle parti impiantistiche oggetto di incentivazione, non verranno contemplati, al fine di focalizzare l'attenzione sui sistemi di isolamento termico.

I quali sono suggeriti nel circa 66% delle raccomandazioni prescritte nel settore residenziale a seguito dell'emissione della certificazione A.P.E. (ENEA, 2023) e in quanto interventi trainanti, sono effettuati nella quasi totalità dei progetti di riqualificazione energetica rientranti nell'incentivazione dell'Ecobonus. Inoltre, si vuole analizzare l'andamento delle prestazioni della reazione al fuoco degli edifici sottoposti a interventi di riqualificazione energetica; tematica sulla quale l'intervento con maggiore impatto potrebbe rivelarsi il sistema di isolamento termico installato in facciata non tanto la fonte di innesco dell'evento.

Capitolo 2

I sistemi di isolamento termico negli edifici

Gli interventi di isolamento termico degli involucri sono considerati interventi trainanti ai sensi della Legge 77/2020. In quanto tali, hanno visto una larga diffusione e si affermano come l'intervento principale nell'ambito dell'Ecobonus 110%. In questo capitolo verranno trattati i fondamenti dello stato dell'arte di questo tipo di intervento e successivamente la normativa inerente alla sicurezza in caso di incendio negli edifici nei quali trovano installazione.

I materiali termoisolanti impiegati vengono classificati sulla base della materia prima della quale sono composti: esistono quindi materiali inorganici o minerali e materiali organici.

Un'ulteriore classificazione vede i materiali termoisolanti distinti in base alla lavorazione che gli stessi richiedono, si parla dunque di materiali naturali e di materiali sintetici.

La normativa UNI 10351, il cui scopo è definire i criteri e i metodi di valutazione delle prestazioni termiche e igrometriche dei materiali edili nei diversi scenari di installazione, elenca i materiali isolanti utilizzando la suddivisione precedentemente esposta. Con riferimento a tale norma, si elencano i materiali utilizzati per la realizzazione di cappotti termici:

- Materiali organici sintetici:
 - EPS: polistirene espanso sinterizzato;
 - XPS: polistirene espanso estruso;
 - PUR: schiuma poliuretana espansa.
- Materiali organici naturali:
 - sughero espanso;
 - fibra di cellulosa;
 - fibra di legno.

- Materiali inorganici naturali:
 - lana di roccia;
 - lana di vetro;
 - calcio silicato.

I materiali organici sintetici, soprattutto il polistirene espanso sinterizzato, sono di larga diffusione sia per la loro economicità rispetto ad altri isolanti, sia per le ottime caratteristiche di isolamento termico.

Il rapporto ANIT 2013, stilato con i dati riferiti all'anno 2009, indica i polistireni al 54% nella distribuzione percentuale dei materiali isolanti rispetto al volume totale venduto, ovvero nella maggioranza degli interventi si utilizzavano materiali organici sintetici (ANIT, 2014).

Le altre due classi sopracitate hanno costi della materia prima più elevati e garantiscono prestazioni simili ai materiali organici sintetici; tuttavia, presentano un vantaggio rispetto a questi ultimi, rappresentato dalla maggiore eco-sostenibilità del prodotto non essendo derivati petroliferi.

Al fine di effettuare un confronto quantitativo di quanto esposto, si riportano alcuni dati di costo per unità di superficie ottenuti dal prezzario regionale della Regione del Veneto, alcuni dati di conducibilità termica e la classe di reazione al fuoco certificata di alcuni materiali isolanti nella tabella 2.1.

I dati di resistenza al fuoco riportati in tabella fanno riferimento alla classe riferita al singolo prodotto non installato in opera classificato ai sensi della norma UNI 13501-1. La classificazione di riferimento è illustrata al §2.2.

Tabella 2.1 Confronto di alcune tipologie di isolanti impiegati in relazione a conducibilità

Materiale	Prezzo [€/m²]	Conducibilità termica [λ] [W/(mK)]	Classe di reazione al fuoco UNI 13501-1
EPS ¹	21,15	0,031	E
XPS ²	22,20	0,035	E
PUR ³	34,24	0,027	E
Lana di roccia ⁴	24,17	0,033	A1
Lana di vetro ⁵	26,18	0,034	A2
Sughero ⁶	70,56	0,037	E

¹ Voce preziario: pannelli in eps bianco trasmittanza fino a 0.35 w/mqk spessore 10 cm
dati prodotto: da scheda tecnica sto italia s.r.l. - pannello sto gk8 300 plus;

² voce preziario: pannelli termoisolanti cam in polistirene espanso estruso a cellule chiuse (xps), sp.10 cm;
dati prodotto: da scheda tecnica sopra s.r.l. - sopra xps sl;

³ voce preziario: pannelli termoisolanti schiuma poliuretanic espansa (pir), sp. 10 cm
dati prodotto: dato da scheda tecnica termpir - etx insulation boards

⁴ voce preziario: pannelli termoisolanti cam in lana di roccia - densità 80/90 kg/mc, sp. 10
dati prodotto: da scheda tecnica rockwool italia s.p.a - airrock 33 alu;

⁵ voce preziario: pannelli termoisolanti cam in lana di vetro - densità 55 kg/mc, sp. 10 cm
dati prodotto: da scheda tecnica ivas industria vernici s.p.a - lana di vetro k34;

⁶ voce preziario: pannelli termoisolanti sughero naturale densità 110/130 kg/mc, sp.10 cm
dati prodotto: da scheda tecnica tecnosugheri s.r.l. - pannello corkpan.

Il confronto effettuato sulla base di dati estratti dalle schede tecniche di alcuni prodotti disponibili sul mercato e il costo estratto dal preziario regionale della regione Veneto mostra un costo per unità di superficie dei materiali organici sintetici inferiore rispetto alle altre tipologie di materiale garantendo prestazioni termiche dello stesso ordine di grandezza, dato che potrebbe giustificare il largo impiego di tali materiali.

2.1 I sistemi di isolamento termico esterno

Il rapporto tecnico UNI/TR 11715 del 2018 definisce le condizioni generali di utilizzo e le modalità di messa in opera dei sistemi di isolamento termico esterno ETISC (*External Insulation Composite Systems*) installabili in superfici verticali, orizzontali o inclinate purché non esposte alle intemperie.

Si riportano in figura 2.1 i principali strati funzionali di un sistema ETICS.

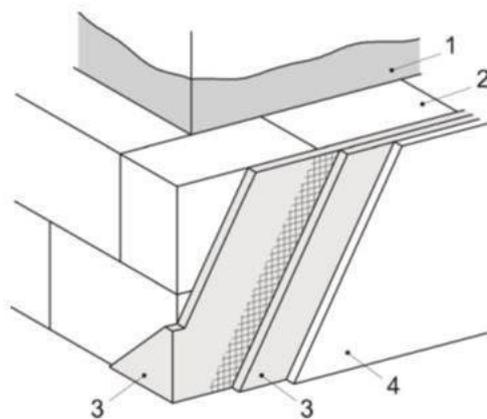


Figura 2.1 Strati funzionali di un sistema ETICS (fonte: UNI/TR 11715:2018)

1. Strato di collante con eventuale fissaggio meccanico, tassellatura: sostegno del peso proprio e del carico orizzontale dovuto al vento;
2. Materiale isolante;
3. Intonaco di base con rete di rinforzo: assorbimento di tensioni superficiali o sollecitazioni meccaniche;
4. Intonaco di finitura: protezione da eventi atmosferici e funzione estetica.

All'articolo 9 "Realizzazione in opera del sistema" della norma UNI/TR 11715, sono descritte le modalità di distribuzione del collante, strato numero 2 dell'elenco precedente, sulla base della tipologia di isolante installato; con riferimento ai materiali trattati al §3.1.1 si riportano alcune modalità contemplate dalla norma.

La norma rimanda alle modalità di incollaggio descritte dal produttore del materiale, ma in linea generale, per i materiali precedentemente citati quali EPS, XPS, Poliuretano espanso e per le lane minerali si dovrebbe prediligere la modalità di incollaggio "perimetrale e per punti", figura 2.2 (a).

Altri tipi di materiale come le lamette di lana minerale prediligono la modalità a "superficie totale", figura 2.2 (b) del pannello.

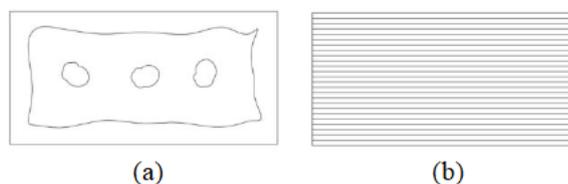


Figura 2.2 Schemi di incollaggio: (a) Incollaggio perimetrale e per punti; (b) Incollaggio a superficie totale (fonte: UNI/TR 11715:2018)

Sono fornite anche indicazioni sulle tassellature di fissaggio per i cappotti. Le possibili varianti sono presentate facendo riferimento a schema "a T" e schema "a W", con profondità a filo dello strato isolante o affondato rispetto allo stesso e coperto con tappo isolante.

Lo strato più esterno, ossia l'intonaco di finitura, nel caso di cappotti applicati in facciata ha un ruolo fondamentale nella protezione dello stesso da agenti esterni, tra i quali potrebbe rientrare anche l'incendio.

Nella norma UNI/TR 11715:2018 in materia di installazione a regola dell'arte dei sistemi ETICS, sono contenute le modalità per la creazione dello strato di intonaco esterno, strati 3 e 4 della figura 2.1. Il primo passo è la posa dell'intonaco di base con gli spessori indicati dal produttore, successivamente si inserisce una rete in fibra di vetro. Quest'ultima è a sua volta coperta da uno strato malta di rasante di spessore minimo 1 mm, a completa asciugatura del primo strato.

Si riportano in tabella 2.2 gli spessori minimi da normativa.

Tabella 2.2 Spessori minimi dello strato di intonaco di base (fonte: UNI/TR 11715:2018)

Materiale dei pannelli isolanti	Spessore nominale [mm]	Spessore minimo [mm]	Spessore medio [mm]
EPS/PUR	3,0	2,5	≥ 3,0
Lana minerale	8,0	5,0	≥ 7,0

Successivamente all'applicazione dell'intonaco di base e alla sua completa maturazione si procede all'applicazione del ciclo di finitura: lo spessore minimo di questo strato è quantificato in 1,50 mm se avente struttura piena o 2,00 mm se avente struttura rigata.

2.2 Normativa vigente in materia di sicurezza dei materiali

Descritte le principali caratteristiche degli interventi di riqualificazione energetica con sistemi ETICS, si analizza nel presente paragrafo il quadro normativo nel quale questi interventi, o meglio i materiali utilizzati negli stessi, devono rientrare nell'ottica di una transizione sicura. Il marchio CE è la prima certificazione da assolvere al fine di poter immettere un prodotto, in questo caso da costruzione, nello Spazio Economico Europeo [SEE].

La marcatura CE dei prodotti da costruzione è normata dal Regolamento Europeo numero 305/2011, il quale fissa le condizioni per l'immissione o la messa a disposizione sul mercato di prodotti da costruzione, stabilendo le disposizioni armonizzate per la descrizione delle prestazioni di tali prodotti in relazione alle loro caratteristiche essenziali e i criteri per l'apposizione della marcatura CE sui prodotti in questione, (Parlamento Europeo e Consiglio Europeo 2011, Capo I, Articolo I).

Il Regolamento, oltre alla marcatura CE, introduce un altro documento chiave per la garanzia di qualità e sicurezza dei prodotti da costruzione all'interno dello SEE: la Dichiarazione di Prestazione [DoP - *Declaration of Performance*].

Attraverso questo documento, quando un prodotto da costruzione rientra nell'ambito di applicazione di una norma armonizzata o è conforme a una valutazione tecnica europea rilasciata per la tipologia del prodotto, il fabbricante redige una dichiarazione di prestazione all'atto dell'immissione di tale prodotto sul mercato, (Parlamento Europeo e Consiglio Europeo 2011, Capo I, Articolo 4).

La DoP fornisce dunque a progettisti, costruttori e installatori le informazioni per stabilire se un prodotto soddisfa i requisiti necessari all'uso prescelto in condizioni di corretto utilizzo, installazione e manutenzione. Parallelamente al Regolamento Europeo 305/2011, si inseriscono le normative in materia di prevenzione incendi, in particolare a livello italiano il D.M. del 3 Agosto 2015.

Nella strategia antincendio, dal punto di vista dei materiali e delle prestazioni loro richieste, entrano in gioco requisiti e prestazioni minime per gli stessi sin dalla prima misura: "S.1 - Reazione al fuoco".

In questa misura sono definiti i requisiti che i materiali installati devono possedere nell'ambito delle attività soggette e a seconda degli ambiti nei quali sono inseriti, ad esempio se posti sulle vie di esodo i requisiti sono più stringenti, perseguendo tre obiettivi:

- ridurre la velocità di propagazione dell'incendio;
- evitare che l'incendio coinvolga altri materiali combustibili;
- aumentare il tempo utile di evacuazione: ritardare il *flash-over*.

Questi tre obiettivi sono necessari allo scopo principe del Codice, ovvero la sicurezza delle persone, la tutela dei beni e la tutela ambientale. La misura S.1 del Codice richiama sia la classificazione italiana dei materiali, sia quella europea. Il D.M. del 26 Giugno 1984 e il D.M. del 3 settembre 2011, che modifica il precedente, introducono la classificazione italiana dei materiali:

- Materiali: Classe 0 (incombustibili) → Classe 5
- Materiali imbottiti: Classe 1 IM → Classe 3 IM

Come anticipato, la classificazione italiana non è l'unica disponibile per descrivere le prestazioni di resistenza al fuoco dei materiali: a livello europeo la norma UNI EN 13501-1 del 2019 stabilisce le procedure di classificazione per la reazione al fuoco di tutti i prodotti da costruzione, inclusi gli incorporati negli stessi. La classificazione delle prestazioni dei materiali da costruzione avviene con una scala di valutazione che prevede sette classi, tabella 2.3.

Tabella 2.3 Classificazione della resistenza al fuoco dei materiali: Euroclassi (UNI EN 1350-1)

A1	Materiale - prodotto incombustibile
A2	Materiale - prodotto a combustibilità limitata
B	La combustione del materiale- prodotto avviene nel periodo da 10 a 20 minuti
C	La combustione del materiale- prodotto avviene nel periodo da 2 a 10 minuti
D	La combustione del materiale- prodotto avviene nel periodo di 2 minuti
E	Materiale - prodotto che non rientra nelle classi precedenti, facilmente infiammabile
F	

La norma armonizzata prevede anche una classificazione "S - *smoke*" ovvero dei fumi emessi in caso di combustione e una classificazione "D - *drops*" del gocciolamento di prodotti caldi della combustione. Si riportano le classificazioni nelle tabelle sottostanti.

Tabella 2.4 Classificazione aggiuntiva dei materiali in relazione alla produzione di fumo (UNI EN 1350-1)

S1	Il materiale sviluppa una quantità molto limitata di gas di combustione
S2	Il materiale sviluppa quantità limitata di gas di combustione
S3	Il materiale sviluppa una elevata di gas di combustione

Tabella 2.5 Classificazione aggiuntiva dei materiali in relazione alla formazione di gocce e particelle ardenti (UNI EN 1350-1)

d0	Il materiale non rilascia gocce o particelle ardenti
d1	Il materiale rilascia una limitata quantità di gocce o particelle ardenti
d2	Il materiale non ha limitazioni nella produzione di gocce o particelle ardenti

2.2.1 Requisiti di reazione al fuoco nella Circolare 5043 del 15 aprile 2015

Il 15 aprile 2013 il Comitato Centrale Tecnico Scientifico per la Prevenzione Incendi ha pubblicato la “Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” aggiornando la precedente guida n. 5634 del 31 marzo 2010, documento che ha affrontato per la prima volta in Italia il tema connesso alla sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili dall’applicazione volontaria.

In questa guida è possibile ritrovare la definizione di facciata, che viene intesa come: l’insieme dei componenti che costituiscono un sistema di chiusura (materiali, elementi, accessori ecc.), progettati, assemblati ed installati al fine di realizzare l’involucro esterno verticale o quasi-verticale, dell’edificio.

Gli obiettivi della circolare sono:

- limitare la propagazione verso la facciata di un incendio con origine all’interno dell’edificio. Si tratta di una dinamica che potrebbe essere causata da fiamme o fumi

caldi che fuoriescono da vani, aperture e cavità verticali della facciata e che provocherebbe l'inefficacia e l'annullamento della compartimentazione prevista in fase di progetto; figura 2.3;

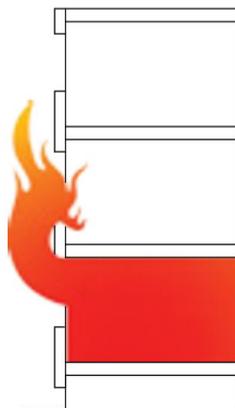


Figura 2.3 Propagazione dell'incendio sulla facciata per cause interne all'edificio

- limitare la propagazione in facciata di un incendio avente origine esterna, figura 2.4;

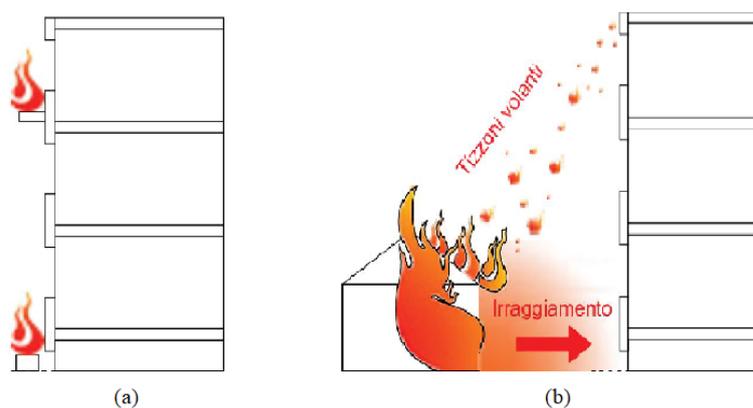


Figura 2.4 Propagazione dell'incendio sulla facciata per cause esterne (a) Propagazione dell'incendio da fonti poste nelle vicinanze della facciata, (b) Propagazione dell'incendio per irraggiamento da edificio contiguo

- evitare o limitare, in caso di incendio, la caduta di parti di facciata che possano compromettere l'esodo in sicurezza degli occupanti e l'intervento delle squadre di soccorso.

Per il raggiungimento di tali obiettivi è richiesto che, nel caso in cui i materiali isolanti siano installati permanentemente in facciata e il sistema ETICS sia composto da un insieme di componenti unitamente commercializzati come kit, si garantisca la classe 1 di reazione al fuoco ovvero classe B-s3-d0 se espressa nella codifica europea.

Il significato della classe di reazione al fuoco menzionata è:

B → non conduce la fiamma;

s3 → elevata produzione di fumo;

d0 → è certificata la non produzione di gocce e particelle ardenti.

Inoltre, i prodotti isolanti, con esclusione di quelli posti a ridosso dei vani finestra e porta finestra per una fascia di larghezza pari a 0,60 m e di quelli posti alla base della facciata fino ad una altezza pari a 3 m fuori terra, possono possedere certificazioni meno stringenti di quelle soprariportate purché siano installati protetti, anche all'interno di intercapedini o cavità, con le seguenti caratteristiche:

- Se il prodotto isolante è certificato C-s3-d2 deve essere protetto con materiali di classe non inferiore alla classe A2;
- Se il materiale è di classe non inferiore ad E deve essere protetto con materiali di classe A1 aventi uno spessore non inferiore a 15 mm;

Sono ammesse soluzioni alternative se supportate da specifiche prove di reazione al fuoco e che garantiscano una classe non inferiore a B-s3-d0.

Il secondo punto dell'elenco consiglia la protezione con uno strato di materiale di classe A1 di almeno 15 mm, spessore maggiore rispetto a quello indicato nella norma UNI/TR 11715:2018 esposta in precedenza, dove rientrano nei casi di corretta installazione dei sistemi di isolamento termico in facciata spessori di intonaco fino a un minimo di 5 mm.

Al fine di limitare la propagazione dell'incendio in facciata la guida prevede delle fasce di separazione, da porsi al fine di garantire il mantenimento della compartimentazione.

Tale fascia di separazione può essere realizzata mediante una sporgenza orizzontale continua al di sopra del solaio, di larghezza non inferiore a 0,60 m, figura 2.5(a). La fascia di separazione può essere realizzata anche con sviluppo sia orizzontale che verticale, figura 2.5(b), o con sviluppo solamente verticale, figura 2.5(c).

In figura 2.5, estratta dalla Guida, sono quotate le dimensioni a, b, c e d. La dimensione a equivale alla sporgenza orizzontale, la dimensione b a un parapetto verticale posto al piano superiore raccordato al solaio, la dimensione c indica lo spessore di un architrave continuo

raccordato al solaio e infine la dimensione d quota l'altezza di solaio. La somma delle quattro dimensioni appena descritte deve essere pari a 1 m e tutte le dimensioni, fatta eccezione per l'altezza di solaio, possono essere nulle.

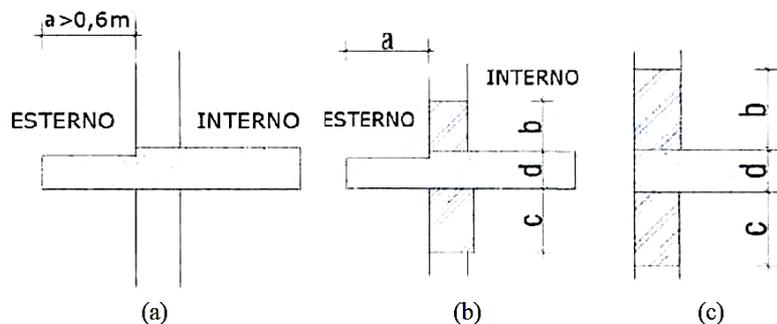


Figura 2.5 Fascia di separazione orizzontale tra compartimenti: (a) a sviluppo orizzontale, (b) a sviluppo sia orizzontale che verticale, (c) a sviluppo verticale (fonte: Schema A della Circolare 5043)

2.2.2 Requisiti di reazione al fuoco ai sensi della Regola Tecnica Verticale 13: Chiusure d'ambito degli edifici civili

Il D.M. del 30 marzo 2022 ha introdotto la regola tecnica verticale (RTV) numero 13 in materia di chiusure d'ambito degli edifici civili. La presente regola tecnica verticale si applica alle chiusure d'ambito degli edifici civili (es. strutture sanitarie, scolastiche, alberghiere, commerciali, uffici e residenziali) e persegue i seguenti obiettivi di sicurezza antincendio:

- 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;
- evitare o limitare la caduta di parti della chiusura d'ambito dell'edificio (es. frammenti di facciata o altre parti comunque disgregate o incendiate, ...) in caso d'incendio, che possano compromettere l'esodo degli occupanti o l'operatività delle squadre di soccorso.

Questi sono equivalenti a quelli esposti nella "Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili" con la differenza sostanziale che dall'introduzione del D.M. 30 marzo 2022 il raggiungimento dei tre obiettivi non è affidato a un documento di applicazione volontaria.

Nella RTV 13 le chiusure d'ambito sono suddivise secondo le caratteristiche dell'edificio nel quale sono inserite secondo la classificazione:

- **SA:** chiusure d'ambito di:
 - edifici aventi le quote di tutti i piani comprese tra $-1 \text{ m} < h \leq 12 \text{ m}$, affollamento complessivo ≤ 300 occupanti e che non includono compartimenti ospitanti fruitori in stato di degenza;
 - edifici fuori terra, ad un solo piano;
- **SB:** chiusure d'ambito di edifici aventi quote di tutti i piani ad altezza maggiore o uguale a 24 m e che non includono compartimenti ospitanti fruitori in stato di degenza;
- **SC:** chiusure d'ambito di altri edifici

Le prestazioni di reazione al fuoco per i materiali applicati nelle chiusure d'ambito quali:

- isolanti termici (es. cappotti non in kit, ...);
- sistemi di isolamento esterno in kit (es. ETICS, cappotti in kit, ...);
- guarnizioni, sigillanti e materiali di tenuta, qualora occupino complessivamente una superficie $> 10\%$ dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito;
- gli altri componenti, ad esclusione dei componenti in vetro, qualora occupino complessivamente una superficie $> 40\%$ dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito;

devono possedere certificazione di appartenenza al gruppo GM1 se installati in edifici di classe *SC* della classificazione fornita dalla RTV, al gruppo GM2 se posti in edifici di classe *SB* della classificazione fornita dalla RTV. Gli edifici classificati come *SA*, secondo la classificazione precedentemente riportata, non sono soggetti a requisiti di prestazione minima dei materiali costituenti le chiusure d'ambito.

Nella RTV è fornita data la definizione di chiusura d'ambito, ovvero la frontiera esterna dell'edificio ad andamento orizzontale o verticale. La facciata viene definita come insieme dei componenti che costituiscono una porzione di chiusura d'ambito dell'edificio non ricompresa nella copertura. Tali definizioni, se pur espresse con una locuzione differente da quella utilizzata nella Guida esposta al §2.2.1, si riferiscono alle medesime strutture.

In conformità a quanto esposto nel paragrafo precedente, in facciata è previsto l'inserimento di fasce di separazione (figura 2.6) realizzate con materiali in classe di reazione al fuoco non inferiore a A2-s1,d0 o costituite da uno o più elementi costruttivi aventi classe di resistenza al fuoco E 30-ef o, se portanti, RE 30-ef.

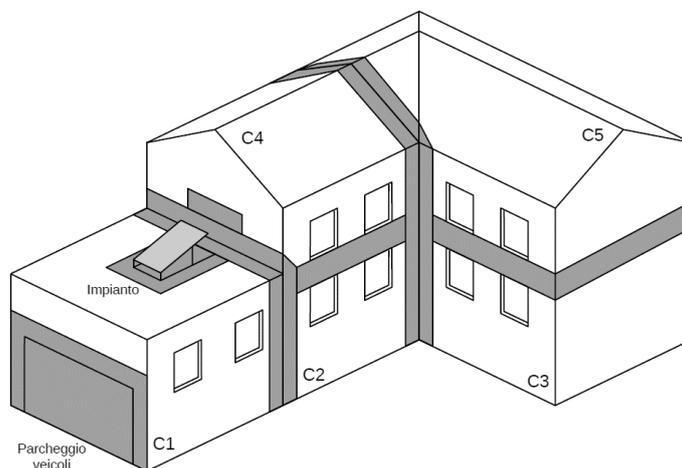


Figura 2.6 Esempio delle fasce di separazione (fonte: Illustrazione V13.1 della RTV 13)

La geometria delle fasce di separazione è descritta al punto V13.5.2 della RTV e prevede lo sviluppo di almeno 1 m sia nel caso di fascia di separazione a sviluppo orizzontale sia nel caso di fascia a sviluppo verticale. Si riportano in figura 2.7 alcuni esempi di geometrie delle fasce di separazione tratti dalla normativa.

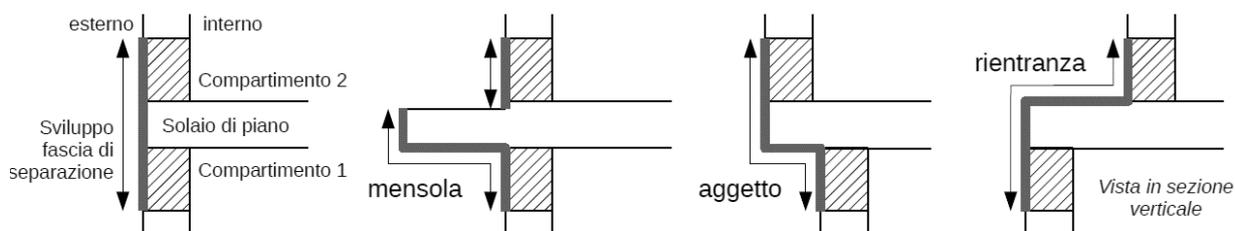


Figura 2.7 Esempi di fascia di separazione in facciata (fonte: Illustrazione V.13-2 della RTV 13)

La RTV impone fasce di separazione anche per impianti di produzione e trasformazione di energia, come impianti fotovoltaici o di produzione del calore o di condizionamento. Le fasce di separazione per gli impianti di produzione e/o trasformazione di energia devono avere le medesime caratteristiche descritte in precedenza. Le canne fumarie devono essere dotate di adeguato isolamento termico o poste a una distanza di separazione idonea da elementi combustibili.

Capitolo 3

Analisi del rischio di incendio secondo il D.M. 3 agosto 2015

L'Allegato I del D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i. (Codice di Prevenzione Incendi, di seguito definito Codice) è la normativa vigente a livello nazionale in materia di sicurezza antincendio e si basa su degli obiettivi primari quali:

- salvaguardia della vita umana;
- incolumità delle persone;
- tutela dei beni e dell'ambiente.

Gli obiettivi primari in materia di prevenzione incendi si intendono raggiunti se in fase di progettazione, realizzazione e gestione dell'attività si minimizzano le cause di innesco di un incendio o di un'esplosione, si garantisce la capacità portante delle strutture portanti per un tempo determinato, si limita la produzione e la propagazione di un incendio all'interno dell'attività e ad attività contigue, si garantisce e l'esodo degli occupanti, si garantisce la sicurezza dei soccorritori, sono tutelati gli edifici pregevoli o viene garantita la continuità d'esercizio per le opere strategiche e infine si limita il danno ambientale o la compromissione dell'ambiente in caso d'incendio.

Al fine di ritenere assolti i principi e gli obiettivi descritti, il Codice propone una strategia basata sull'approccio prestazionale, la strategia è formulata mediante la struttura riportata nella tabella 3.1.

Tabella 3.1 Struttura del Codice di prevenzione incendi

Sezione	Contenuto	Paragrafo
Generalità	Principi fondamentali	G.1 Termini, definizioni e simboli grafici
		G.2 Progettazione per la sicurezza antincendio
		G.3 Determinazione dei profili di rischio delle attività
Strategie	Misure di prevenzione, protezione e gestionali applicabili a tutte le attività al fine di mitigare il rischio di incendio e comporre la strategia antincendio	S.1 Reazione al fuoco
		S.2 Resistenza al fuoco
		S.3 Compartimentazione
		S.4 Esodo
		S.5 Gestione della sicurezza antincendio
		S.6 Controllo dell'incendio
		S.7 Rivelazione ed allarme
		S.8 Controllo fumi e calore
		S.9 Operatività antincendio
		S.10 Sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio
Regole Tecniche Verticali	Integrano e modificano le soluzioni della sezione strategie per attività specifiche	Attualmente sono 15 emanate mediante decreti ministeriali al fine di modificare e integrare quanto richiesto nella sezione Strategie
Metodi		M.1 Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio
		M.2 Progettazione per la sicurezza antincendio
		M.3 Determinazione dei profili di rischio delle attività

La sezione Generalità è volta a fornire gli elementi come termini, definizioni e determinazione dei profili di rischio richiamati all'interno della sezione S – Strategia antincendio.

Nella sezione S sono individuati i livelli di prestazione, ovvero la specificazione oggettiva della prestazione richiesta all'attività per realizzare la misura antincendio. Il raggiungimento di tali livelli di prestazione è ottenuto dal progettista utilizzando:

- soluzioni conformi;
- soluzioni alternative;
- soluzioni in deroga.

Le soluzioni conformi sono soluzioni progettuali di immediata applicazione nei casi specificati, che garantiscono il raggiungimento del collegato livello di prestazione senza necessità di dimostrazione da parte del progettista antincendio. Le soluzioni alternative permettono al progettista antincendio, di dimostrare il raggiungimento dei livelli di prestazione mediante l'utilizzo dei metodi di progettazione della sicurezza antincendio ammessi e descritti nella sezione Metodi (M) del Codice, tra i quali rientra la Fire Safety Engineering adottata nel presente elaborato.

Infine, la soluzione in deroga è utilizzabile descrivendo le soluzioni non rispettabili e le metodologie con le quali il progettista ha compensato le carenze.

Le strategie vengono successivamente integrate e/o modificate dalle regole tecniche verticali (RTV) in base alla specificità dell'attività oggetto della pratica.

3.1 Valutazione del rischio di incendio

L'obiettivo di questo capitolo è la valutazione del rischio di incendio in edifici residenziali nei quali siano stati applicati interventi di efficientamento energetico, con il fine di analizzare e comprendere l'influenza di tali interventi sul rischio di incendio. Tali considerazioni saranno fondamentali per la costruzione e lo studio di scenari di incendio in tali contesti nei capitoli successivi.

La seguente valutazione del rischio di incendio è svolta mediante le metodologie di cui alla sezione G.3 del Codice, utilizzata come linea guida in quanto gli edifici residenziali pluripiano non necessariamente rientrano nel campo di applicazione del Codice, infatti, gli edifici pluripiano ad uso civile sono attività soggette se l'altezza antincendio è superiore a 24 m secondo la classificazione delle attività effettuata dal D.P.R. 151/2011:

- Attività 77.1.A $24\text{ m} < \text{Altezza Antincendio} \leq 32\text{ m}$;
- Attività 77.1.B $32\text{ m} < \text{Altezza Antincendio} \leq 54\text{ m}$;
- Attività 77.1.C $54\text{ m} < \text{Altezza Antincendio}$

I valori A, B e C al termine del codice di attività identificano rispettivamente il rischio di incendio basso, medio e alto associato all'attività secondo il Codice.

Tramite questa classificazione si identifica la modalità di presentazione del progetto presso il comando dei Vigili del Fuoco.

Richiamando quanto esposto al §2.2.2, in occasione della trattazione del contenuto della RTV 13, si ricorda che i soli edifici la cui quota di piano è maggiore a 12 m devono rispondere a particolari requisiti in merito alla sicurezza delle chiusure d'ambito precedentemente descritti.

3.1.1 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana

Il profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana, R_{vita} è attribuito per ogni compartimento mediante i fattori:

- δ_{occ} : caratteristiche prevalenti degli occupanti;
- δ_a : velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio, riferita al tempo t_a in secondi, impiegato dalla potenza termica per raggiungere il valore di 1000 kW.

Il fattore δ_{occ} è determinato come da tabella 3.2, estratto dalla tabella G.3-1 del Codice.

Tabella 3.2 caratteristiche prevalenti degli occupanti (fonte: Tabella G.3-1 del Codice)

R_{vita}	Caratteristiche prevalenti degli occupanti δ_{occ}
A	Gli occupanti sono in stato di veglia e hanno familiarità con l'edificio
B	Gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con l'edificio
C	Gli occupanti possono essere addormentati:
Ci	- in attività individuale di lunga durata
Cii	- in attività gestita di lunga durata
Ciii	- in attività gestita di breve durata
D	Gli occupanti ricevono cure mediche
E	Occupanti in transito

Il fattore relativo alle caratteristiche prevalenti degli occupanti associato al caso in oggetto di edifici ad uso civile pluripiano è Ci ; ovvero occupanti che possono essere addormentati in attività individuale di lunga durata.

Il fattore δ_a è determinato come da tabella G.3-2 del Codice, della quale si riporta un estratto in tabella 3.3.

Tabella 3.3 Velocità caratteristica di incendio (fonte: Tabella G.3-2 del Codice)

δ_a	t_a	Criteri
1	600 s Lento	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$.
2	300 s Medio	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s Rapido	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco.
4	75 s ultrarapido	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con $h > 5,0 \text{ m}$. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio.

Il tempo caratteristico di crescita di un incendio in un edificio ad uso civile residenziale si assume come "rapido" e quindi il parametro δ_a è pari a 3. La stima di tale parametro è stata effettuata in conformità a quanto indicato per la tipologia Civile Abitazione nella tabella G3-4 del Codice nella quale sono riportati i valori del profilo di rischio R_{vita} per alcune tipologie di destinazione d'uso.

In conclusione, secondo la valutazione del rischio, come da sezione G.3 del Codice, il parametro R_{vita} è assunto con valore *Ci3*.

3.1.2 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici

Il profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici, R_{beni} è attribuito all'intera attività in funzione del carattere strategico, storico, culturale, architettonico o artistico dell'opera secondo la tabella G.3-6 del Codice, riportata in tabella 2.4.

Tabella 3.4 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni (fonte: Tabella G.3-6 del Codice)

		Opera da costruzione vincolata	
		No	Si
Opera da costruzione strategica	No	$R_{beni} = 1$	$R_{beni} = 2$
	Si	$R_{beni} = 3$	$R_{beni} = 4$

L'edificio civile in oggetto non rientra nella definizione di infrastruttura strategica e non è un edificio di particolare rilevanza architettonica; pertanto, R_{beni} è assunto pari a 1.

3.1.3 Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dell'ambiente

Il profilo di rischio relativo alla salvaguardia dell'ambiente, $R_{ambiente}$, è descritto al paragrafo G.3.4 del Codice. Il Codice indica che il valore di $R_{ambiente}$ è ritenuto non significativo per le attività civili in quanto in conformità con a destinazione d'uso degli ambienti non rientra nel campo di applicazione del D.lgs. 3 aprile 2006, n.152 "Norme in materia ambientale".

L'utilizzo degli ambienti con destinazione d'uso civile residenziale non comporta lo stoccaggio in quantità significative di sostanze o miscele pericolose, materiali combustibili in quantità significative e aree in cui vi è presenza di reazioni chimiche pericolose ai fini dell'incendio condizioni che stabiliscono la presenza di aree a rischio specifico.

3.1.4 Valutazione del rischio di incendio per l'attività di tipo residenziale

L'attività oggetto della valutazione del rischio è di tipo civile residenziale, le attività di questa tipologia nel 2022 hanno contribuito al 14,5% degli incendi ed esplosioni per un totale di 39.061 eventi (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, 2023).

Gli occupanti prevalenti all'interno della struttura hanno familiarità con la stessa, ma potrebbero essere addormentati, come valutato nell'attribuzione del parametro R_{vita} .

Nell'edificio ad uso residenziale si assume che non siano effettuate lavorazioni rilevanti ai fini della valutazione del rischio incendio. Tuttavia, pur trattandosi di ambienti privi di lavorazioni particolari e di stoccaggio di materiali combustibili in quantità rilevanti si riscontrano le seguenti possibili fonti di innesco:

- principio di incendio nell'ambiente cucina vista la presenza di gas metano di rete e fuochi per la cottura degli alimenti (fiamme libere);
- principio di incendio derivante dalla presenza di caldaie per la produzione di acqua calda sanitaria alimentate da gas metano di rete;
- principio di incendio derivante dall'accensione di stufe a legna, se presenti, per il riscaldamento;
- principio di incendio sviluppato all'interno dell'area garage o autorimessa, se presente, dovuto alla presenza di veicoli parchati;

- cortocircuito dovuto alla presenza di utilizzatori alimentati dalla rete elettrica e/o impianti per la produzione e lo stoccaggio di energia.

A queste fonti di innesco si aggiunge la possibilità di scenari non prevedibili derivanti da comportamenti negligenti da parte delle persone all'interno dell'attività come, ad esempio mozziconi di sigaretta non correttamente spenti, causa del 1,6% degli incendi o esplosioni nel 2022 (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, 2023) .

Lo scenario di incendio sviluppatosi da una caldaia per la produzione di acqua calda sanitaria è ritenuto possibile nel caso in cui questa non fosse correttamente mantenuta secondo le indicazioni da libretto di uso e manutenzione. Analogamente si ritiene possibile lo sviluppo di un principio di incendio derivante dalla presenza di stufe a legna e canne fumarie non correttamente mantenute, nelle quali ad esempio non viene compiuta un'accurata pulizia periodica. Le canne fumarie e camini sono fonte di innesco nel 4,2% dei casi (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco 2023).

La presenza di veicoli parchati nelle vicinanze dell'edificio o in appositi garage posti al piano terra, come visto in precedenza nel capitolo 2, può provocare l'innesco del materiale posto in facciata e la conseguente propagazione nell'attività di tipo residenziale.

Per completezza si segnala che, se i locali per il posteggio di veicoli hanno superficie superiore ai 300 m² rientrano nelle attività soggette al Codice e vedono l'applicazione della Regola Tecnica Verticale V.6 che ha lo scopo di limitare la propagazione all'interna unità abitativa.

Lo scenario di principio di incendio derivante da cause elettriche, costituenti il 4,2% delle cause di incendio (Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco, 2023), può essere provocato principalmente da apparecchi utilizzatori mal funzionanti e dall'utilizzo di prese multiple. È opportuno il corretto posizionamento dei quadri elettrici e limitare la presenza di materiali combustibili nelle loro vicinanze (ad esempio nel locale quadri).

Al fine di ridurre il rischio di sviluppo di un incendio sia in copertura che sulla facciata dell'edificio è opportuno che impianti tecnologici come, ad esempio, l'impianto fotovoltaico o il sistema di accumulo siano costituiti da materiale certificato, correttamente dimensionati, installati e i locali che ne ospitano i componenti siano mantenuti liberi da materiali infiammabili.

Lo sviluppo di uno scenario di incendio all'interno dei locali sarebbe favorito dalla presenza di elementi di arredo, elementi di arredo imbottiti, tendaggi e materiali stoccati in conformità con l'utilizzo residenziale dell'edificio come ad esempio materiali plastici, carta e tessuti.

L'oggetto della tesi è la valutazione della tematica della sicurezza negli interventi di efficientamento energetico che si traduce nella sicurezza delle facciate nel caso di installazione di materiale isolante esterno. Nella presente valutazione del rischio sono stati valutati gli eventi che possono provocare l'innescò di un incendio in un'attività di tipo civile residenziale.

Gli edifici civili residenziali sottosoglia, ovvero con altezza antincendio inferiore ai 12 m, attualmente non necessitano di particolari requisiti per le protezioni attive in caso di incendio, è altresì vero che il costruito italiano è costituito principalmente di strutture in calcestruzzo armato o a muratura portante. Queste tipologie strutturali garantiscono una protezione passiva all'incendio, infatti, i materiali citati possiedono una discreta capacità di compartimentazione che può contribuire ad ostacolare la propagazione del fuoco. In caso di applicazione di rivestimenti combustibili in facciata l'incendio sviluppatosi da una delle fonti di innesco valutate in precedenza potrebbe estendersi all'intera attività se non si garantisce il mantenimento della compartimentazione della struttura. L'applicazione di pannelli termoisolanti in facciata, quindi, non produce una variazione delle fonti di innesco tipiche dell'attività, tuttavia, potrebbe aggravare e favorire l'estensione dell'incendio.

3.1.5 Analisi storica dei casi di incendio propagatisi sulla facciata dell'edificio

Alla luce della statistica precedentemente riportata, gli ambienti domestici rappresentano il 14,5% dei casi di intervento da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, ciò dimostra che l'ambiente domestico non è assolutamente immune alla tematica del rischio di incendio, se pur non necessariamente rientrante nelle attività soggette ai sensi del Codice.

Nel presente paragrafo è stata eseguita un'analisi storica dei casi di incendio dove si è verificato il coinvolgimento dei materiali posti in facciata favorendone lo sviluppo e la propagazione tra i piani dell'edificio. Questa indagine è stata svolta al fine di riportare alcuni casi realmente avvenuti con dinamiche simili a quelle simulate nel caso di studio.

- 14/11/2020 Dijon, Francia.

L'incendio della facciata dell'edificio ha avuto come fonte di innesco un cestino della spazzatura posto sulla pubblica via: questo ha innescato il materiale isolante, EPS, installato sulla facciata. Il fuoco si è diffuso in maniera estremamente rapida nella parte superiore dell'edificio, per nove piani di altezza. Le morti provocate dall'episodio, 7, sono dovute principalmente all'esposizione degli occupanti ai fumi di combustione, con conseguenti decessi per intossicazione.



Figura 3.1 Analisi storica dei casi di incendio: 2010, Dijon, Francia

- 14/05/2012 Roubaix, Francia.

L'incendio, iniziato su un balcone posto al secondo piano dell'edificio, si è esteso in poco più di 5 minuti sulla facciata dal secondo piano fino alla parte superiore, per 18 piani.



Figura 3.2 Analisi storica dei casi di incendio: 2012, Roubaix, Francia

- 17/08/2015 Villefranche, Francia.

L'incendio, con innesco a livello del piano terra all'esterno dell'edificio, si è diffuso rapidamente fino all'ultimo piano, per 7 piani. Il fuoco si è spostato poi verso l'interno dell'edificio in seguito al collasso dei vetri delle finestre causato dall'esposizione al calore dell'incendio.



Figura 3.3 Analisi storica dei casi di incendio: 2012, Villefranche, Francia

- 14/06/2017 Grenfell Tower, Londra, Regno Unito

L'incendio ha avuto origine da un frigorifero posto al quarto piano dell'edificio per poi propagarsi successivamente lungo la facciata dell'edificio, la cui ristrutturazione era terminata l'anno precedente. L'inchiesta ha rivelato che i pannelli di rivestimento sarebbero stati realizzati con materiali infiammabili. Il caso ha avuto grande impatto mediatico anche a causa del numero elevato di morti provocate.



Figura 3.4 Analisi storica dei casi di incendio: 2017, Londra, Regno Unito

- 29/08/2021 Torre del Moro, Milano, Italia

L'incendio è divampato in un appartamento situato al quindicesimo piano dell'edificio. Quest'ultimo aveva subito un intervento di ristrutturazione che aveva visto l'applicazione di pannelli aventi non finalità di efficientamento energetico, bensì estetica. Tali pannelli, costituiti da materiale plastico, hanno favorito la diffusione dell'incendio tramite la facciata dell'edificio.



Figura 3.5 Analisi storica dei casi di incendio: 2011, Milano, Italia

- 02/06/2023 Colli Aniene, Roma, Italia

Le fiamme si sono sviluppate a partire dalla base del palazzo, da una zona adibita a magazzino all'aperto per il cantiere legato ai lavori di ristrutturazione ed efficientamento energetico a cui era sottoposto il palazzo stesso. L'impresa, secondo quanto riportato, stava eseguendo l'installazione di pannelli in EPS. L'incendio si è propagato sulla facciata dell'edificio, coinvolgendo sette degli otto piani.



Figura 3.6 Analisi storica dei casi di incendio: 2023, Roma, Italia

L'analisi storica degli incendi propagatisi in facciata successivamente all'applicazione di rivestimenti sulla stessa, dimostra che l'incendio di facciata è un rischio concreto e attuale anche in edifici con destinazione d'uso civile residenziale come l'edificio analizzato nel caso di studio del presente elaborato.

I casi ritrovati nella cronaca degli eventi incidentali si riferiscono principalmente ad edifici definiti alti, con altezze superiori ai 12 metri, quindi soggetti dal marzo del 2022 a particolari requisiti di prestazione di resistenza al fuoco delle facciate ai sensi della RTV 13 analizzata in precedenza.

Il caso di studio oggetto dell'elaborato si concentra su un edificio non rientrante nella soglia attualmente normata, ovvero avente altezza di piano massima inferiore ai 12 metri. Tali edifici ritrovano ampia diffusione nello stock del costruito nazionale e l'incendio di facciata di un edificio di dimensioni ridotte incontra meno notorietà rispetto ai casi precedentemente esposti. Pur trattandosi di edifici pluripiano di dimensioni ridotte e di conseguenza con un numero di occupanti ristretto, lo sviluppo di un incendio di facciata in un edificio ad uso civile residenziale porta con sé alcuni problemi sia di sicurezza, nel caso in cui l'esodo degli occupanti pur coprendo una distanza ridotta fosse impossibilitato dall'incendio o dalle condizioni dell'occupante, sia economici in quanto trattandosi di civili abitazioni appartenenti a nuclei familiari generano persone sfollate e necessità investimenti per il ripristino dell'agibilità dell'edificio pluripiano.

Infine, gli edifici civili pluripiano di altezza superiore ai 24 metri, rientrando nelle attività soggette, adempiono ai requisiti prestazionali di tutte le strategie del Codice e quindi sono dotati sia delle strategie passive sia di quelle attive come la disponibilità di dispositivi per il controllo dell'incendio e di sistemi di allarme al fine di favorire l'esodo tempestivo degli occupanti. Accorgimenti non necessariamente presenti in edifici residenziali di dimensioni ridotte.

Capitolo 4

Approccio alla modellazione del caso di studio

Il presente capitolo ha lo scopo di introdurre il caso di studio analizzato e le varie fasi che hanno portato all'implementazione del modello e alla scelta dei parametri principali.

4.1 Illustrazione del caso di studio

Il caso di studio analizzato in questo elaborato, come precedentemente anticipato, è un edificio pluripiano ad uso civile residenziale a telaio portante in calcestruzzo armato con tamponature in laterizio avente altezza massima di 11,71 m e altezza antincendio pari a 6,0 m.

Tale altezza antincendio, definita come in figura 4.1, essendo inferiore ai 24 m, lo rende un'attività definita sottosoglia, ovvero non rientrante nelle attività indicate nel D.P.R. 151/11 e quindi non soggetta all'applicazione del Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3 agosto 2015).

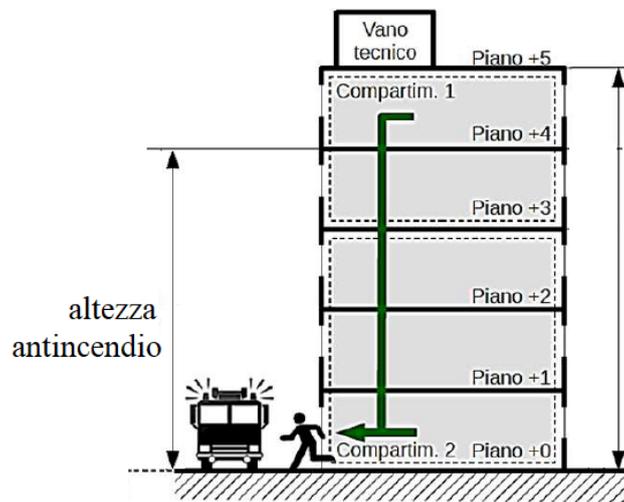


Figura 4.1 Definizione di altezza antincendio (fonte: Illustrazione G1-3 del Codice)

Inoltre, la struttura avendo quota di piano inferiore ai 12 m e affollamento previsto inferiore alle 300 persone rientra nella tipologia di edifici di categoria SA secondo il D.M. del 30 marzo 2022, RTV 13, di conseguenza i materiali di cui sono costituite le chiusure d'abito non hanno l'obbligo di rispondere a particolari requisiti in materia di prestazioni di reazione al fuoco.

L'edificio, figura 4.2, si compone di 3 piani fuori terra, serviti da un unico vano scala, così costituiti:

- piano terra è costituito da: 4 garage singoli per il ricovero di autovetture, androne per l'accesso al vano scala, porticato condominiale e 3 vani cantina;
- primo e secondo piano: totale di 4 appartamenti, 2 per ogni piano.

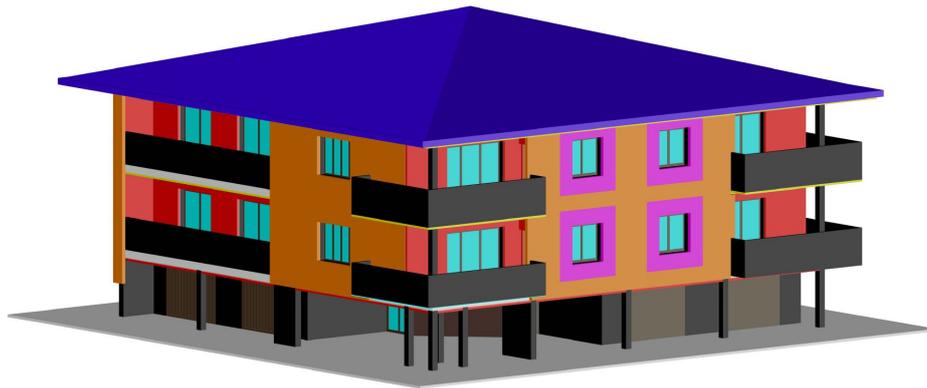


Figura 4.2 Modello Autocad dell'edificio oggetto del caso di studio

L'analisi del caso di studio presentato si compone di tre scenari riportati in tabella 4.1.

Tabella 4.1 Definizione degli scenari analizzati

Scenario 1	consiste nella simulazione di un incendio nella struttura priva di installazione di materiali termoisolanti in facciata, ovvero allo stato di progetto
Scenario 2	consiste nella simulazione di un incendio nella struttura a seguito dell'installazione di poliuretano espanso rigido (PUR) in facciata;
Scenario 3	consiste nella simulazione di un incendio nella struttura a seguito dell'installazione di polistirene espanso sinterizzato (EPS) in facciata.

Il primo scenario: Scenario 1 è stato simulato al fine di avere una panoramica dello sviluppo dell'incendio nella struttura priva di ristrutturazione e di installazione dei materiali termoisolanti in facciata. Gli altri due scenari: Scenario 2 e Scenario 3 sono stati selezionati alla luce della larga diffusione dei materiali oggetto dell'analisi, come evidenziato nei paragrafi precedenti, e delle loro caratteristiche di certificazione delle prestazioni di reazione al fuoco. Entrambi i materiali, infatti, hanno tipicamente classe di reazione al fuoco di classe E.

Definiti gli scenari analizzati, nei prossimi paragrafi sono stati riassunti i vari passaggi atti alla costruzione del modello per la realizzazione dell'analisi numerica delle tre casistiche.

4.2 Descrizione dello scenario di incendio e curva HRR

I primi passi per condurre un'analisi FSE (*Fire Safety Engineering*) sono la modellazione dello scenario di incendio e la stima della curva di rilascio termico, detta curva HRR, attesa. Il parametro HRR (*Heat Release Rate*) definisce la variazione della potenza rilasciata nel tempo da un focolare di incendio, espressa in kW. Essa dipende dalla natura e dalla disposizione del combustibile e dalle condizioni di ventilazione. Può essere definita anche come velocità di bruciamento o di combustione in quanto l'unità di misura kW è equivalente ad un'energia rilasciata nel tempo.

Preliminarmente all'analisi FSE è necessario determinare la curva naturale HRR, schematizzata in figura 4.3, la quale si compone di tre fasi:

- fase di propagazione dell'incendio: a livello temporale si estende dal tempo 0 fino al tempo t_A e ha, nel caso più semplice, andamento a crescita quadratica come da equazione 4.1;

$$HRR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t_A} \right)^2 ; t < t_A \text{ [kW]} \quad (4.1)$$

- fase stazionaria dell'incendio: a livello temporale si estende dal tempo t_A fino al tempo t_B e rappresenta la fase durante la quale la potenza liberata si stabilizza al suo valore massimo, come da equazione 4.2;

$$HRR(t) = HRR_{max} ; t_A \leq t < t_B \text{ [kW]} \quad (4.2)$$

- fase di decadimento: a livello temporale si estende dal tempo t_B fino al tempo t_C con andamento, nel caso più semplice, di tipo lineare come da equazione 4.3.

$$HRR(t) = HRR_{max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B} ; t_B \leq t \leq t_C \text{ [kW]} \quad (4.3)$$

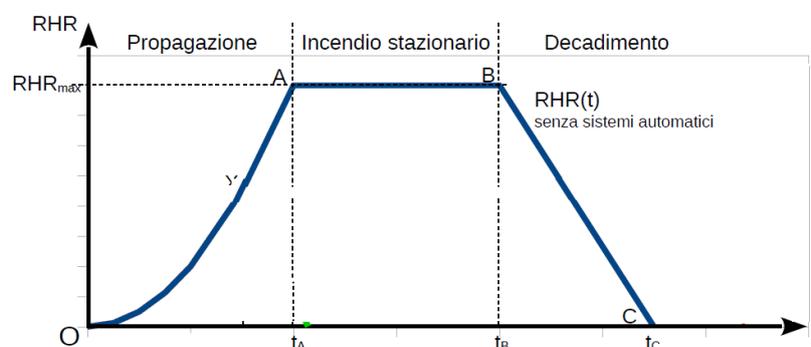


Figura 4.3 Esempio di andamento di curva HRR senza sistemi di spegnimento automatici (fonte: Illustrazione M.2-1 del Codice)

Lo scenario di incendio analizzato in questo elaborato prevede la simulazione di un incendio che trova innesco nella zona cucina dell'appartamento situato al primo piano rialzato dell'edificio. Al fine di stimare la curva HRR rappresentativa dell'incendio, si è calcolato il carico di incendio specifico di progetto, $q_{f,d}$ equazione 4.4, del locale cucina con le modalità previste dal punto S.2.9 del Codice di Prevenzione Incendi.

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad (4.4)$$

dove:

- δ_{q1} fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione alla dimensione del compartimento, valore da tabella S.2-6 del Codice, assunto pari a 1;
- δ_{q2} è il fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento, valore da tabella S.2-7 del Codice, assunto pari a 0,8;
- δ_n è il fattore che tiene conto delle differenti misure antincendio del compartimento, valore da tabella S.2-8 del Codice, assunto pari a 1;
- q_f è il valore nominale del carico d'incendio specifico [MJ/m²], descritto dalla equazione 4.5.

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \psi_i}{A} \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad (4.5)$$

dove:

- g_i massa dell'i-esimo materiale combustibile [kg];
- H_i potere calorifico inferiore dell'i-esimo materiale combustibile [MJ/kg];
- m_i fattore di partecipazione alla combustione dell'i-esimo materiale combustibile pari a 0,80 per il legno e altri materiali di natura cellulosica e 1,00 per tutti gli altri materiali combustibili;
- ψ_i fattore di limitazione della partecipazione alla combustione dell'i-esimo materiale combustibile pari a 0 per i materiali contenuti in contenitori appositamente progettati per resistere al fuoco; 0,85 per i materiali contenuti in contenitori non combustibili e non appositamente progettati per resistere al fuoco; 1 in tutti gli altri casi;

A superficie lorda del piano del compartimento o, nel caso degli incendi localizzati, superficie lorda effettiva di distribuzione del carico di incendio. [m^2]

Il carico di incendio nominale, q_f , è stato calcolato con l'ausilio del software distribuito dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco: *Clara* v. 3.0. Nel programma è presente un database di vari arredi e materiali per i quali sono stati stimati i vari fattori di partecipazione da considerare.

Si elencano nella tabella 4.2 i valori di riferimento per il compartimento cucina.

Tabella 4.2 Tabella riassuntiva del carico di incendio del compartimento cucina

A	15,84 m^2
q_f	491,56 MJ/ m^2
$q_{f,d}$	393,25 MJ/ m^2

Noto il carico di incendio di progetto del compartimento oggetto della simulazione, si procede alla stima della curva HRR, precedentemente descritta, mediante i passaggi riportati nel capitolo del Codice M.2 "Scenari di incendio per la progettazione prestazionale".

Nelle simulazioni si è utilizzato il focolare predefinito del Codice di prevenzione incendi per le attività civili, punto M.2.7 della normativa. Si riportano in tabella 4.3 le caratteristiche del focolare.

Tabella 4.3 Focolare predefinito per attività civili (Tabella M.2-2 del Codice)

Tempo caratteristico di crescita dell'incendio t_α	150 s
HRR_{max} totale	5 MW
HRR_{max} per m^2 di superficie del focolare (HRRPUA)	250-500 kW/ m^2

Il focolare è stato assunto con t_α di 150 s e HRR_{max} pari a 5 MW. Tale valore, se diviso per la superficie del focolare, rientra nel range indicato in tabella alla voce HRR_{max} per m^2 di superficie del focolare. Il tempo t_α , tempo caratteristico di incendio, è il tempo impiegato dal focolare per rilasciare una potenza termica di valore di circa 1000 kW.

Definiti i valori di HRR_{max} e il tempo caratteristico di crescita dell'incendio t_α , si calcola il tempo t_A , tempo di inizio della fase stazionaria, con l'equazione 4.6.

$$t_A = \sqrt[2]{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}} \quad (4.6)$$

La fase di incendio stazionario, come precedentemente descritto, termina al tempo t_B , tempo di inizio della fase di decadimento. Il tempo t_B è definito come il tempo in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile, $q_f \cdot A_f$ è stata rilasciata nel compartimento antincendio. Prima del calcolo del tempo t_B è necessario verificare se l'energia termica inizialmente disponibile è sufficiente affinché l'incendio possa raggiungere la potenza massima, HRR_{max} . Tale verifica è condotta con la disuguaglianza all'equazione 4.7.

$$0,70 q_{f,d} A_f \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3 \quad (4.7)$$

Nel caso in cui la verifica non fosse soddisfatta l'incendio raggiungerebbe il valore di HRR_{max} e inizierebbe immediatamente la fase di decadimento.

Nel caso di studio oggetto dell'elaborato la verifica risulta soddisfatta e si è proceduto, applicando l'equazione 4.8, al calcolo del tempo t_B .

$$t_B = t_A + \frac{0,70 q_{f,d} A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{HRR_{max}} \quad (4.8)$$

È stimato che il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile venga consumato con andamento lineare annullandosi al tempo t_C , calcolato con l'equazione 4.9.

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 0,30 q_{f,d} A_f}{HRR_{max}} \quad (4.9)$$

Si elencano in tabella 4.4 i risultati ottenuti mediante l'applicazione delle formule precedentemente descritte, definendo così la curva HRR dello scenario di incendio.

Tabella 4.4 Parametri della curva HRR implementata nel modello

A_f : superficie lorda del compartimento	15,84 m ²
HRR_{max} : potenza termica massima	5000 kW
t_A : tempo di inizio della fase stazionaria	335 s
t_B : tempo di fine della fase stazionaria	1095 s
t_C : tempo al quale la potenza termica rilasciata è nulla	1845 s

Si riporta la curva HRR ottenuta in figura 4.4.

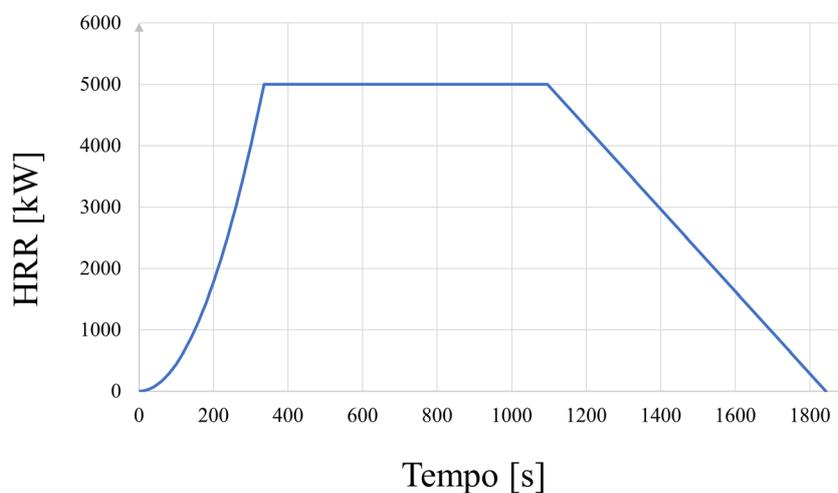


Figura 4.4 Curva HRR

4.3 Modellazione del caso studio

Il modello per l'analisi del caso di studio fa riferimento alle metodologie della *Fire Safety Engineering* (FSE). Quest'ultima ha come obiettivo il raggiungimento di obiettivi prestazionali con analisi quantitative mediante la risoluzione di modelli di calcolo semplificati e avanzati.

L'analisi dello studio della reazione al fuoco in caso di incendio del materiale per l'isolamento termico posto in facciata, essendo una geometria complessa, è svolta attraverso l'applicazione di un modello di calcolo avanzato, per mezzo del modello fluidodinamico FDS (*Fire Dynamics Simulator*) sviluppato dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e attraverso l'interfaccia grafica Pyrosim 2023 (ver. 6.8.0) sviluppata da Thunderhead Engineering.

Il modello FDS è un modello di fluidodinamica computazionale basato sulla risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes ed è adatto alla risoluzione di dinamiche associate a flussi a bassa velocità e guidati termicamente.

Si riportano nello schema di figura 4.5 le fasi seguite per la creazione del modello riportate nei paragrafi del presente capitolo.

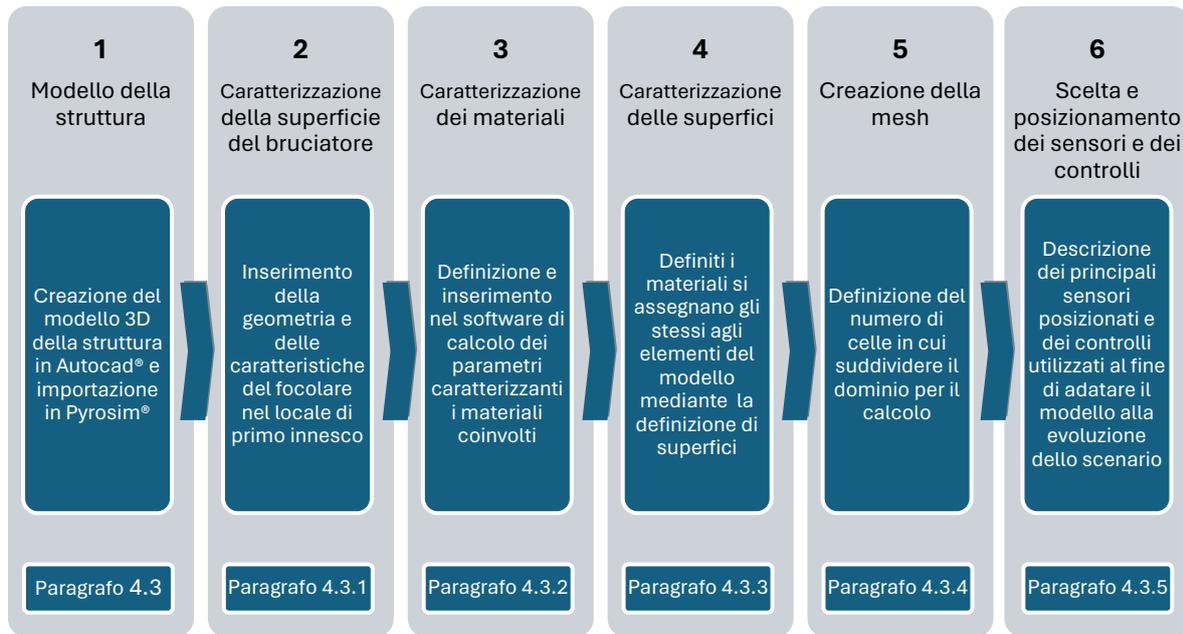


Figura 4.5 Fasi riportate per la creazione del modello

La creazione del modello (fase 1 della figura 4.5) ha inizio con la realizzazione del modello in tre dimensioni in Autocad® e la successiva implementazione nel software Pyrosim attraverso l'opportuna interfaccia di importazione di file sorgente *.dwg*. Al fine di ottimizzare i tempi di calcolo, la scelta fatta è stata quella di importare una sezione del modello CAD dell'edificio e non il modello nella sua interezza (figura 4.6). Tale scelta operativa risulta strategica in quanto permette di ridurre i tempi di calcolo senza andare ad impattare sulla capacità di tracciare l'evoluzione dello scenario sulla facciata.

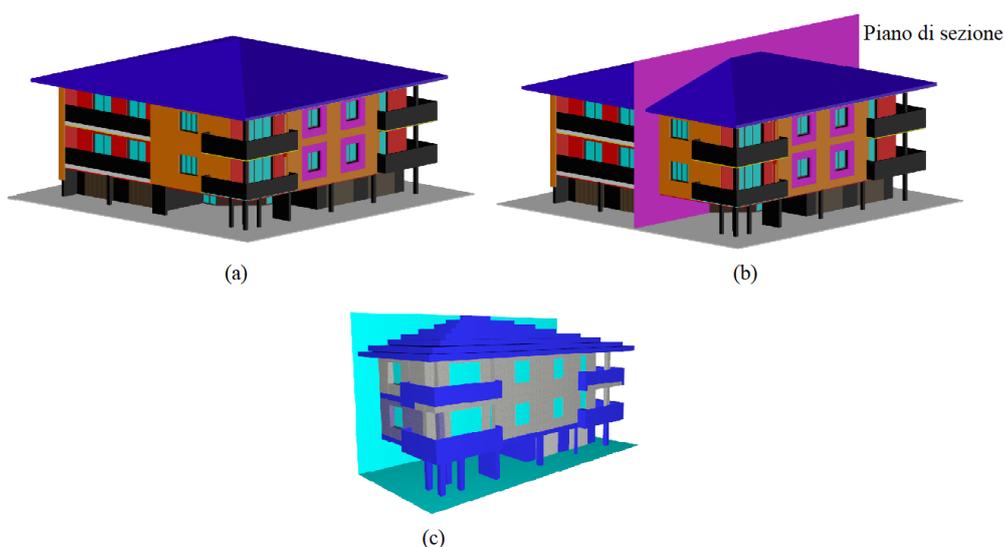


Figura 4.6 Realizzazione del modello, (a) modello in tre dimensioni della struttura realizzato con Autocad®, (b) modello con indicato il piano di sezione e (c) sezione del modello importata in Pyrosim

4.3.1 Caratterizzazione della superficie del bruciatore

La simulazione effettuata nel presente caso di studio prevede lo sviluppo di un incendio nel locale cucina di uno dei due appartamenti situati al primo piano dell'edificio.

Al fine di condurre la simulazione di un incendio in ambiente domestico, è stata creata una superficie di tipo *Burner* (fase 2 figura 4.5) uniformemente distribuita all'interno della stanza sovracitata e distanziata di 0,40 m dalle pareti perimetrali della stessa, visibile in figura 4.7.

La superficie del bruciatore e le sue caratteristiche, calcolate al §4.2, sono state mantenute costanti nelle simulazioni effettuate.

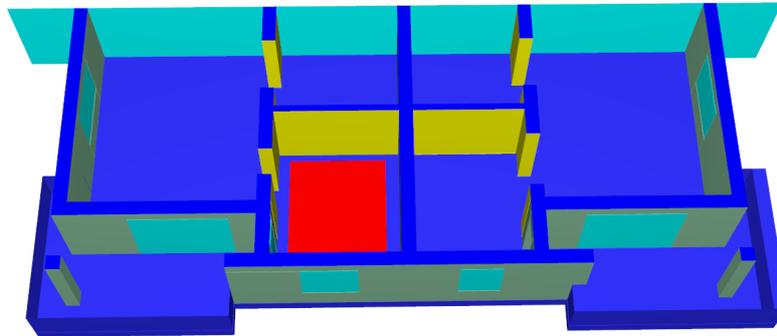


Figura 4.7 Vista del primo piano dell'edificio e posizionamento della superficie (in rosso)

Alla superficie di tipo *Burner* è stata assegnata la curva HRR calcolata in §4.2, selezionando la funzione *Custom* nel campo dati *Ramp-Up time*, campo dove si inserisce la tipologia di crescita della potenza termica nel tempo. La scelta della funzione di tipo *Custom* prevede l'inserimento di alcuni punti della curva HRR specificando il tempo t e il rapporto tra il valore di HRR raggiunto al tempo t e il valore di HRR_{max} . Nell'intervallo tra questi punti il programma attribuisce un andamento lineare della curva. Si riporta in figura 4.8 la schermata di riferimento: è possibile notare dall'immagine la maggiore densità di punti inserita nella fase di propagazione dell'incendio al fine di ottenere l'andamento di crescita previsto.

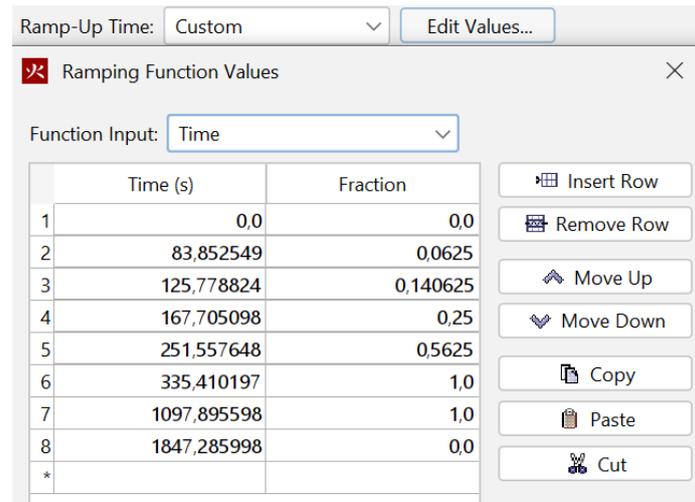


Figura 4.8 Inserimento della curva HRR nel software Pyrosim con la funzione Custom ovvero attraverso la definizione della frazione di potenza emessa nel tempo.

Specificata la curva HRR associata alla superficie di tipo *Burner*, è necessario inserire il valore di HRRPUA ovvero la potenza termica rilasciata per unità di area. Quest'ultima si ricava dividendo il valore di HRR_{max} , definito in precedenza, per l'area della superficie burner inserita nel modello.

Si riporta nella figura 4.9 il confronto della curva HRR ottenuta con i calcoli analitici tramite le equazioni fornite dal Codice e la curva HRR ottenuta dal software Pyrosim come definita in relazione alla superficie *Burner*. Le due curve hanno lo stesso andamento nel tempo e una totale sovrapposizione nelle tre fasi di sviluppo dell'incendio.

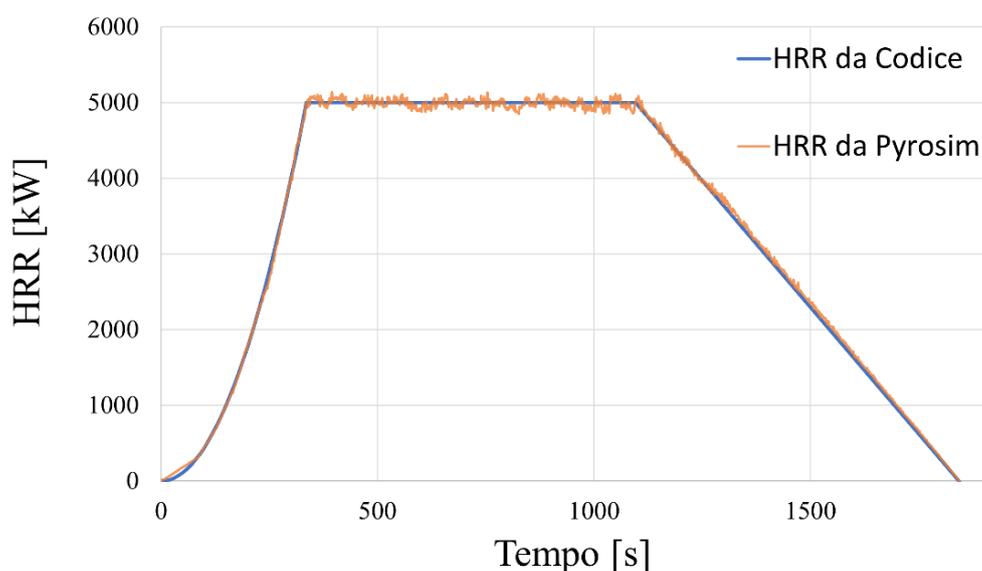


Figura 4.9 Risultato dell'implementazione della curva HRR in Pyrosim

4.3.2 Caratterizzazione dei materiali

La caratterizzazione dei materiali (fase 3 figura 4.5) avviene dal menu *Materials* del software; dove è possibile specificarne le proprietà da assegnare alle superfici del modello. Il software ha una libreria di materiali preimpostati e permette di inserirne di nuovi attraverso la sezione *Thermal Properties*. In particolare, sono stati inseriti i seguenti parametri:

- Densità [kg/m^3];
- Calore specifico (costante o in funzione della temperatura) [$\text{kJ}/(\text{kg K})$];
- Conducibilità termica (costante o in funzione della temperatura) [$\text{W}/(\text{m K})$];
- Emissività: il rapporto tra l'energia irradiata dalla superficie del materiale e quella irradiata da un emettitore perfetto, noto come corpo nero, alla stessa temperatura e lunghezza d'onda e nelle stesse condizioni di osservazione. Si tratta di un numero adimensionale compreso tra 0 (per un riflettore perfetto) e 1 (per un emettitore perfetto);
- Coefficiente di assorbimento: valore che stima la radiazione che penetra ed è assorbita nel materiale [m^{-1}].

Sono stati inseriti i materiali che intervengono nelle simulazioni con le caratteristiche riportate nelle tabelle sottostanti. Per i dati inseriti sono state prese come riferimento schede tecniche di prodotto reperibili in rete. In particolare, sono state definite le proprietà rispettivamente del laterizio, dei pannelli in poliuretano espanso ed EPS, dell'intonaco e delle superfici vetrate.

Tabella 4.5 Proprietà del laterizio inserite nelle simulazioni

Laterizio da scheda tecnica POROTON P800	
Densità	830,0 kg/m^3
Calore specifico	1,0 $\text{kJ}/(\text{kg K})$
Conducibilità termica	0,17 $\text{W}/(\text{m K})$
Emissività	0,9
Coefficiente di assorbimento	5,0E+4 m^{-1}

Tabella 4.6 Proprietà dei pannelli di poliuretano espanso inserite nelle simulazioni

Pannelli in poliuretano espanso (PUR)

Densità	30,0 kg/m ³
Calore specifico	1,5 kJ/(kg K)
Conducibilità termica	0,027 W/(m K)
Emissività	0,9
Coefficiente di assorbimento	5,0E+4 m ⁻¹

Tabella 4.7 Proprietà dei pannelli in EPS inserite nelle simulazioni

Pannelli in polistirene espanso sinterizzato (EPS)

Densità	25,0 kg/m ³
Calore specifico	1,45 kJ/(kg K)
Conducibilità termica	0,031 W/(m K)
Emissività	0,9
Coefficiente di assorbimento	5,0E+4 m ⁻¹

Tabella 4.8 Proprietà dell'intonaco di finitura inserite nelle simulazioni

Intonaco di finitura

Densità	400,0 kg/m ³
Calore specifico	1,0 kJ/(kg K)
Conducibilità termica	0,28 W/(m K)
Emissività	0,9
Coefficiente di assorbimento	5,0E+4 m ⁻¹

Tabella 4.9 Proprietà delle superfici vetrate inserite nelle simulazioni

Vetro

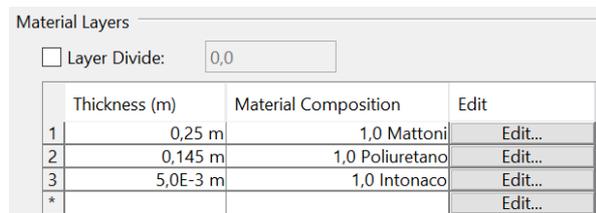
Densità	2200,0 kg/m ³
Calore specifico	0,8 kJ/(kg K)
Conducibilità termica	1,0 W/(m K)
Emissività	0,9
Coefficiente di assorbimento	5,0E+4 m ⁻¹

4.3.3 Caratterizzazione delle superfici

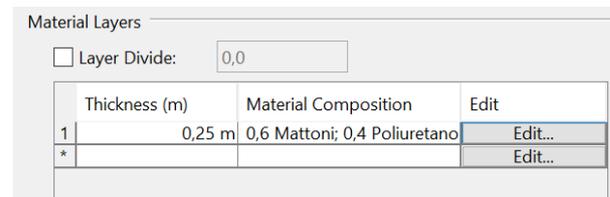
Si procede definendo la superficie assegnata alle tamponature dell'edificio (fase 4 figura 4.5), sulle quali insiste l'isolante termico il cui comportamento costituisce l'oggetto principale del caso di studio.

Alle tamponature perimetrali è stata assegnata la tipologia di superficie *Layered*, la quale permette di inserire superfici composte da più strati di materiali come, ad esempio la stratigrafia di una parete.

Selezionata la tipologia di superficie è necessario specificare gli strati di cui si compone. Questa operazione può essere effettuata inserendo nella tabella *Material Layers* più righe associate ai materiali e al loro spessore nella stratigrafia, figura 4.10(a), oppure inserendo una sola riga nella tabella e specificando il rapporto tra la massa del materiale e la massa totale, figura 4.10(b). Per le superfici oggetto delle simulazioni è stato utilizzato il primo tra i due metodi descritti.



(a)



(b)

Figura 4.10 Inserimento della stratigrafia di una superficie di tipo *Layered*, (a) inserimento dello spessore dello strato di materiale (b) inserendo lo spessore totale e la frazione di massa dei materiali.

Nel campo dati *Backing* della superficie si specifica la modalità di trasferimento di calore tra i vari strati di cui è composta. Esistono tre differenti opzioni:

- *Air Gap*: rappresenta un'intercapedine d'aria nello spazio retrostante allo strato;
- *Insulated*: impedisce la perdita di calore dal retro del materiale;
- *Exposed*: permette il trasferimento di calore nello spazio retrostante al materiale.

La superficie è stata creata in modalità *Exposed*, al fine di garantire il trasferimento del calore all'interno della stratigrafia delle tamponature.

L'utilizzo della superficie di tipo *Layered* con modalità *Exposed* ha permesso di ovviare a un problema comparso nelle prime simulazioni effettuate: in prima battuta erano stati inseriti nel modello dei solidi distinti e adiacenti, ognuno rappresentante un elemento della stratigrafia.

Si riepilogano nella tabella sottostante, tabella 4.10, gli spessori degli strati inseriti nella superficie *Layered* delle tamponature.

Tabella 4.10 Tabella descrittiva della stratigrafia delle tamponature

Stratigrafia delle tamponature	
Mattoni forati (tipo Poroton)	0,25 cm
Materiale isolante (EPS o PUR)	0,145 cm
Intonaco di finitura	0,005 cm

Allo scopo di controllare il trasferimento di calore, precedentemente alle simulazioni dell'edificio, è stata effettuata la simulazione di una parete isolata ponendo il bruciatore a distanza 0,40m da uno dei suoi lati maggiori (figura 4.11).

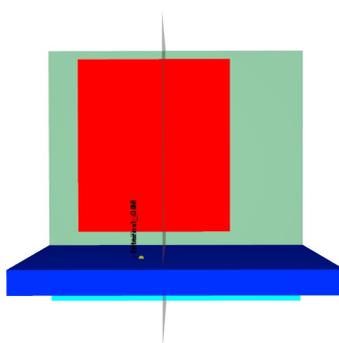


Figura 4.11 Vista dall'alto della configurazione della simulazione per la valutazione del trasferimento di calore nella parete

Con riferimento alla figura 4.10, è possibile visualizzare i dispositivi che rilevano la temperatura sia sulle facce esterne sia all'interno della stratigrafia. È stato inoltre inserito un dispositivo per l'analisi del flusso di calore sul lato esposto all'incendio. I dispositivi sono rappresentati dal punto di colore giallo posto sulla parete e sono posizionati come illustrato in figura 4.11.

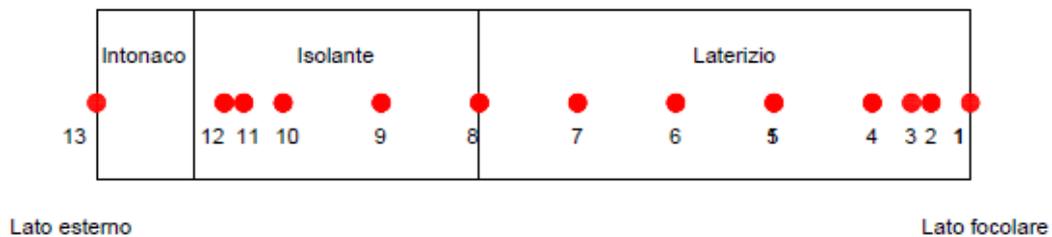


Figura 4.12 Posizionamento dei punti di controllo nella stratigrafia di parete con distanza dal lato focolare rispettivamente: 2: 0,02 m, 3: 0,03 m, 4: 0,05 m, 5: 0,10 m, 6: 0,15 m, 7: 0,20 m, 8: 0,25 m, 9: 0,30 m, 10: 0,35 m, 11: 0,37 m e 12: 0,38 m. I sensori 1 e 13 rilevano la temperatura delle facce esterne

L'andamento delle temperature ottenuto dalla risoluzione del modello FDS è stato confrontato con l'equazione analitica della conduzione termica in solidi semi-infiniti, equazione 4.10.

$$\frac{T(x, \tau) - T_0}{T_i - T_0} = \text{erf} \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (4.10)$$

La cui soluzione, ipotizzando il flusso di calore costante, è riportata nell'equazione 4.11.

$$T(x) = T_i + \frac{2q_0 \sqrt{\alpha t / \pi}}{\lambda A} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0 x}{\lambda A} \left(1 - \text{erf} \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (4.11)$$

dove:

$T(x)$: temperatura alla profondità x della stratigrafia della parete [°C];

T_i : temperatura iniziale della faccia della parete [°C], condizione al contorno del modello;

q_0 : flusso di calore [W], dato ottenuto dal sensore nel modello FDS;

t : tempo [s]

λ : conducibilità termica [W/(m K)]

A : Area della parete [m²]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

ρ : densità [kg/m³]

c_p : calore specifico [kJ/(kg K)]

Si riporta nel grafico sottostante, figura 4.13, il confronto tra la soluzione analitica e la soluzione numerica. Come si può notare, con riferimento alla faccia interna della parete, la soluzione numerica restituisce una temperatura maggiore rispetto alla soluzione analitica. Tale discrepanza è dovuta al flusso di calore assunto come costante nella soluzione analitica ma non costante nel modello numerico. L'andamento delle temperature negli altri punti risulta coerente, in quanto le temperature nelle altre posizioni della stratigrafia, ad esempio a 2 cm, 3 cm e 5 cm del grafico sono rilevate con buona approssimazione. Si precisa che i dati del grafico in ascissa sono stati ridotti ai soli primi 0,20 m di spessore in quanto non si è rilevato un aumento di temperatura nei restanti 0,20 m di stratigrafia, ovvero il grafico riporta i dati fino al sensore numero 7 con riferimento alla figura 4.12.

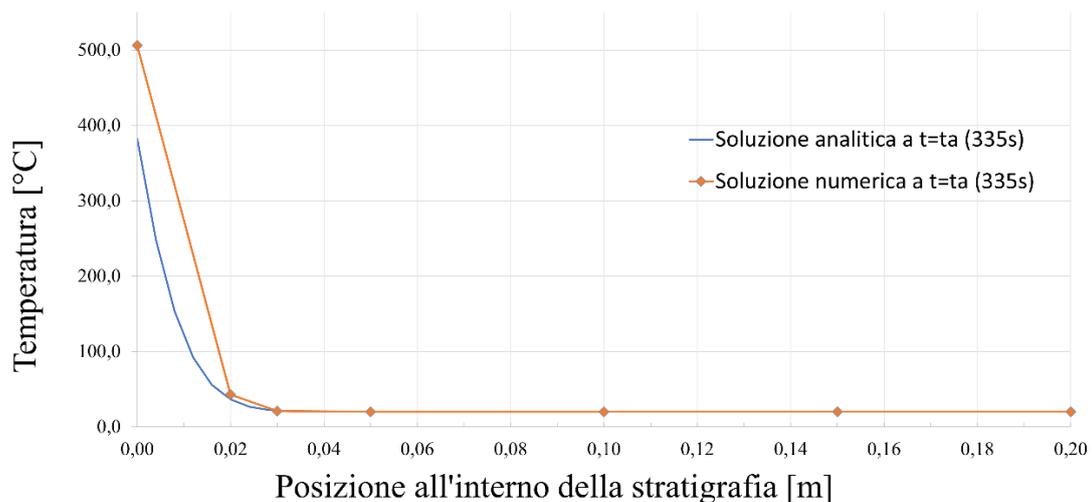


Figura 4.13 Grafico di confronto tra la conduzione di calore della parete nella soluzione numerica e nella soluzione analitica calcolato al tempo t_A (335 s)

Il grafico in figura 4.13 permette di fare una considerazione utile al fine dello svolgimento delle simulazioni degli scenari: l'andamento delle temperature all'interno della stratigrafia della parete non raggiunge valori rilevanti ai fini antincendio sul lato esterno al locale di primo innesco. Questo in relazione alle temperature di ignizione dei materiali isolanti. Quindi l'innalzamento delle temperature rilevate sulla facciata è principalmente causato dalla

presenza di aperture come finestre e portefinestre, il cui collasso causerebbe il massimo trasferimento di calore ai materiali posti in facciata.

Gli ultimi dati di cui necessita la superficie associata alle tamponature sono il valore di HRR del materiale isolante e la sua temperatura di accensione. Tali valori sono definibili mediante il menu *Reaction* selezionando l'opzione *Governed Manually*. Selezionata l'opzione sono stati inseriti il valore della potenza termica rilasciata e la temperatura di ignizione dei materiali isolanti.

I valori di HRR introdotti nella simulazione, tabella 4.11, fanno riferimento ai valori di HRR di picco ottenuti dalla letteratura pubblicata a seguito dello svolgimento di un test a larga scala condotto in Svezia nel 1996 in merito alle prestazioni dei materiali di isolamento termico al fuoco (Babrauskas, 1996).

I valori della temperatura di accensione sono stati scelti con riferimento alla letteratura, in particolare dalla quinta edizione del manuale: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering per il poliuretano espanso rigido (Hasemi, 2016: 718) e dalla pubblicazione redatta dalla *European Manufacturers of Expanded Polystyrene* (EUMEPS, 2002) per il polistirene espanso sinterizzato. Si riportano tali valori in tabella 4.11.

Tabella 4.11 Temperatura di ignizione dei materiali isolanti

	EPS	PUR
HRR_{peak} [kW/m²]	154	71
Temperatura di accensione (°C)	360	280

Infine, in tutti gli scenari è stato assegnato il materiale calcestruzzo, presente nella libreria di Pyrosim, ai solai di piano e alle tramezze realizzanti la divisione interna dell'edificio una superficie costituita dai soli mattoni con le caratteristiche precedentemente descritte. Si riporta in figura 4.14 la distribuzione dei materiali descritti nella planimetria del piano tipo dell'edificio.

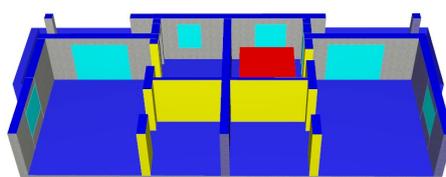


Figura 4.14 Piano tipo dell'edificio in blu sono indicati gli elementi in calcestruzzo, in giallo gli elementi in laterizio

4.3.4 Creazione della mesh

I modelli di calcolo avanzato, come precedentemente anticipato, prevedono la creazione di una mesh (fase 5 figura 4.5) che equivale al dividere la zona in analisi in un numero elevato di celle rispetto alle quali sono risolte le equazioni di conservazione della massa e dell'energia.

Le dimensioni ottimali della mesh possono essere calcolate mediante l'equazione 4.12.

$$dx = \frac{i}{D^*} ; i = 4, 10, 16 \quad (4.12)$$

dove:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.13)$$

i : parametro per definire la precisione della mesh ottenuta

Q : HRR totale del focolare

ρ_{∞} : densità dell'aria [kg/m^3]

c_p : calore specifico dell'aria [$\text{kJ}/(\text{kg K})$]

T_{∞} : temperatura ambiente [K]

g : costante di accelerazione gravitazionale [m/s^2]

I risultati ottenuti dallo svolgimento della equazione 4.12 sono pari a:

- 46 cm se assunto il parametro i di valore 4, mesh di dimensioni ampie;
- 18 cm se assunto il parametro i di valore 10, mesh di dimensioni medie;
- 11 cm se assunto il parametro i di valore 16, mesh di dimensioni fini.

Un ulteriore aspetto da considerare nella determinazione della dimensione della mesh è la dimensione della stratigrafia della parete. Avendo selezionato superfici di tipo *Layered* e trasferimento di calore all'interno della stessa in modalità *Exposed*, l'analisi FDS impone una dimensione della mesh normale alla superficie non inferiore al suo spessore massimo, quindi pari allo spessore delle tamponature.

Mediante le formule di calcolo delle dimensioni ottimali, risulta che assumere un valore della dimensione della mesh pari allo spessore delle tamponature rappresenta una scelta adeguata, rientrando nel range dei valori ottenuti.

Alla luce di quanto detto, la mesh utilizzata per gli scenari di simulazione ha dimensioni pari a 0,40 m x 0,40 m x 0,40 m, ovvero è omogenea nelle tre dimensioni. La mesh ottenuta si compone di 45.240 celle.

Infine, un'ulteriore scelta fatta è stata quella di eliminare i *Mesh Vents* nelle direzioni X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} e Z_{max} permettendo la fuoriuscita dei gas di combustione dai limiti della mesh.

4.3.5 Scelta e posizionamento dei sensori e dei controlli

L'analisi FDS permette di dichiarare dei sensori definiti *Device* nell'ambiente di Pyrosim (fase 6 figura 4.5), questi hanno la funzione di misurare la grandezza selezionata in modo puntuale. Andando più nel dettaglio, una volta definite le coordinate del sensore e la grandezza oggetto della misurazione, figura 4.15, al termine della simulazione il software genererà un file in formato *comma-separated values* (.csv) contenente i valori puntuali nel tempo della grandezza selezionata.

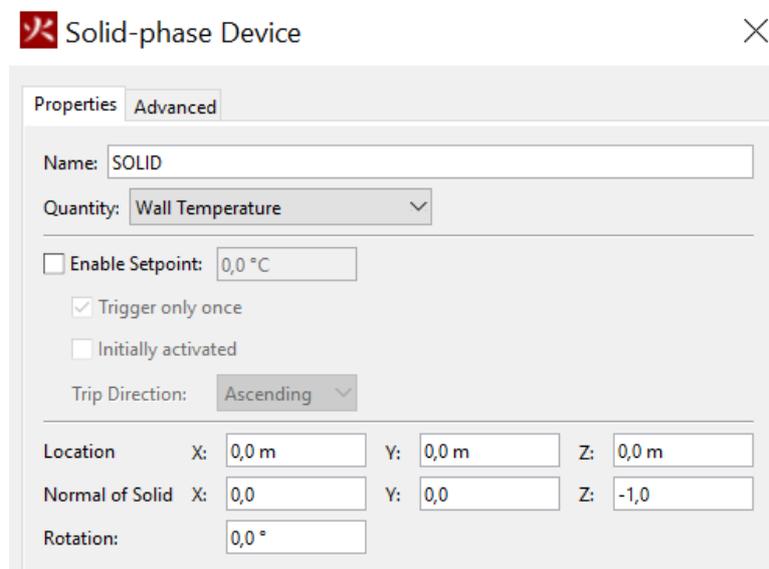


Figura 4.15 Esempio della schermata di dichiarazione di un sensore

Un'ulteriore funzione del software permette la definizione di controlli logici al fine modificare alcuni parametri del modello durante la simulazione in seguito ad un evento

specifico. Questo avviene mediante la dichiarazione di *control*, si riporta un esempio in figura 4.16.

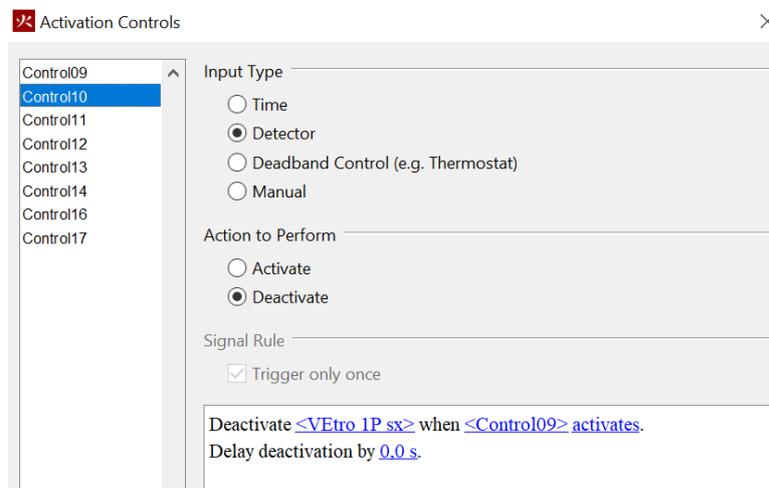


Figura 4.16 Esempio della schermata di definizione dei controlli logici

Nel modello sono stati creati dei sensori di rilevamento della temperatura di tipo *Wall Temperature*, con lo scopo di monitorare l'andamento delle temperature sulla faccia della superficie nella quale sono posizionati. Questi sono posti sulla faccia interna delle superfici vetrate nel caso delle finestre poste nel locale di primo innesco, sul lato esterno delle stesse per le altre finestre poste sulla facciata principale.

Mediante la funzione controlli logici è stata programmata la scomparsa delle superfici vetrate quando il sensore posto sulla superficie rileva una temperatura della facciata esposta ai fumi di combustione pari a 300°C. La temperatura di rottura delle superfici vetrate nei casi di esposizione al fuoco è un tema indagato in varie ricerche scientifiche e subisce notevoli variazioni legate, ad esempio, allo spessore del vetro, alla sua tipologia, alle condizioni di vincolo offerte dalla cornice dell'infisso e alla potenza del flusso ricevuto. Il valore di massima temperatura di servizio dei vetri, assunto pari a 300°C, è considerato un limite inferiore ragionevole (Babrauskas, 1997).

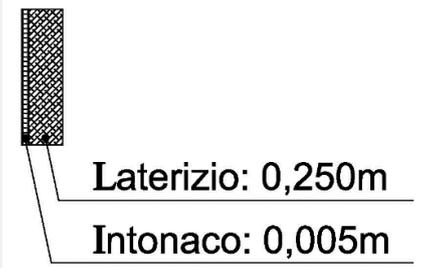
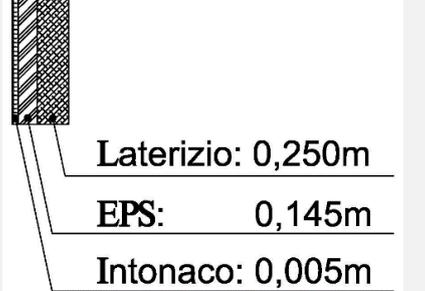
Implementando l'evento di rottura delle superfici vetrate si permette all'incendio di propagarsi all'esterno dell'edificio ed eventualmente sulla facciata in funzione delle caratteristiche dei materiali inseriti nella simulazione.

4.4 Scenari simulati

Descritte le principali caratteristiche del modello, vengono introdotti nel presente paragrafo gli scenari simulati. In tali scenari, come precedentemente descritto, sono state mantenute costanti le caratteristiche del bruciatore quali la curva HRR caratteristica e la sua disposizione geometrica all'interno del locale di primo innesco. I controlli logici e i sensori sono comuni a tutte le simulazioni effettuate; quindi, il collasso delle superfici vetrate avviene al rilevamento della temperatura superficiale pari a 300°C come definito al §4.3.5.

Gli scenari simulati e le stratigrafie delle tamponature proprie di ogni scenario sono riportati in tabella 4.12.

Tabella 4.12 Scenari simulati

Stratigrafia delle tamponature	Descrizione dello scenario
 <p>Laterizio: 0,250m Intonaco: 0,005m</p>	<p>Scenario 1: struttura allo stato di realizzazione, senza interventi di efficientamento termico</p>
 <p>Laterizio: 0,250m PUR: 0,145m Intonaco: 0,005m</p>	<p>Scenario 2: struttura con isolamento termico in poliuretano espanso rigido (PUR) di spessore 0,145 m (come riportato al §4.3.3, tabella 4.10)</p>
 <p>Laterizio: 0,250m EPS: 0,145m Intonaco: 0,005m</p>	<p>Scenario 3: struttura con isolamento realizzato in polistirene espanso sinterizzato (EPS) di spessore 0,145 m (come riportato al §4.3.3, tabella 4.10)</p>

Alle stratigrafie di parete presentate sono applicate le caratteristiche di temperatura di ignizione e valore HRR esposte in precedenza nel §4.3.3 – Caratterizzazione delle superfici.

Si riporta in figura 4.17 il modello della facciata, dove sono evidenziate in colore giallo le superfici alle quali sono state assegnate le stratigrafie caratterizzanti gli scenari.

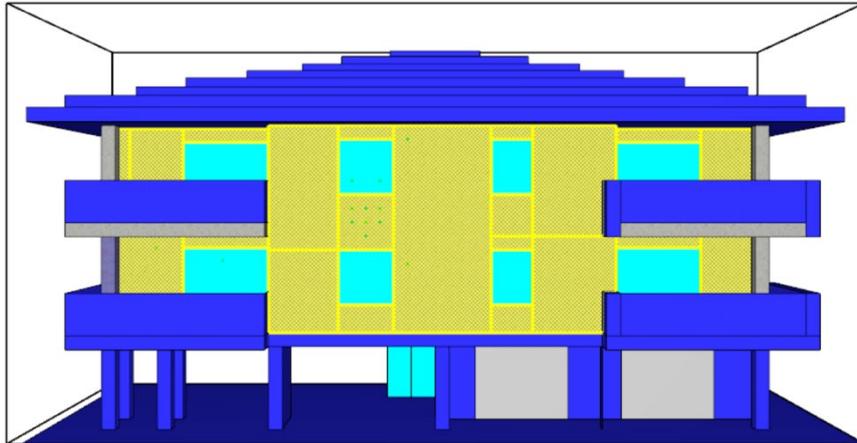


Figura 4.17 In colore giallo si evidenziano le tamponature alle quali sono state assegnate le stratigrafie dei vari scenari simulati

Per ognuno degli scenari descritti saranno valutati:

- Il comportamento delle superfici vetrate, avendo osservato nel presente capitolo che al collasso di queste si verifica il massimo scambio termico tra il calore sviluppato dal focolare e la facciata oggetto dell'indagine;
- La propagazione delle fiamme sulla facciata;
- La distribuzione della temperatura sulla stessa;
- Le temperature dei fumi caldi uscenti dal locale di innesco.

Capitolo 5

Risultati

Nel presente capitolo si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari descritti nei paragrafi precedenti. Tali risultati sono esposti mediante la funzione di visualizzazione dei risultati *Pyrosim Results*, strumento disponibile anche nel linguaggio FDS mediante la funzione *Smokeview*.

Lo strumento di visualizzazione dei risultati permette di visualizzare graficamente varie grandezze, come ad esempio l'andamento della temperatura dei prodotti gassosi della combustione, mediante l'inserimento nel modello di piani di visualizzazione della grandezza selezionata, chiamati *2D slices*. Inoltre, mediante vari file in formato “.csv”, generati durante il calcolo, è possibile elaborare i valori puntuali dei sensori inseriti nel modello.

Conformemente a quanto dichiarato al capitolo precedente per ogni Scenario sono valutati:

- la propagazione delle fiamme sulla facciata;
- il comportamento delle superfici vetrate;
- la distribuzione delle temperature sulla facciata;
- la distribuzione delle temperature dei fumi caldi uscenti dal locale di primo innesco.

La propagazione delle fiamme in facciata è esposta riportando la vista frontale della facciata dove viene sovrapposta la visualizzazione a vari istanti temporali dell'andamento della propagazione delle fiamme uscenti dal locale di primo innesco sulla stessa.

Il comportamento delle superfici vetrate è analizzato mediante l'inserimento di grafici riportanti la temperatura rilevata dal sensore inserito sulla faccia esposta ai fumi caldi della superficie vetrata stessa. Si identificano in figura 5.1 le superfici vetrate menzionate successivamente nei grafici:

- punto 1 figura 5.1: successivamente denominata finestra primo piano;
- punto 2 figura 5.1: successivamente denominata portafinestra primo piano;
- punto 3 figura 5.1: successivamente denominata finestra secondo piano.

Le vetrate citate sono state selezionate rispetto alle altre presenti nel modello in quanto esposte alle condizioni più gravose rispetto alla tipologia di incendio simulata.

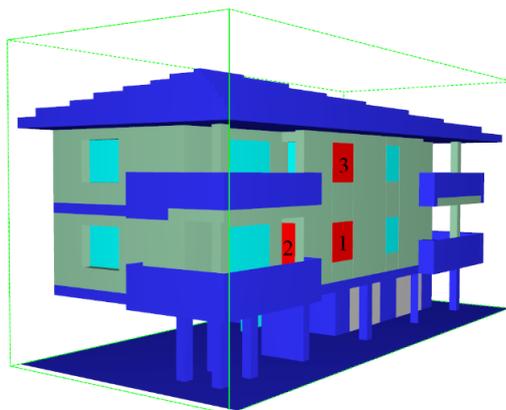


Figura 5.1 Identificazione delle superfici vetrate menzionate nell'esposizione dei risultati

La distribuzione delle temperature sulla facciata è riportata mediante una vista frontale dell'edificio sulla quale è inserito mediante la funzione *Wall Temperature* la temperatura raggiunta da ogni cella della mesh posta sulla faccia esterna della facciata a vari istanti temporali.

Infine, la distribuzione delle temperature dei fumi caldi uscenti dal locale di primo innesco ovvero dalla finestra del primo piano (punto 1 figura 5.1) è riportata mediante l'inserimento della funzione *2D slice* nel modello. Questa funzione permette di visualizzare mediante una distribuzione cromatica l'andamento delle temperature su un piano inserito nel modello. Si riporta la posizione del piano di sezione *2D slice* in figura 5.2.

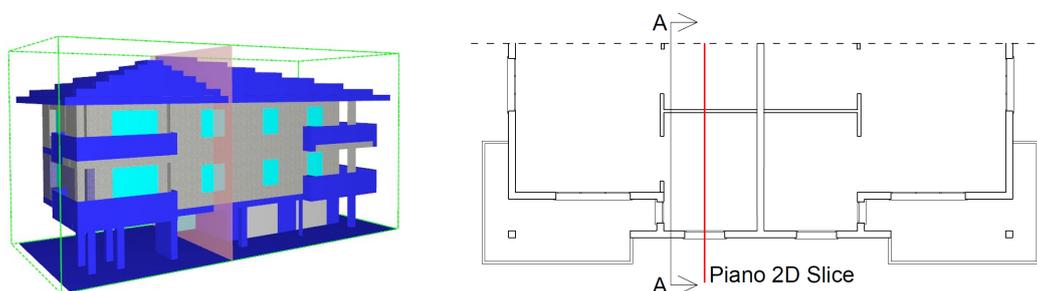


Figura 5.2 Piano di sezione, in rosso, visto sia in pianta che in tre dimensioni sul quale sono riportate le temperature dei fumi caldi uscenti dalla finestra del locale di primo innesco

Le immagini riportanti i risultati di temperatura sul piano *2D slice* hanno come punto di vista la sezione A-A rappresentata in figura 5.2.

5.1 Scenario 1: Struttura allo stato di progetto

Il primo scenario riportato in questo paragrafo, rappresentate la struttura senza interventi di risanamento energetico, è stato realizzato al fine di poter confrontare le differenze della prestazione di reazione al fuoco dell'edificio a seguito dell'installazione di isolanti in facciata.

L'edificio oggetto del caso studio è caratterizzato da una struttura a telaio portante con tamponature in mattoni forati dello spessore di 0,25 m. I laterizi hanno come classe di reazione al fuoco tipicamente un valore di Euroclasse A1 o A2: tali classi rendono il materiale classificabile come non combustibile. Al fine riprodurre tale comportamento nell'ambito della simulazione FDS, alla superficie delle tamponature non sono stati assegnati il valore di HRR e la temperatura di ignizione.

Preliminarmente all'analisi della propagazione esterna dell'incendio si ritiene di interesse riportare l'andamento dell'incendio simulato all'interno della struttura. Si riporta in figura 5.3, rappresentante la pianta del primo piano dell'edificio, la propagazione dei fumi prodotti dall'incendio, a vari istanti temporali, all'interno dell'appartamento dove avviene l'innesco.

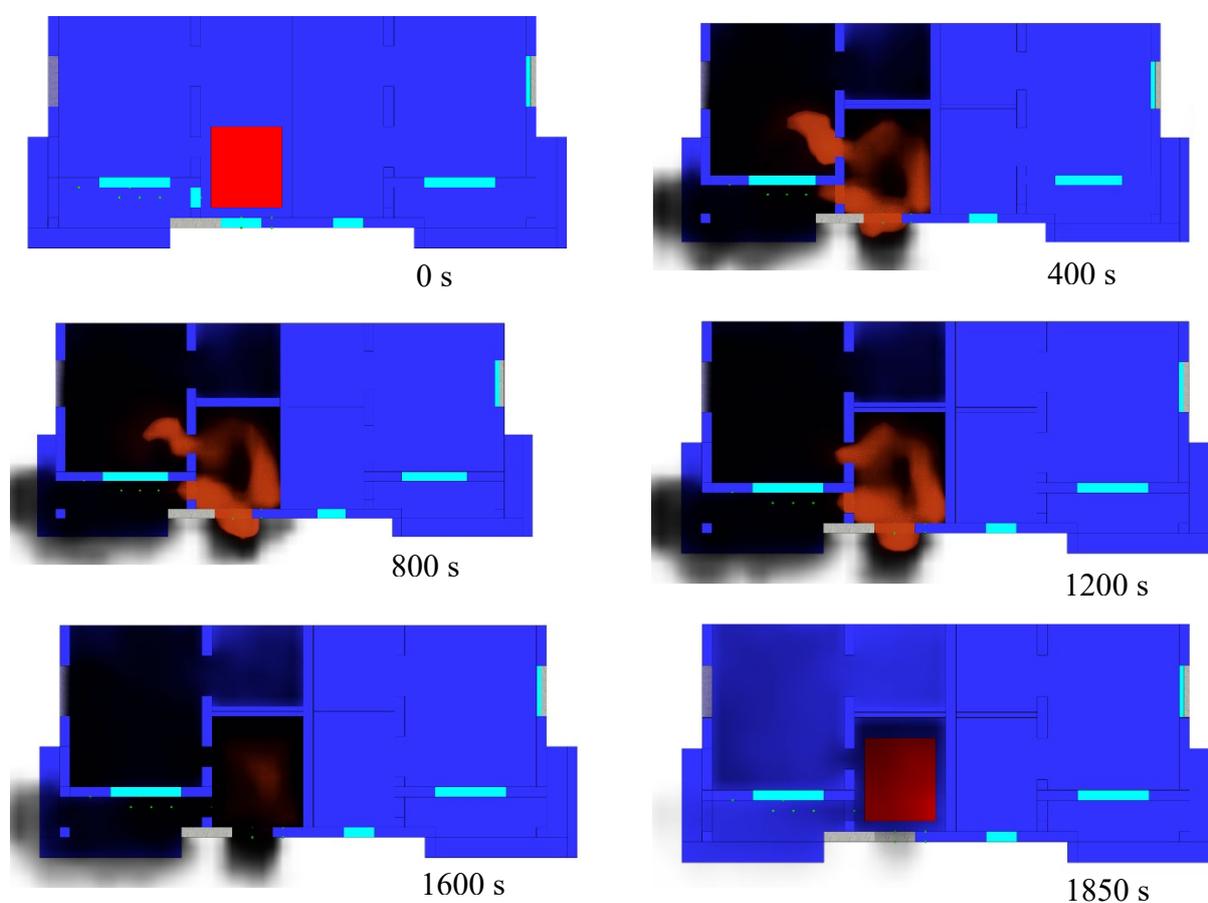
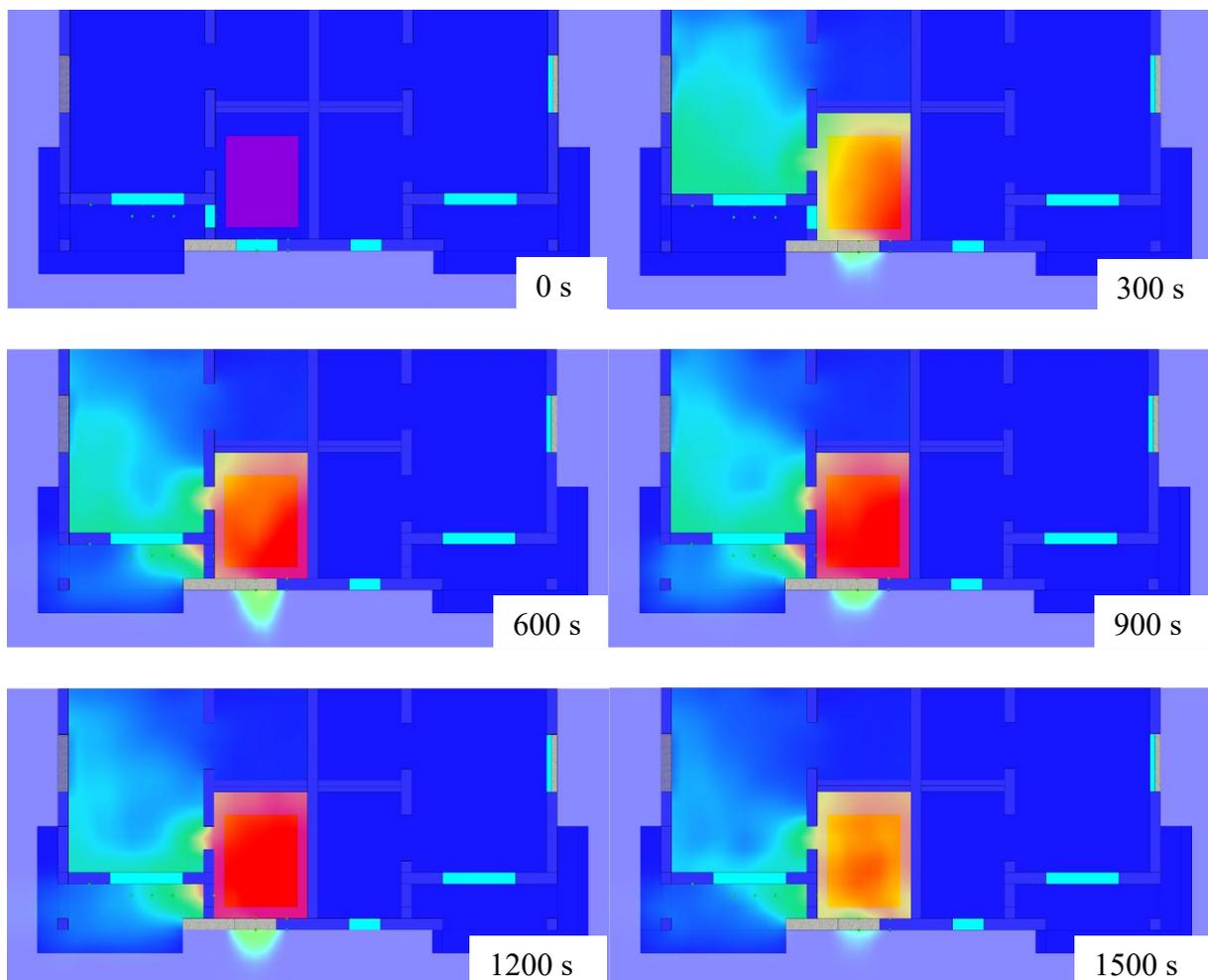


Figura 5.3 Propagazione dei fumi all'interno dell'edificio a vari istanti di tempo

La figura 5.3 mostra la propagazione dei fumi caldi all'interno dell'appartamento nel quale è inserito il locale di primo innesco. È possibile notare la propagazione delle fiamme fino alla zona soggiorno, l'innesco di altri materiali posti in altre stanze separate dal locale di primo innesco non è stato considerato ai fini delle simulazioni oggetto dell'elaborato. Si è ugualmente lasciata la possibilità di propagazione di parte dei prodotti della combustione interna all'edificio al fine di simulare uno scenario di incendio di cucina in un edificio ad uso civile, ovvero solitamente non compartimentato con particolari requisiti di resistenza al fuoco per le aperture di comunicazione tra i vani dell'appartamento.

In merito alla propagazione interna dell'incendio, si riportano inoltre le temperature dei fumi caldi rilevate all'altezza del soffitto dei locali in figura 5.4.



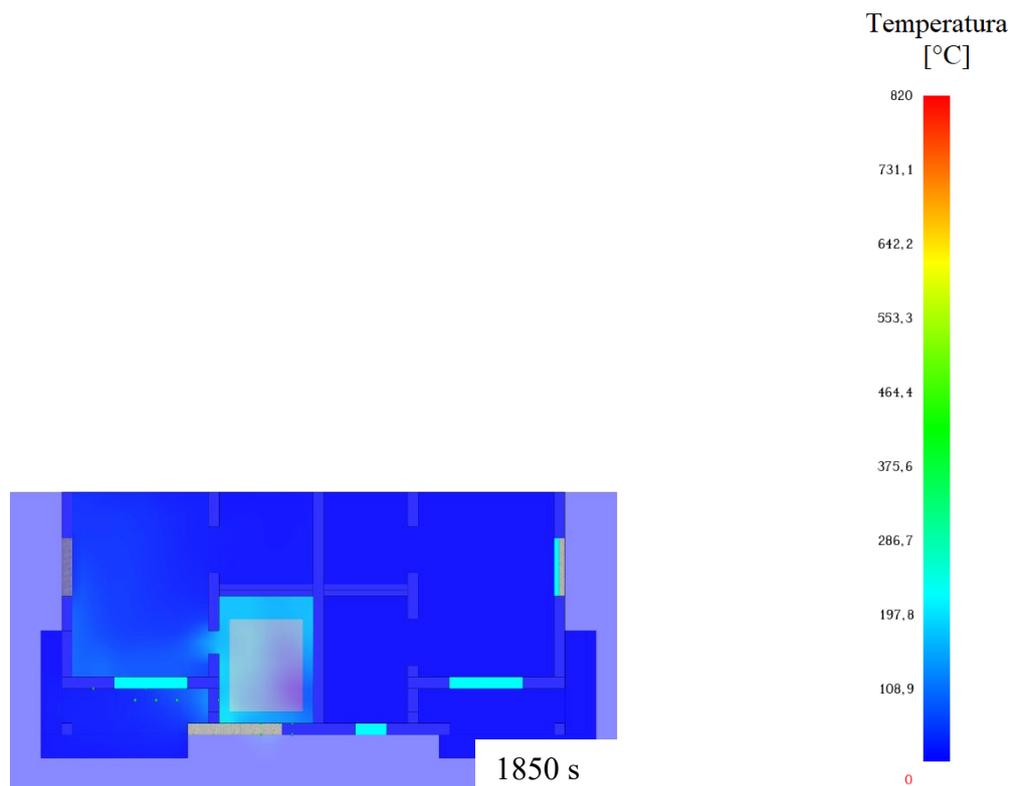


Figura 5.4 Distribuzione delle temperature al soffitto all'interno del primo piano dell'edificio

La distribuzione delle temperature riportata in figura 5.4 mostra il raggiungimento di una temperatura massima di 820°C al soffitto del locale di innesco e temperature dell'ordine di 350°C raggiunte nella stanza adiacente durante la fase stazionaria dell'incendio.

Inoltre, dalle immagini relative allo sviluppo dell'incendio all'interno dei locali si può verificare la presenza di alcune delle condizioni necessarie per il *flashover*, quali:

- la presenza di ventilazione: è possibile osservare la scomparsa delle superfici vetrate nel locale di primo innesco;
- una temperatura al soffitto maggiore o uguale a 600°C.

Infine, in entrambe le immagini (figura 5.3 e 5.4) è osservabile, dalle immagini al tempo 1850s, l'estinzione dell'incendio e il conseguente calo della temperatura all'interno della struttura conformemente a quanto implementato nella definizione della curva HRR.

Il primo risultato relativo alla propagazione in facciata dell'incendio che si riporta è la visualizzazione delle fiamme sviluppatesi dall'incendio in facciata a vari intervalli temporali, figura 5.5.

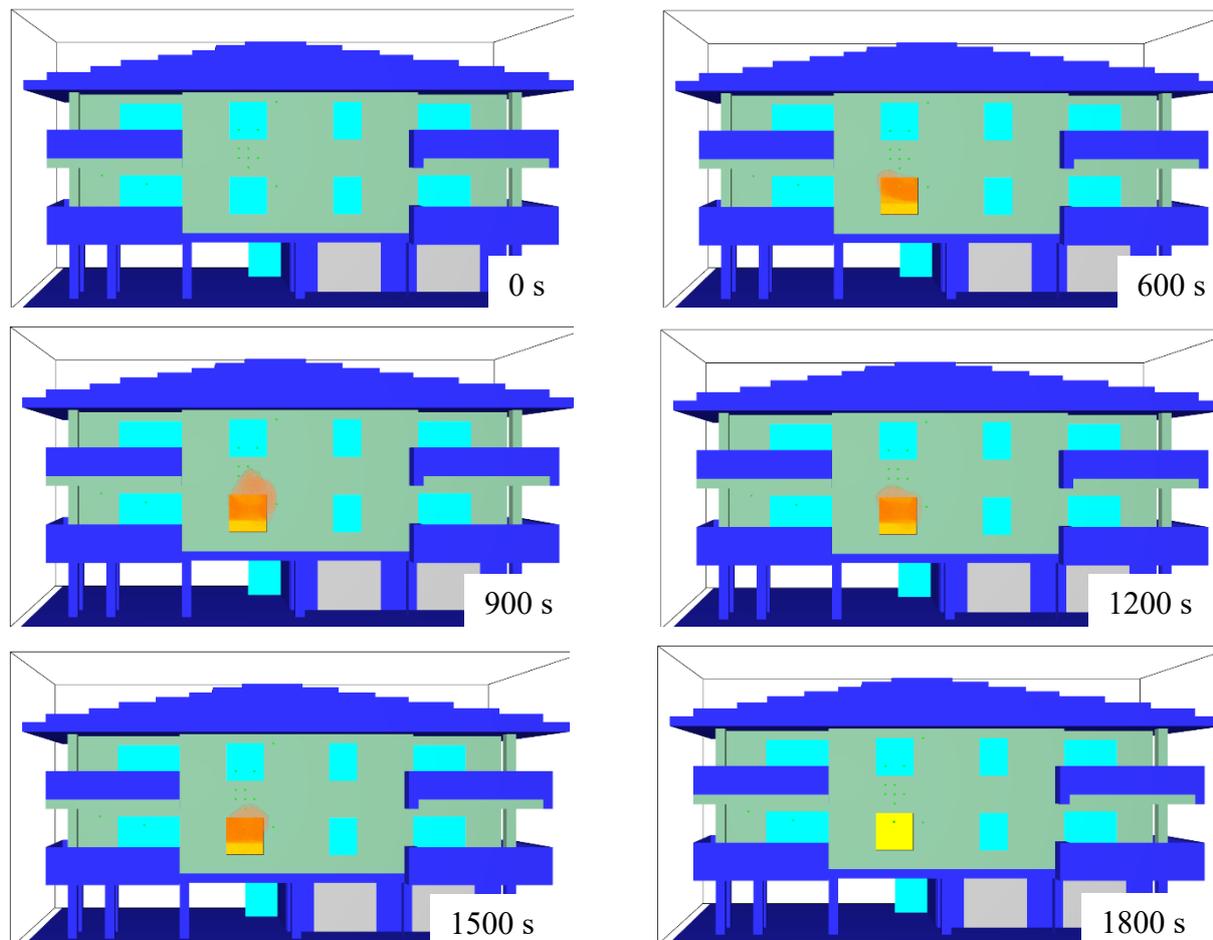


Figura 5.5 Scenario 1: Visualizzazione delle fiamme in facciata a vari istanti di tempo

L'andamento nel tempo della potenza termica rilasciata ha lo stesso andamento della curva HRR del focolare descritto al paragrafo precedente. Questo risultato conferma che l'incendio, non incontrando materiali combustibili sulla facciata, conserva la medesima evoluzione del focolare, quindi dell'unica fonte di combustibile disponibile.

Il collasso delle superfici vetrate del locale di primo innesco avviene prima del raggiungimento del *flashover*, in particolare la finestra collassa al tempo 274 s e la portafinestra al tempo 307 s, figura 5.6. La denominazione delle superfici utilizzata nel grafico si riferisce a quanto precedentemente definito in figura 5.1.

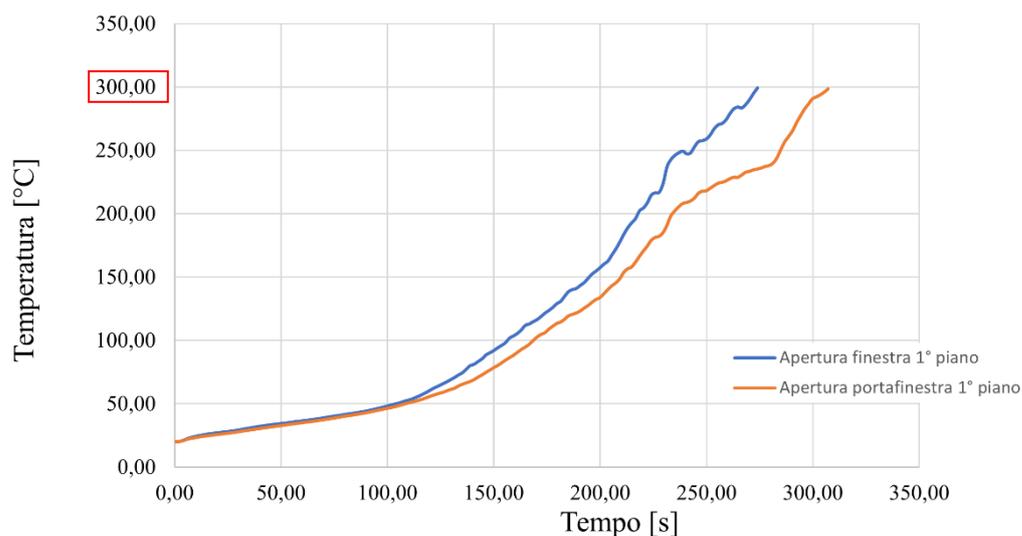
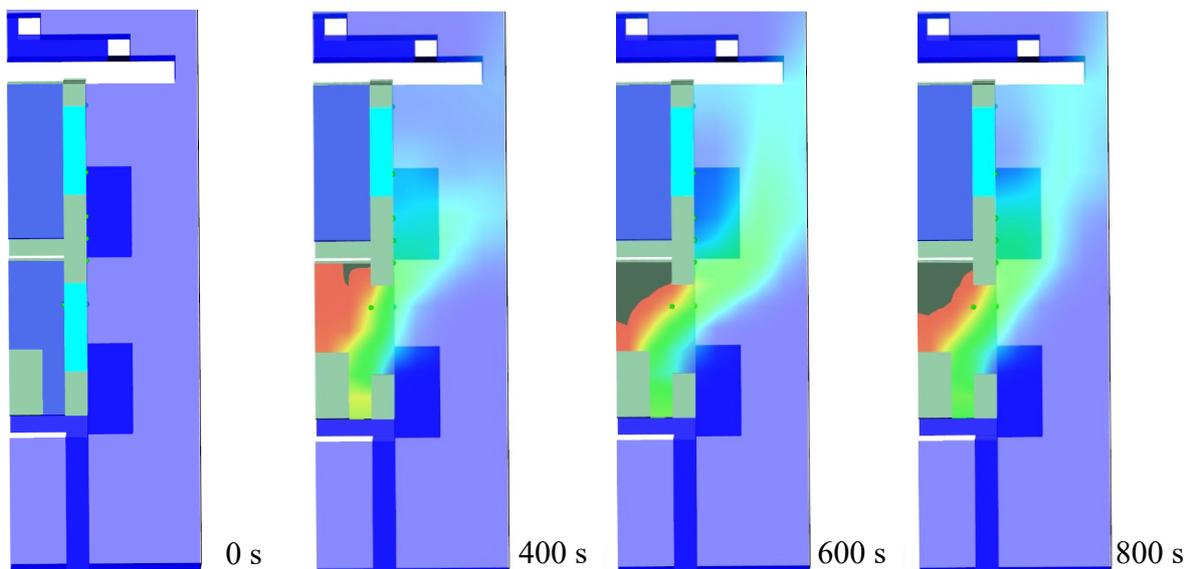


Figura 5.6 Grafico dell'andamento della temperatura sulle superfici vetrate del locale di primo innesco e del cambiamento di stato dei controlli logici ad esse associati

Si riporta in figura 5.7 l'andamento della temperatura dei fumi caldi in facciata a vari istanti temporali. La figura rappresenta la sezione dell'edificio; ottenuta come descritto in figura 5.2, in prossimità della finestra del locale di primo innesco, denominata finestra primo piano (figura 5.1)



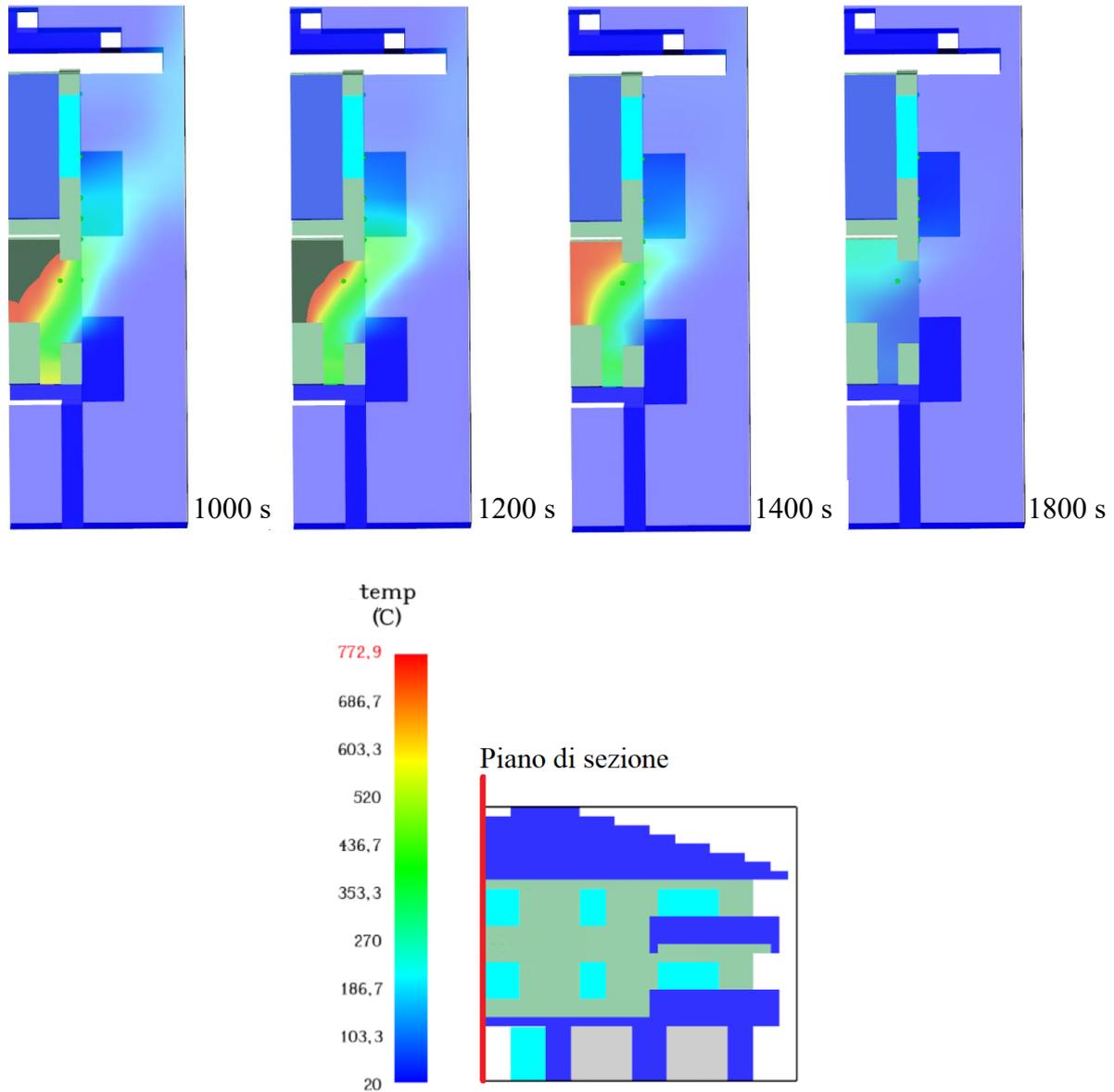
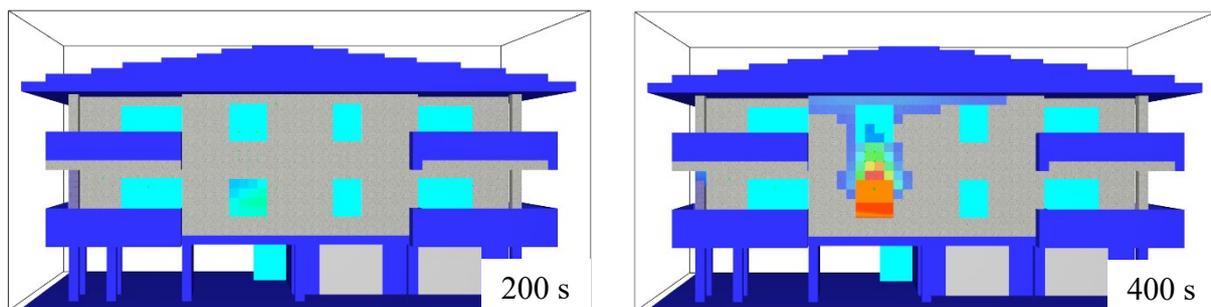


Figura 5.7 Scenario 1: sezione del modello con l'andamento della temperatura dei fumi caldi in facciata a vari istanti di tempo

Infine, si riporta in figura 5.8 l'andamento delle temperature della facciata, ottenuto mediante la funzione *Boudaries wall temperature* del software.



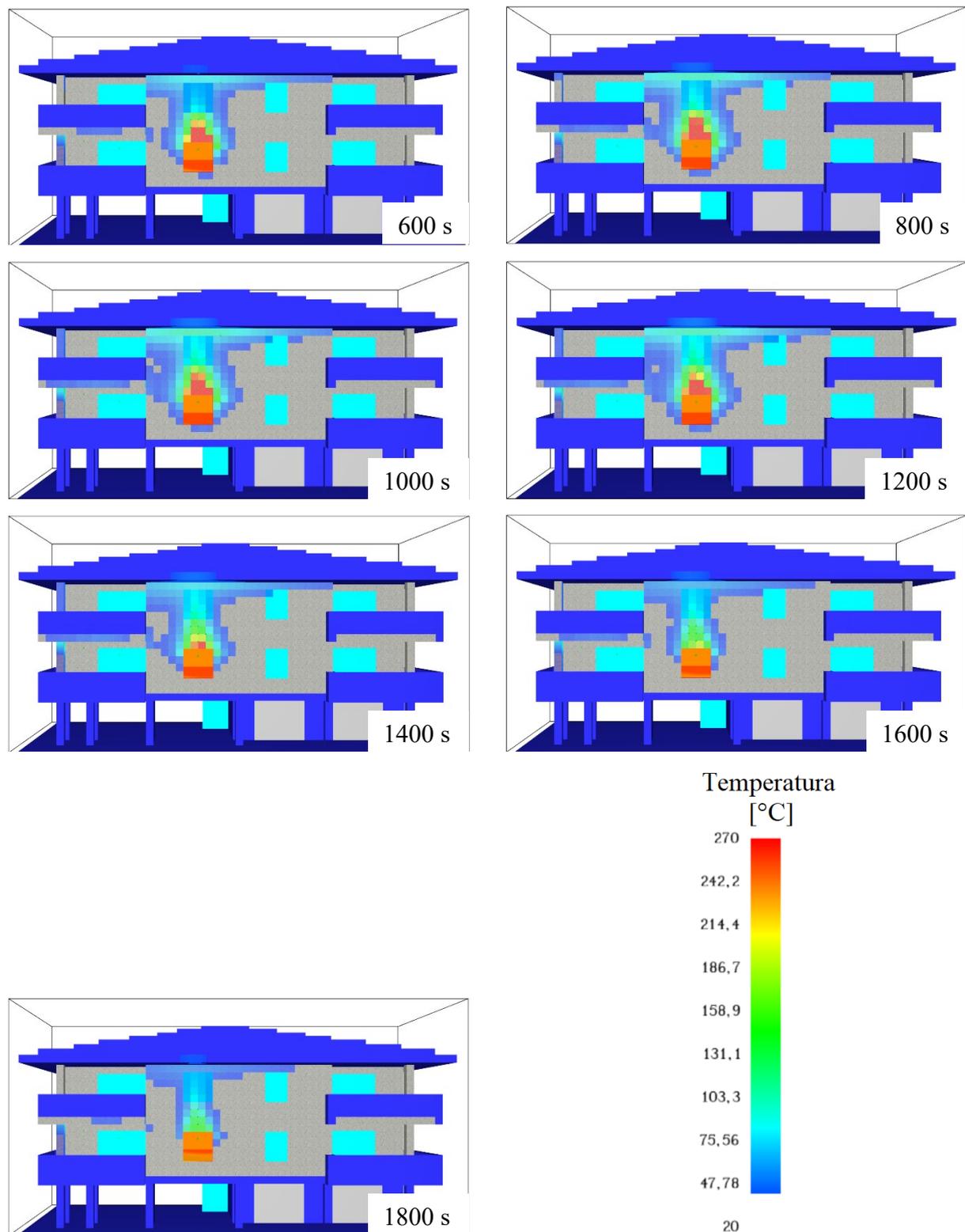


Figura 5.8 Scenario 1: andamento della temperatura superficiale della facciata a vari istanti di tempo

Nel caso in oggetto, non essendo presenti materiali combustibili in facciata, le temperature riportate sono temperature elevate che tuttavia, non venendo a contatto con materiale combustibile, non danno oggetto a propagazione dell'incendio. Pertanto, quanto riportato

nelle figure corrisponde esclusivamente alla superficie di contatto tra le fiamme prodotte dal focolare di incendio e la facciata.

In particolare, il sensore posto sulla finestra del secondo piano (figura 5.1) non ha rilevato temperature pari o superiori a 300°C. Il vetro non raggiunge la sua massima temperatura di servizio, mantenendo la sua integrità non permette ai fumi caldi di propagarsi all'interno del secondo piano dell'edificio.

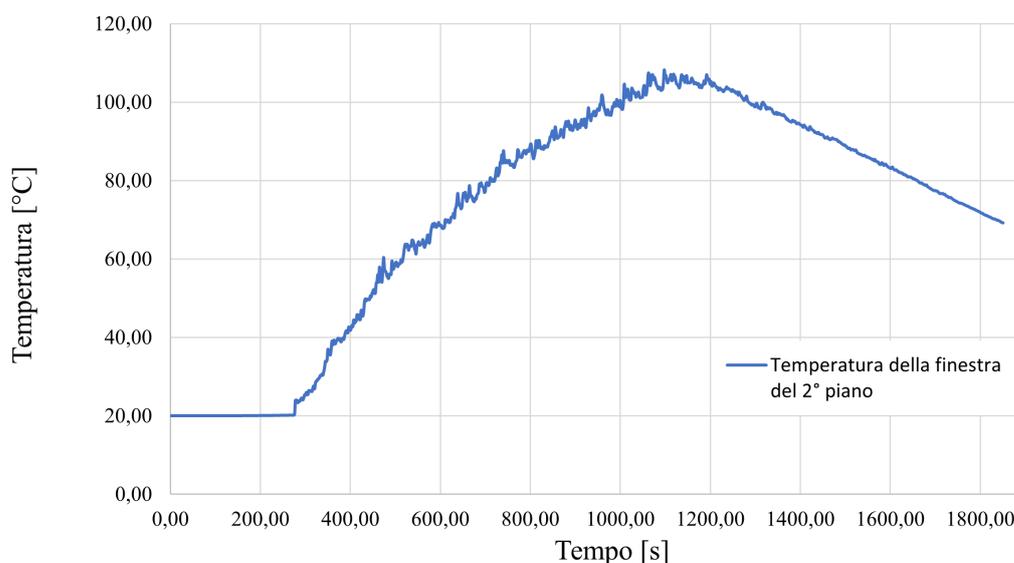


Figura 5.9 Temperatura della superficie vetrata della finestra al 2° piano dell'edificio

5.2 Scenario 2: isolamento in poliuretano espanso (PUR)

Si riportano nel presente paragrafo i risultati ottenuti dallo Scenario 2, il quale prevede, come precedentemente descritto, l'installazione in facciata di materiale isolante in poliuretano espanso di spessore 0,145 m.

Il materiale isolante oggetto della simulazione ha tipicamente Euroclasse di reazione al fuoco E o D in alcuni casi: al fine di implementare questo comportamento sono stati inseriti i dati caratteristici del comportamento al fuoco inseriti nell'analisi FDS, quali:

- Temperatura di ignizione: 280°C
- Potenza termica rilasciata per unità di area HRRPUA: 71 kW/m²

Si riporta nell'immagine sottostante, figura 5.10, lo sviluppo delle fiamme in facciata in vari istanti di tempo.

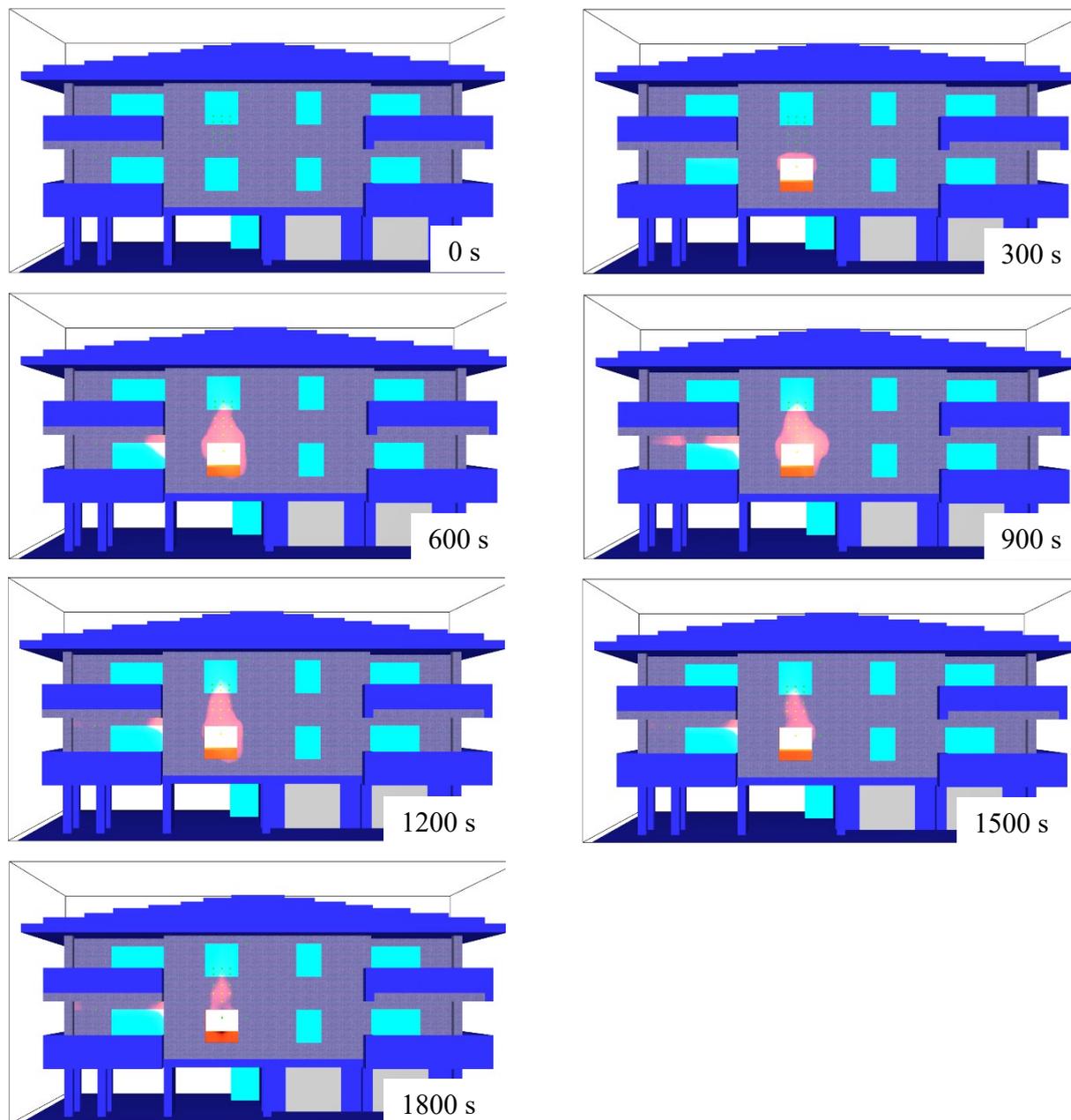


Figura 5.10 Scenario 2: Visualizzazione delle fiamme in facciata a vari istanti di tempo

Dall'immagine è possibile notare che le fiamme, propagatesi in facciata, hanno un maggiore sviluppo in altezza rispetto al caso privo di materiale isolante riportato allo Scenario 1. Questo conferma la partecipazione del materiale isolante alla propagazione in facciata dell'incendio. Al fine di visualizzare quanto detto si riporta in figura 5.11 il confronto tra i due Scenari all'istante 900 s, quindi durante la fase stazionaria dell'incendio.

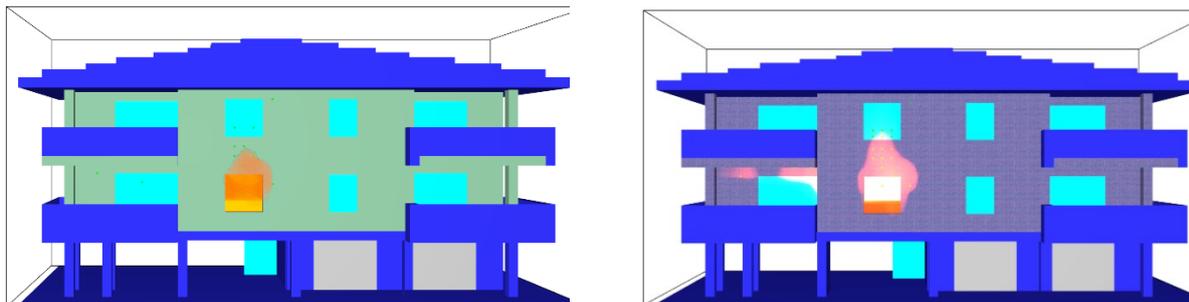


Figura 5.11 Confronto della propagazione delle fiamme in facciata tra Scenario 1 (a sinistra) e Scenario 2 (a destra) al tempo $t: 900s$

L'andamento della temperatura delle superfici vetrate è riportato in figura 5.12, la posizione delle superfici menzionate nel grafico si riferisce alla nomenclatura di figura 5.1.

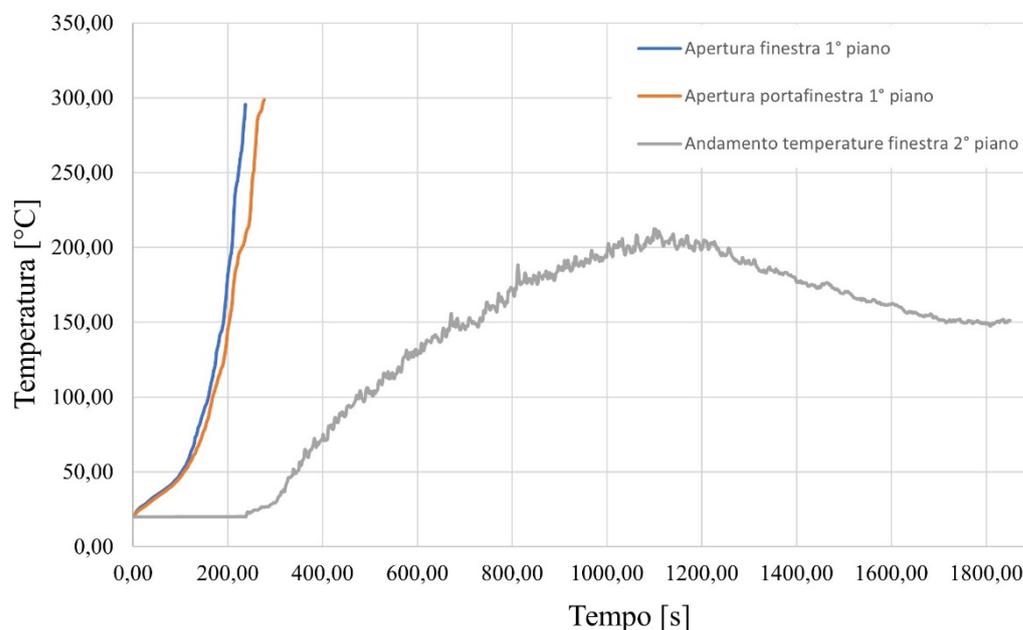


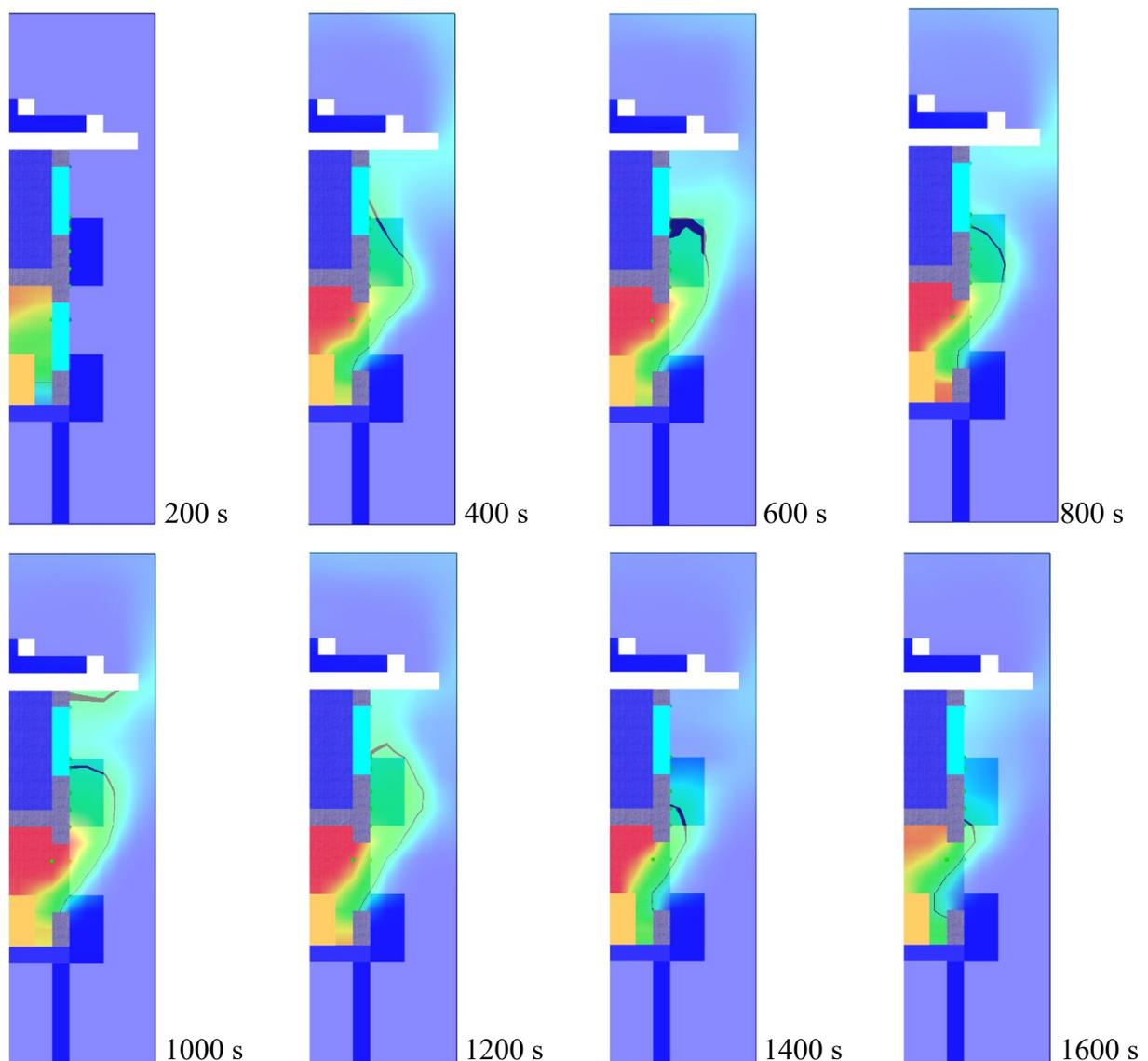
Figura 5.12 Scenario 2: andamento delle temperature sulle superfici vetrate

Il grafico di figura 5.7 mostra l'andamento delle temperature rilevate dai sensori posti sulle superfici vetrate del locale di primo innesco e della finestra posta sulla facciata del secondo piano.

Le finestre del locale di primo innesco, come nello scenario precedente, raggiungono la temperatura massima di servizio, con conseguente collasso. A seguito della scomparsa delle superfici vetrate del primo piano, si visualizza l'incremento della temperatura rilevata dal sensore della finestra del secondo piano: quest'ultima non raggiunge la temperatura di

collasso, impedendo la propagazione dei fumi caldi all'interno del compartimento e la possibile propagazione dell'incendio all'interno del secondo piano dell'edificio.

Si riporta in figura 5.13 la sezione dell'edificio, ottenuta come descritto in figura 5.2, riportante l'andamento delle temperature dei fumi in facciata. In figura, in colore nero, è raffigurata la propagazione dei fumi a una temperatura pari alla temperatura di ignizione del poliuretano al fine di visualizzare la possibilità di innesco del materiale isolante seppure protetto dallo strato di intonaco superficiale.



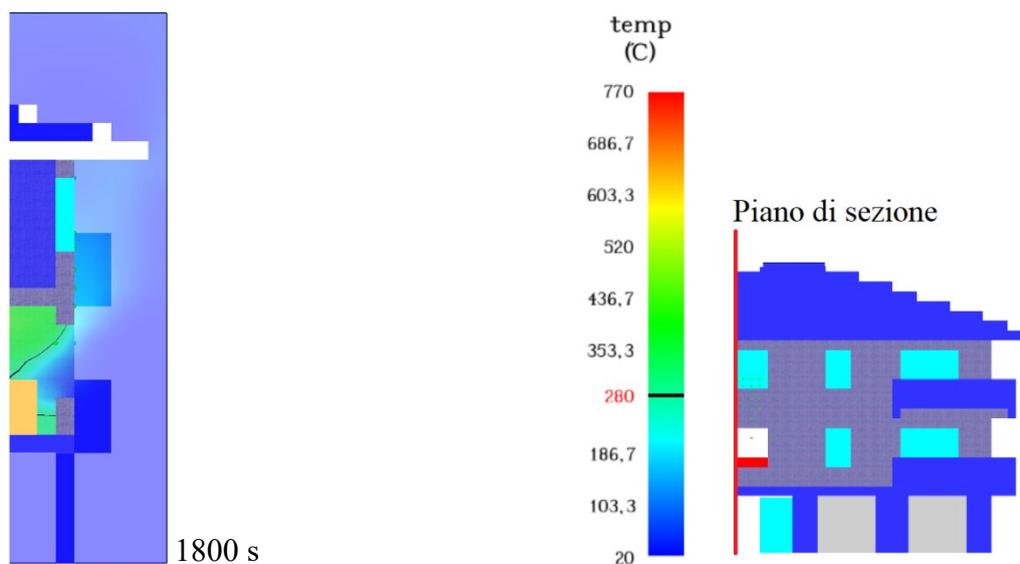
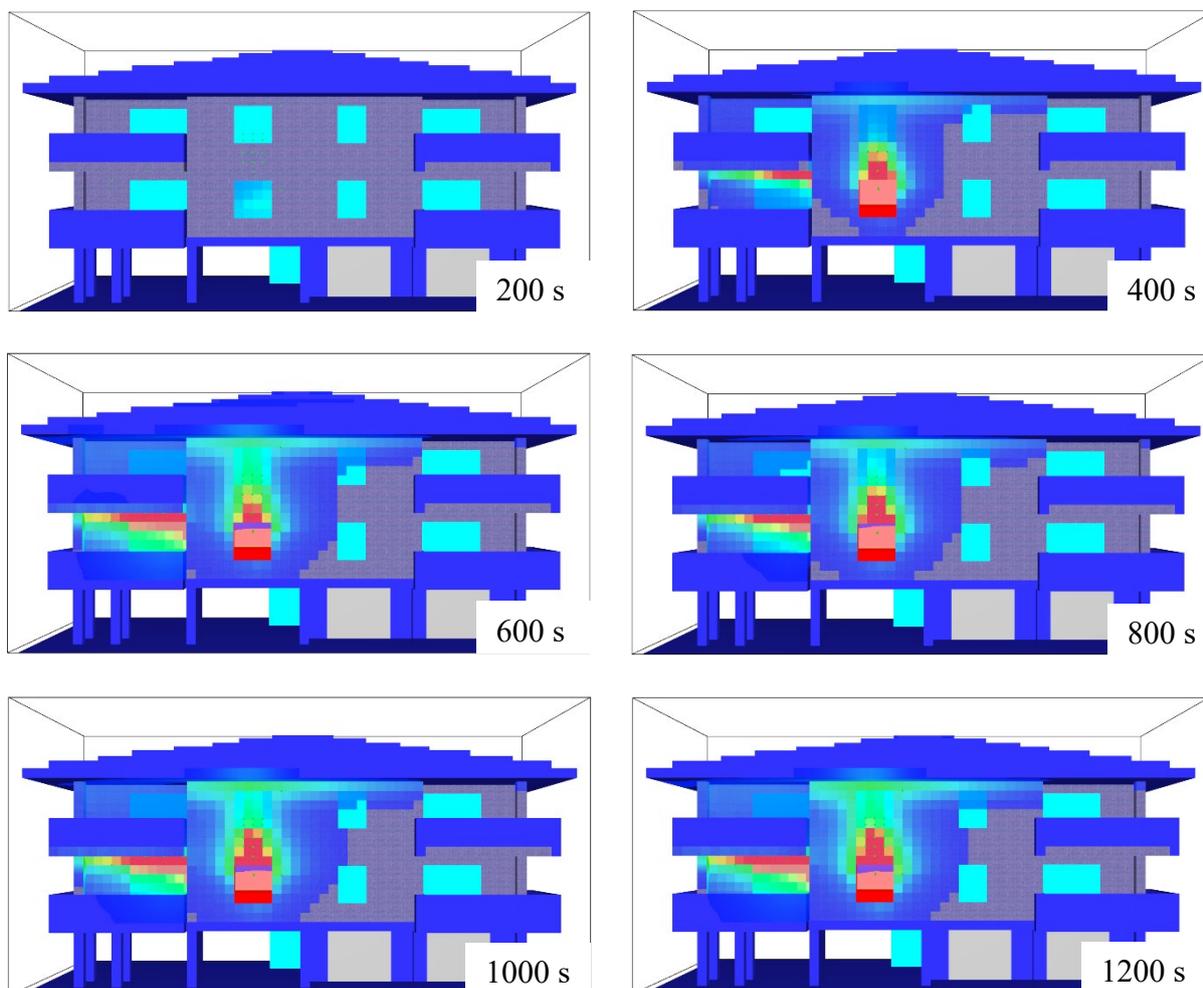


Figura 5.13 Scenario 2: sezione del modello con l'andamento della temperatura dei fumi caldi in facciata

Si riporta in figura 5.14 la distribuzione delle temperature sulla facciata posti in facciata.



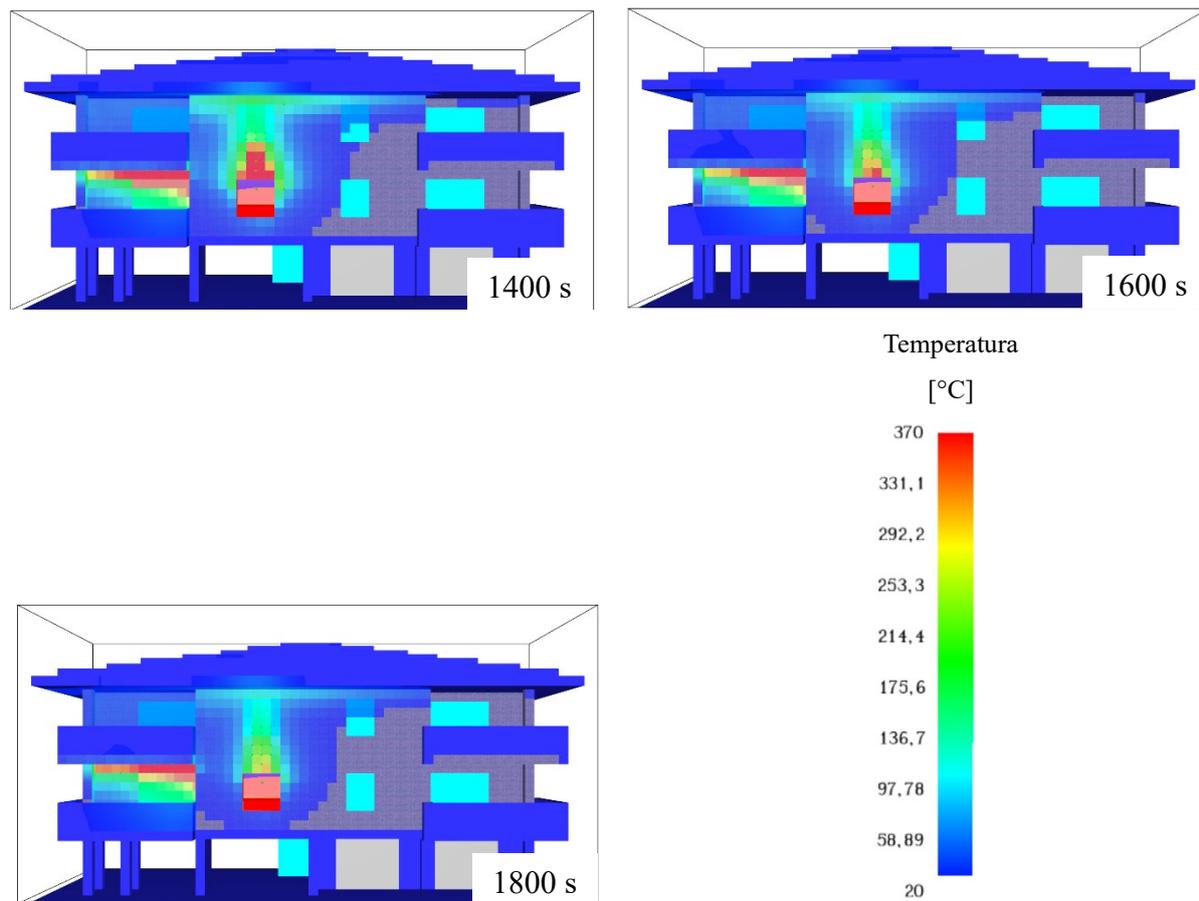
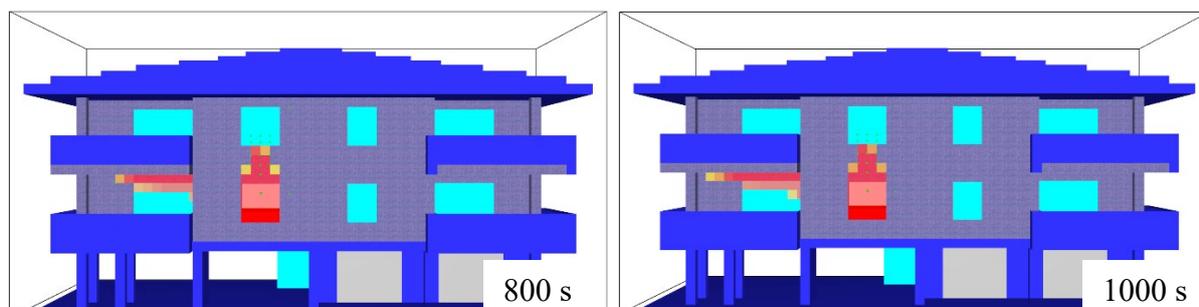


Figura 5.14 Scenario 2: andamento della temperatura superficiale della facciata a vari istanti di tempo

La figura precedente, figura 5.14, riportante la distribuzione delle temperature sulla facciata permette di identificare l'area della facciata soggetta a scambio termico con i fumi caldi che lambiscono la stessa. Al fine di visualizzare con maggiore precisione la porzione di materiale isolante che raggiunge o supera la temperatura di accensione del materiale, 280°C , si riporta, in figura 5.15, la medesima distribuzione delle temperature in facciata riportata nella figura precedente, filtrata per le sole temperature maggiori o uguali a 280°C .



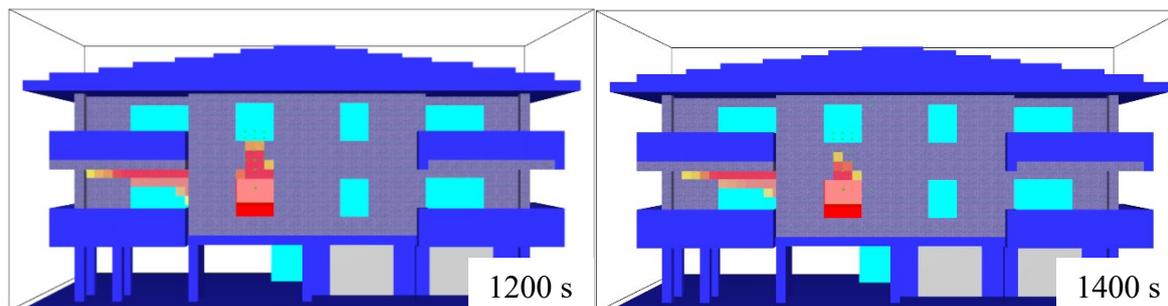


Figura 5.15 Scenario 2: andamento della temperatura superficiale della facciata filtrata per le temperature maggiori o uguali alla temperatura di accensione del materiale isolante a vari istanti di tempo

La propagazione dell'incendio avviene nell'area sovrastante alla finestra, ovvero l'area maggiormente esposta alla fuoriuscita dei fumi caldi dalla finestra stessa. Un ulteriore punto di interesse è l'area del balcone, interessata dalla fuoriuscita dei fumi caldi dalla porta finestra. Il balcone, grazie al suo sviluppo orizzontale, risulta essere assimilabile ad una fascia di separazione: trattiene i fumi caldi e ne limita la propagazione al piano superiore non essendo il parapetto soggetto all'applicazione di materiale isolante.

L'area di materiale soggetto a combustione, stimata dalla distribuzione riportata in figura 5.15, risulta essere pari a circa 2 m^2 se si considera la sola facciata verticale sovrastante alla finestra del locale di primo innesco e pari a circa 5 m^2 considerando anche la propagazione dei fumi caldi nel balcone posto sulla facciata.

La temperatura di ignizione del poliuretano, come esposto nel capitolo precedente, è stata assunta pari a 280°C . Occorre inoltre considerare che il materiale isolante, se esposto a una temperatura di 200°C , subisce una forte degradazione delle sue proprietà meccaniche e di isolamento (Quagliano Amado, 2019). L'ultimo dato che si riporta in merito allo Scenario 2 è la temperatura di facciata, filtrata per valori superiori alla temperatura di degradazione del materiale, al fine di mettere in evidenza l'area che in caso di incendio risulterebbe interessata dal danneggiamento, figura 5.16. Questa si stima avere una superficie totale di circa 8 m^2 .

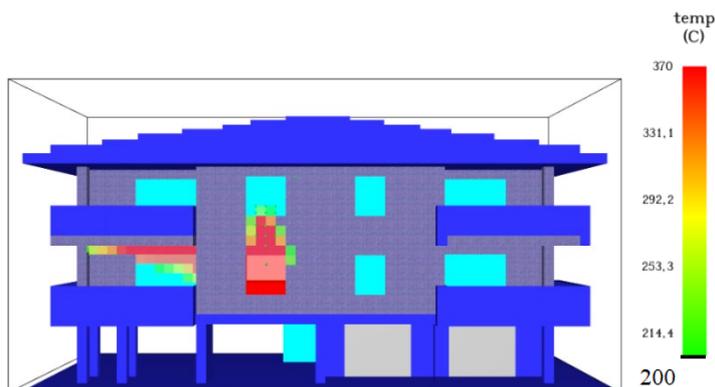


Figura 5.16 Scenario 2: estensione del materiale soggetto a degradazione termica

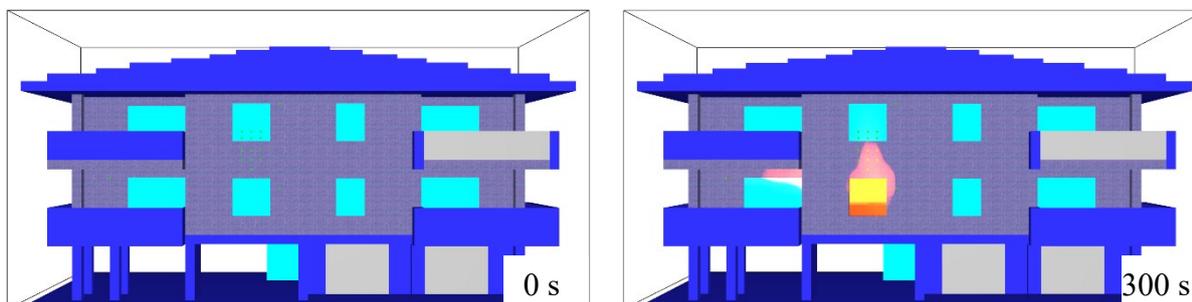
5.3 Scenario 3: isolante in polistirene espanso sinterizzato (EPS)

Si riportano nel presente paragrafo i risultati ottenuti dallo Scenario 3 che prevede, come precedentemente descritto, l'installazione in facciata di materiale isolante in polistirene espanso sinterizzato di spessore 0,145 m.

Il materiale isolante oggetto della simulazione ha tipicamente Euroclasse di reazione al fuoco E. Al fine di implementare questo comportamento sono stati inseriti i dati caratteristici del comportamento al fuoco inseriti nell'analisi FDS, quali:

- Temperatura di ignizione: 360°C
- Potenza termica rilasciata per unità di area HRRPUA: 154 kW/m²

Come per gli scenari precedenti, si riporta nell'immagine sottostante, figura 5.17, lo sviluppo delle fiamme in facciata a vari istanti di tempo.



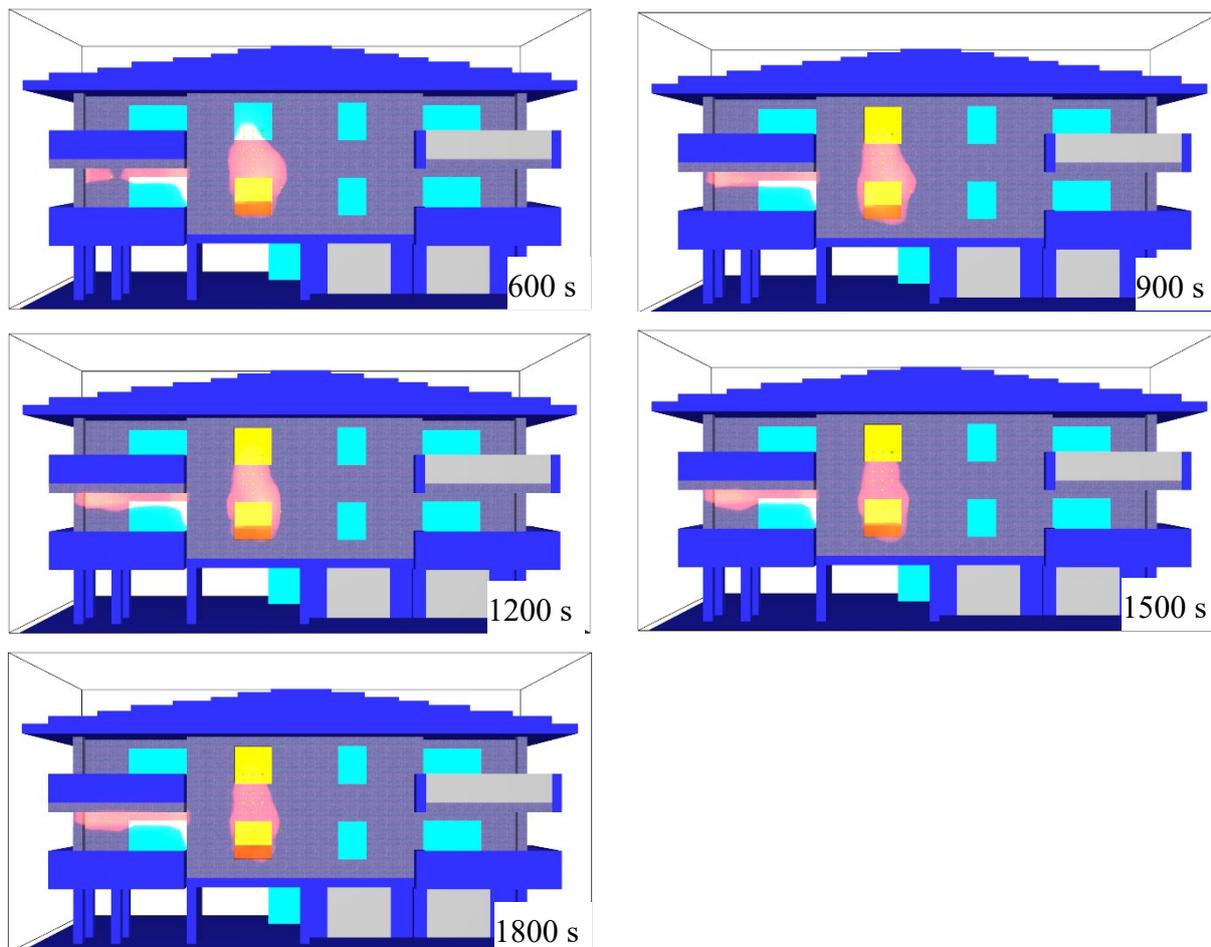


Figura 5.17 Scenario 3: Visualizzazione delle fiamme in facciata a vari istanti di tempo

Lo sviluppo delle fiamme in facciata e nella zona balcone di questo scenario è maggiore rispetto al caso dello Scenario 1, privo di materiali isolanti in facciata. Risulta inoltre essere di maggiore entità anche rispetto allo Scenario 2, questo comportamento è dovuto al valore di HRR dell'EPS maggiore rispetto a quello del PUR. Si riporta in figura 5.18 il confronto di distribuzione delle fiamme tra Scenario 2 e Scenario 3 all'istante 900 s.

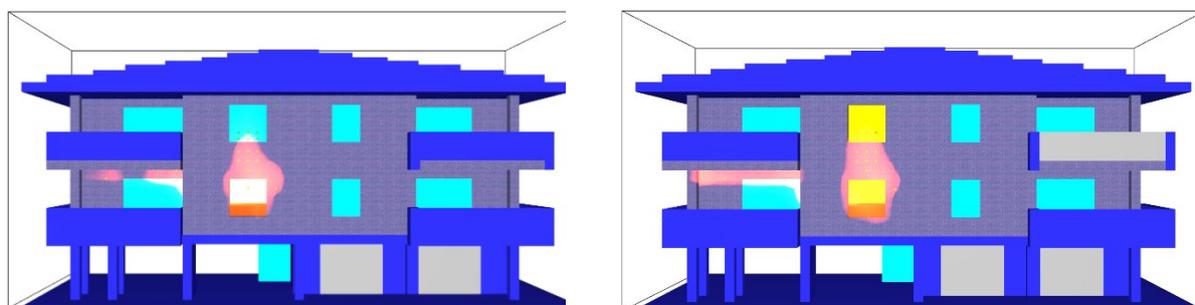


Figura 5.18 Confronto della propagazione delle fiamme in facciata tra Scenario 2 (a sinistra) e Scenario 3 (a destra) al tempo $t: 900s$

Oltre alla maggiore larghezza dello sviluppo delle fiamme sia nella zona soprastante alla finestra del primo piano sia nella zona balcone ottenuta nello scenario 3, è possibile notare il collasso della superficie vetrata posta al secondo piano dell'edificio. Si riportano in figura 5.19 le temperature raggiunte nel tempo dalle superfici vetrate. Analogamente agli scenari precedenti si verifica il collasso delle superfici vetrate del locale di primo innesco, permettendo alle fiamme e ai fumi caldi sviluppati dal focolare di raggiungere il materiale posto in facciata.

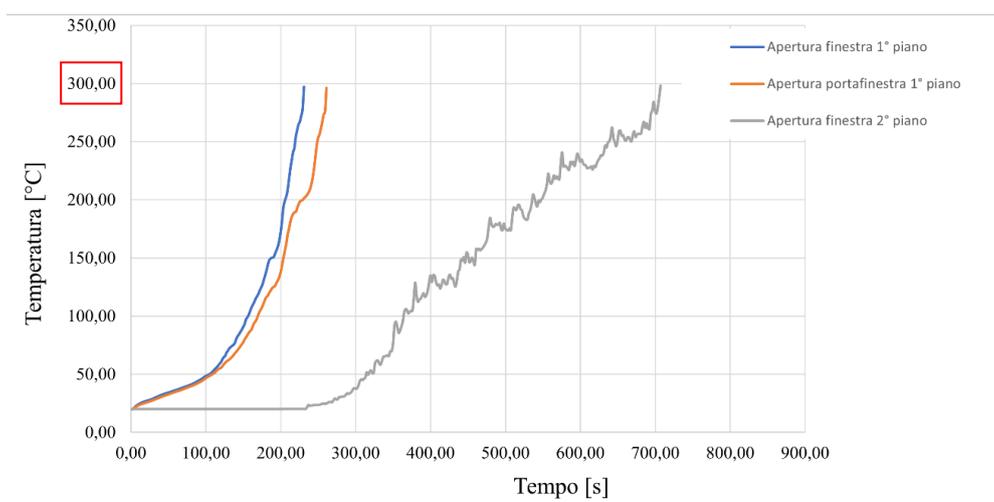


Figura 5.19 Scenario 3: andamento delle temperature sulle superfici vetrate

Il collasso della superficie vetrata della finestra posta al secondo piano dell'edificio comporta l'entrata dei fumi nel locale posto al piano superiore, ovvero la propagazione dell'incendio a un altro compartimento, figura 5.20. In particolare, in collasso di tale superficie avviene in un tempo di circa 710 s, tempo inferiore al tempo medio di arrivo sul posto a livello nazionale del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco che è pari a circa 1080 secondi.

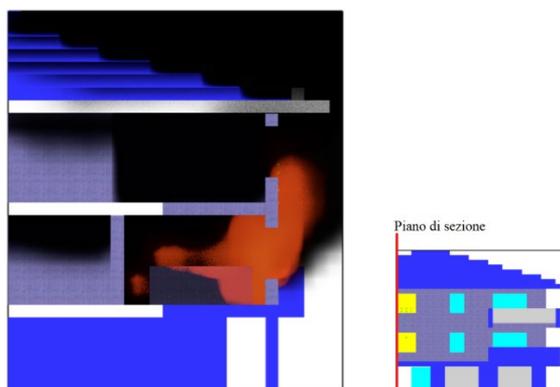
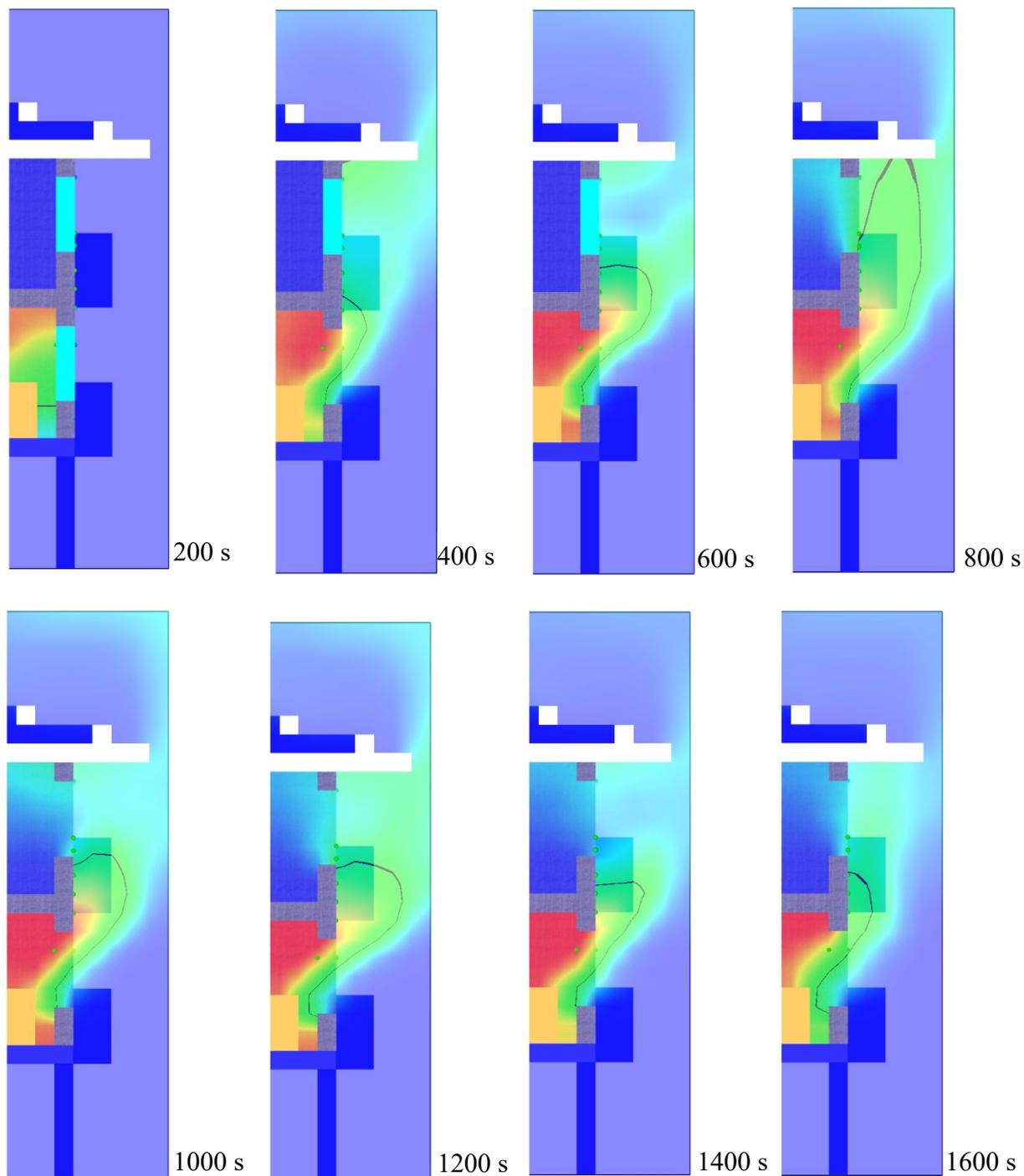


Figura 5.20 Scenario 3: sezione dell'edificio con visualizzazione della propagazione dei fumi caldi al secondo piano dell'edificio

In figura 5.14 si riporta la sezione dell'edificio, effettuata come dichiarato in figura 5.2, dove si riporta l'andamento della temperatura dei gas emessi a vari istanti di tempo.



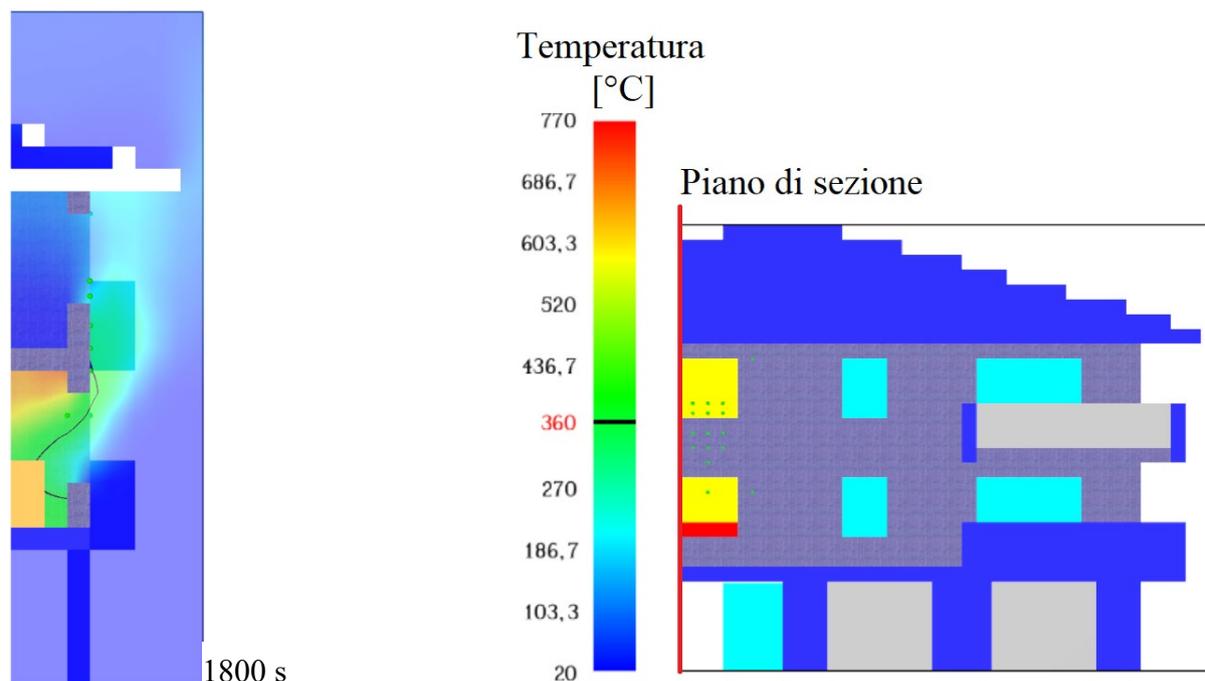
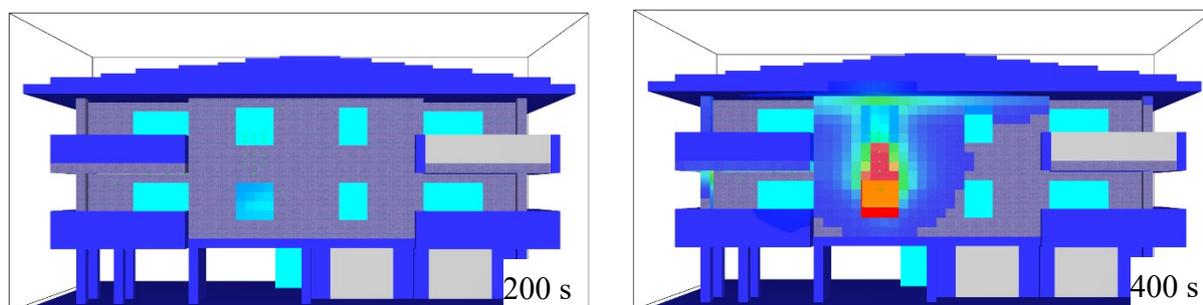


Figura 5.21 Scenario 3: sezione del modello con l'andamento della temperatura dei fumi caldi in facciata

In figura, in colore nero, è raffigurata la propagazione dei fumi a una temperatura pari alla temperatura di ignizione del polistirene al fine di visualizzare la possibilità di innesco del materiale isolante seppure protetto dallo strato di intonaco superficiale. Inoltre, si riscontra l'entrata di fumi a temperatura di circa 250°C nel locale sovrastante al locale di primo innesco.

La figura 5.22 riporta infine, come per gli scenari precedenti, l'andamento delle temperature del materiale in facciata. La seconda legenda presente in figura è stata riportata filtrando le sole temperature uguali o maggiori alla temperatura di ignizione del materiale.



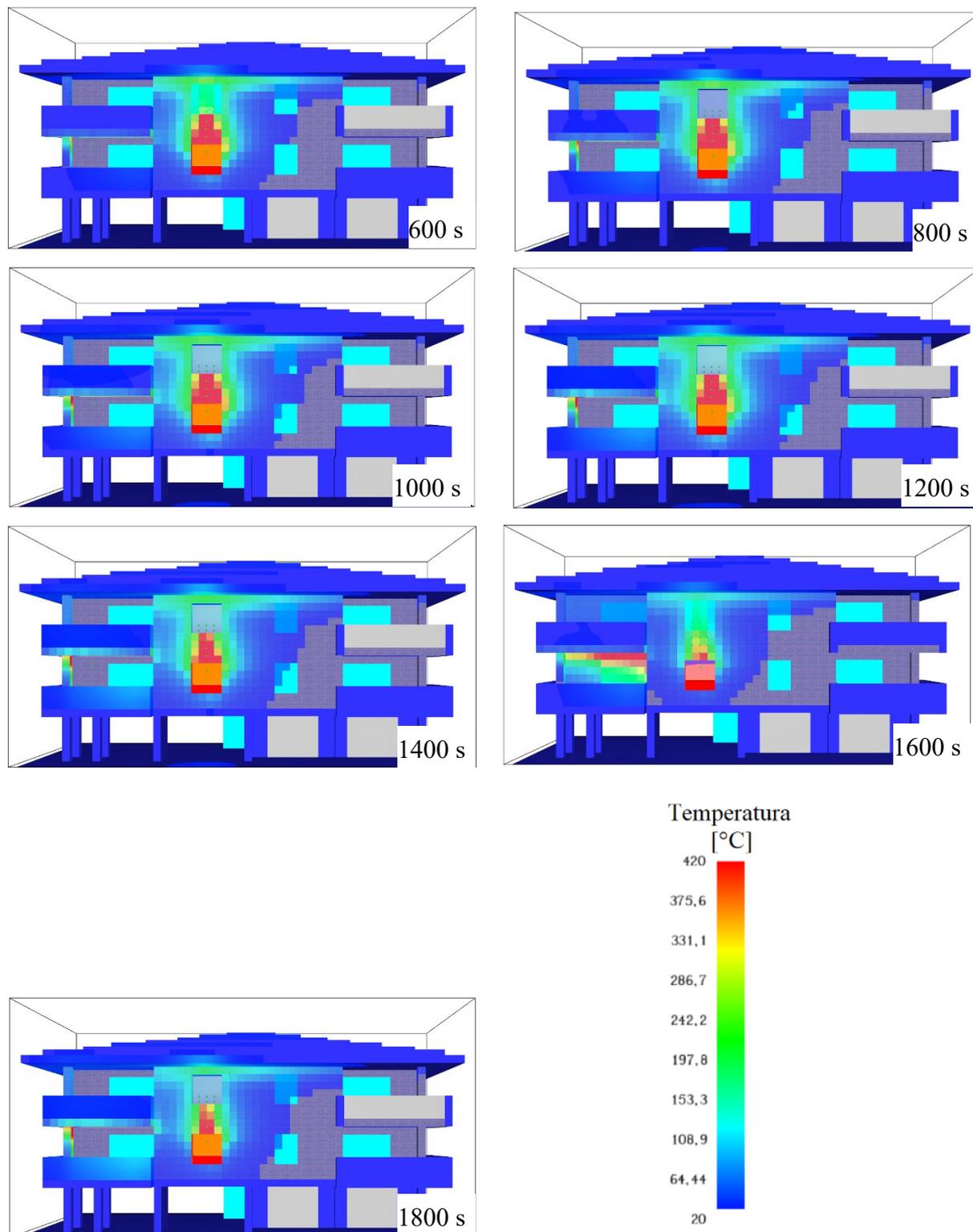


Figura 5.22 Scenario 3: andamento della temperatura superficiale della facciata a vari istanti di tempo

Dalla figura 5.22 si denota un aumento delle temperature massime raggiunte in facciata rispetto agli Scenari precedenti.

L'area soggetta a aumento della temperatura delle facciata nello Scenario 3 è di estensione confrontabile con quella ottenuta nello Scenario 2 (figura 5.23). La differenza sostanziale tra i due scenari è il valore delle temperature raggiunte in facciata, infatti, si ottengono nello Scenario 3 delle temperature più elevate rispetto allo Scenario 2: ciò trova motivazione dal valore di HRR per unità di area, maggiore per il materiale oggetto della simulazione.

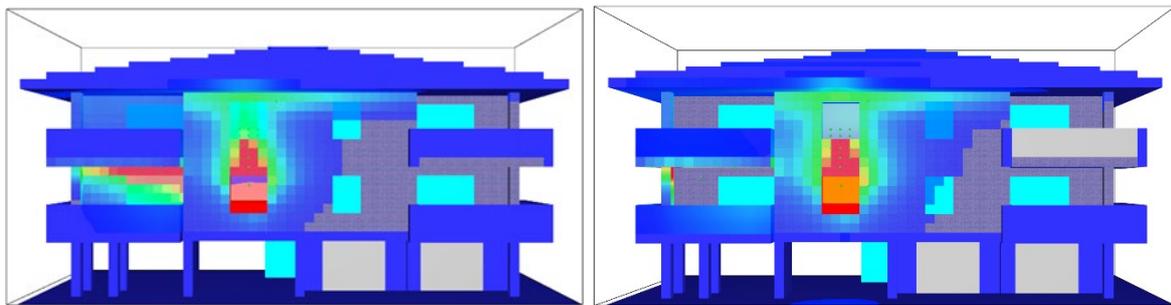


Figura 5.23 Distribuzione delle temperature al tempo t : 1200 s nello Scenario 2 (a sinistra) e nello Scenario 3 (a destra)

Al fine di rendere più immediata la visualizzazione delle aree la cui temperatura raggiunge o supera la temperatura di accensione del materiale, si riporta in figura 5.24 la distribuzione delle temperature filtrata per i soli valori maggiori o uguali a 360°C , temperatura di accensione dell'EPS.

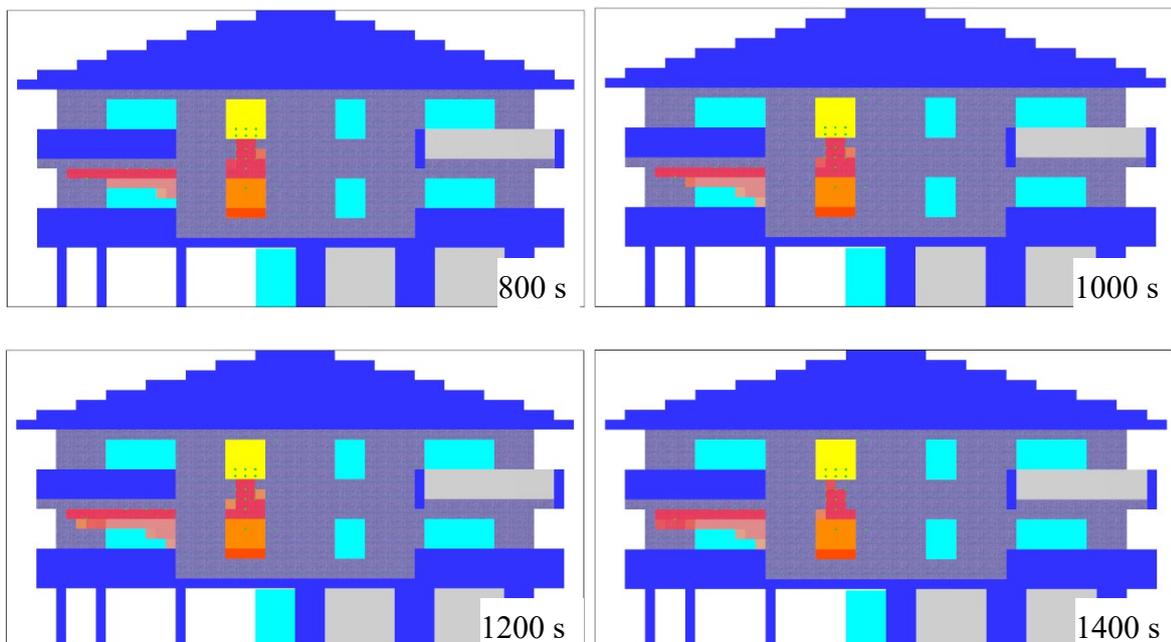


Figura 5.24 Scenario 3: andamento della temperatura superficiale della facciata filtrata per le temperature maggiori o uguali alla temperatura di accensione del materiale isolante a vari istanti di tempo

La propagazione dell'incendio avviene nella zona superiore della finestra del locale di primo innesco fino al raggiungimento del secondo piano dell'edificio, analogamente ai risultati ottenuti nello Scenario 2. Coerentemente con il secondo scenario, l'area coperta del balcone è assimilabile a una fascia di separazione: contiene i fumi caldi fuoriusciti dalla portafinestra e ne limita la propagazione.

L'area stimata di materiale isolante soggetto a combustione è di circa $2,5 \text{ m}^2$ se si considera la sola facciata verticale sovrastante la finestra del primo piano e di circa $6,0 \text{ m}^2$ considerando anche l'area di facciata appartenente al balcone.

La temperatura di ignizione del polistirene, come esposto nel capitolo precedente, è stata assunta pari a 360°C . Si ha inoltre che il materiale isolante, se esposto a una temperatura di 160°C subisce una forte degradazione delle sue proprietà sia meccaniche che di isolamento (Gonzalez-Aguilar, 2022). L'ultimo dato che si riporta dello Scenario 3 è la temperatura di facciata, filtrata per valori superiori alla temperatura di degradazione del materiale al fine di mettere in evidenza l'area che in caso di incendio risulterebbe interessata dal danneggiamento, figura 5.25.

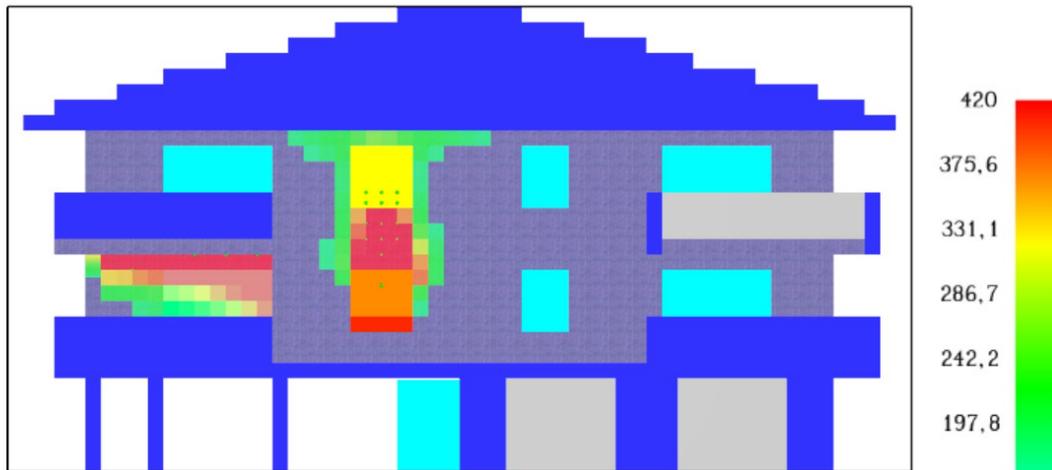


Figura 5.25 Scenario 3: estensione del materiale soggetto a degradazione termica

L'area danneggiata ha una superficie stimata di circa 14 m^2 ed è maggiormente estesa rispetto all'area di danneggiamento rilevata nello Scenario 2.

Il presente scenario si conferma essere il più critico tra i due scenari con diversi materiali isolanti simulati. Alla luce dei risultati ottenuti è stato simulato l'inserimento di una fascia di separazione a sviluppo verticale e di una fascia di separazione a sviluppo orizzontale, entrambe realizzate in lana di roccia. Coerentemente con quanto esposto al §2.2.1 e al §2.2.2,

paragrafi nei quali si sono espone le principali disposizioni della circolare “Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” e della RTV 13 in materia di sicurezza delle facciate degli edifici alti.

5.3.1 Scenario 3 con l'implementazione di fasce di separazione

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle simulazioni, secondo le medesime condizioni dello Scenario 3, nelle quali sono state modellate due tipologie di fasce di separazione realizzate in lana di roccia:

- fascia di separazione a sviluppo verticale, la cui sezione è riportata in figura 5.26 (a);
- fascia di separazione a sviluppo orizzontale, la cui sezione è riportata in figura 5.26 (b).

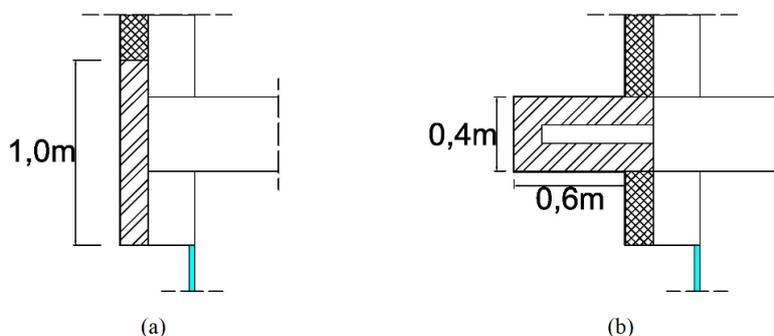


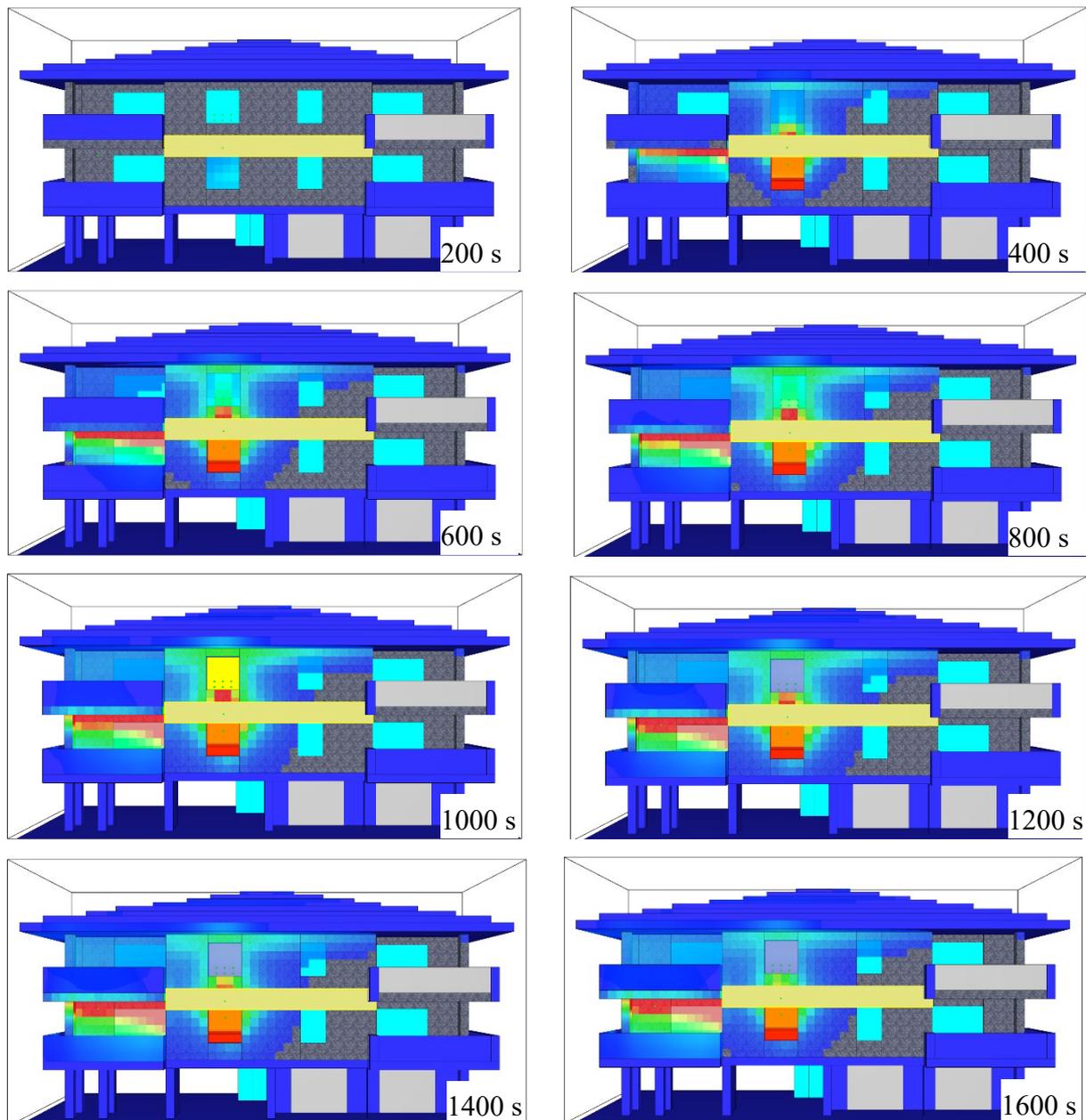
Figura 5.26 Scenario 3: fasce di separazione: (a) fascia a sviluppo verticale, (b) fascia a sviluppo orizzontale

La lana di roccia possiede ottime caratteristiche sia in termini di reazione al fuoco, è tipicamente classificata con Euroclasse A1, ovvero non combustibile, sia in termini di isolamento, presentando comportamenti simili al polistirene espanso sinterizzato.

L'inserimento di una fascia di separazione a sviluppo verticale, a differenza di quanto si verifica con l'inserimento di una fascia di separazione a sviluppo orizzontale con elementi aggettanti, non va a modificare le caratteristiche architettoniche della facciata dell'edificio esistente.

Le fasce di separazione introdotte sono state implementate in conformità a quanto indicato nella “Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” e a quanto indicato nella RTV 13 in materia di sicurezza delle chiusure d'ambito (§2).

Con riferimento ai risultati ottenuti, si riporta l'andamento delle temperature raggiunte dai materiali posti in facciata nel caso di installazione di una fascia di separazione a sviluppo verticale in figura 5.27. Inoltre, si riporta la legenda dei soli colori maggiori o uguali alla temperatura di ignizione del materiale; si precisa che l'andamento delle temperature sulla fascia di separazione è stato rimosso al fine di facilitare la visualizzazione delle sole temperature di interesse.



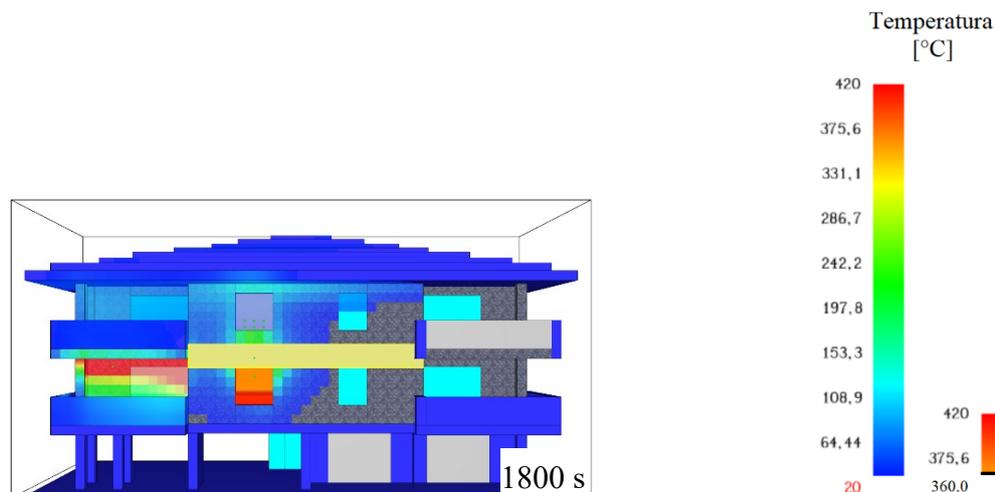


Figura 5.27 Scenario 3: andamento della temperatura superficiale della facciata a vari istanti di tempo con la presenza di una fascia di separazione a sviluppo verticale

Nonostante l'installazione di una fascia di separazione a sviluppo verticale permetta la riduzione della quantità di materiale isolante soggetto a combustione, si osserva comunque la propagazione dell'incendio sino a quota superiore alla fascia di separazione.

Questo comportamento è giustificabile in quanto una fascia di separazione verticale non offre nessun vincolo alla propagazione dei fumi caldi sulla facciata. Questi possono quindi raggiungere il materiale posto a quota superiore alla fascia di separazione con temperature superiori alla temperatura di accensione del materiale isolante.

In figura 5.28 si riporta una sezione dell'edificio, ottenuta secondo le modalità di figura 5.2, dove è rappresentata la distribuzione dei fumi caldi in facciata al tempo 1100 s; tempo al quale si verifica il superamento della fascia di separazione. Nell'immagine la fascia di separazione è rappresentata in bianco e in nero sono evidenziate le temperature pari alla temperatura di accensione del materiale isolante. È possibile notare che i fumi caldi ad altezza superiore alla fascia di separazione hanno temperatura maggiore di 360°C.

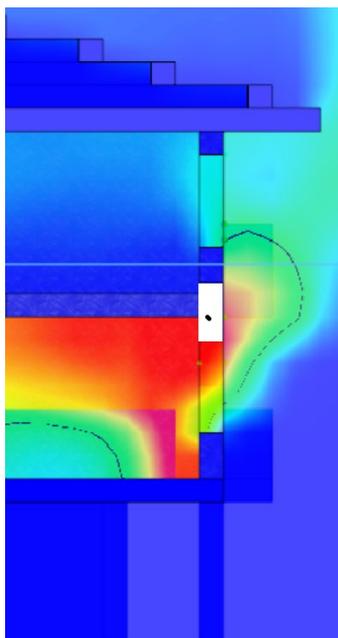


Figura 5.28 Distribuzione delle temperature dei fumi caldi in facciata, provvista di fascia di separazione, al tempo t : 1100 s

La temperatura raggiunta dalla superficie vetrata della finestra del secondo piano (figura 5.1), come nel caso privo di fascia di separazione, è pari alla massima temperatura di servizio del vetro. In questo caso la fascia di separazione ha un effetto ritardante sul collasso della superficie vetrata allungando il tempo disponibile per l'intervento. Si riporta nel grafico, figura 5.29, l'andamento nel tempo delle temperature raggiunte dal vetro nel caso privo di fasce di separazione e nel caso di previsione di una fascia di separazione a sviluppo verticale.

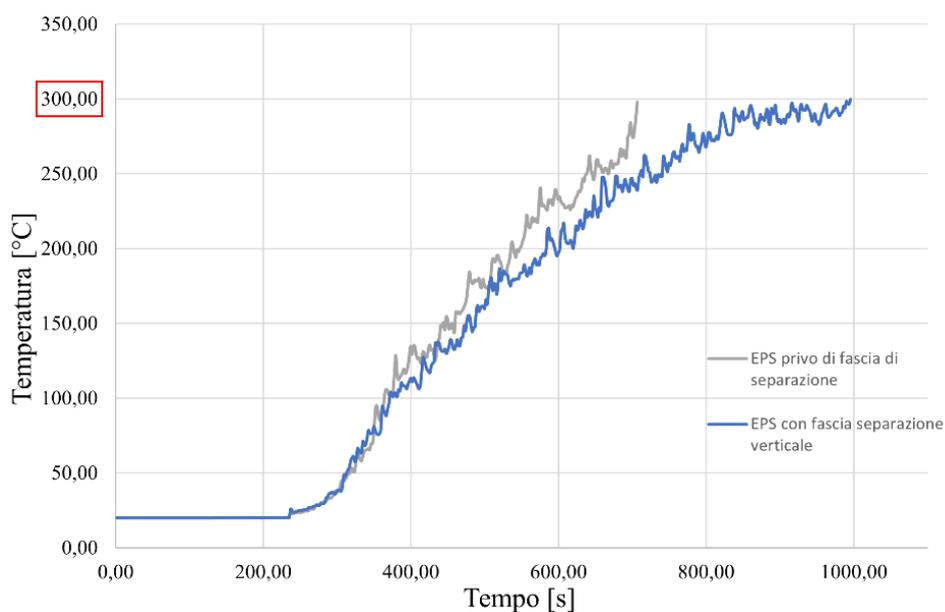
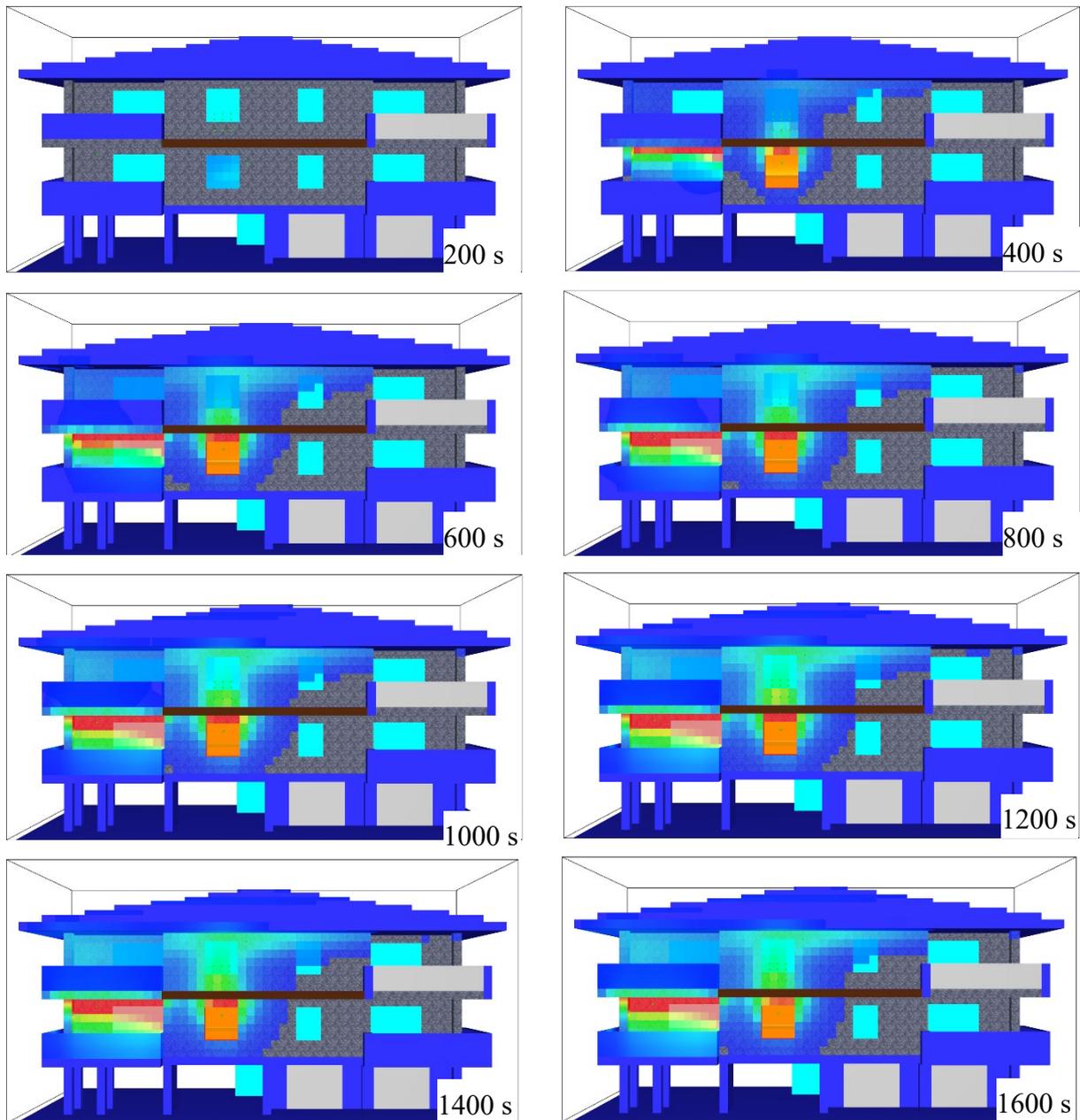


Figura 5.29 Scenario 3: tempo di collasso della finestra del secondo piano

Si riporta infine, in figura 5.30, l'andamento delle temperature nel caso di installazione di una fascia di separazione a sviluppo orizzontale.



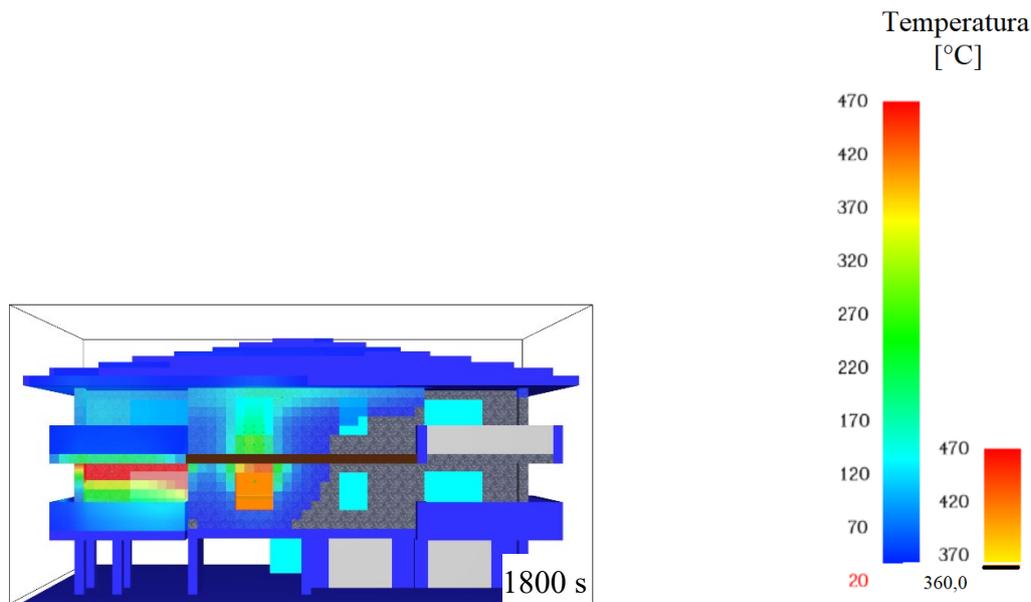
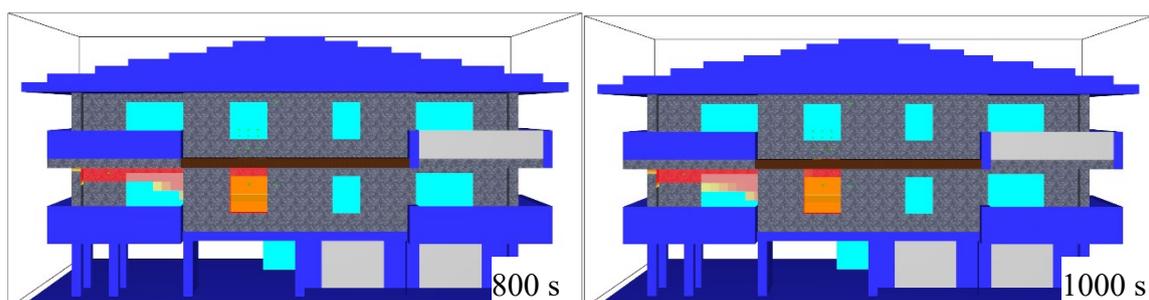


Figura 5.30 Scenario 3: andamento della temperatura superficiale della facciata a vari istanti di tempo con la presenza di una fascia di separazione a sviluppo orizzontale

L'installazione di una fascia di separazione a sviluppo orizzontale, ovvero costituita da un elemento aggettante, genera un duplice effetto e permette di fare due considerazioni:

- il materiale isolante posto al di sopra della quota del secondo piano non raggiunge la temperatura di ignizione: la propagazione dell'incendio in facciata non ha luogo;
- la temperatura massima raggiunta dai materiali posti al primo piano dell'edificio si innalza sia rispetto al caso privo di fascia di separazione sia rispetto al caso di installazione di una fascia di separazione a sviluppo verticale. L'innalzamento della temperatura è dovuto alla presenza dell'elemento aggettante che trattiene parte dei fumi caldi fuoriuscenti dalla finestra.

In figura 5.31 si evidenzia, come per gli scenari precedenti, l'andamento delle temperature sulla facciata filtrate per le sole temperature uguali o maggiori alla temperatura di accensione del materiale isolante.



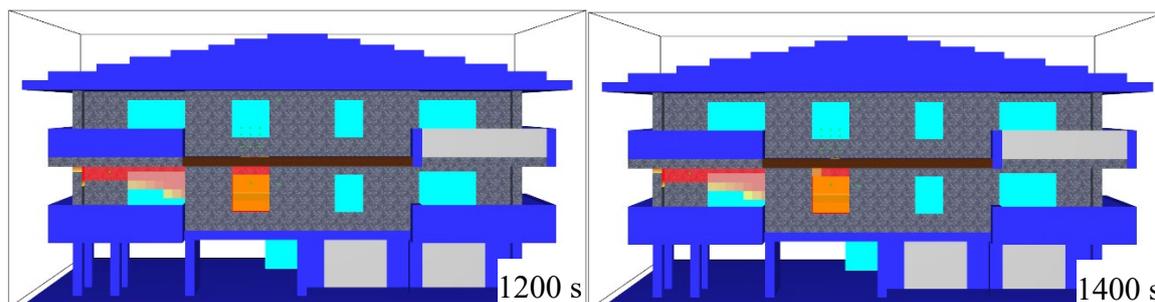


Figura 5.31 Scenario 3 con fascia di separazione orizzontale: andamento della temperatura superficiale della facciata filtrata per le temperature maggiori o uguali alla temperatura di accensione del materiale isolante a vari istanti di tempo

Con riferimento alle figure 5.30 e 5.31 si comprende che con l'installazione di una fascia di separazione orizzontale sulla facciata il materiale installato a quota superiore della stessa pur subendo un aumento di temperatura e la degradazione delle proprietà di isolamento termico non raggiunge una temperatura tale da provocarne l'accensione. Si può affermare che la compartimentazione offerta dalla fascia di separazione sia congrua alla durata dell'evento simulato. Infine, si riscontra che la limitazione dello sviluppo di incendio in facciata, come nel caso di fascia di separazione verticale, non provoca il collasso della superficie vetrata della finestra del secondo piano dell'edificio.

5.4 Riepilogo dei risultati ottenuti

Il presente paragrafo ha lo scopo di riepilogare i risultati ottenuti per i tre Scenari analizzati. Si riassumono i risultati ottenuti nelle tabelle sottostanti, ognuna per ogni scenario.

Scenario 1 – Struttura priva di isolante termico in facciata

Collasso della finestra 1° piano	Avvenuto
Collasso della portafinestra	Avvenuto
Collasso della finestra 2° piano	Non avvenuto

Scenario 2 – Isolante termico in poliuretano espanso rigido

Collasso della finestra 1° piano	Avvenuto
Collasso della portafinestra	Avvenuto
Collasso della finestra 2° piano	Non avvenuto
Massima temperatura raggiunta in facciata	370°C
Massima temperatura dei fumi caldi registrata	770°C
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a combustione	2 m ² (esclusa zona balcone)
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a danneggiamento	8 m ²

Scenario 3 – Isolante termico in polistirene espanso sinterizzato

Collasso della finestra 1° piano	Avvenuto
Collasso della portafinestra	Avvenuto
Collasso della finestra 2° piano	Avvenuto
Massima temperatura raggiunta in facciata	420°C
Massima temperatura dei fumi caldi registrata	770°C
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a combustione	2,5 m ² (esclusa zona balcone)
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a danneggiamento	16 m ²

Scenario 3 – Isolante termico in polistirene espanso sinterizzato con fasce di separazione

Collasso della finestra 1° piano	Avvenuto
Collasso della portafinestra	Avvenuto
Collasso della finestra 2° piano fascia separazione verticale	Avvenuto
Massima temperatura raggiunta in facciata con fascia verticale	420°C
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a combustione	0,70 m ² (esclusa zona balcone) Situata al di sopra della fascia

Continua: Scenario 3 – Isolante termico in polistirene espanso sinterizzato con fasce di separazione

Collasso della finestra 2° piano fascia separazione verticale	Non avvenuto
Massima temperatura raggiunta in facciata con fascia orizzontale	470°C
Stima dell'area del materiale isolante soggetto a combustione	0,70 m ² (esclusa zona balcone) Situata nell'area tra la finestra del primo piano e la fascia di separazione

Conclusioni

L'analisi condotta nei primi capitoli dell'elaborato dimostra l'attenzione dei normatori sia a livello comunitario, dell'Unione Europea, che nazionale per la tematica di riduzione dell'impatto ambientale all'interno del territorio, quindi della riduzione sia delle emissioni che del consumo di energia.

Il principale sistema di incentivazione del risanamento energetico di edifici civili pluripiano ad uso residenziale negli ultimi anni, dal 2020, è stato l'Ecobonus 110%. Tale bonus permetteva la detrazione nella misura del 110% per gli interventi trainanti e trainati provocanti il miglioramento di due classi energetiche della classificazione APE. L'intervento principale, trainante, del bonus applicato nella quasi totalità degli interventi con esso finanziati è l'applicazione in facciata di materiali termoisolanti. Le prestazioni di reazione al fuoco e di installazione di tali materiali sono regolamentate dalla Regola Tecnica Verticale numero 13 nel caso di edifici con altezza antincendio maggiore o uguale a 12 m.

L'analisi presentata nell'elaborato dimostra che anche gli edifici non soggetti, ovvero non rientranti nella soglia precedentemente indicata, in caso di incendio possono essere soggetti allo sviluppo dell'incendio sulla facciata dell'edificio.

In entrambi gli Scenari analizzati, ovvero sia con l'installazione di poliuretano espanso rigido (Scenario 2) sia con l'installazione di polistirene espanso sinterizzato (Scenario 3), si verifica la propagazione dell'incendio sulla facciata dell'edificio e il conseguente annullamento della funzione di compartimentazione offerta dal solaio nel caso precedente all'installazione di materiale isolante (Scenario 1).

I risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari con il software Pyrosim dimostrano che l'installazione di materiale termoisolante in facciata produce una variazione sostanziale della prestazione di reazione al fuoco della struttura. Questa variazione di comportamento deve essere considerata e correttamente valutata in fase di progetto al fine di ottenere una riduzione dei consumi e delle emissioni degli edifici garantendo il mantenimento della sicurezza in caso di incendio. Infine, le simulazioni di applicazione in facciata di fasce di separazione progettate come da normativa, RTV 13, dimostrano che sarebbe opportuno effettuare un'analisi del rischio a monte degli interventi di risanamento energetico al fine di prevedere l'installazione degli strumenti proposti dalla normativa se pur ad oggi non ancora obbligatori nella tipologia edilizia analizzata.

Bibliografia

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), 2024. *Dati di utilizzo del Superbonus 110%: report dei dati mensili al 31.12.2023*
- Anderson, J., Boström, L., McNamee, R. J., Milovanovic, B., 2016. *Uncertainties in façade fire tests – measurements and modeling*. MATEC Web Conf. 46:03002
- Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e Acustico (ANIT), 2014. *Rapporto ANIT 2013: Il mercato dei materiali isolanti in Italia*
- Babrauskas, Vytenis, 1996. *Facade Fire Tests: Towards an International Test Standard*
- Babrauskas, Vytenis, 1997. *Glass breakage in fire*
- Consiglio Europeo, 2023. *Infografica - Fit for 55: making buildings in the EU greener*
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, 2023. *Annuario 2023 (Dati statistici anno 2022)*
- Dembele, Siaka, et al. 2012. *Thermal breakage of window glass in room fires conditions, analysis of some important parameters*
- EUMEPS (European Manufacturers of Expanded Polystyrene), 2002. *Behaviour of EPS in case of fire*
- Gonzalez-Aguilar, A. M., Cabrera-Madera, V. P., Vera-Rozo, J. R., Riesco-Ávila, J. M., 2022. *Effects of Heating Rate and Temperature on the Thermal Pyrolysis of Expanded Polystyrene Post-Industrial Waste*
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E., 2023. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) – user's guide*. NIST Special Publication 1019
- Quagliano Amado, J. C., 2019. *Thermal Resistance Properties of Polyurethanes and Its Composites*
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2020. *Strategia per la riqualificazione energetica del parco immobiliare nazionale*
- Hasemi, Y., 2016. *Surface Flame Spread*. In Hurley, M. J., SFPE handbook of fire protection engineering (p. 705-718).

- Pagliaro, F., Hugony, F., Zanghirella, F., 2023. *La prestazione energetica del parco edilizio certificato nel 2022*. In Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), *Rapporto annuale sulla certificazione energetica degli edifici – Annualità 2023*
- Palladino, D., Pagliaro, F., Del Fatto, V., Lavinia, C., Margiotta, F., Colasuonno, L., 2019. *Stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale e analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE)*
- Skelly, M. J., Roby, R. J., Beyler, C. L., 1991. *An Experimental Investigation of Glass Breakage in compartment Fires*
- Thunderhead Engineering, 2020. *PyroSim User Manual version 2020-2*
- Thunderhead Engineering, 2024. *Heat Conduction in Pyrosim*
- Ufficio Rapporti con l'Unione europea, 2021. Dossier n° 58: *Pacchetto "Pronti per il 55%" (FIT for 55%): la revisione della normativa in materia di clima*
- Messerschmidt, Brigitte, Fellman, Jacob. 2013. *Fire testing of ETICS a comparative study*