

POLITECNICO DI TORINO



**Politecnico  
di Torino**

Collegio di Ingegneria Civile Edile

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Linee guida per lo studio della propagazione  
degli incendi in facciate ventilate di edifici  
civili con i metodi della Fire Safety Engineering**

Relatore:

Prof. Ing. Roberto Vancetti

Correlatore:

Ing. Emiliano Cereda

Candidata:

Giorgia Zanghi

Marzo 2025

## Abstract (ITA)

La sicurezza antincendio negli edifici alti e delle loro facciate è una tematica di crescente importanza, soprattutto in relazione a quelle ventilate, la cui configurazione può favorire la propagazione verticale del fuoco. In questo contesto, l'approccio prestazionale con strumenti di Fire Safety Engineering (FSE) rappresenta un metodo fondamentale e innovativo per la valutazione del rischio di incendio, rispetto ai tradizionali approcci prescrittivi.

Questa tesi si propone di fornire una linea guida e un supporto per il progettista nell'analisi della sicurezza antincendio delle facciate ventilate, in conformità con il Codice di prevenzione incendi. Per questo motivo, viene delineato un metodo di valutazione basato su strumenti di simulazione avanzati, in particolare sui modelli FDS (Fire Dynamics Simulator).

Dopo un'introduzione al fenomeno incendio e all'analisi delle caratteristiche degli edifici alti e delle diverse tipologie di facciate, viene esaminata la propagazione del fuoco in facciata, includendo un excursus storico sugli incendi più significativi verificatisi in edifici di grande altezza.

Successivamente, vengono presentati gli strumenti e le metodologie della FSE per il progettista, con particolare attenzione ai modelli FDS e all'utilizzo del software PyroSim per le simulazioni d'incendio. Vengono presentate le simulazioni condotte proprio con tale software, le quali mirano a studiare il comportamento al fuoco nelle facciate ventilate analizzandone l'andamento e l'evoluzione delle temperature nel tempo. Infine, tramite il tool IS Fuoco del software CDM Dolmen, viene verificata la resistenza al fuoco delle connessioni metalliche che fanno parte della sottostruttura delle facciate ventilate.

L'analisi condotta permette di valutare l'efficacia di diverse soluzioni progettuali e individuare strategie per migliorare la sicurezza delle facciate ventilate. I risultati ottenuti evidenziano l'importanza di un approccio prestazionale nella progettazione antincendio, fornendo indicazioni utili per la mitigazione del rischio e per l'adozione di soluzioni tecniche più efficaci.

## Abstract (EN)

Fire safety in high-rise buildings and their facades is a topic of growing importance, particularly concerning ventilated facades, whose design may facilitate vertical fire spread. In this context, the performance-based approach, employing Fire Safety Engineering (FSE) methodologies, represents an essential and innovative framework for fire risk assessment, offering greater flexibility compared to traditional prescriptive methods.

This dissertation aims to provide guidelines and technical support for designers in the fire safety assessment of ventilated facades, in accordance with the Italian Fire Prevention Code (Codice di prevenzione incendi). To achieve this, a structured evaluation method is proposed, based on advanced simulation tools, specifically Fire Dynamics Simulator (FDS) models.

Following an introduction to fire dynamics and an analysis of high-rise buildings and various facade typologies, the study examines fire propagation in facades, incorporating a historical review of major fire incidents in tall buildings.

Subsequently, FSE tools and methodologies relevant to designers are presented, with particular emphasis on FDS models and the application of PyroSim for fire simulations. The simulations conducted using PyroSim aim to analyse fire behaviour in ventilated facades, focusing on temperature evolution over time.

Finally, the IS Fuoco tool within the CDM Dolmen software is employed to assess the fire resistance of metal connections forming part of the ventilated facade substructure.

The study evaluates the effectiveness of various design solutions and identifies strategies to enhance the fire safety of ventilated facades.

The findings highlight the critical role of a performance-based approach in fire safety design, providing valuable insights for risk mitigation and the development of more effective technical solutions.

# Sommario

Abstract (ITA) .....	I
Abstract (EN).....	II
Introduzione .....	1
1. I concetti fondamentali della sicurezza antincendio .....	4
1.1. La prevenzione incendi .....	4
1.2. La Fire Safety Engineering.....	7
1.3. La combustione.....	9
1.4. Lo sviluppo di un incendio .....	14
1.4.1. La curva RHR .....	24
1.5. Cenni di fisica dell'incendio .....	29
1.5.1. L'evoluzione di un incendio all'interno di un locale.....	30
2. Gli edifici alti, le soluzioni in facciata e la normativa italiana.....	32
2.1. Gli edifici di grande altezza .....	32
2.1.1. Le caratteristiche principali.....	35
2.2. Le facciate .....	37
2.2.1. Le tipologie di facciata .....	39
2.2.2. Le facciate ventilate .....	43
2.3. La normativa italiana .....	55
2.3.1. L'efficienza energetica delle strutture.....	55
2.3.2. La sicurezza antincendio .....	64
3. Gli incendi in facciata .....	73
3.1. La propagazione dell'incendio in facciata.....	73
3.2. Antologia dei principali incendi in edifici di grande altezza .....	78
3.3. Osservazioni e riflessioni sugli incendi di facciata accaduti .....	89
3.4. Il comportamento al fuoco delle facciate ventilate.....	97
3.4.1. I rischi e le strategie di progettazione dei sistemi delle facciate ventilate	100
3.4.2. Sistemi di protezione passiva alla propagazione incendi .....	102

4.	Le linee guida per la sicurezza antincendio delle facciate .....	107
4.1.	Gli obiettivi e la metodologia generale del progettista .....	107
4.2.	L'approccio prestazionale e la metodologia FSE di base.....	118
4.2.1.	I modelli di calcolo .....	118
4.2.2.	L'architettura comune dei codici commerciali .....	121
4.3.	La modellazione e le simulazioni di incendio in PyroSim .....	122
4.3.1.	Il confronto tra le modalità di simulazione (modelli 1-4) .....	131
5.	Analisi della propagazione di incendi in intercapedine di facciate ventilate con metodi FSE	135
5.1.	Obiettivi e metodologie .....	135
5.2.	I casi studio per le simulazioni d'incendio .....	137
5.2.1.	Materiali e stratigrafie adottate.....	138
5.2.2.	I modelli realizzati in PyroSim.....	140
5.2.3.	Il setup delle simulazioni in PyroSim .....	142
5.3.	I risultati .....	151
5.3.1.	La facciata ventilata continua combustibile – modello 5 .....	151
5.3.2.	La facciata ventilata continua incombustibile – modello 7 .....	161
5.3.3.	Il confronto tra la facciata ventilata continua combustibile e incombustibile – modelli 5 e 7 .....	170
5.3.4.	Il confronto facciata continua alta 6 m e 9 m rispetto al burner – il paragone tra modelli 7 e 8 .....	178
5.3.5.	Il confronto tra differenti spessori dell'intercapedine (modelli 9-12 e modelli 13-16)	183
5.3.6.	La facciata ventilata incombustibile di 2 piani fuori terra con presenza di una finestra al piano primo e differente curva RHR (modelli 17 e 18).....	190
5.3.7.	La facciata ventilata incombustibile con una fascia di separazione di 1 metro – modello 19.....	204
5.3.8.	La facciata ventilata incombustibile con un cavity barrier – modello 20 ..	207
5.3.9.	Il confronto tra le soluzioni antincendio (modelli 18-20).....	210

5.3.10. Le modellazioni di facciate ventilate di edifici alti 8 piani fuori terra (modelli 21 e 22)	213
5.4. La verifica di resistenza al fuoco delle connessioni metalliche .....	231
Conclusioni .....	245
Indice delle figure .....	248
Indice delle tabelle .....	259
Bibliografia .....	261



## Introduzione

La presente tesi è dedicata allo studio della propagazione degli incendi nelle facciate ventilate di edifici civili, con particolare attenzione all'approccio metodologico della Fire Safety Engineering (FSE). La questione posta al centro di questa ricerca riveste un'importanza fondamentale nel contesto della sicurezza degli edifici alti, in quanto il comportamento al fuoco delle chiusure d'ambito può influenzare significativamente la salvaguardia della vita umana, condizionando sia le possibilità di esodo degli occupanti sia l'intervento dei soccorritori.

L'importanza di questo tema è evidenziata dalla crescente diffusione degli edifici di grande altezza nei contesti urbani contemporanei e dal parallelo incremento nell'utilizzo di facciate ventilate come soluzione tecnologica avanzata. Questa tipologia costruttiva, pur offrendo notevoli vantaggi in termini di prestazioni energetiche, comfort abitativo ed estetica architettonica, introduce specifiche criticità in relazione alla propagazione verticale dell'incendio, come dimostrato da numerosi eventi incidentali verificatisi negli ultimi anni in diverse metropoli globali.

L'obiettivo principale di questa ricerca è duplice: da un lato, comprendere approfonditamente i meccanismi di propagazione dell'incendio nelle facciate ventilate attraverso l'analisi di diverse configurazioni e variabili progettuali; dall'altro, sviluppare un supporto metodologico per il progettista che si appresta ad affrontare valutazioni di sicurezza antincendio in questo ambito. La tesi centrale di questo lavoro è che l'approccio prestazionale della FSE, supportato da strumenti avanzati di modellazione computazionale, consenta una valutazione più accurata e specifica del rischio rispetto ai tradizionali metodi prescrittivi, permettendo l'individuazione di soluzioni progettuali più efficaci.

Il punto di partenza dell'indagine è rappresentato dal quadro normativo definito dal Codice di prevenzione incendi, con particolare riferimento alla RTV.14 dedicata agli "Edifici di civile abitazione" e alla RTV.13 relativa alle "Chiusure d'ambito". Questi riferimenti normativi costituiscono la cornice all'interno della quale si sviluppa l'approccio metodologico proposto, orientato all'applicazione dei principi della FSE nella valutazione della sicurezza antincendio delle facciate ventilate.

Il percorso di ricerca si articola in cinque capitoli che seguono una progressione logica e consequenziale. Il primo capitolo introduce il fenomeno dell'incendio nei suoi aspetti fondamentali, fornendo le basi teoriche necessarie per comprendere i meccanismi di sviluppo e propagazione. Il secondo esplora le caratteristiche degli edifici alti e le diverse tipologie di soluzioni in facciata, con un approfondimento specifico sulle facciate ventilate e sulle loro peculiarità costruttive e funzionali. Il terzo capitolo affronta il tema centrale della propagazione dell'incendio in facciata, attraverso un'analisi storica degli eventi incidentali più significativi e uno studio dettagliato del comportamento al fuoco specifico delle facciate ventilate. Il quarto capitolo rappresenta il contributo metodologico più rilevante, proponendo linee guida operative per il progettista nell'ambito dell'applicazione della FSE

alla sicurezza antincendio delle facciate ventilate. Viene dedicata una particolare attenzione ai codici di modellazione e all'utilizzo del software PyroSim per la simulazione dell'incendio. Infine, il quinto capitolo presenta i risultati delle simulazioni condotte e include un approfondimento sulla verifica di resistenza al fuoco delle connessioni metalliche della sottostruttura mediante il software CDM Dolmen, completando così l'analisi del comportamento delle facciate ventilate in condizioni di incendio.

La metodologia adottata ha integrato diverse componenti: un'approfondita ricerca bibliografica sulla letteratura scientifica, sui testi normativi e sugli articoli specialistici relativi al tema; l'applicazione dei metodi della FSE per lo studio dei fenomeni fluidodinamici dell'incendio; l'utilizzo di analisi FDS (Fire Dynamics Simulator) per la modellazione computazionale e la simulazione degli scenari di incendio.

Le simulazioni sono state organizzate in quattro gruppi principali, finalizzati a confrontare diverse variabili progettuali: la natura dei materiali, combustibili e incombustibili, in un modulo di facciata di altezza limitata; l'influenza dell'estensione della facciata sulla propagazione dell'incendio; l'effetto della variazione dello spessore della lama d'aria; l'impatto della presenza di aperture con finestre vetrate, considerando anche il cedimento di queste ultime per effetto dell'esposizione al calore. Inoltre, sono state analizzate specifiche soluzioni di protezione passiva, quali fasce di separazione e cavity barriers, valutandone l'efficacia nel contenimento della propagazione.

L'analisi si è concentrata principalmente sull'andamento e sull'evoluzione delle temperature nel tempo, studiando l'estensione del pennacchio termico (*plume*) come indicatore della propagazione delle fiamme, dei gas e dei fumi caldi. A completamento dello studio, è stata condotta una verifica di resistenza al fuoco delle connessioni metalliche della sottostruttura, elemento critico per la stabilità del sistema di facciata in condizioni di incendio.

È opportuno evidenziare i limiti entro cui si è sviluppata questa ricerca, al fine di contestualizzare correttamente i risultati ottenuti. L'analisi si è focalizzata sulle temperature piuttosto che sull'altezza di fiamma, in considerazione del fatto che il software PyroSim fornisce risultati più accurati in termini quantitativi per le prime rispetto alla seconda. Non è stato approfondito l'effetto camino, fenomeno pur rilevante per il funzionamento delle facciate ventilate, poiché l'indagine si è concentrata prioritariamente sulla distribuzione delle temperature.

Un ulteriore limite ha riguardato le dimensioni dei modelli simulati. Non sono state analizzate facciate micro-ventilate a causa delle ridotte dimensioni della lama d'aria, che avrebbero richiesto una mesh con passo estremamente ridotto, comportando un onere computazionale eccessivo. Analogamente, i modelli di facciate complete di edifici alti 8 piani sono stati realizzati solo parzialmente, a causa dei tempi di calcolo estremamente lunghi e delle limitate risorse hardware disponibili. In particolare, solo la simulazione relativa alla facciata incombustibile è stata completata, richiedendo circa un mese di

elaborazione, mentre quella relativa alla facciata combustibile non è stata portata a termine per mancanza di ulteriori risorse temporali e computazionali.

Queste limitazioni, intrinsecamente legate alle caratteristiche dei software di simulazione FDS, evidenziano la complessità dell'analisi fluidodinamica computazionale dell'incendio in strutture architettoniche articolate e sottolineano l'importanza di un approccio graduale alla modellazione, che proceda da configurazioni più semplici verso sistemi progressivamente più complessi, al fine di garantire la gestibilità dei modelli e la leggibilità dei risultati.

Nonostante questi limiti, i risultati ottenuti forniscono indicazioni significative sui meccanismi di propagazione dell'incendio nelle facciate ventilate e sull'efficacia delle diverse soluzioni progettuali, contribuendo a delineare un approccio metodologico che possa supportare efficacemente i progettisti nell'analisi della sicurezza antincendio di questa specifica tipologia costruttiva.

# 1. I concetti fondamentali della sicurezza antincendio

## 1.1. La prevenzione incendi

Nell'allegato I del Decreto Ministeriale del 3 agosto 2015, ovvero il Codice di prevenzione incendi, la prevenzione incendi viene definita come la

*«funzione preminente di interesse pubblico diretta a conseguire, secondo criteri uniformi sul territorio italiano, gli obiettivi di sicurezza della vita umana, di incolumità delle persone e di tutela dei beni e dell'ambiente attraverso la promozione, lo studio, la predisposizione e la sperimentazione di norme, misure, provvedimenti, accorgimenti e modi di azione intesi ad evitare l'insorgenza di un incendio e degli eventi ad esso comunque connessi o a limitarne le conseguenze».*

Pertanto, è un insieme di misure, procedure e norme finalizzate a ridurre il rischio incendio e a limitare le conseguenze di potenziali eventi di incendio.

L'obiettivo principale è la salvaguardia della vita umana, quindi preservare l'incolumità delle persone che occupano gli edifici o le aree a rischio. In secondo luogo, la finalità è la minimizzazione dei danni materiali, cercando di ridurre al minimo le perdite economiche e i possibili danni alle strutture. Infine, si mira alla tutela ambientale, ossia lo scopo è prevenire l'inquinamento e il degrado causati dagli incendi e dalle sostanze tossiche e inquinanti rilasciate nell'ambiente esterno (Vancetti, 2022).

La prevenzione incendi si basa su alcuni principi chiave che ne guidano l'efficacia e la sua applicazione.

Innanzitutto, è fondamentale la prevenzione che implica l'adozione di misure destinate ad evitare l'insorgenza di incendi. Ciò include l'impiego di materiali ignifughi o, in ogni caso, dotati di determinate caratteristiche di reazione e resistenza al fuoco; inoltre, questo include il rigoroso rispetto delle normative edilizie.

Un altro aspetto cruciale è la protezione che consiste nella creazione di barriere fisiche e nell'installazione di sistemi di sicurezza, come estintori e impianti di allerta, per salvaguardare persone e beni.

È fondamentale anche la pianificazione che prevede lo sviluppo di piani di emergenza e procedure di evacuazione per assicurare una risposta rapida e adeguata in caso di incendio. In questo contesto, la progettazione gioca un ruolo essenziale, intervenendo su tutti e tre i principi. Progettando e predisponendo correttamente spazi e oggetti, uscite e aperture, vie di esodo e più in generale aree, arredi e così via, è possibile agire a livello di prevenzione, protezione e pianificazione, offrendo un ambiente nel complesso più sicuro e protetto (Vancetti, 2022).

A questo punto, è fondamentale comprendere come si attua la prevenzione incendi: alla base di tutto vi è una valutazione del rischio incendio. Questa valutazione è essenziale perché consente di identificare i potenziali pericoli e le situazioni di rischio, permettendo di adottare le misure più appropriate e di fare le considerazioni preliminari corrette (Vancetti,

2022). In Italia la legislazione impone che questa valutazione venga effettuata per tutti i luoghi di lavoro, come stabilito dal Decreto Legislativo del 9 aprile 2008 n. 81. Questa legge ha l'obiettivo di preservare la sicurezza e la salute dei lavoratori e di valutare tutti i rischi, compreso il rischio incendio; quindi, rappresenta un elemento cruciale per tutelare non solo i dipendenti, ma tutte le persone, i beni e l'ambiente circostante.

In Italia la prevenzione incendi viene realizzata attraverso l'applicazione del Codice di prevenzione incendi, il quale fornisce le linee guida per garantire la sicurezza antincendio stabilendo misure da adottare per prevenire e gestire questo tipo di eventi. Il Codice si applica a diverse tipologie di strutture, come edifici pubblici e privati, commerciali e industriali, e si basa su standard internazionali per affrontare le sfide moderne della sicurezza antincendio. È un testo in continuo aggiornamento e si presenta come un documento accessibile e fruibile da tutti gli utenti grazie a un linguaggio di immediata comprensione. Per di più, è aperto al progresso tecnico e tecnologico con sviluppi, sperimentazioni e innovazioni nel campo della prevenzione incendi.

In generale, si fa una distinzione tra attività normate e non normate, soggette e non soggette. Le attività normate vengono così definite perché sono sottoposte ad una regola tecnica verticale realizzata appositamente per loro, regola che può essere interna o esterna al Codice; le attività non normate, di conseguenza, non dispongono di una regola tecnica ad hoc. Invece, le attività dette "soggette" si definiscono tali perché soggette ai controlli di prevenzione incendi da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco; viceversa, le attività non soggette racchiudono tutte quelle attività non sottoposte a tali controlli.

Tenendo conto di tale classificazione si hanno diversi casi, quali:

- attività soggette e normate;
- attività soggette e non normate;
- attività non soggette, normate e non normate.

Nel primo caso, attività soggette e normate, esiste il cosiddetto regime del doppio binario: se sono presenti Regole Tecniche Verticali (RTV) all'interno del Codice, leggi o decreti prescrittivi antecedenti, il progettista può scegliere a quale norma fare riferimento; mentre, nel caso in cui non siano presenti RTV specifiche, è necessario l'impiego di decreti antecedenti al Codice.

Nel secondo caso, attività soggette e non normate, bisogna obbligatoriamente utilizzare il Codice.

Nel terzo caso, attività non soggette, normate e non normate, si può utilizzare il Codice come riferimento o linea guida; tuttavia, l'obbligo rimane quello di eseguire una valutazione del rischio incendio (Vancetti, 2022).

Il D.P.R. n. 151 del 01/08/2011, in particolare l'Allegato I, fornisce l'elenco delle attività sottoposte ai controlli di prevenzione antincendio.

Pertanto, la prevenzione incendi non viene applicata a tutti gli edifici e a tutte le aree pubbliche e private, sebbene dovrebbe essere applicata in tutti i contesti e a tutte quelle aree a rischio (Vancetti, 2022). Fortunatamente, il Codice di prevenzione incendi considera

altri ambiti, quali ad esempio le chiusure d'ambito e gli edifici di civile abitazione, che verranno ripresi più avanti<sup>1</sup>. Il testo, infatti, suggerisce al progettista tutte le casistiche e gli aspetti da tenere in conto per il rischio incendio, indicandogli la strada da seguire, nei metodi e nei passi fondamentali.

Il Codice è strutturato in quattro sezioni:

- Generalità (sezione G): raccoglie tutti i principi, i dettami e le definizioni della sicurezza antincendio applicabili in linea generale a tutte le attività;
- Strategia antincendio (sezione S): è una raccolta di tutte le possibili misure antincendio adottabili nei vari contesti per mitigare il rischio;
- Regole tecniche verticali, abbreviate in RTV (sezione V): è un compendio di regole specifiche distinte per ogni singola attività, tipologia o altro campo di applicazione;
- Metodi (sezione M): in questa sezione vengono descritte le metodologie per le analisi quantitative, per la progettazione di particolari misure antincendio o per la disamina di problematiche di natura tecnica in una determinata casistica da affrontare.

La prevenzione incendi consiste, dunque, nella progettazione della sicurezza antincendio, la quale è un processo dotato di una certa struttura, di fasi e step da seguire, così come suggerito dal Codice per il progettista che si appresta ad eseguire uno studio e un'analisi del rischio incendio. Questo processo non è una semplice lista da seguire, bensì è iterativo e con retroazione: infatti, durante il corso di tale processo, il progettista attua una o più scelte e, spesso, è necessario che torni sui propri passi, tornando quindi indietro e iterando il processo; le sue scelte hanno o possono avere delle conseguenze sulle varie strategie, perciò sulle misure antincendio (Vancetti, 2022).

In ogni caso, si possono seguire due tipi di approcci: l'approccio semi-prescrittivo e quello prestazionale. Entrambi permettono al progettista di effettuare la valutazione del rischio, il quale è libero di scegliere di approfondire o meno l'analisi. Tuttavia, il primo approccio presenta al progettista delle soluzioni conformi, già confezionate dal legislatore del Codice, che rispettano i principi della sicurezza antincendio; invece, il secondo approccio dà una maggiore libertà al progettista nelle sue analisi, allo scopo di studiare la soluzione migliore e ad hoc per la situazione in esame. Ovviamente, in questo caso, sarà cura del progettista stesso dimostrare la validità della soluzione proposta e il soddisfacimento dei requisiti di sicurezza.

Per questi motivi, per il primo tipo di approccio si sfruttano le prime tre sezioni (G, S e V) del Codice, mentre per il secondo approccio si segue la sezione M, che si occupa proprio dell'impostazione generale dell'approccio di tipo prestazionale, sia nelle metodologie che negli strumenti.

Come già detto, la prima cosa da fare è effettuare una valutazione del rischio, per farlo, il Codice suggerisce la seguente linea da seguire: in primo luogo, si stabiliscono dei profili di rischio legati ai tre obiettivi della sicurezza antincendio, ovvero alla salvaguardia della vita,

---

<sup>1</sup> Si vedano le sezioni 2.3.2 e 4.1 sia per gli edifici residenziali che per le chiusure d'ambito.

dei beni e dell'ambiente; successivamente, sulla base dei profili di rischio e seguendo alcuni criteri dettati dalla norma, vengono attribuiti dei livelli di prestazione e vengono suggerite delle soluzioni. Le soluzioni progettuali possono essere conformi, ossia conformi alla normativa vigente in materia di sicurezza antincendio e quindi rientranti tra quelle esplicitamente indicate dal Codice, oppure possono essere alternative o in deroga, per le quali è necessario avviare un procedimento di deroga, come previsto dalla normativa vigente. Queste ultime, per tale ragione, non sono la prima scelta suggerita dal Codice.

L'approccio prestazionale subentra proprio in questi ultimi due casi, poiché risulta necessario validare le valutazioni della sicurezza antincendio con analisi dedicate applicando i metodi dell'ingegneria antincendio (Vancetti, 2022).

## 1.2. La Fire Safety Engineering

La Fire Safety Engineering (FSE) è la disciplina che si occupa dello sviluppo e dell'applicazione di metodologie ingegneristiche per affrontare i problemi della sicurezza antincendio. Dalla UNI ISO/TR 13387-1:2008 la sua definizione è:

*«applicazione di principi ingegneristici, regole tecniche e giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzati alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell'ambiente, alla quantificazione dei rischi d'incendio e dei relativi effetti ed alla valutazione analitica delle misure antincendio ottimali, necessarie a limitare entro livelli prestabiliti, le conseguenze dell'incendio».*

È possibile ritrovare questa definizione anche nel Codice di prevenzione incendi, il quale riprende e si riallaccia sia alle norme ISO sia alle normative internazionali in materia di sicurezza antincendio, definendo le linee guida per l'iter che deve seguire il progettista, in particolare quando si trova in soluzione alternativa.

I concetti alla base dell'FSE sono due: il primo è quello di definire soluzioni idonee al raggiungimento degli obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo; il secondo consiste nel seguire un approccio performance based.

Per quanto riguarda il primo punto, risulta essenziale eseguire una valutazione del livello di sicurezza antincendio. Quindi, si prospettano scenari di incendio di progetto, si quantificano gli effetti dell'incendio e si misura il livello di sicurezza antincendio, valutato rispetto a prestabilite soglie prestazionali quali, ad esempio, temperatura, visibilità, altezza dello strato libero da fumi etc.

Invece, per quanto concerne l'approccio performance based, è la prospettiva del progettista a cambiare: si vuole seguire questo tipo di approccio perché quello prescrittivo tradizionale è di più semplice applicazione, ma risulta poco flessibile in realtà complesse come edifici storici o edifici innovativi e tecnologicamente avanzati, nei quali possono essere insediate diverse attività oppure vi possono essere differenti tipologie di occupanti; l'approccio "basato sulle prestazioni", o meglio l'approccio *ingegneristico*, dimostra possibilità, alternative e potenzialità in quei contesti complessi nei quali l'approccio tradizionale risulta

rigido e non applicabile. Il progettista in passato seguiva l'approccio prescrittivo, esisteva quindi quell'abitudine, consolidata negli anni, di leggere e applicare la norma in maniera rigorosa (si potrebbe dire anche in maniera "pedissequa"). Tuttavia, oggi risulta migliore e più vantaggioso seguire l'approccio prestazionale, che risulta un percorso progettuale basato sulle prestazioni dell'edificio; inoltre, consente di quantificare e valutare l'effetto di ogni misura alternativa attraverso l'uso di modelli, misurando i risultati rispetto ai valori minimi ritenuti accettabili per le prestazioni richieste.

Gli strumenti e i metodi della disciplina FSE sono potenzialmente non solo validi ma essenziali, soprattutto in tutti quei casi complessi in cui l'approccio prescrittivo risulta limitante e di difficile applicabilità.

Modellazioni di incendio ed esodo, ricerche e sperimentazioni sul campo, come ad esempio esperimenti di incendi in scala reale o simulazioni virtuali di esodo, sono strumenti fondamentali per l'approccio performance based dell'FSE (Vancetti, 2023).

Pertanto, si segue la sezione Metodi del Codice di prevenzione incendi, la quale riporta le metodologie innovative ed alternative, volte alla risoluzione di specifiche problematiche tecniche della progettazione antincendio. Questa sezione è composta da tre capitoli:

- M1 – Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio;
- M2 – Scenari di incendio per la progettazione prestazionale;
- M3 – Salvaguardia della vita nella progettazione prestazionale.

Nel capitolo M1 si trova la descrizione della metodologia di progettazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio. Applicando i principi di questa disciplina, analogamente alle altre discipline ingegneristiche, è possibile arrivare a definire soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo.

Dunque, il progettista segue due fasi: la prima è una fase di analisi preliminare; la seconda prevede un'analisi quantitativa. Nello step preliminare si definisce il progetto, chiarendone fin da subito gli obiettivi; poi si individuano le attività presenti, le destinazioni d'uso degli ambienti e delle aree; infine, si guardano le condizioni al contorno e gli occupanti. Successivamente, si definiscono le soglie di prestazione, prima in maniera qualitativa e poi quantitativa. Dopodiché, si individuano gli scenari d'incendio, ossia gli eventi che potrebbero verosimilmente e ragionevolmente verificarsi. Nel secondo step si calcolano gli effetti dell'incendio e si confrontano con i livelli di prestazione individuati per i vari scenari supposti. A questo punto si elaborano delle soluzioni progettuali in linea con le problematiche individuate, si valutano queste soluzioni per i vari scenari guardando gli effetti dell'incendio su occupanti, struttura e ambiente. Alla fine, si selezionano le soluzioni che rispondono meglio agli obiettivi prefissati, effettuando un confronto delle informazioni e dei risultati ottenuti.

Più avanti, nel capitolo M2, è descritta la procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio.

Per quanto riguarda l'identificazione degli scenari di incendio, questa avviene in maniera prima qualitativa, tramite lo sviluppo di alberi degli eventi e attraverso analisi storiche. Tra tutti i possibili scenari di incendio si selezionano gli scenari di progetto; di questi si selezionano i dati di input, che saranno informazioni relative agli occupanti, al focolare ed alle attività che possono trovarsi nella struttura. Non si studiano, quindi, tutti gli scenari di incendio ma solo quelli di progetto: questo è un modo per ottimizzare l'impegno del progettista sia a livello di tempi che di costi. Il dato di input più importante sarà sicuramente il carico di incendio, ovvero l'energia termica totale disponibile (che sarà anche l'area sottesa della curva RHR)<sup>2</sup>.

Infine, nel capitolo M3 viene enunciato il criterio per perseguire l'obiettivo e, pertanto, garantire la salvaguardia della vita umana: il tempo in cui permangono condizioni non incapacitanti per gli occupanti all'interno di un edificio, cioè il tempo in cui questi ultimi sono esposti al pericolo incendio senza esserne però vittime, deve essere superiore al tempo necessario perché possano raggiungere un luogo sicuro. A questo punto, si studia il sistema d'esodo e in particolare le interazioni tra occupante e occupante, occupante e ambiente, occupante e incendio. La soluzione ottimale suggerita e affermata nel Codice prevede che nel sistema d'esodo ideale tutti gli occupanti non incontrino né l'incendio né i suoi effetti. In questo caso, effettivamente, la salvaguardia della vita umana sarebbe certamente garantita. Tuttavia, nella maggior parte delle situazioni questo è molto difficile da realizzare, quindi nella sezione M3 la soluzione proposta è che ASET (Available Safe Escape Time) sia maggiore di RSET (Required Safe Escape Time): questo vuol dire che il tempo disponibile per l'esodo, ossia il tempo che intercorre tra l'innesco dell'incendio il momento in cui si creano condizioni incapacitanti per la fuga degli occupanti, sia maggiore del tempo necessario affinché gli occupanti stessi riescano a raggiungere un luogo sicuro. Il primo tempo, l'ASET, viene determinato per mezzo delle modellazioni di incendio, mentre il secondo, l'RSET, tramite le modellazioni di esodo.

### 1.3. La combustione

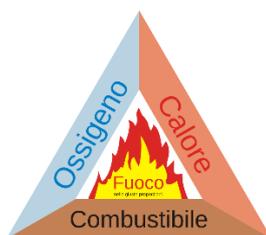
Il fenomeno dell'incendio è regolato dal processo di combustione, una reazione chimica di ossidazione caratterizzata da un'elevata velocità di propagazione e un significativo rilascio di calore, configurandosi quindi come una reazione esotermica. Può essere descritta schematicamente attraverso il cosiddetto *triangolo del fuoco*, una rappresentazione che identifica i tre elementi fondamentali necessari per il suo sviluppo.

Pertanto, un incendio è la risultante di:

- combustibile;
- comburente;
- sorgente o innesco.

---

<sup>2</sup> Si veda la Figura 1.9 al par. 1.4.



*Figura 1.1: Il triangolo della combustione (Triangolo del fuoco, 2024)*

Il combustibile è il materiale che sostanzialmente brucia, o meglio è quel materiale che è in grado di combinarsi chimicamente, con l'ossigeno o con un'altra sostanza detta comburente, e reagendo emette successivamente energia sottoforma di calore, luce, gas e fumi. Ricadono in questa categoria tutte quelle sostanze in grado di ossidarsi, ovvero che si legano a uno o più atomi di ossigeno. In genere, il materiale combustibile è costituito da carbonio, idrogeno, ossigeno e/o zolfo e si può trovare allo stato di gas, liquido o solido.

Bisogna specificare che lo stato in cui si trova il combustibile può influenzare considerevolmente il processo di combustione: ad esempio, se è liquido potrebbe verificarsi il rilascio continuo di vapori combustibili che potrebbero rappresentare un forte rischio di una successiva riaccensione e combustione; oppure, se il combustibile si trova allo stato solido, la pezzatura, ossia il volume della massa del materiale combustibile, la compattezza, quindi la presenza di aria nella massa del materiale, e la sua umidità, dunque la presenza di acqua nella massa stessa, potrebbero incidere notevolmente nello sviluppo e nell'evoluzione del fenomeno.

Il comburente, invece, è la sostanza o il miscuglio, in genere gassoso, che alimenta la combustione mediante l'ossidazione del combustibile, garantendo l'apporto dell'ossigeno necessario affinché il processo vada avanti. Di conseguenza, si tratta tendenzialmente di aria o ossigeno in essa contenuto.

L'insieme di combustibile e comburente rappresenta la condizione di base affinché si verifichi la combustione; tuttavia, se manca l'innesco, non può verificarsi l'incendio. La sorgente, anche detta innesco, rilascia un adeguato valore di energia termica che è in grado di dare avvio al processo di combustione; quindi, ad esempio, l'innesco può essere una scintilla, una fiamma di un accendino o altro. In sintesi, questo elemento consente il raggiungimento della temperatura di accensione del combustibile (Vancetti, 2022).

Questi tre elementi, ovvero combustibile, comburente e innesco, devono essere presenti nello stesso momento; al contrario, in assenza di uno di essi, non si ha la combustione, pertanto non inizia il processo oppure, se la reazione è in corso, questa si interrompe. Proprio sulla base di questo concetto appena espresso si fonda il meccanismo di spegnimento di molti sistemi (Vancetti, 2022).

La combustione, in particolare quando coinvolge materiali solidi, è spesso associata al processo di pirolisi. Quest'ultimo rappresenta una trasformazione termochimica di decomposizione, caratterizzata dalla degradazione progressiva del materiale esposto al calore in condizioni di assenza di ossidanti, tipicamente l'ossigeno.

A differenza della combustione, che richiede la presenza di un agente ossidante, la pirolisi si basa sulla rottura dei legami chimici originari, generando molecole più semplici. Nello specifico, tale scissione avviene attraverso un processo di omolisi<sup>3</sup> termicamente indotta, dove il calore fornito è utilizzato per rompere i legami molecolari. La decomposizione, inizialmente superficiale, avanza gradualmente verso l'interno del materiale combustibile. Durante questa fase, vengono rilasciate sostanze volatili, le quali possono successivamente partecipare alla combustione vera e propria, contribuendo così alla completa eliminazione della sostanza.

Questo meccanismo, che integra fenomeni di pirolisi e combustione, evidenzia la complessa interazione tra la degradazione termica e i processi ossidativi nelle reazioni che coinvolgono materiali solidi (Perero, 2024).

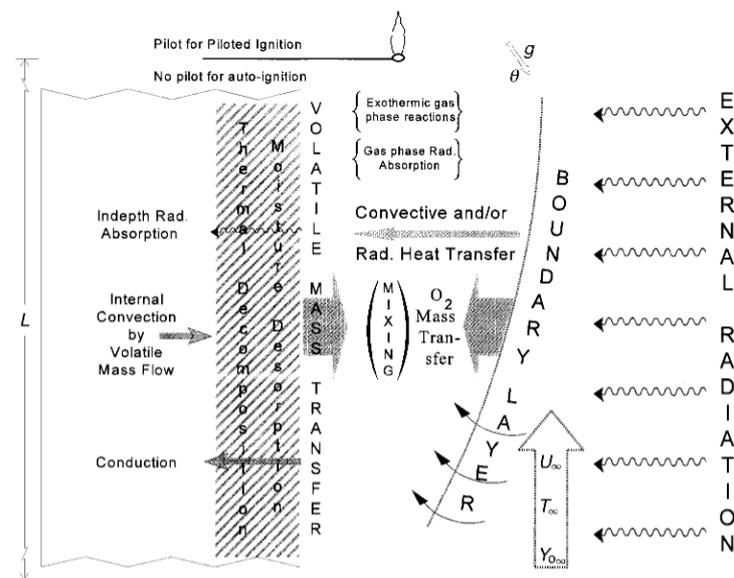


Figura 1.2: I principali processi chimici e fisici che si verificano durante l'accensione (Atreya, 1998, pag. 2792)

Sebbene sia la protagonista del fenomeno incendio, la combustione non è riducibile solo ai tre elementi del triangolo del fuoco poiché l'incendio in sé è un fenomeno molto complesso.

Innanzitutto, i parametri che determinano l'andamento di un incendio sono sostanzialmente riconducibili alle proprietà dei materiali costituenti gli oggetti coinvolti, nello specifico: del calore specifico, della conduttività termica, del calore di combustione, della densità e di conseguenza del grado di compattazione del materiale, dei gas e dei fumi che si possono generare in seguito alla combustione del materiale stesso, del calore latente di fusione o di altri cambiamenti di stato (Micunco, 2022).

<sup>3</sup> L'omolisi è la rottura di un legame covalente in cui ciascun atomo coinvolto nel legame trattiene un elettrone, formando due radicali liberi. Questo processo avviene generalmente in presenza di calore, luce o agenti chimici che forniscono energia sufficiente a rompere il legame in modo simmetrico.

In generale, la combustione dipende dal potere calorifico del materiale combustibile o di tutti quelli coinvolti nel processo, il quale è definito come la

*«quantità di calore (espresso in kcal o in milioni di joule, MJ) sviluppata dalla combustione di una quantità unitaria di combustibile (espressa in kg per i combustibili solidi e liquidi, per i gas in metri o in decimetri cubici misurati in condizioni normali, cioè a pressione atmosferica e a 0°C)» (Vancetti, 2022).*

In particolare, esistono due poteri calorifici: il potere calorifico superiore e inferiore. Il potere calorifico superiore include tutta l'energia liberata dalla combustione, compreso il calore di condensazione del vapore acqueo; mentre il potere calorifico inferiore esclude questo calore, considerando il vapore acqueo come gas. Per questo motivo il potere calorifico inferiore viene calcolato sottraendo al potere calorifico superiore il calore di vaporizzazione dell'acqua che si genera durante la combustione (Vancetti, 2022).

Altre variabili da considerare sono la temperatura teorica di combustione e l'aria teorica necessaria affinché avvenga la combustione (Vancetti, 2022).

Per far avvenire il processo, si devono verificare contemporaneamente le seguenti condizioni:

- contatto tra combustibile e comburente;
- concentrazioni di combustibile e comburente adatte, ossia comprese entro un determinato intervallo, detto intervallo di infiammabilità;
- temperatura superiore ad un valore minimo, caratteristico di ogni sostanza, detta temperatura di accensione o temperatura di autoaccensione.

Su quest'ultimo punto, è importante fare una distinzione tra le due temperature citate, in particolare sulle loro definizioni. La temperatura di accensione è la temperatura minima alla quale un combustibile brucia senza necessariamente innescare in presenza di ossigeno, o meglio una volta che il materiale prende fuoco continua il processo senza ulteriore apporto di calore dall'esterno. Questa temperatura può cambiare a seconda della natura del materiale, del suo stato, del rapporto tra combustibile e comburente, e così via. Al contrario, la temperatura di autoaccensione è la temperatura minima alla quale deve essere sottoposta una sostanza combustibile per fare in modo che si accenda spontaneamente, ovvero senza innescare. Si noti che, poi, l'autoaccensione è differente dall'autocombustione: essa, al contrario, è una lenta reazione di ossidazione o un processo di fermentazione con produzione di calore, una "distillazione", un fenomeno lento che porta man mano la sostanza a prendere fuoco e consumarsi, originando un vero e proprio incendio (Vancetti, 2022).

Per far sì che una reazione di combustione abbia inizio, è indispensabile fornire una quantità di energia sufficiente ad attivare il processo. Anche in condizioni ottimali di pressione e concentrazione, due sostanze compatibili non reagiscono spontaneamente a meno che non venga raggiunta, per un intervallo di tempo adeguato, una temperatura minima in grado di

attivare le molecole nelle loro immediate vicinanze. In termini chimico-fisici, questo principio è definito come energia di attivazione, ossia l'energia necessaria per consentire l'avvio della combustione (Vancetti, 2022).

Le modalità di accensione possono essere per via diretta, indiretta, per attrito e per autocombustione: l'accensione diretta si verifica quando un materiale combustibile, in presenza di ossigeno, entra in contatto diretto con una fiamma, una scintilla o un elemento incandescente; l'accensione indiretta avviene attraverso il trasferimento di calore, vale a dire mediante convezione, conduzione o irraggiamento termico; nel caso dell'accensione per attrito, invece, il calore necessario all'innesco viene generato dallo sfregamento tra due materiali; infine, l'autocombustione si manifesta quando il calore si sviluppa all'interno del materiale stesso, senza il coinvolgimento di sorgenti esterne (Micunco, 2022).

I prodotti della combustione comprendono fumo, gas, fiamme e calore; in particolare, i primi due risultano essere i più pericolosi.

Il fumo è una sospensione di particelle solide o liquide, costituite da residui di combustibile non completamente bruciato o da prodotti condensati della combustione. Questo rappresenta un rischio considerevole, in quanto oscura la visibilità, irrita gli occhi e le mucose e può causare disorientamento alle persone durante l'esodo. Rispetto ai gas, il fumo si distingue per la sua composizione, poiché è costituito da particelle solide finissime, prevalentemente catrami, carbonio e altre sostanze incombuste. Tali particelle, trascinate dai gas prodotti dalla combustione, invadono rapidamente gli ambienti, rendendoli inospitali per gli occupanti; tuttavia, anche in spazi aperti, l'effetto irritante del fumo rimane un pericolo concreto, comparabile a quello dei gas tossici.

Invece, i gas di combustione sono i prodotti che rimangono allo stato gassoso anche dopo essersi raffreddati a temperatura ambiente (circa 15°C). La loro composizione dipende dalla natura chimica sia del combustibile che del comburente, dalla quantità di ossigeno disponibile e dalle temperature raggiunte durante il processo di combustione. A livello chimico, le molecole di ossigeno si combinano con gli atomi del combustibile, come il carbonio, generando ossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e, in alcuni casi, composti più complessi potenzialmente dannosi per la salute umana. Nonostante spesso vengano trascurati, i gas tossici rappresentano la principale causa di decessi in caso di incendio, superando persino i pericoli derivanti dalle fiamme stesse.

La tipologia dei gas prodotti in un incendio varia a seconda del materiale che brucia. Sebbene non sia possibile fornire una lista universale, tra i gas più comuni si annoverano l'ossido di carbonio, l'acido cloridrico e l'acido nitrico, tutti in grado di esercitare effetti irritanti o asfissianti sull'organismo umano (Vancetti, 2022).

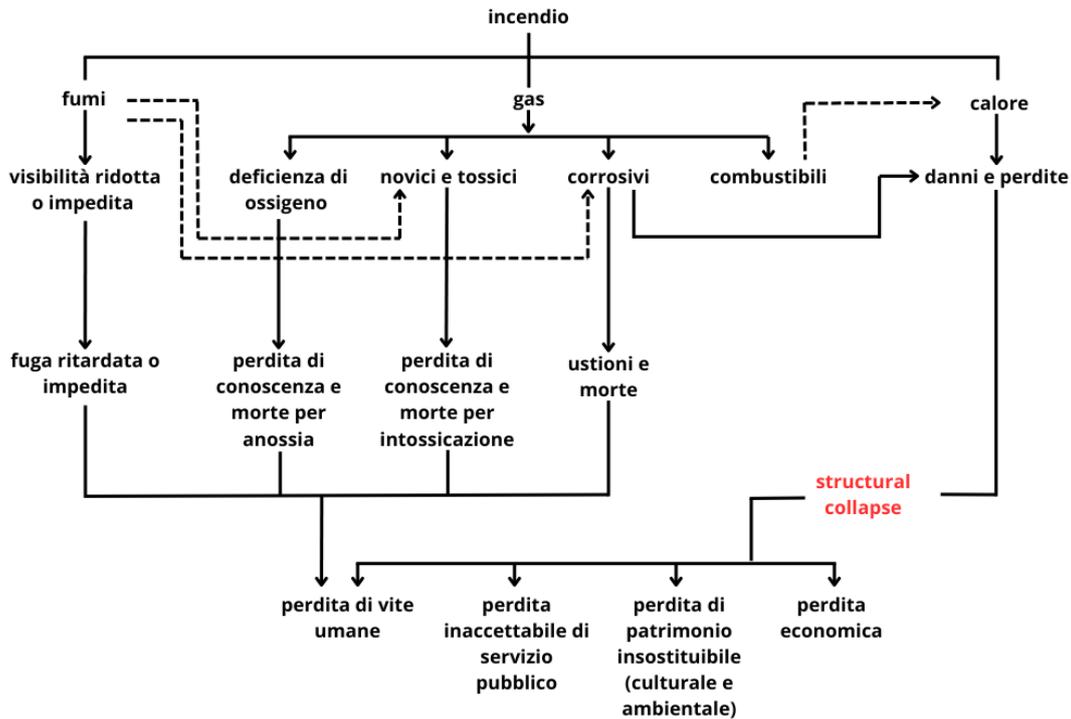


Figura 1.3: Schema sui prodotti di combustione e sui loro effetti (Vancetti, 2022)

Oltre ai gas e al fumo, tra i prodotti della combustione vi sono anche braci, ceneri e sostanze ad alta temperatura. I gas rivestono un ruolo cruciale nella propagazione dell'incendio, poiché l'innesco avviene spesso in fase gassosa. Anche i fumi contribuiscono a tale propagazione, essendo composti da residui carboniosi sospesi nell'aria, derivanti dalla parte incombustibile dei materiali o dalla loro combustione parziale. La pericolosità di gas e fumi è accentuata dalla loro capacità di diffondersi rapidamente attraverso le aperture di un edificio, causando gravi rischi per la salute degli occupanti. Tra le conseguenze più comuni vi sono l'asfissia per mancanza di ossigeno, l'intossicazione dovuta alla natura tossica dei gas e la riduzione della visibilità, che può compromettere la possibilità di individuare i percorsi di fuga (Micunco, 2022).

#### 1.4. Lo sviluppo di un incendio

L'evoluzione di un incendio è contraddistinta da quattro fasi caratteristiche:

- 1) ignizione;
- 2) crescita o propagazione;
- 3) incendio completamente sviluppato (flashover);
- 4) decadimento o estinzione.

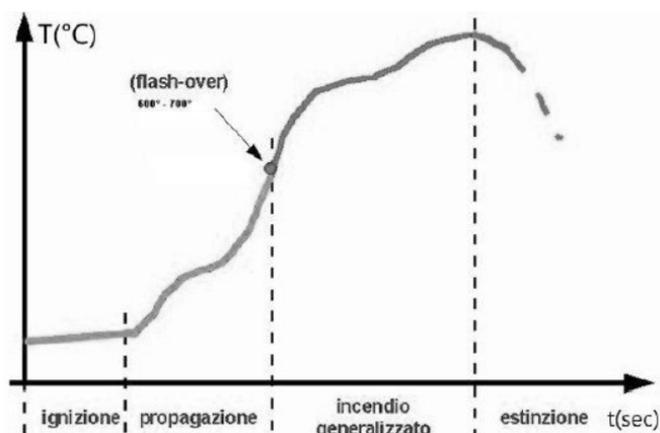


Figura 1.4: Curva temperatura-tempo (Vancetti, 2022)

Durante l'ignizione prende avvio il processo di combustione nel quale una sorgente esterna agisce sul combustibile per un determinato intervallo di tempo e, qualora tale sorgente rilasci un quantitativo di energia sufficiente, il combustibile viene riscaldato fino a raggiungere la propria temperatura di accensione; successivamente, la combustione della sostanza procede in autonomia, alimentata soltanto dal calore generato dal processo stesso. Tale fenomeno è regolato prevalentemente dal bilancio termico associato alla reazione<sup>4</sup>.

Segue la fase di crescita o propagazione, durante la quale l'incendio si sviluppa inizialmente in funzione del combustibile e successivamente in base alla ventilazione, ossia alla disponibilità di comburente (aria o ossigeno) necessario per alimentare il processo. Subito dopo la stabilizzazione della reazione di combustione, l'incendio tende a propagarsi rapidamente, accompagnato da un marcato aumento della temperatura dell'ambiente circostante. Nelle fasi iniziali successive all'ignizione, lo sviluppo dell'incendio è determinato principalmente dalle condizioni del combustibile disponibile, senza essere influenzato in modo significativo dalle caratteristiche di ventilazione. Durante questa fase, la temperatura media dell'ambiente rimane relativamente bassa, un effetto attribuibile anche alla diluizione dei gas caldi con l'aria fredda ancora presente. Si possono osservare l'emissione di fumi, con un conseguente marcato abbattimento della visibilità, l'emissione di gas tossici, irritanti e corrosivi, oltre a un significativo aumento della velocità di combustione, che generalmente presenta un andamento di tipo quadratico<sup>5</sup>.

Quando si raggiunge il punto di *flashover*, l'incendio è pienamente sviluppato: questo vuol dire che l'intera quantità di combustibile presente sta partecipando al processo di combustione (Vancetti, 2022).

<sup>4</sup> Si veda il par. 1.5.

<sup>5</sup> Si rimanda alla lettura del par. 1.4.1.

Si riporta la definizione di flashover del NFPA 101 – Life Safety Code:

*«Una fase dello sviluppo di un incendio al chiuso nel quale tutte le superfici esposte raggiungono la temperatura di accensione più o meno contemporaneamente e il fuoco si propaga rapidamente a tutto il compartimento».*

In generale, il punto di flashover si associa ad una temperatura ambientale uniforme che si aggira tra i 500°C e i 600°C (Micunco, 2022); tuttavia, come è possibile notare nella figura precedente, la temperatura associata al flashover può essere anche di 600-700°C (Vancetti, 2022).

*«Una precisa definizione del momento in cui si verifica il flashover non è strettamente possibile» (Ayr et al., 2015, pag. 3).*

Questa transizione può avvenire anche molto rapidamente e rappresenta uno stato irreversibile; quindi, la possibilità che l'incendio venga estinto o si possa estinguere da solo è davvero molto minima poiché questo risulta incontrollato e la situazione ha ormai raggiunto il massimo livello di criticità. Infatti, quando si è superato tale punto di non-ritorno, le operazioni di soccorso cessano.

Il flashover è il punto di flesso della funzione sulla curva temperatura-tempo e si può notare graficamente il passaggio dalla fase di ignizione a quella di incendio pienamente sviluppato, anche detto *incendio generalizzato* (Vancetti, 2022). Si riporta un'altra rappresentazione simile alla precedente, dove è possibile apprezzare in maniera più immediata i concetti appena esposti:

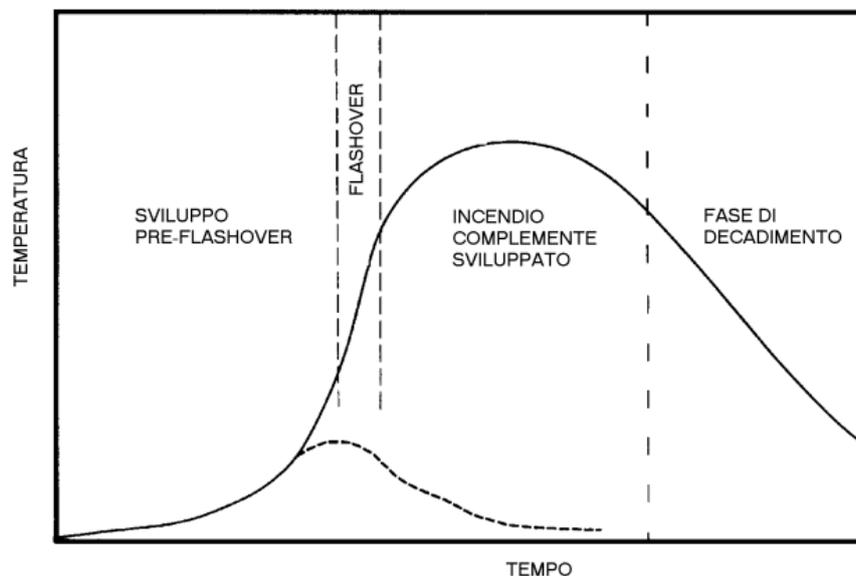


Figura 1.5: Curva temperatura-tempo, sviluppo di un incendio (Ayr et al., 2015, pag. 2)

Anche in questo caso, oltre alle fasi di sviluppo di un incendio, viene mostrato anche l'andamento del fenomeno in assenza di flashover, rappresentato dalla linea tratteggiata.

Nella fase di incendio generalizzato, gli effetti che si possono apprezzare sono un ulteriore aumento della velocità di combustione, un elevato tasso di rilascio di calore, con

conseguente aumento anche della temperatura, e un incremento nella produzione di fumi e gas, ossia i principali prodotti della combustione (Vancetti, 2022).

Una volta che l'incendio risulta pienamente sviluppato, la velocità di combustione è massima e si ha una forte turbolenza causata dai gas prodotti, sicché la temperatura interna alla struttura non è più uniforme, ma anzi soffitto e parti alte delle pareti hanno sicuramente temperature più elevate; oltre a ciò, le fiamme tendono a fuoriuscire da porte e finestre e la temperatura dell'incendio è assimilata alla temperatura media dei gas (Vancetti, 2023).

Infine, la fase di decadimento o estinzione segna il graduale esaurimento del combustibile residuo (Vancetti, 2022). In verità, bisogna specificare che il decadimento può verificarsi anche per carenza di comburente, cioè di ossigeno, oppure se viene effettuata un'operazione di estinzione (Vancetti, 2023). In particolare, in questo stadio l'emissione di calore da parte dell'incendio si riduce progressivamente, portando a una diminuzione dell'intensità fino allo spegnimento completo. L'incendio può essere considerato definitivamente estinto quando la temperatura ambientale scende al di sotto dei 300°C, condizione che consente di escludere con ragionevole certezza eventuali riaccensioni o riprese del fuoco (Vancetti, 2022).

Invero, sperimentalmente si osserva che questa fase di estinzione incomincia nel momento in cui la temperatura media in ambiente raggiunge l'80% del valore massimo raggiunto in precedenza. Tra l'altro, essa si giudica conclusa una volta che la temperatura risulta inferiore ai 200°C, poiché si esclude la possibilità di un nuovo innesco (Vancetti, 2023).

Si possono, quindi, distinguere due fasi: una che precede il flashover e una che segue questo momento. Come è già stato ampiamente detto all'inizio<sup>6</sup>, la sicurezza antincendio ha come obiettivi la salvaguardia della vita umana, dei beni e dell'ambiente: nella fase di pre-flashover si può operare nella progettazione antincendio nell'ottica di salvaguardia della vita umana (*Life Safety*); mentre post-flashover si può operare nell'ottica della salvaguardia dei beni e degli edifici (*Structural Safety*). Nel primo caso, si può intervenire con strategie di protezione attiva; invece, nel secondo caso, si raccomanda la protezione passiva per contenere gli effetti dell'incendio ormai avvenuto (Vancetti, 2023).

*«Per protezione attiva si intendono tutti quei dispositivi che, in caso di incendio, svolgono un ruolo attivo nell'estinzione dell'incendio stesso, come sprinklers, estintori, evacuatori di fumo e calore, cioè tutti quei sistemi che necessitano l'intervento o di un impianto o di un operatore affinché questi funzionino. Per protezione passiva, invece, (...) si intendono tutte quelle misure che fanno in modo che l'incendio abbia difficoltà a propagarsi» (Micunco, 2022, pag. 36).*

---

<sup>6</sup> Si veda il par. 1.1.

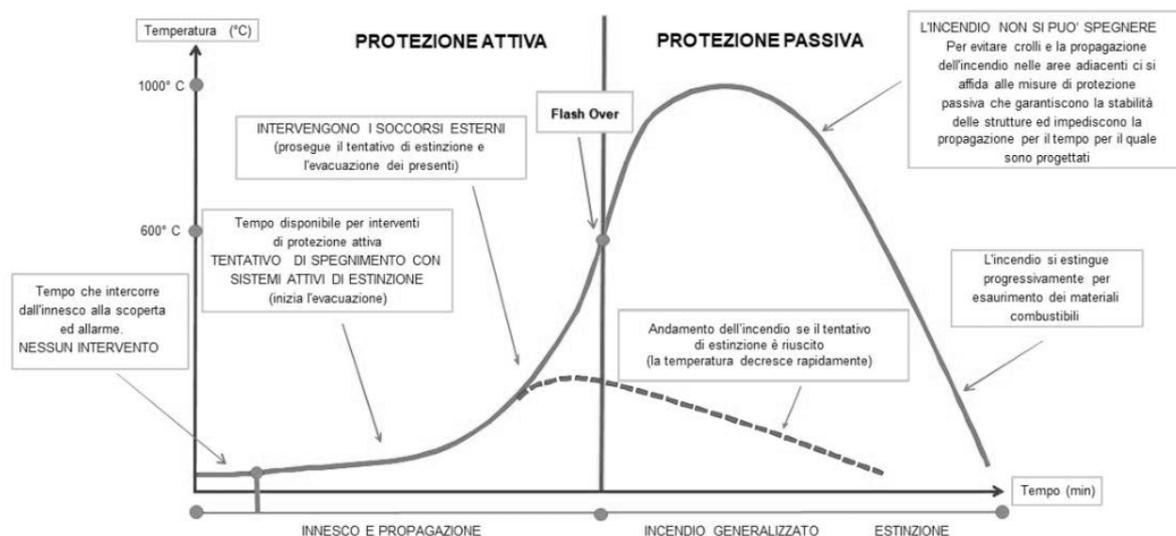


Figura 1.6: Andamento temperatura-tempo e flashover (Minoia, 2022, pag. 7)

In generale, si definiscono le curve temperatura-tempo e potenza-tempo.

Le prime, già mostrate in precedenza (si vedano Figura 1.4, Figura 1.5 e Figura 1.6), permettono di tracciare l'andamento delle temperature dei gas di combustione e, quindi, dell'incendio in un certo punto, o intorno al sistema che si sta analizzando, nel periodo temporale in cui si verifica il fenomeno. In altre parole, queste curve forniscono una serie di fotogrammi dell'andamento delle temperature, istante per istante. Questi andamenti permettono di identificare graficamente la fase di ignizione e il punto di flashover, come si può apprezzare nelle immagini precedenti.

Le seconde curve, invece, sono molto utili per la quantificazione degli effetti dell'incendio e, dunque, per le modellazioni di incendio. Infatti, questi andamenti esprimono la potenza termica rilasciata dall'incendio in funzione del tempo. Una curva di questo tipo viene, perciò, denominata Rate of Heat Release (RHR) o anche detta Heat Release Rate (HRR). In particolare, questa risulta essere una rappresentazione matematica sufficientemente semplice dell'incendio naturale; in altre parole, fornisce una funzione analitica, definita e continua a tratti, in cui è possibile identificare diverse condizioni fisiche prevedibili, come ad esempio la fase di crescita, eventuale flashover, una fase di stazionarietà e, infine, il decadimento (Vancetti, 2022).

Si veda il seguente confronto tra le curve temperatura-tempo e le curve potenza-tempo: la prima immagine, Figura 1.7, è identica a quella già mostrata in precedenza (Figura 1.4); mentre la seconda, Figura 1.8, mostra lo stesso incendio evidenziando, con l'uso dei colori, le stesse fasi e individuando una fase di stazionarietà.

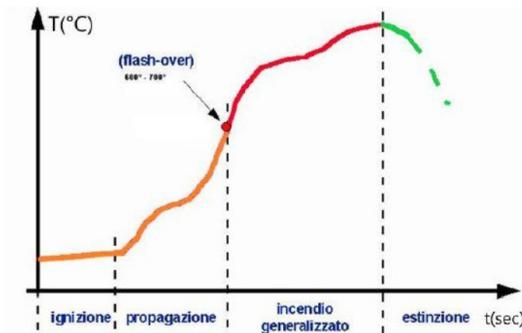


Figura 1.7: Curva di incendio naturale (Calabrese, 2018)

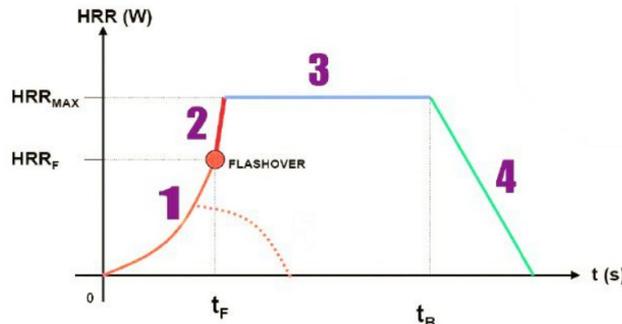


Figura 1.8: Potenza termica nel tempo (Calabrese, 2018)

Si noti che la fase stazionaria coincide con il momento in cui l'incendio risulta pienamente sviluppato e la velocità di combustione è massima.

Come si può notare dalla Figura 1.8, la curva RHR è caratterizzata da tre tratti: un primo tratto di crescita parabolica, un secondo di fase intermedia stazionaria e, infine, un tratto finale lineare<sup>7</sup>. In generale, queste tre fasi riflettono l'andamento di un incendio che si sviluppa al chiuso, tendenzialmente guidato dalla ventilazione, in cui la prima fase, quella pre-flashover, risulta appunto di tipo quadratico<sup>8</sup>.

La curva RHR è la *carta d'identità* dell'incendio ed è il dato di input nelle simulazioni effettuate con i software di modellazione di incendio. Infatti, i dati che si vogliono analizzare, normalmente temperatura massima e portata di fumo e gas nocivi, sono quantità che non dipendono dal calore che può svilupparsi, ma sono correlati alla potenza termica rilasciata. Questo dato rivela la rapidità con la quale l'energia termica viene rilasciata (Vancetti, 2022).

In generale, la funzione della curva RHR è descritta dalla seguente relazione:

$$RHR(t) = m_c(t) H \quad (1.1)$$

dove  $m_c(t)$  è la velocità di combustione in kg/s, mentre  $H$  è il potere calorifico espresso in kJ/kg.

<sup>7</sup> Si veda il par. 1.4.1.

<sup>8</sup> Idem.

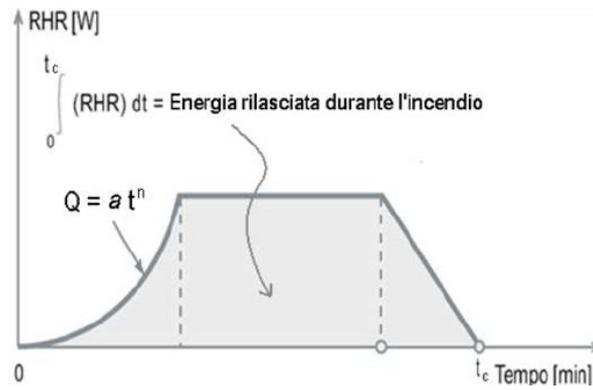


Figura 1.9: Area sottesa dalla curva RHR (Vancetti, 2022)

L'area sottesa dalla curva è l'energia rilasciata durante l'incendio, ossia il carico di incendio  $E_{tot}$ , definito dalla seguente relazione:

$$E_{tot} = \int_{t_0}^{t_c} RHR(t) dt \quad (1.2)$$

Il tempo iniziale, tendenzialmente, vale:

$$t_0 = 0 s \quad (1.3)$$

Tuttavia, la relazione continua ad essere valida in generale, anche per intervalli di tempo diversi. Quindi, se si vuole determinare l'energia rilasciata dal tempo iniziale  $t_0$  fino ad un generico istante di tempo  $t$ , la relazione vale:

$$E = \int_{t_0}^t RHR(t) dt \quad (1.4)$$

Invero, bisogna distinguere tra carico di incendio, citato in precedenza, e curva RHR. Il carico di incendio è il

*«potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretto in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali» (Vancetti, 2022).*

Pertanto, corrisponde all'energia che può essere rilasciata complessivamente da tutti i materiali combustibili presenti durante l'incendio. Questa quantità viene espressa in MJ e, per convenzione, 1 MJ corrisponde all'energia sviluppata da 0,057 kg di massa di legna equivalente (Vancetti, 2022).

Si fa una distinzione in più, ossia esistono due carichi di incendio: quello specifico e quello specifico di progetto. Il primo è riferito all'unità di superficie lorda espresso in MJ/m<sup>2</sup>, mentre il secondo è lo stesso corretto tramite alcuni parametri legati al rischio incendio e alle misure antincendio adottate.

Il carico di incendio specifico di progetto si determina applicando la seguente formula:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n q_f \quad (1.5)$$

dove:

- $\delta_{q1}$  è un fattore che tiene conto del rischio incendio correlato alla superficie lorda del compartimento;
- $\delta_{q2}$  è un fattore che tiene in conto sempre il rischio incendio, ma in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento (vi sono tre livelli di pericolosità);
- $\delta_n = \prod_i \delta_{n,i}$  è un parametro che considera le differenti misure antincendio adottate per il compartimento;
- $q_f$  è il valore nominale del carico di incendio specifico.

Per il calcolo si rimanda al capitolo S.2.9 del Codice di prevenzione incendi.

Per  $q_f$  esistono tre approcci per la sua stima: la stima statistica, quella orientativa del valore e quella analitica. Con il primo metodo, si determina  $q_f$  tramite una valutazione di tipo statistico ammettendo valori con probabilità di superamento minore al 20%, ossia valori corrispondenti al frattile 80%, poiché

*«il frattile 80% è il valore che statisticamente ha la probabilità di essere superato nel 20% dei casi» (Vancetti, 2022).*

I valori di  $q$  riportati in letteratura sono ottenuti sperimentalmente e rappresentano, di norma, valori medi. Per calcolare il frattile 80% bisogna moltiplicare il valore medio per un coefficiente amplificativo, facendo una distinzione tra attività con variabilità molto limitate per mobili o merci in deposito, quali ad esempio abitazioni, alberghi, ospedali, uffici e scuole, e attività con variabilità maggiori per mobili o merci in deposito, quali centri commerciali, grandi magazzini, attività industriali.

Vi è una tabella in appendice E dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2, nella quale è possibile trovare  $q_f$  per differenti destinazioni d'uso<sup>9</sup>.

Attività	Valore medio [MJ/m <sup>2</sup> ]	Frattile 80% [MJ/m <sup>2</sup> ]
Civili abitazioni	780	948
Ospedali (stanza)	230	280
Alberghi (stanza)	310	377
Biblioteche	1500	1824
Uffici	420	511
Scuole	285	347
Centri commerciali	600	730
Teatri (cinema)	300	365
Trasporti (spazio pubblico)	100	122

Tabella 1.1: Tabella E.4 (UNI EN 1991-1-2)

<sup>9</sup> Si ritrova la stessa tabella nel Codice di prevenzione incendi, infatti si veda tabella S.2-10.

Il secondo metodo di stima di  $q_f$ , invece, consiste nel determinare un valore orientativo per una combinazione di arredi e/o merci contenuti nel compartimento, dove si ha un valore di  $q_f$  per ciascun elemento di arredo.

Infine, il terzo approccio consiste nel calcolo analitico, in cui si sommano tutti i carichi di incendio, seguendo questa formula:

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^n g_i H_i m_i \psi_i}{A} \quad (1.6)$$

dove:

- $g_i$  è la massa dell' $i$ -esimo materiale combustibile in kg;
- $H_i$  è il potere calorifico inferiore dell' $i$ -esimo materiale combustibile in MJ/kg;
- $m_i$  è il fattore di partecipazione alla combustione dell' $i$ -esimo materiale combustibile, pari a:
  - 0,80 per il legno e altri materiali di natura cellulosica,
  - 1,00 per tutti gli altri materiali combustibili;
- $\psi_i$  è il 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 per un tempo congruente con la classe di resistenza al fuoco e comunque classe minima almeno EI 15,
  - 0,85 per i materiali contenuti in contenitori non combustibili, che conservano la loro integrità durante l'esposizione all'incendio e non appositamente progettati per resistere al fuoco;
- $A$  è la superficie lorda del piano del compartimento o, nel caso degli incendi localizzati, superficie lorda effettiva di distribuzione del carico di incendio, espressa in m<sup>2</sup>.

Sebbene siano due concetti affini, esiste una notevole differenza tra RHR e carico d'incendio: infatti, il primo concerne il rilascio di una potenza termica, un termine intrinsecamente connesso allo sviluppo dell'incendio; al contrario, il secondo indica un'energia rilasciata senza alcun riferimento al tempo. In altre parole, quando si adotta il carico di incendio, si suppone che tutto il materiale combustibile presente nell'ambiente possa prendere parte all'incendio e, per tale motivo, questo approccio si ritiene di tipo conservativo. Invece, adottare la curva RHR implica che man mano il materiale prende fuoco e brucia nel tempo, rilasciando via via energia; pertanto, la combustione avrà un'evoluzione e il processo seguirà uno sviluppo. Tale energia, che corrisponde all'area sottesa dalla curva (si veda la Figura 1.9), può coincidere con il carico d'incendio. Bisogna ricordarsi, però, che questo è vero solo una volta che si guarda il fenomeno nel suo complesso, quindi considerando il suo pieno sviluppo. In conclusione, se l'obiettivo è fare delle analisi pre-flashover è opportuno impiegare la curva RHR; al contrario, per analisi post-flashover, si può utilizzare la stima del carico d'incendio (Vancetti, 2022).

Tornando agli andamenti iniziali (si veda ad esempio la Figura 1.7), le curve di incendio esprimono l'andamento della temperatura dei gas di combustione nell'intorno della superficie degli oggetti in funzione del tempo. Eppure, per gli elementi strutturali è indispensabile eseguire analisi termiche e occorre valutarne la resistenza al fuoco. In altre parole, la struttura deve avere sufficiente resistenza meccanica per un determinato intervallo di tempo a seconda, appunto, della sua classe di resistenza al fuoco. Per fare ciò, secondo la normativa europea, si possono seguire due strade: la prima prevede un approccio prestazionale, in cui si adottano le curve d'incendio naturali, le prime citate all'inizio; la seconda strada, bensì, prevede l'adozione di curve dette nominali, seguendo così un approccio di tipo convenzionale.

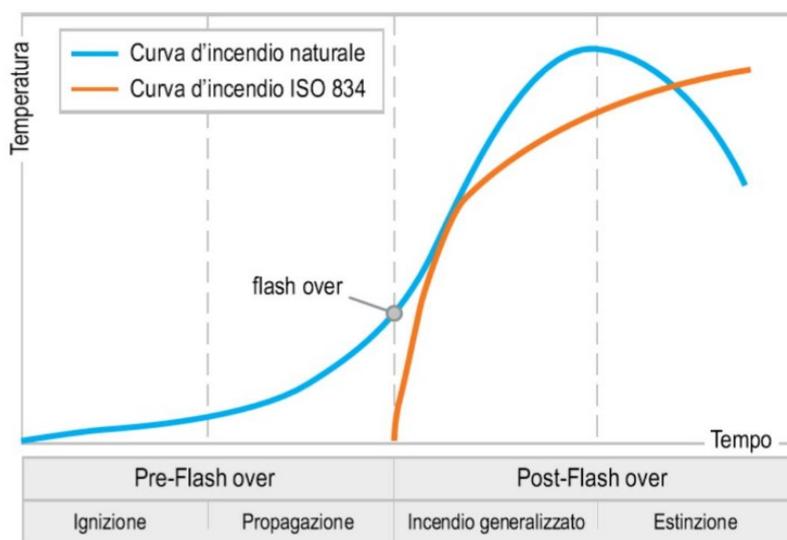


Figura 1.10: Confronto tra le curve d'incendio naturali e nominali (Micunco, 2022, pag. 36)

Queste curve, a differenza delle naturali, semplificano il fenomeno incendio perché non considerano le fasi di innesco, propagazione e spegnimento. In altre parole, rappresentano la fase post-flashover di incendio pienamente sviluppato.

In Europa, si utilizzano in particolare per prove standard sui materiali, poiché sono facilmente realizzabili in laboratorio.

Tuttavia, in genere le curve nominali sono poco aderenti alla realtà, per via del loro andamento strettamente crescente e della loro non-influenza dalla distribuzione dei materiali combustibili nell'ambiente. Infatti, queste curve delineano l'involuppo di tutte le possibili condizioni di incendio nel compartimento (Vancetti, 2022).

Vi sono tre possibili leggi di variazione delle temperature: la curva nominale standard, la curva nominale da idrocarburi e la curva d'incendio esterno.

La prima curva, la curva nominale standard, introdotta dalla norma ISO 834, si adotta in caso di incendi di materiali combustibili in prevalenza di natura cellulosa e segue la legge:

$$\theta = 20 + 345 \log(8 t + 1)$$

(1.7)

dove:

- $\theta$  è la temperatura dei gas caldi in °C;
- $t$  è il tempo espresso in min.

La curva nominale da idrocarburi, invece, si utilizza per incendi di idrocarburi o sostanze con velocità di rilascio termico simile e la sua formula analitica è la seguente:

$$\theta = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}) + 20 \quad (1.8)$$

Infine, la curva d'incendio esterno si impiega per il progetto di elementi strutturali posti al di fuori dell'edificio colpito da incendio, supponendo che tali elementi si trovino a temperature inferiori rispetto a quelle interne alla struttura. Questa curva si descrive con la seguente funzione:

$$\theta = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20 \quad (1.9)$$

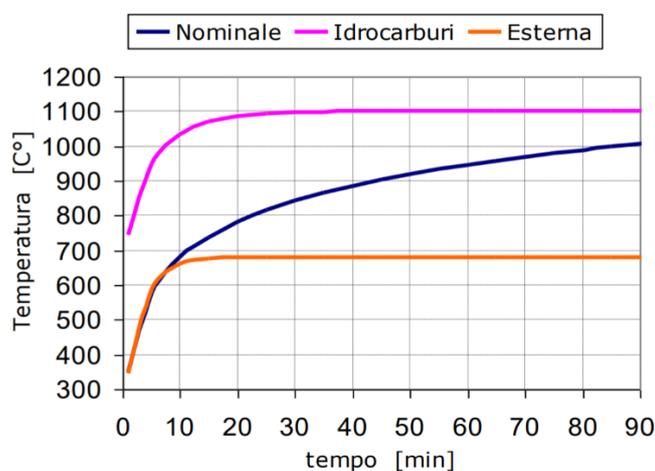


Figura 1.11: Le differenti curve nominali (Vancetti, 2022)

### 1.4.1. La curva RHR

Tornando ora alla curva RHR, essa è una funzione definita a tratti e si riporta nuovamente il suo andamento nella figura seguente.

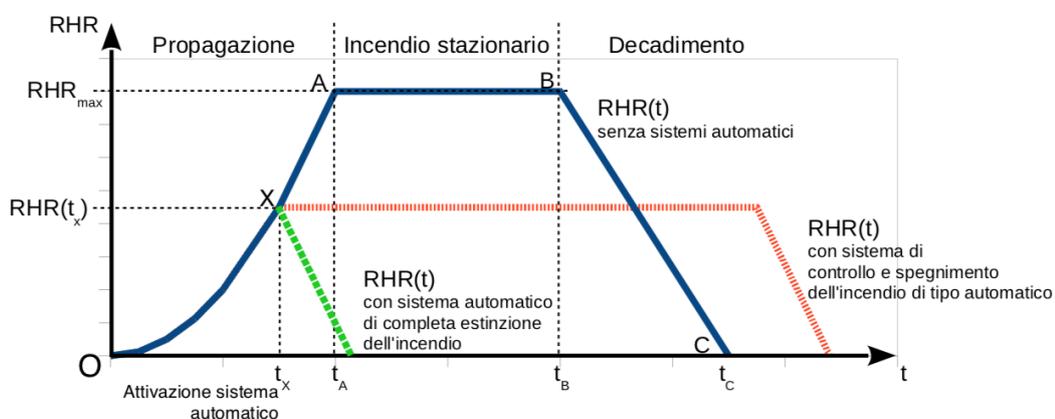


Figura 1.12: Curva RHR o HRR (Vancetti, 2023)

### **La fase di propagazione**

La prima fase di propagazione è rappresentata da un tratto di crescita parabolica e l'equazione della funzione è la seguente:

$$RHR(t) = 1000 \frac{t^2}{t_\alpha^2} \text{ per } t < t_A \quad (1.10)$$

dove:

- $RHR(t)$  è la potenza termica rilasciata dall'incendio espressa in kW;
- $t$  è il tempo in secondi (s);
- $t_\alpha$  è il tempo, sempre in secondi (s), necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga 1000 kW.

La pezzatura del materiale combustibile, la modalità di deposito di tale materiale e la sua distribuzione nell'ambiente sono i fattori che maggiormente influenzano questa prima fase, in particolare incidendo su  $t_\alpha$  (Vancetti, 2023).

### **La fase di crescita parabolica**

Riprendendo la prima formulazione della curva RHR, è possibile scrivere per il primo tratto parabolico:

$$RHR(t) = m_c(t) H = \alpha t^2 \quad (1.11)$$

Il Codice di prevenzione incendi, nel capitolo G.3, utilizza il termine  $t_\alpha$  per classificare in quattro categorie la velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio, ossia in lenta, media, rapida e ultra rapida<sup>10</sup>.

Velocità	$t_\alpha$ [s]	$\alpha = \frac{1000}{t_\alpha^2}$ [kW/s <sup>2</sup> ]
Ultrarapida	75	0,1778
Rapida	150	0,0444
Media	300	0,0111
Lenta	600	0,0028

Tabella 1.2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio (Vancetti, 2022)

La distinzione tra velocità di crescita è possibile apprezzarla graficamente nella figura successiva.

---

<sup>10</sup> Si veda la tabella G.3-2 del Codice.

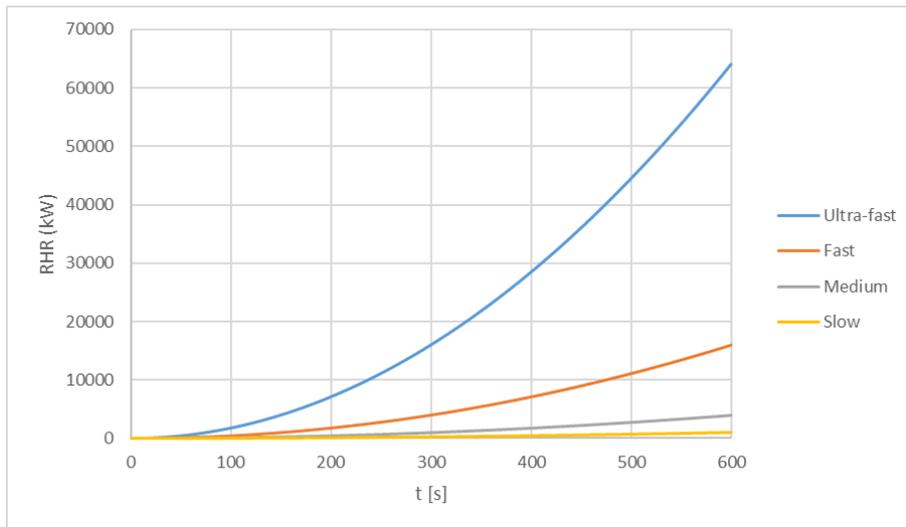


Figura 1.13: Sviluppi distinti per differenti velocità di crescita (Vancetti, 2022)

Quindi, la pendenza della funzione è indice della velocità di crescita: maggiore è la pendenza, maggiore sarà la velocità di crescita, e viceversa.

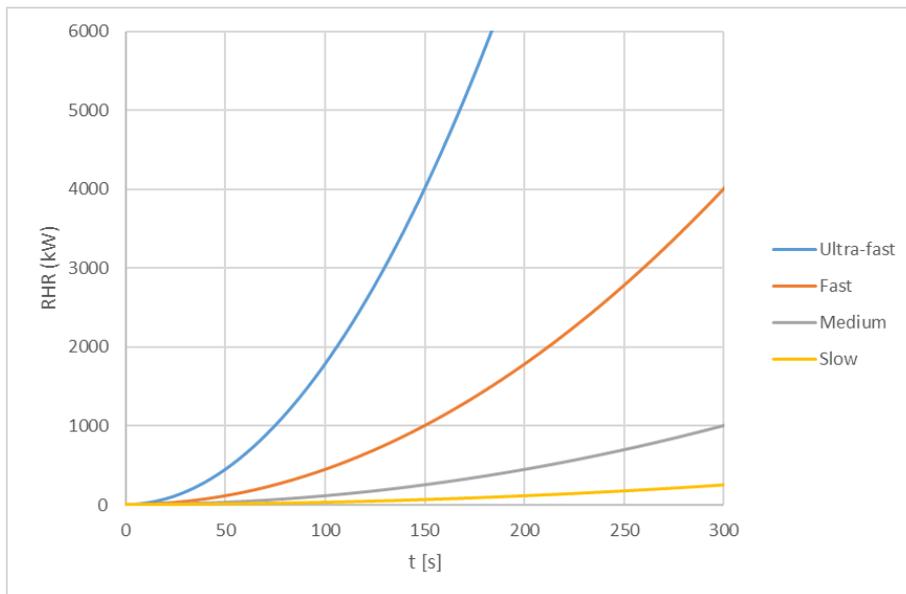


Figura 1.14: Differenti velocità di crescita entro i 300 s (Vancetti, 2022)

In questa figura, risulta ancora più marcata ed evidente la diversa velocità prevalente di crescita (Vancetti, 2023).

Per il tempo  $t_\alpha$  e la velocità di crescita, si può anche fare riferimento nuovamente all'appendice E dell'Eurocodice 1, ossia alla seguente tabella:

Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	$t_\alpha$ [s]	$RHR(t)$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250

Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	$t_\alpha$ [s]	$RHR(t)$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Tabella 1.3: Tabella E.5 (UNI EN 1991-1-2)

Per tutte le altre attività, si possono individuare tali informazioni ricavandole sperimentalmente, quindi effettuando prove, oppure da eventi che si sono verificati nella realtà, pertanto tramite ricerche, ottenendo così dati certi, concreti e affidabili (De Trizio, 2024).

### **La fase intermedia stazionaria**

Supponendo di essere in assenza di sistemi di spegnimento, la fase di propagazione e crescita raggiunge il flashover, prosegue con andamento parabolico anche post-flashover e si conclude quando si raggiunge il tempo  $t_A$ , che corrisponde al picco massimo  $RHR_{max}$  di potenza termica rilasciata dall'incendio. Ottenuto  $RHR_{max}$ , si determina  $t_A$  con la seguente formula:

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}} \quad (1.12)$$

Raggiunto  $t_A$  termina la prima fase e segue la fase intermedia stazionaria, in cui la potenza rimane costante pari a  $RHR_{max}$  fino al tempo  $t_B$  (Vancetti, 2023).

Al tempo  $t_B$ , si sa che corrisponde l'inizio della fase di decadimento e un rilascio dell'energia termica inizialmente disponibile pari al 70% (Basso, 2022; De Trizio, 2024). Prima di andare avanti, occorre verificare che tale energia sia sufficiente a garantire il superamento della prima fase di propagazione e il raggiungimento del picco massimo  $RHR_{max}$ ; pertanto, deve essere verificata la seguente disuguaglianza:

$$70\% q_f A_f \geq \frac{1000}{3 t_\alpha^2} t_A^3 \quad (1.13)$$

In altre parole, l'energia termica disponibile deve risultare maggiore o al più uguale alla potenza massima. Se tale relazione è verificata, si può calcolare  $t_B$ :

$$t_B = t_A + \frac{70\% q_f A_f - \frac{1000}{3 t_\alpha^2} t_A^3}{RHR_{max}} \quad (1.14)$$

Al contrario, se ciò non accade, allora la curva RHR raggiunge il massimo per qualche secondo, poi segue la fase di decadimento e risulterà  $t_A = t_B$  (Vancetti, 2023).

## La fase di decadimento

Dunque, a questo punto si giunge alla fase di decadimento, in cui gradualmente si esaurisce il combustibile o il comburente e si va incontro a spegnimento.

In questo ultimo stadio si suppone che si consumi il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile (Vancetti, 2022; De Trizio, 2024).

Il tempo finale  $t_C$  è pari a:

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\% q_f A_f}{RHR_{max}} \quad (1.15)$$

L'andamento di questo tratto è lineare, perciò  $RHR(t)$  seguirà la legge:

$$RHR(t) = RHR_{max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B} \quad (1.16)$$

Il Codice di prevenzione incendi dà alcuni suggerimenti riguardo ai focolari predefiniti, in particolare al paragrafo M.2.7. Il progettista può seguire questo approccio, ad esempio, laddove il focolare predefinito risulta più gravoso di uno che potrebbe verificarsi, perciò quando tale scelta lo porta "a favore di sicurezza". Invero, prima dovrebbe esserci un'analisi preliminare, seguita da una quantitativa e poi una procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio<sup>11</sup>, associando così a ciascuno una curva RHR. Se l'interesse è rivolto alla fonte di innesco, alle cause e al coinvolgimento della stessa nell'incendio, è opportuno seguire tale procedura e selezionare scenario d'incendio (o più) e relativa curva RHR; se, invece, il focus dello studio esula dalla fonte di innesco, perché ad esempio si vuole analizzare la propagazione in facciata, allora è vantaggioso ricorrere al focolare predefinito del Codice.

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratteristica dell'incendio $t_\alpha$	150 s (fast)	75 s (ultra-fast)
$RHR_{max}$ totale	5 MW	50 MW
$RHR_{max}$ per m <sup>2</sup> di superficie del focolare	250-500 kW/m <sup>2</sup>	500-1000 kW/m <sup>2</sup>
Resa in particolato $Y_{soot}$	Pre flashover: 0,07 kg/kg Post flashover: 0,14 kg/kg	Pre flashover: 0,18 kg/kg Post flashover: 0,36 kg/kg
Resa in monossido di carbonio $Y_{CO}$	Pre flashover: 0,10 kg/kg Post flashover: 0,40 kg/kg	
Calore di combustione effettivo $\Delta H_C$	20 MJ/kg	
Resa in biossido di carbonio $Y_{CO_2}$	1,5 kg/kg	
Resa in acqua $Y_{H_2O}$	0,82 kg/kg	
Frazione di RHR in irraggiamento (Radiative fraction)	35%	

Tabella 1.4: Focolari predefiniti (tabella M.2-2, Codice)

<sup>11</sup> Si veda il par. 1.2.

La tabella dà sia indicazioni riguardo alla velocità di crescita e all'evoluzione dell'incendio, sia alle caratteristiche dei prodotti di combustione, nello specifico ai dati di particolato e monossido di carbonio (De Trizio, 2024).

## 1.5. Cenni di fisica dell'incendio

Gli incendi possono essere classificati in due categorie principali: outdoor, all'aperto, e indoor, in ambiente chiuso o confinato.

Gli incendi outdoor si sviluppano in spazi aperti, come nel caso di incendi boschivi o di facciate di edifici. In queste situazioni, l'apporto di aria è praticamente illimitato. Di conseguenza, la dinamica dell'incendio è influenzata principalmente dal vento e dal tipo di materiale combustibile coinvolto, piuttosto che dalla ventilazione.

Al contrario, gli incendi confinati si verificano all'interno di ambienti chiusi e sono strettamente correlati alla ventilazione disponibile nel locale. Un esempio tipico è rappresentato dalla rottura di una finestra o di un lucernario. È fondamentale spiegare perché un vetro si rompe in tali circostanze: l'evento può essere causato, ad esempio, dall'aumento della temperatura e della pressione all'interno dello spazio confinato. Quando si verifica la rottura, l'apporto di aria fresca introduce nuovo comburente, che può favorire l'intensificazione dell'incendio. Tuttavia, è importante notare che un eccessivo apporto di aria, e quindi di comburente, potrebbe paradossalmente ostacolare la combustione, arrivando persino a soffocare l'incendio in determinate condizioni (Vancetti, 2023).

L'analisi dello sviluppo di un incendio in un determinato locale dotato di aperture si basa sulla risoluzione delle equazioni di bilancio termico e di massa che governano il fenomeno (Vancetti, 2023).

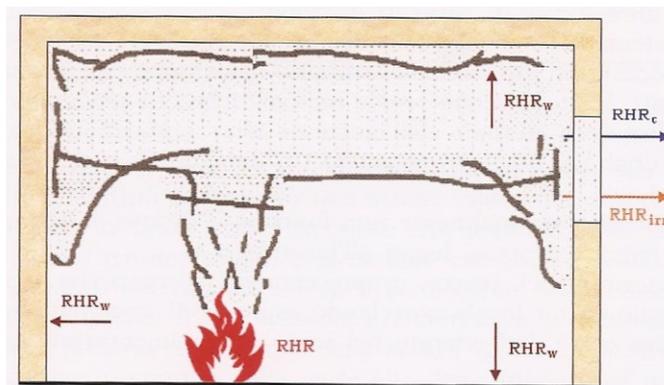


Figura 1.15: Bilancio termico all'interno di un locale sottoposto ad un incendio con aperture di ventilazione (Vancetti, 2023)

All'interno di un locale, l'equazione di bilancio termico in regime stazionario vale:

$$RHR = RHR_c + RHR_w + RHR_{irr} + RHR_{gas} \quad (1.17)$$

dove:

- $RHR$  [kW] è la potenza termica totale generata dall'incendio e poi rilasciata;

- $RHR_c$  [kW] è la potenza termica dispersa per convezione dai gas caldi di combustione che fuoriescono dal locale attraverso le aperture di ventilazione, pari a circa 65-70% di RHR;
- $RHR_w$  [kW] è la potenza termica che viene ceduta per convezione ed irraggiamento alle strutture che delimitano il locale e, attraverso queste, per conduzione all'esterno, pari a circa il 25 – 30% di RHR;
- $RHR_{irr}$  [kW] è potenza termica che viene dispersa per irraggiamento attraverso le aperture di ventilazione, pari a circa 10% di RHR;
- $RHR_{gas}$  [kW] è la quantità di calore che si accumula nei gas combusti all'interno del locale, generalmente viene trascurata.

Mentre l'equazione di bilancio di massa vale:

$$m_u = m_a + m_c \tag{1.18}$$

dove:

- $m_u$  [kg/s] è la portata massica di fumo e gas di combustione che fuoriescono dal locale;
- $m_a$  [kg/s] è la portata massica di aria entrante nel locale dalle aperture;
- $m_c$  [kg/s] è la portata massica di combustibile che subisce la pirolisi.

Durante l'incendio, la potenza termica e le portate massiche variano nel tempo e, di conseguenza, il fenomeno si traduce in un sistema di equazioni differenziali, risolvibile tramite ipotesi che dipendono dal modello che viene utilizzato per descrivere la fisica che governa la sua evoluzione (Vancetti, 2023).

### *1.5.1. L'evoluzione di un incendio all'interno di un locale*

Per cogliere le assunzioni alla base dei vari modelli d'incendio, si consideri un ambiente chiuso contenente un oggetto che comincia a bruciare, ossia nella fase di ignizione.

Inizialmente, l'incendio ha dimensioni piuttosto modeste, si sviluppa come se fosse all'aperto, poiché influenzato unicamente dalle condizioni del combustibile, e nel locale è presente una quantità d'aria sufficiente per la combustione.

L'evoluzione dell'incendio può avvenire per propagazione della fiamma sul materiale che ha subito l'ignizione o attraverso il trasferimento di energia agli oggetti vicini, i quali, se riscaldati a sufficienza, rilasciano sostanze volatili infiammabili che alimentano ulteriormente la combustione. Durante il processo, si osservano generalmente una fiamma e un pennacchio di gas combusti, noto come *plume*. Attraverso il pennacchio, i prodotti della combustione vengono dispersi mentre l'aria circostante viene richiamata e mescolata ai vapori combustibili. Questo processo genera energia termica che viene assorbita dai gas e dal particolato sospeso, determinandone un aumento di temperatura.

I gas caldi di combustione, grazie alla spinta ascensionale dovuta alla differenza di densità, ossia grazie alla spinta di Archimede, tendono a salire verso l'alto e ad attirare aria fresca lateralmente, aumentando la portata del pennacchio. Questo meccanismo non solo

alimenta la combustione, ma incrementa il flusso d'aria all'interno del pennacchio stesso, che si espande assumendo progressivamente una forma a cono rovesciato, composta da materia ed energia (Vancetti, 2023).

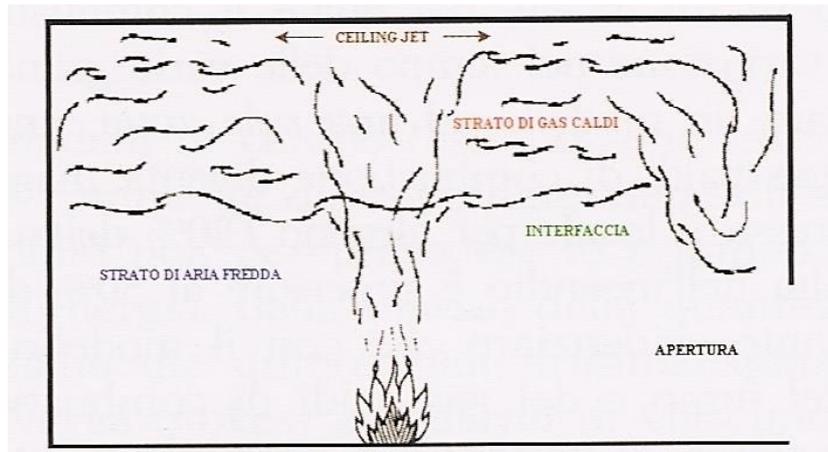


Figura 1.16: Incendio all'interno di un locale (Vancetti, 2023)

Man mano che il pennacchio si eleva, la temperatura e la velocità dei gas caldi diminuiscono, fino a incontrare il soffitto della stanza. A questo punto, i gas iniziano a fluire orizzontalmente lungo il soffitto, espandendosi gradualmente in un fenomeno noto come *ceiling jet*. Durante questa fase, il calore viene trasferito verso il basso per irraggiamento e verso il soffitto per convezione, con un progressivo raffreddamento dei gas man mano che si allontanano dalla zona inizialmente interessata.

Col passare del tempo, i prodotti della combustione si accumulano sotto il soffitto, formando uno strato caldo ben distinto dall'aria più fredda nella parte inferiore del locale. L'interfaccia tra questi due strati è relativamente definita e si assume che lo scambio di energia e materia tra di essi avvenga esclusivamente attraverso il pennacchio.

Con l'evoluzione dell'incendio, lo strato caldo aumenta di spessore e l'interfaccia si abbassa. Quando raggiunge le aperture del locale, come porte o finestre, i gas caldi e il fumo fuoriescono dalla parte superiore delle aperture, mentre l'aria fresca entra attraverso la parte inferiore. La quantità di aria in entrata e in uscita dipende dalla posizione del piano neutro, determinata dalle differenze di pressione tra l'ambiente interno e quello esterno (Vancetti, 2023).

## 2. Gli edifici alti, le soluzioni in facciata e la normativa italiana

### 2.1. Gli edifici di grande altezza

Per edificio di grande altezza o *edificio alto*, come verrà spesso indicato in questa tesi, si intende una costruzione dotata di più livelli, la cui altezza superi un determinato valore variabile a seconda del paese in cui si trova. Uno dei primissimi documenti in Italia che disciplinava la classificazione degli edifici è il Decreto Ministeriale del 16 febbraio 1982; in particolare, l'applicabilità dello stesso era connessa all'*altezza di gronda* del fabbricato, ovvero alla distanza che si misura dal suolo alla linea di gronda. Con il successivo Decreto Ministeriale del 16 maggio 1987 n. 246, è stato cambiato il principio alla base di questa classificazione degli edifici ad uso civile; nello specifico, al posto dell'altezza di gronda è subentrata l'*altezza antincendio*, la quale viene definita come l'

*«altezza massima misurata dal livello inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitato e/o agibile, escluse quelle dei vani tecnici, a livello del piano esterno più basso»  
(D.M. 30 novembre 1983)*

Si riporta di seguito la classificazione degli edifici in base all'altezza antincendio che si trova nell'allegato del D.M. 16 maggio 1987.

Tipo di edificio	Altezza antincendio	Massima superficie del compartimento (m <sup>2</sup> )	Massima superficie di competenza di ogni scala per ogni piano (m <sup>2</sup> )	Tipo di vani scala e di almeno un vano ascensore	Caratteristiche REI dei vani scala e ascensore, filtri, porte, elementi di suddivisione tra i compartimenti
A	Da 12 m a 24 m	8000	500	Nessuna prescrizione	60 (**)
			500	Almeno protetto se non sono osservati i requisiti del punto 2.2.1	60
			550	Almeno a prova di fumo interno	60
			600	A prova di fumo	60
B	Da oltre 24 m a 32 m	6000	500	Nessuna prescrizione	60 (**)
			500	Almeno protetto se non sono osservati i requisiti del punto 2.2.1	60
			550	Almeno a prova di fumo interno	60
			600	A prova di fumo	60
C	Da oltre 32 m a 54 m	5000	500	Almeno a prova di fumo interno	90

Tipo di edificio	Altezza antincendio	Massima superficie del compartimento (m <sup>2</sup> )	Massima superficie di competenza di ogni scala per ogni piano (m <sup>2</sup> )	Tipo di vani scala e di almeno un vano ascensore	Caratteristiche REI dei vani scala e ascensore, filtri, porte, elementi di suddivisione tra i compartimenti
D	Da oltre 54 m a 80 m	4000	500	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore a 0,36 m <sup>2</sup>	90
E	Oltre 80 m	2000	350 (*)	Almeno a prova di fumo interno con filtro avente camino di ventilazione di sezione non inferiore a 0,36 m <sup>2</sup>	120

*Tabella 2.1: Tabella A (D.M. 16 maggio 1987)*

Oggigiorno, la classificazione degli edifici civili segue la definizione di altezza antincendio: infatti, nel Codice di prevenzione incendi attualmente in vigore, si riprende il concetto di altezza antincendio espressa nel passato; tuttavia, si estende l'applicabilità delle definizioni non solo a edifici residenziali, ma anche a strutture con altra destinazione d'uso, come per esempio strutture ospitanti uffici, strutture sanitarie, alberghiere, commerciali, scuole, e altri edifici ad uso civile. Inoltre, definisce l'altezza antincendio come la massima quota dei piani di un'attività, escludendo i piani con presenza occasionale e di breve durata di personale addetto. Seguono alcuni esempi di altezza antincendio, oltre ad esempi di quote di piano e di compartimento che si possono ritrovare nella sezione G.1.7 del Codice.

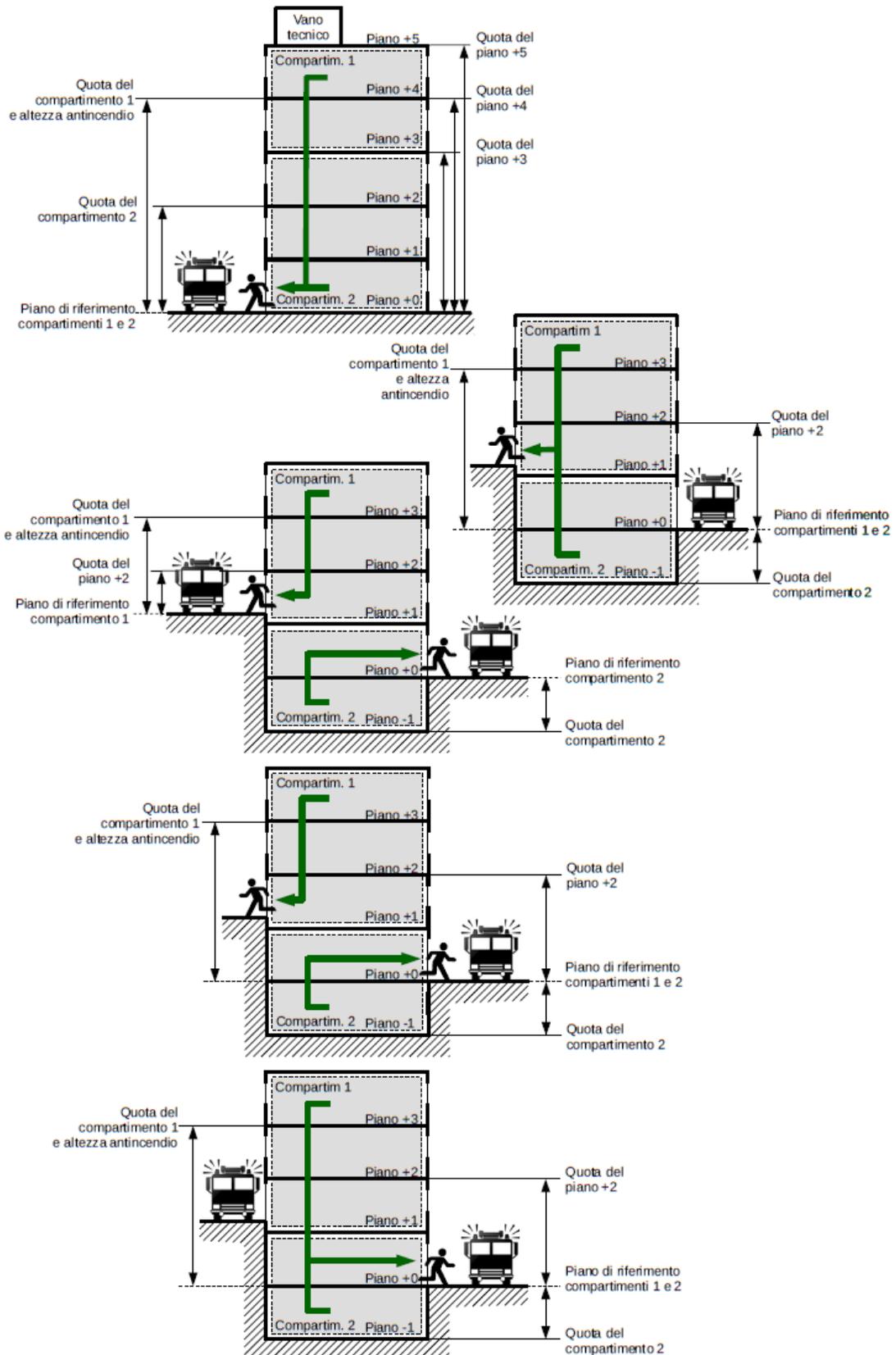


Figura 2.1: Esempi di altezza antincendio (Illustrazione G.1-3, Codice)

### **2.1.1. Le caratteristiche principali**

In generale, gli edifici possono esibire caratteristiche simili e vantare medesime tecniche costruttive o, se non le stesse, al più simili. Analogamente, questo vale anche per gli edifici di grande altezza. Da qui emergono criticità similari, ancora più evidenti per le strutture alte poiché si palesano ulteriormente al crescere dell'altezza. È importante, quindi, illustrare brevemente alcuni aspetti caratteristici.

Il nucleo è la parte centrale delle strutture di grande altezza e, per questo motivo, spesso viene chiamato *core*. Qui vi sono ambienti e aree con specifiche destinazioni d'uso che si ripetono per tutti i piani dell'edificio; in effetti, nel core si possono trovare ascensori, scale, scale antincendio, servizi igienici, quadri elettrici, cavedi e, infine, locali tecnici per le unità di trattamento dell'aria Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC), ossia sistemi costituiti da apparecchiature e tecnologie combinate per fornire riscaldamento, raffreddamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

Il nucleo può essere centrale, laterale o possono esserci nuclei multipli. Per quanto riguarda la prima categoria, in primo luogo rappresenta la soluzione ottimale dal punto di vista strutturale, poiché il core è dotato di una sua rigidità e questo conferisce alla struttura una maggiore rigidità complessiva, in particolare assicurando all'edificio una quota di resistenza maggiore alle azioni orizzontali dovuti, ad esempio, dal carico del vento; in secondo luogo, è la soluzione migliore per la ripartizione sia degli ambienti sia dei condotti del condizionamento. La seconda tipologia di core, quella laterale, viene impiegata spesso quando si hanno edifici adiacenti oppure se il piano ha una dimensione contenuta. Invece, i nuclei multipli vengono utilizzati quando la struttura è dotata di piani piuttosto estesi, non solo per finalità strutturali, ma anche per abbattere distanze quali ad esempio la via di esodo o il percorso di accesso ai servizi igienici (Basso, 2022).

Come è facilmente intuibile, la presenza del core o più di uno può essere un punto sia a favore che a sfavore: in sua assenza, non ci sarebbe banalmente un collegamento tra i piani, dalla testa ai piedi dell'edificio, fino a terra, pertanto non sarebbe attuabile l'esodo; al contrario, la sua presenza è sì un elemento essenziale per garantire la possibilità di salvezza degli esodanti in caso di emergenza, però può anche rappresentare un problema proprio durante una situazione del genere, sia per l'esodo in sé sia per la gestione della sicurezza in emergenza. È importante ricordare che, in queste situazioni emergenziali, le persone tentano di mettersi in salvo prese dal panico e dalla paura, generando molta confusione. Inoltre, bisogna sempre garantire oltre che una via di esodo per gli occupanti, anche una via di accesso per i soccorritori. In questi casi, si potrebbe pensare che avere più core rappresenti un vantaggio, poiché si potrebbero avere più vie di esodo e di fuga; invero, il vantaggio di una struttura multicore non è così scontato poiché l'esodo in emergenza è molto complesso.

Un altro elemento distintivo degli edifici alti è l'altezza d'interpiano, ovvero la distanza di quota tra un piano e l'altro. Questo fattore ha un fortissimo impatto sul costo totale dell'opera, poiché si riflette direttamente sull'altezza complessiva della struttura.

Aumentando l'altezza sta aumentando anche la superficie esterna dell'edificio e, di conseguenza, l'annesso costo dell'involucro, ossia della facciata esterna. Quindi, in generale, i progettisti tentano di abbattere questa grandezza nella misura del possibile, tenendo conto di tutte le altezze che costituiscono l'altezza di interpiano, ossia l'altezza del pavimento, l'altezza netta tra pavimento e controsoffitto, l'altezza del controsoffitto e l'altezza del solaio strutturale (Basso, 2022).

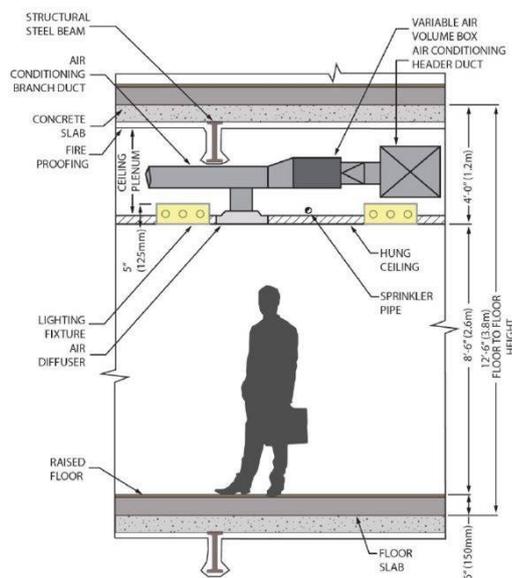


Figura 2.2: Altezza d'interpiano (Paduos et al., 2018)

Un'altra peculiarità delle strutture di grande altezza è l'impianto di riscaldamento, in particolare l'adozione in generale di sistemi di tipo HVAC<sup>12</sup>. Questi sistemi assicurano il comfort termo-igrometrico e di qualità dell'aria agli occupanti dell'edificio per tutti gli ambienti, regolando riscaldamento, raffreddamento, ventilazione e aria condizionata, quindi temperatura e umidità. Affinché ci sia questo benessere indoor, è importante garantire anche le adeguate condizioni di pressione interna e, per fare ciò, è necessario che il sistema immetta più aria esterna, il 5% in più di quella prevista dal bilancio, rispetto a quella espulsa (Basso, 2022).

Un'altra caratteristica degli edifici alti è la copertura, che risulta piana nella maggior parte dei casi. In realtà, questa zona può essere il punto in cui si trovano sistemi per il trattamento dell'aria, per esempio, o altri sistemi di altra natura; oppure si possono trovare aree dedicate a spazi ricreativi, per esempio negli ultimi anni si trovano spesso campi sportivi, ma anche piscine, se non addirittura discoteche, oppure anche aree con funzione decorativa come parchi e giardini. In certi casi, per edifici molto alti, in copertura è possibile trovare persino piste di atterraggio per gli elicotteri; tuttavia, in questi casi si tratta di edifici con altezze considerevoli, pari o superiori a 80 metri. In ogni caso, soprattutto in questi casi,

<sup>12</sup> Acronimo che sta per Heating, Ventilation and Air Conditioning, come detto in precedenza.

la copertura piana può avere la funzione di luogo temporaneo sicuro in un contesto emergenziale (Basso, 2022).

Infine, un altro elemento caratteristico è la facciata. Negli edifici alti, la facciata rappresenta la frontiera più esterna e l'involucro della struttura. Per garantire il giusto comfort termico agli occupanti è fondamentale che vengano rispettati alcuni requisiti energetici: l'isolamento termico nella stagione invernale fredda, evitando dunque perdite di calore dall'interno verso l'esterno, e il giusto raffrescamento nella stagione estiva calda, evitando che il calore esterno comprometta il benessere indoor (Basso, 2022).

## 2.2. Le facciate

Prima di giungere al tema centrale degli incendi in facciata, bisogna necessariamente parlare del tema "facciate" partendo dalle definizioni e dalle tipologie esistenti.

È possibile trovare la definizione di *facciata* nella Lettera Circolare del 15 aprile 2013 n. 5043 – Guida tecnica su "Requisiti antincendio delle facciate di edifici civili":

*«l'insieme delle componenti che costituiscono un sistema di chiusura (materiali, elementi, accessori etc.), progettati, assemblati ed installati al fine di realizzare l'involucro esterno verticale, o quasi – verticale, dell'edificio» (pag. 1).*

Invero, dopo un lungo periodo di silenzio normativo, in Italia nel 2010 è stata introdotta la circolare n. 5643, il primo documento a trattare la sicurezza antincendio delle facciate, seguendo le linee guida di altri Paesi dell'Unione Europea (Minutoli, 2017, pag. 46). Questo atto rappresenta a tutti gli effetti la primissima iniziativa in Italia per affrontare il tema della progettazione antincendio, segnando un passo significativo nel riconoscimento della necessità di regolamentare e migliorare la sicurezza antincendio nelle strutture edilizie. Le finalità antincendio della guida tecnica erano ridurre la probabilità di propagazione di un incendio, ostacolare la probabilità di innesco di incendio in facciata e, infine, scongiurare la caduta di parti o detriti della facciata stessa evitando così, al tempo stesso, la probabilità che altri compartimenti venissero compromessi (Mazziotti, 2017, pag. 60-62). Tuttavia, le indicazioni progettuali fornite in questo documento erano applicabili esclusivamente agli edifici con un'altezza antincendio superiore a 12 metri e dovevano essere considerate come "sperimentali" per un periodo di due anni e di carattere "volontario", pertanto non vincolante.

Successivamente, nel 2013, il Dipartimento Ministeriale dei Vigili del Fuoco ha pubblicato la circolare n. 5043 accompagnata da un "documento volontario di applicazione", che rappresenta un aggiornamento significativo rispetto al precedente documento del 2010, sostituendo di fatto la circolare precedente. Le modifiche apportate rispetto alla circolare precedente comprendono un miglioramento della struttura formale del documento e una definizione tipologica delle facciate più adeguata, soprattutto in relazione alle prestazioni di sicurezza antincendio da garantire (Giacalone, 2014).

La guida tecnica fissa principi generali relativi ai requisiti di resistenza al fuoco e alla compartimentazione. In particolare, non sono previsti requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi di facciata che fanno parte di compartimenti con un carico di incendio pari o inferiore a 200 MJ/mq, escludendo gli isolanti astanti. Inoltre, non si richiedono requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi di facciata di compartimenti con un carico di incendio superiore a 200 MJ/mq, a condizione che siano dotati di un sistema di spegnimento ad attivazione automatica (Lettera Circolare n. 5043/2013, pag. 4; De Trizio, 2024).

Anche in questo documento si può notare che l'applicabilità delle indicazioni è riservata a tutte le strutture aventi un'altezza antincendio maggiore di 12 metri. Inoltre, in questi atti si nota una grande lacuna di indicazioni riguardo alle facciate e alle coperture fotovoltaiche (Minutoli, 2017, pag. 46).

Attualmente è in vigore il Codice di prevenzione incendi e il progettista è tenuto a seguire le indicazioni contenute al suo interno. Risulta, quindi, fondamentale riportare la definizione di "facciata" presente in questo testo, che è la seguente:

*«insieme dei componenti che costituiscono una porzione di chiusura d'ambito dell'edificio non ricompresa nella copertura» (pag. V.13-1).*

Si specifica che nella facciata sono considerati anche intradossi di porticati e aggetti, ossia le parti sporgenti che si estendono oltre il piano verticale dell'edificio, come ad esempio balconi e cornici.

Il Codice distingue chiaramente tra le definizioni di "facciata" e di "chiusura d'ambito", quest'ultima intesa come una

*«frontiera esterna dell'edificio, sia essa orizzontale che verticale» (pag. V.13-1).*

Nella definizione di chiusura d'ambito rientrano anche le frontiere esterne interrato, le separazioni tra ambiti diversi dell'edificio, come intercapedini e pozzi luce, e le frontiere tra edifici distinti, qualora si affaccino su un volume d'aria. Infine, la copertura è definita come

*«insieme dei componenti che costituiscono la porzione di chiusura d'ambito sommitale dell'edificio» (pag. V.13-1),*

distinguendola nuovamente dalla definizione di facciata.

Si noti anche che, al contrario delle circolari 5643/2010 e 5043/2013, nel Codice si trovano indicazioni sugli impianti fotovoltaici, i quali possono essere installati sulle coperture e sulle facciate degli edifici.

Per quanto concerne le chiusure d'ambito, come viene approfondito in questo lavoro di tesi in un capitolo successivo dedicato ai riferimenti normativi vigenti in Italia, il Codice fornisce indicazioni specifiche, in particolare nel capitolo RTV.13. In questa sezione si ritrovano le medesime definizioni di facciata presenti nella circolare 5043/2013, poiché quest'ultima è

il documento alla base delle indicazioni che si trovano nel Codice. Pertanto, essa costituisce il riferimento principale per la definizione delle tipologie di facciata.

### **2.2.1. Le tipologie di facciata**

#### **Facciata semplice**

La facciata semplice è definita come una facciata, eventualmente multistrato, in cui strati ed elementi funzionali sono messi in opera e montati con continuità, senza intercapedini d'aria tra i layer della stratigrafia della facciata.

Elementi dotati di fori, quali ad esempio laterizi, blocchi di calcestruzzo, vetrocamere e così via, vanno considerati come un unico strato. Rientrano in questa categoria sia le facciate rivestite con elementi prefabbricati fissati tramite legante, umido o a secco, e posati in aderenza alla parete, come ad esempio i cappotti termici, sia le facciate costituite da mattoni o blocchi con camera d'aria non ventilata, soluzione utilizzata per l'isolamento termico (Giacalone, 2014).

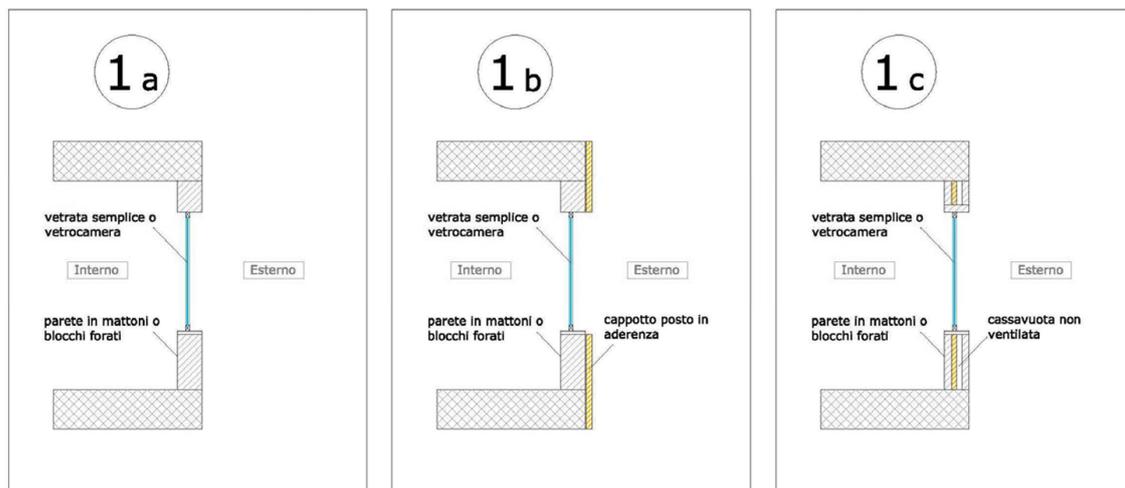


Figura 2.3: Esempi di facciata semplice (Giacalone, 2014)

#### **Facciata a doppia parete**

La facciata a doppia parete è una facciata multistrato in cui strati e/o elementi funzionali sono divisi da una lama d'aria, ossia un'intercapedine d'aria, anche detta *corridoio d'aria* o *spazio intermedio*. Per questo motivo, questa tipologia di parete può essere ventilata o non ventilata e può presentare pareti opache o vetrate.

La facciata a doppia parete *non ventilata* è del tutto paragonabile ad una facciata semplice (Giacalone, 2014).

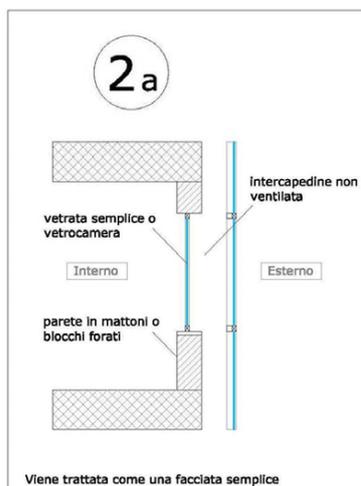


Figura 2.4: Facciata a doppia parete non ventilata (Giacalone, 2014)

Invece, la tipologia a doppia parete *di tipo ventilato* implica che l'aria circoli nello spazio intermedio, quindi nell'intercapedine. Questa circolazione può essere meccanica, ovvero forzata, oppure naturale. Questa tipologia di facciata può essere di tipo non ispezionabile o ispezionabile, a seconda dello spessore della lama d'aria.

La facciata a doppia parete ventilata *non ispezionabile* presenta spessori d'intercapedine compresi tra 3 cm e 60 cm, anche se generalmente variano da 5 e 10 cm, e la ventilazione può essere sia verso l'interno che verso l'esterno (Giacalone, 2014).

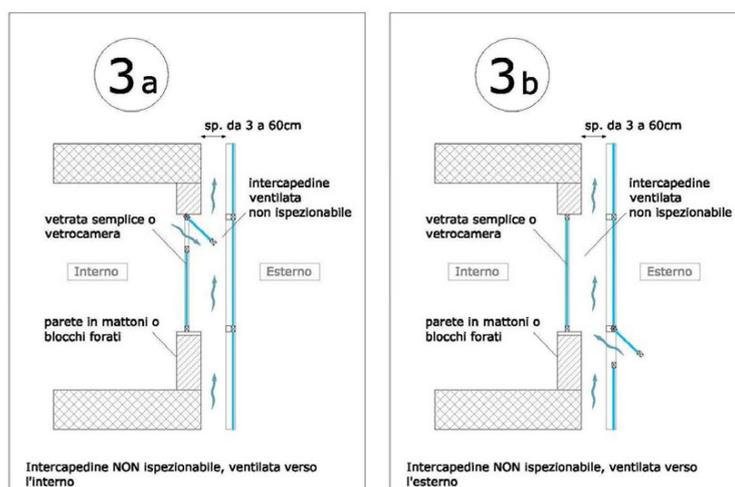


Figura 2.5: Facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile (Giacalone, 2014)

Viceversa, la facciata a doppia parete ventilata *ispezionabile* ha un'intercapedine di spessore certamente maggiore di 60 cm, consentendo l'eventuale passaggio di personale addetto al controllo e alla manutenzione.

Se questo spessore supera i 120 cm, allora il progettista antincendio deve considerare la facciata come due sistemi, esterno e interno, distinti e indipendenti. Spesso, in questi casi, si ha esternamente una vetrata e internamente una parete continua o *curtain wall*, con o senza infissi, opaca o anch'essa vetrata (Giacalone, 2014).

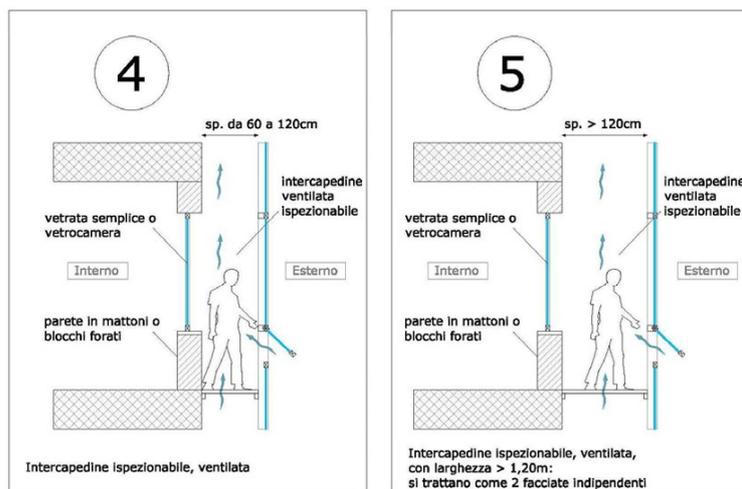


Figura 2.6: Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile (Giacalone, 2014)

### **Facciata continua o curtain wall**

La facciata continua, o *curtain wall*, è una facciata esterna non portante e indipendente dallo scheletro strutturale dell'edificio. Infatti, è costituita da un'intelaiatura di elementi strutturali lineari collegati tra loro, che comprendono molti elementi, quali telai, pannelli, superfici vetrate, sigillature, sistemi di fissaggio, giunti, membrane di tenuta, e così via (Giacalone, 2014; Basso, 2022; De Trizio, 2024); la connessione con l'edificio è garantita tramite collegamento alla testa dei solai e dei muri trasversali di compartimentazione e gli elementi di giunzione tra struttura e facciata esterna devono essere di classe di resistenza al fuoco EI60. Le parti della facciata che devono rispettare le prestazioni di sicurezza antincendio possono anche presentare aperture, però è necessario che, in caso di incendio, dispongano di serrande tagliafuoco automatiche o altri sistemi simili, che assicurino la resistenza al fuoco prevista per le altre parti dell'involucro esterno (Lettera Circolare n. 5043/2013, pag. 4).

L'esterno quindi risulterà continuo, mentre la struttura portante arretrata rispetto alla facciata (si vedano UNI EN 13119:2007 e UNI EN 13830:2022). In genere è caratterizzata da una struttura di alluminio estrusa, sebbene possa essere di legno, acciaio, PVC (polivinilcloruro) o altro materiale, e presenta tamponature fatte di pannelli in vetro. Tuttavia, il rivestimento esterno può anche essere di pietra, pannelli di metallo o legno, oppure ancora strisce di vario materiale, oppure ancora può presentare finestre, e così via (Giacalone, 2014; De Trizio, 2024).

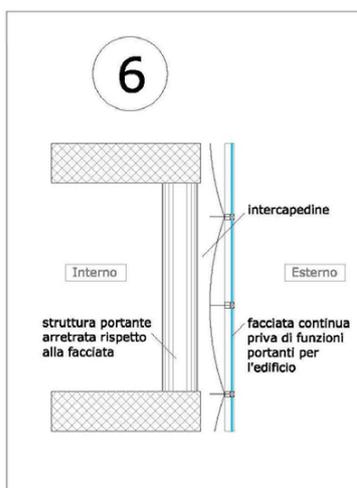


Figura 2.7: Facciata continua o curtain wall (Giacalone, 2014)

### **Facciata a parete aperta e a parete chiusa**

La parete può essere aperta o chiusa. Per la prima tipologia si intende una parete esterna con superficie fatta per almeno il 50% di giunti, griglie fisse o mobili (apribili in caso di incendio di almeno 60 gradi rispetto alla posizione da chiuse), elementi ripartiti uniformemente; oppure la stessa superficie può essere composta da pannelli realizzati in materiali che, raggiunti i circa 200°C, vanno incontro a rottura e poi cadono verso il basso. Al contrario, la parete chiusa non ha queste caratteristiche (Giacalone, 2014; Basso, 2022).

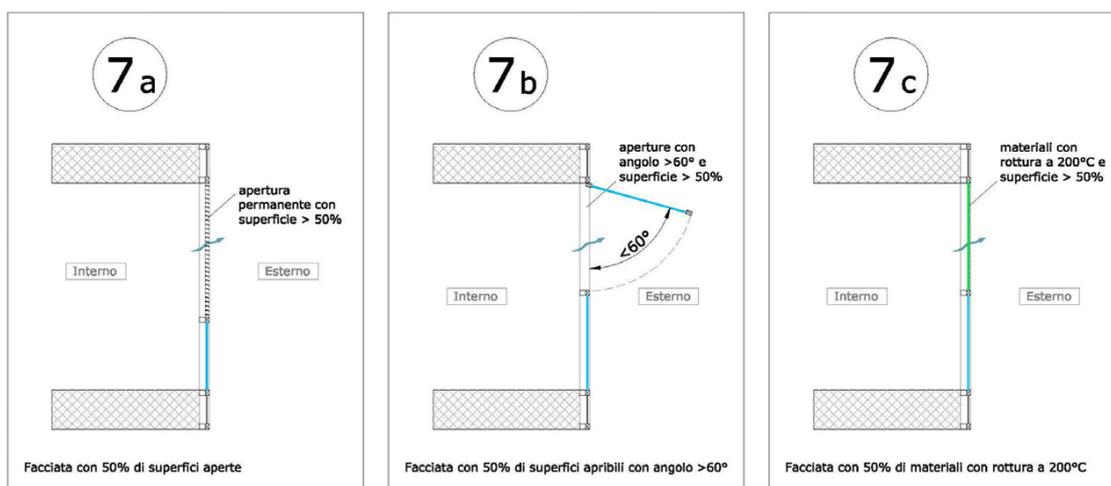


Figura 2.8: Facciata a parete aperta e a parete chiusa (Giacalone, 2014)

### **Kit**

Seguendo i dettami della Direttiva Prodotti da Costruzione (DPC) e del Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR), il sistema *kit* è da considerarsi pari ad un unico prodotto da costruzione che deve essere assemblato da almeno due componenti distinti che devono essere uniti per realizzarne la messa in opera. Per rispettare la DPC o il CPR, il sistema deve essere venduto e acquistato in un'unica transazione da un singolo fornitore; inoltre, il kit deve avere caratteristiche tali per cui i requisiti essenziali delle strutture su cui viene adoperato siano soddisfatti (Giacalone, 2014; De Trizio, 2024).

### 2.2.2. Le facciate ventilate

La norma UNI 11018-1:2023 fornisce la seguente definizione di facciata ventilata:

*«tipo di facciata a schermo avanzato, in cui l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino in modo naturale e/o in modo artificialmente controllato, a seconda delle necessità stagionali e/o giornaliere, al fine di migliorarne le prestazioni termo-energetiche complessive».*

In altre parole, si tratta di una tecnologia a doppia parete che funziona, come già detto<sup>13</sup>, grazie al moto convettivo che si instaura nell'intercapedine d'aria. Si noti che tutti gli strati, incluso quello isolante, risultano all'esterno rispetto al filo strutturale dell'edificio (Micunco, 2022).



Figura 2.9: Esempi di facciate ventilate (Giraldo et al., 2013)

Anche se questa tecnologia è ormai conosciuta e largamente diffusa, si pensa che la sua prima applicazione fu all'inizio del 700: in particolare, nacque al nord d'Italia per la necessità di protezione dei materiali da costruzione dalle intemperie e dagli agenti atmosferici quali pioggia, ghiaccio e neve o anche irraggiamento solare, tutti fattori che potevano (e che in generale possono) causare danneggiamenti più o meno ingenti, soprattutto con il passare del tempo e il ripetersi ciclico degli eventi meteorologici (Micunco, 2022).

Con questa soluzione fu possibile distinguere per la prima volta la struttura dall'involucro della facciata esterna. Le prime soluzioni in facciata di questo tipo celavano al di sotto un'intelaiatura di legno, costituita da listelli orditi orizzontalmente e verticalmente; i primi fissati meccanicamente alla parete della struttura, mentre ai secondi veniva ancorato il rivestimento esterno, quasi sempre di materiale di origine naturale, come legno o pietra (Micunco, 2022).

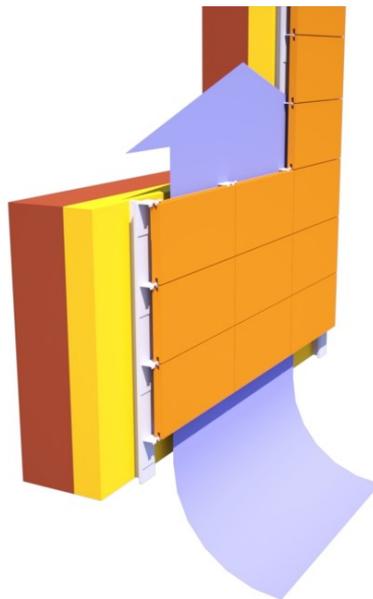
A causa della crisi energetica negli anni '70, ci fu un rinnovato interesse per questa tecnologia. Da qui in poi, fino ad oggi, l'attenzione è stata concentrata sul trovare una soluzione in grado di abbattere e contenere il più possibile i consumi dell'energia; la facciata

<sup>13</sup> Si veda la sezione 2.2.1.

ventilata si è rivelata rispondente proprio a tali esigenze. Con l'avanzamento tecnologico e con il passare del tempo, è stata sempre più impiegata come soluzione per abbattere costi e consumi energetici, soprattutto dai progettisti che, al giorno d'oggi, sono sempre più consci dell'impatto sia ambientale che economico (Micunco, 2022).

### **La stratigrafia delle facciate ventilate**

Una parete ventilata è così articolata, dall'interno verso l'esterno dell'edificio: ha un primo strato portante, la parete interna; poi ha uno strato di isolamento o strato coibente; segue un'intercapedine o lama d'aria, dove si ha la ventilazione; infine, vi sono la sottostruttura e lo strato di rivestimento. Si vedrà ora strato per strato e nell'intercapedine, materiali, proprietà e caratteristiche principali (Micunco, 2022).



*Figura 2.10: Schema di una facciata ventilata (Putilov, 2011)*

Lo strato portante è il supporto al di sotto, poiché sostiene i carichi propri e accidentali sia della struttura che della facciata; infatti, questi carichi vengono ripartiti alla struttura portante tramite gli elementi di ancoraggio della sottostruttura. Quindi, si possono avere pareti in cemento armato o in muratura e incontrare elementi in laterizio, in pietra, in materiale misto o composito, in conglomerato cementizio o elementi, appunto, anche armati. Ciò nondimeno, si possono anche avere delle strutture che presentano il telaio, in cemento armato o in acciaio, e le pareti di tamponamento non portanti, eseguite con tecniche costruttive di tipo tradizionale o innovativo, come per esempio murature o pareti a secco: in questi casi, la parete al di sotto non sarà continua, poiché vi è proprio un passaggio netto tra telaio (struttura portante) e parete (struttura non portante). Per questo motivo, bisogna prestare particolare attenzione all'ancoraggio del sistema della facciata, disponendo fissaggi soltanto in corrispondenza di travi e pilastri (elementi portanti), mentre si metteranno dei dispositivi di ritenuta sulle tamponature (non portanti).

Dal momento che la parete portante costituisce il supporto di tutto il sistema della facciata, la sua superficie dovrà essere piana, verticale, stabile e il più regolare possibile. Qualora

essa presenti disallineamenti e irregolarità, si può realizzare esternamente sulla parete uno strato di regolarizzazione, applicando un intonaco di malta cementizia di spessore di 2 cm circa (Micunco, 2022).

Subito dopo la parete si ha lo strato di isolamento, che si presenta spesso sotto forma di pannelli. Questi possono essere di spessori differenti, ad esempio dai 4 ai 12 cm, e ciò dipende dai requisiti di trasmittanza della parete<sup>14</sup>. L'isolamento è posto in aderenza alla parete portante e in maniera uniforme, proprio come nei cappotti termici. Posto in questo punto della stratigrafia della facciata, consente di avere un isolamento termico complessivamente migliore e di ridurre l'insorgenza di ponti termici (Micunco, 2022).

L'installazione dei pannelli isolanti avviene per mezzo di ancoraggi di tipo meccanico, tendenzialmente realizzati in materiale plastico con testa a disco. Inoltre, se necessario, è possibile porre uno strato di collante tra isolante e superficie esterna della parete portante o, se fosse presente, lo strato di regolarizzazione. Sempre ai fini della messa in opera, è essenziale che i pannelli siano autoportanti e abbiano sufficiente resistenza, soprattutto meccanica (Micunco, 2022).

La selezione del materiale isolante è fondamentale non solo per l'isolamento termico e per il controllo delle perdite di calore, ma anche per altri fattori quali l'isolamento acustico, la capacità del materiale di non degradarsi o alterarsi, senza dimenticare poi il comportamento al fuoco. Proprio in merito a quest'ultimo, le caratteristiche del materiale d'interesse per il progettista sono la reazione, la resistenza al fuoco e, infine, la capacità di propagare le fiamme in caso di incendio, che è collegata alle ultime due precedenti. In virtù di queste proprietà, si raccomanda sempre al progettista di guardare alla classe di resistenza del materiale e alla sua reazione al fuoco (Micunco, 2022).

Sebbene le opzioni sul mercato siano numerose, di norma si impiegano pannelli di isolante di spessore minimo pari ad almeno 4 cm, che possono essere di origine naturale, sintetica, inorganica o minerale. I materiali di origine naturale sono, ad esempio, lana di pecora, fibra di legno, sughero, canapa, paglia, fibra di cocco, cotone, lino e cellulosa. Quelli di natura sintetica sono, sempre a titolo esemplificativo, polistirene espanso (EPS), polistirene estruso (XPS), poliuretano espanso (PU), polietilene espanso (PE), resine espanse (ad esempio melamminiche), polivinilcloruro (PVC) espanso, in genere in forma di schiume che poi diventano rigide e molto leggere. Invece, i materiali isolanti di origine inorganica o minerale possono essere, ad esempio, in fibra minerale, come lana di roccia, lana di vetro, argilla, perlite e vermiculite espanse, calcestruzzo e pannelli in vetro cellulari, pietra pomice e gesso (Micunco, 2022; Perero, 2024).

Si anticipa che i materiali che meglio rispondono alle esigenze della sicurezza antincendio sono isolanti a base di cellulosa, pannelli coibenti in lana di roccia, isolamenti fatti con schiume poliuretatiche o con schiuma di vetro oppure ancora realizzati in perlite espansa.

---

<sup>14</sup> Si veda la sezione 2.3.

Partendo dalla soluzione in cellulosa, questa risulta ottima per rispondere alle esigenze di resistenza al fuoco: infatti, oltre ad essere ecologica, la cellulosa è molto compatta e, perciò, il suo volume contiene pochissimo ossigeno, di conseguenza manca il comburente per un eventuale incendio; inoltre, se sottoposta a tale fenomeno, non gocciola e questo ne evita la propagazione. D'altro canto, la lana di roccia è incombustibile, non conduce calore ed è resistente a temperature molto alte, anche dell'ordine dei 1000°C e oltre. Invece, gli strati di isolamento realizzati con resine poliuretatiche risultano poco infiammabili e, se esposti all'incendio, tendono a non sciogliersi e a non gocciolare. Infine, gli strati di isolamento realizzati con schiume di vetro hanno una temperatura di esercizio massima di 430°C; al contrario, la stessa temperatura è maggiore per le lastre coibenti in perlite espansa, ossia è circa 700-800°C (Micunco, 2022).

Spesso viene sconsigliato l'impiego di materiali isolanti combustibili, soprattutto in polistirolo, polistirene e poliuretano, che siano estrusi o espansi; infatti, questi materiali hanno temperature di esercizio contenute e, se sottoposte alle fiamme, si sciolgono a temperature basse (inferiori ai 100°C), gocciolano, producono molto fumo e contribuiscono alla propagazione dell'incendio (Micunco, 2022).

Dopo lo strato portante e lo strato di isolamento, si ha uno strato di aria, o meglio, un'intercapedine tra la superficie interna della facciata, cioè la faccia esterna dell'isolante, e il rivestimento esterno (Micunco, 2022). Qui si può subito notare una differenza con la soluzione a cappotto citata precedentemente, dove in quel caso la stratigrafia, dall'interno verso l'esterno dell'edificio, è composta da parete di supporto, isolamento e intonaco di finitura; invece, nella facciata ventilata si ha la presenza di una lama d'aria (Ottolenghi, 2023). In questo spazio, appunto, ha luogo la ventilazione che è proprio il suo punto di forza. Questo fenomeno si genera perché entra un flusso di aria fresca dal basso che sale verso l'alto, mentre l'aria calda tende ad uscire sempre verso l'alto. Si genera così una convezione naturale e questo moto ascendente dell'aria che si crea, a causa appunto del gradiente termico interno all'intercapedine, dà luogo a quello che si chiama *effetto camino*. L'ingresso dell'aria "fresca" viene garantito attraverso la progettazione di apposite aperture, protette con griglie, poste in posizioni strategiche, come al piede o in sommità o anche in altre posizioni intermedie della facciata (Micunco, 2022).

Pertanto, nella stagione calda, l'irraggiamento del sole incidente sul rivestimento aumenterà le temperature dell'aria nell'intercapedine, che a loro volta innescheranno l'effetto camino e di conseguenza anche il moto convettivo, allontanando il calore e abbattendo così la temperatura. Nella stagione fredda, invece, la radiazione è meno forte e in questo caso l'intercapedine bilancia la temperatura tra interno ed esterno, abbattendo al contempo le problematiche di umidità e condensa superficiale (Ottolenghi, 2023).

Il modo in cui funziona la facciata ventilata dipende da (ed è collegato a) molti fattori. In primo luogo, dipende dal clima, quindi dalla zona geografica, dalla stagione e dal meteo: si pensi all'irraggiamento solare e alla sua intensità, ad esempio, che possono cambiare se è

estate o inverno; si pensi anche alla temperatura stessa dell'aria esterna e al vento, alla sua direzione e alla sua velocità. Poi, in secondo luogo, il funzionamento della facciata ventilata può dipendere anche dalla geometria dell'edificio, ossia cambiano portate e velocità dell'aria nella camera di ventilazione. Infine, la stratigrafia e la configurazione della parete possono avere un ruolo importante e impattante sulla ventilazione, sull'effetto camino e sulla facciata ventilata stessa (Micunco, 2022).

Inoltre, i fattori che contribuiscono all'avvio della ventilazione naturale sono principalmente la radiazione del sole in facciata, l'assorbimento solare del rivestimento (dato, in particolare, dal suo colore), lo spessore della lama d'aria e la dimensione delle aperture di ventilazione della parete (Micunco, 2022).

È opportuno precisare che la ventilazione può essere naturale o meccanica: la prima risulta certamente la soluzione più economica tra le due, poiché sfrutta la convezione naturale; tuttavia, la seconda tipologia può essere una soluzione migliore per facciate di edifici siti in territori con particolari condizioni di clima, in cui il fenomeno della convezione naturale non si genera o, se ha luogo, non risulta sufficiente per l'isolamento. Infatti, per la convezione meccanica si impiegano sistemi di ventilazione, i quali sfruttano energia e necessitano di manutenzione periodica; per questi motivi, questa soluzione risulta più costosa. La scelta tra le due tipologie di ventilazione dipende essenzialmente dal volume, dalle dimensioni, dalla configurazione dell'edificio e dalle risorse economiche a disposizione (Ottolenghi, 2023).

Per far sì che si avvii la convezione naturale, sfruttandone in questo modo i vantaggi, risulta cruciale dimensionare questa camera d'aria nella maniera corretta. Sebbene esistano molte metodologie di calcolo per il suo progetto, in genere si segue il metodo riportato nella norma UNI EN ISO 6946:2018, che si trova in Appendice B. In effetti, tale normativa illustra dettagliatamente come effettuare il calcolo dello spessore della lama d'aria, tenendo in considerazione i flussi d'aria naturali e l'effetto camino (BibLus, 2024a).

La classificazione si basa sull'ampiezza dell'area di ventilazione  $A_v$ , definita come l'area delle aperture per metro di lunghezza, e si ottiene tramite la relazione:

$$A_v = \frac{A_1 + A_2}{L} \tag{2.1}$$

dove:

- $A_1$  è l'apertura in sommità della facciata ventilata in  $\text{mm}^2$ ;
- $A_2$  è l'apertura al piede della facciata ventilata in  $\text{mm}^2$ ;
- $L$  è la larghezza in direzione orizzontale della facciata in m;
- l'unità di misura di  $A_v$  è, quindi,  $\text{mm}^2/\text{m}$ .

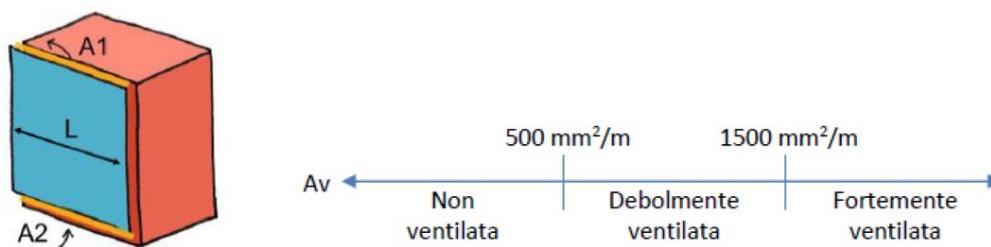


Figura 2.11: Ampiezza dell'area di ventilazione (Micunco, 2022, pag. 24)

Perciò, si hanno tre categorie d'intercapedini: le non ventilate, le debolmente ventilate e le fortemente ventilate.

Se  $A_v$  risulta inferiore ai  $500 \text{ mm}^2/\text{m}$ , allora l'intercapedine risulta non ventilata; se questo valore è superiore a  $1500 \text{ mm}^2/\text{m}$ , si ha un'intercapedine fortemente ventilata; al contrario, se  $A_v$  è compreso tra questi due numeri limite, allora l'intercapedine è debolmente ventilata (Micunco, 2022; BibLus, 2024a).

Per garantire la ventilazione è necessario che il rapporto tra superficie di aereazione, ossia le aperture e di conseguenza  $A_v$ , e l'altezza della facciata rispetti specifiche proporzioni numeriche. Per esempio, se il progettista, opta per una facciata debolmente ventilata, tale rapporto dovrà essere minore di  $0,002 \text{ m}^2/\text{m}$ ; per una facciata fortemente ventilata, quel rapporto dovrà essere superiore a  $0,05 \text{ m}^2/\text{m}$ ; al contrario, per una media ventilazione, questo rapporto dovrà dare un numero compreso tra i due valori precedenti (Micunco, 2022; BibLus, 2024a).

Per far sì che si abbia l'effetto camino, è fondamentale che l'intercapedine sia almeno di 4 cm di spessore e che non vi siano ostacoli al moto del flusso d'aria, come ad esempio ostruzioni dovute alla presenza di componenti della sottostruttura (Micunco, 2022).

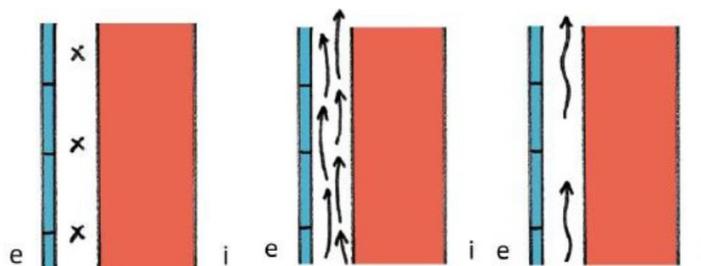


Figura 2.12: Intercapedine non ventilata (a sinistra), intercapedine fortemente ventilata (al centro) e intercapedine debolmente ventilata (a destra) (Micunco, 2022, pag. 25)

La norma UNI 11018-2:2024 stabilisce che lo spessore minimo dell'intercapedine deve essere di 2 cm per consentire il deflusso dell'acqua proveniente dalle precipitazioni. Per quanto riguarda lo spessore massimo, può variare a seconda del rapporto tra la dimensione della facciata, o meglio dalla larghezza da rivestire, e dalla tipologia di ventilazione scelta dal progettista, debole o forte. Inoltre, bisogna tenere in conto anche la resistenza termica della lama d'aria, sulla base del flusso d'aria in facciata, nel calcolo della trasmittanza termica (Ottolenghi, 2023). Quindi, si possono avere spessori di 2-5 cm, fino a

20-30 cm, ma anche 40-60 cm o più, a seconda anche dell'altezza della parete e dell'edificio stesso (Micunco, 2022; Ottolenghi, 2023).

La norma UNI 11018 prescrive, altresì, che l'intercapedine debba essere progettata in modo da prevenire la propagazione di fiamme e fumi lungo la facciata in caso di incendio. Questo implica prevedere la corretta compartimentazione dei camini verticali, che si vengono a creare per la configurazione sia della facciata sia dell'edificio (Micunco, 2022). In altre parole, la facciata si ripartisce con questa configurazione: tra il pacchetto di parete interna, costituito da strato portante e isolamento, e il rivestimento esterno si ha sì l'intercapedine, però in questo spazio si hanno anche le connessioni metalliche che tengono ancorato e fissato il rivestimento esterno. In realtà non si ha un'unica camera di ventilazione che segue il perimetro dell'intero edificio, bensì la facciata viene scomposta in porzioni, o meglio in moduli di una larghezza predefinita, dotati della stratigrafia appena descritta. Tali moduli sono disposti uno accanto all'altro, seguendo il layout perimetrale dell'edificio e andando così a costituirne tutto l'involucro. Ciascuno di questi sarà dotato della propria camera d'aria, o meglio camino. Gli elementi della sottostruttura, in particolare quelli verticali, sono quelli che permettono di riconoscere la modularità e che separano i camini verticali. Questi spazi è bene che non siano comunicanti e che siano indipendenti. Per la sicurezza antincendio, ciò si traduce nella compartimentazione: in sostanza, essa consiste nella realizzazione di camere isolate, le une rispetto alle altre, non suscettibili in alcun modo dagli effetti di un incendio che si genera in una camera adiacente o vicina, in qualsiasi punto della struttura oppure nei suoi pressi.

A questo punto, nonostante qualche anticipazione, è più che opportuno parlare della sottostruttura. Essa è costituita da un insieme di componenti, oggi giorno metalliche, realizzate in acciaio inox, acciaio zincato e leghe di alluminio, le quali possono presentarsi come perni, piastre, inserti e così via, che nell'insieme vanno a formare dispositivi di fissaggio e di ancoraggio. Queste componenti vengono adeguatamente fissate da un lato, verso la parete interna della facciata (strato portante e isolamento). In questo caso, servono a ripartire i carichi provenienti dalla facciata sulla parete portante e alla struttura. Invece, nell'altra direzione, tali elementi metallici hanno una duplice funzione: vengono posizionati per il distanziamento del rivestimento, che serve per realizzare l'intercapedine d'aria, e al contempo per sostenere le lastre che lo costituiscono. Tali inserti metallici trovano alloggio in appositi fori, incavi, solchi, scanalature o intagli, ricavati o predisposti proprio per il fissaggio (Micunco, 2022).

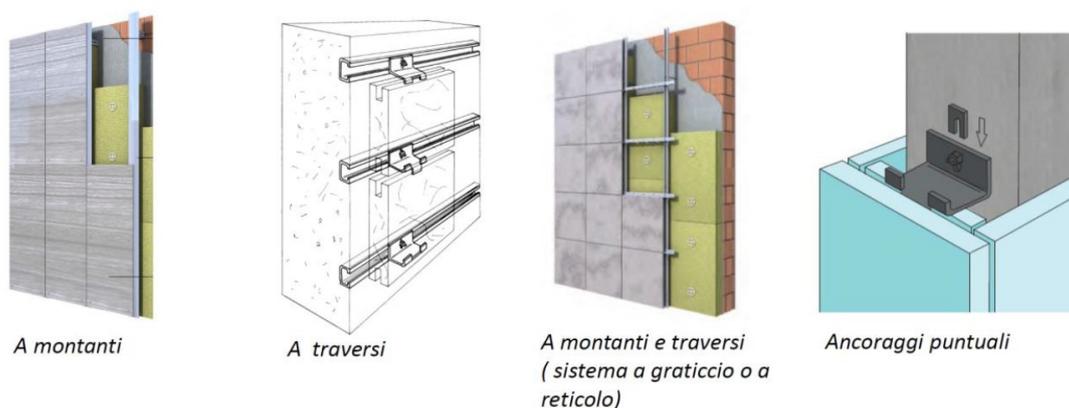
Il montaggio consiste nel realizzare un reticolo di profili metallici disposti sia in senso verticale che orizzontale. Vengono sistemati in una configurazione tale da evitare uno stato tensionale interno dovuto ai carichi accidentali, come ad esempio l'azione del vento. Il numero e le dimensioni specifiche dei profili metallici vengono individuate caso per caso, sulla base delle sollecitazioni previste, al fine di assicurare la stabilità dell'intero sistema. La maglia di profilati metallici della sottostruttura presenta un'orditura principale, composta da montanti verticali ancorati alla parete portante, e un'orditura secondaria, costituita da

traversi orizzontali collegati alla prima orditura e di sostegno per il rivestimento. Tuttavia, in alcune configurazioni, la sottostruttura è composta soltanto da traversi o staffe ancorate direttamente alla parete portante.

L'ancoraggio può essere realizzato attraverso sistemi tradizionali, cosiddetti "a umido", che utilizzano malte o materiali adesivi in combinazione con ganci di ritenuta, oppure mediante sistemi di tipo meccanico o "a secco", che prevedono l'impiego di staffe, profili o tasselli fissati meccanicamente, spesso accompagnati da giunzioni imbullonate nel caso di telai in acciaio. Indipendentemente dalla tecnologia impiegata, l'ancoraggio deve garantire la corretta trasmissione e ripartizione dei carichi dalla facciata alla struttura portante, vincolando saldamente il rivestimento alla stessa.

In alcuni punti della facciata, i fissaggi possono essere puntuali, conferendo al sistema un comportamento isostatico. In altri casi, il sistema di fissaggio è diffuso, determinando un comportamento iperstatico che contribuisce ad arginare i rischi di rottura e collasso del rivestimento.

Una volta completata la facciata, i sistemi di fissaggio possono risultare nascosti, offrendo un vantaggio estetico in quanto non visibili dall'esterno. In alternativa, possono essere a vista, come accade nei fissaggi puntuali, dove generalmente si osservano i quattro punti di ancoraggio delle lastre: due destinati al sostegno e due per l'ancoraggio, anche per contrastare l'azione del vento (Micunco, 2022).



*Figura 2.13: Tipologie di sottostrutture - Fissaggio all'elemento portante (Micunco, 2022, pag. 27)*

Un aspetto importante dei sistemi di fissaggio è la possibilità di sostituzione dei singoli pannelli, capacità che offre comodità nel caso di interventi di manutenzione o sostituzione. Questi sistemi comprendono viti, bulloni, rivetti, squadrette, boccole e altri elementi, progettati per assorbire le deformazioni termiche e i piccoli spostamenti derivanti da azioni accidentali, come vento e sisma. Inoltre, distanziano e sostengono il rivestimento, garantendo allo stesso tempo resistenza, durabilità e sicurezza all'intera struttura (Micunco, 2022).

Tornando alla stratigrafia, l'ultimo strato della facciata ventilata è il rivestimento esterno. Esso si presenta sotto forma di pannelli o lastre di materiale di varia natura, come ad esempio ceramica o gres, metallo (alluminio, zinco o zinco-titanio), pietra naturale o

ricostituita, vetro, laterizio o addirittura legno trattato per l'installazione esterna (Ottolenghi, 2023), ma anche cemento e materiali plastici (Micunco, 2022). Pertanto, in base al materiale scelto, è possibile avere rivestimenti opachi o trasparenti. Il progettista può scegliere tra un'ampissima varietà di finiture, per quanto riguarda materiali, colori, texture, opacità e trasparenza (Ottolenghi, 2023). Oltre a ciò, la scelta del materiale per il rivestimento non si limita a criteri estetici, ma deve rispondere alle specifiche esigenze funzionali del progetto. I pannelli o le lastre, a prescindere dal materiale, sono generalmente installati o agganciati mediante sistemi a secco, garantendo una posa efficiente e una manutenzione semplificata.

I requisiti dei rivestimenti esterni sono essenzialmente avere una buona rispondenza e resistenza ai fenomeni di degrado e in caso di incendio. In relazione al degrado, i materiali devono presentare una elevata resistenza agli shock termici e meccanici, una capacità di resistere all'azione dell'acqua e del vento e, in generale, esibire durabilità e inalterabilità fisico-meccanica buone, se non ottime. Per quanto riguarda la sicurezza antincendio, i rivestimenti devono essere incombustibili o, al più, conformi ai requisiti normativi in termini di comportamento al fuoco e, ovviamente, devono impedire la propagazione delle fiamme, con restrizioni più stringenti al crescere dell'altezza dell'edificio (Micunco, 2022).

Dal punto di vista funzionale, il rivestimento esterno può riflettere la radiazione solare, quantomeno una quota, abbattendo il calore e la temperatura sulla frontiera esterna e schermando la facciata. Si noti che questa azione di protezione rappresenta un'altra differenza e un vantaggio in più rispetto alla soluzione a cappotto. Inoltre, il rivestimento contribuisce in modo significativo alla conservazione della facciata, assicurandone la durabilità e proteggendo l'intercapedine e la facciata interna dalla radiazione solare diretta e dagli effetti di agenti atmosferici come pioggia, vento e intemperie di varia natura. Le modalità di fissaggio adottate generano giunti tra le lastre, ovvero spazi tra un elemento e l'altro. La loro presenza previene ristagni d'acqua, favorendo il deflusso delle acque meteoriche e riducendo così il rischio di infiltrazioni (Micunco, 2022).

È essenziale che la dimensione dei giunti sia tale da consentire i movimenti differenziali delle lastre, dovuti ad esempio all'espansione termica dei materiali durante la stagione calda. Infatti, un contrasto eccessivo tra le lastre, causato dall'assenza di adeguati spazi di dilatazione, può determinare la rottura del rivestimento. I giunti possono essere di tipo chiuso, con un distanziamento di circa 2-3 mm, o di tipo aperto, con distanziamenti più ampi, generalmente di 6-7 mm, per meglio adattarsi ai movimenti termici e alle esigenze progettuali specifiche (Micunco, 2022).

### **I vantaggi e altre considerazioni**

Le facciate ventilate presentano numerosi vantaggi, che ne fanno una soluzione altamente apprezzata sia per edifici di nuova costruzione che per interventi su strutture esistenti.

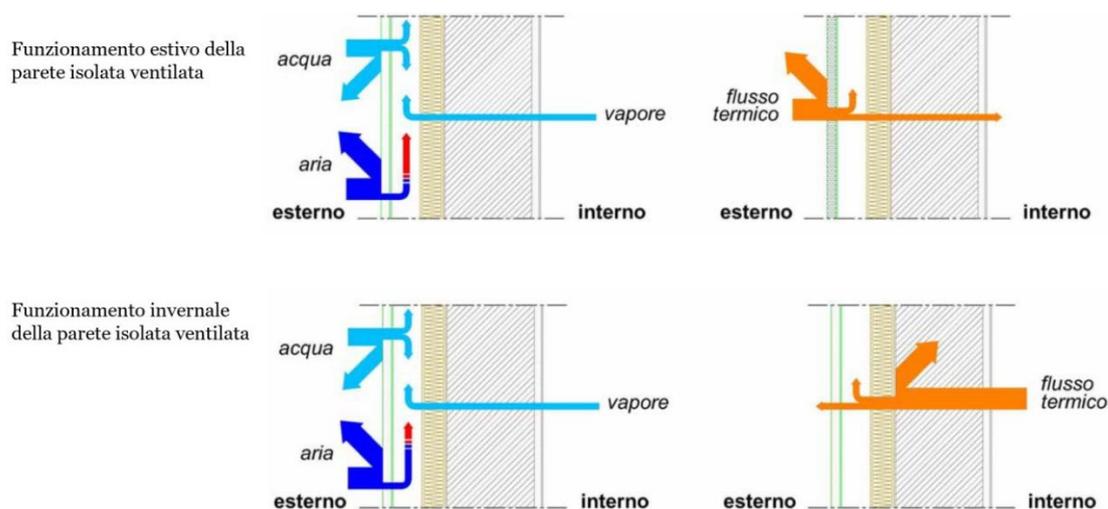


Figura 2.14: Schema di funzionamento di una parete a ventilazione naturale in regime estivo ed invernale (Micunco, 2022)

Come già detto in precedenza, durante la stagione estiva il sistema è particolarmente efficace nell'abbattere il calore in ingresso, mentre in inverno riduce le dispersioni termiche garantendo così un ambiente interno più confortevole e una riduzione dei consumi energetici.

Inoltre, un altro aspetto fondamentale è l'evacuazione del vapore acqueo resa possibile grazie alla presenza dell'intercapedine ventilata. Questo processo favorisce l'eliminazione di problematiche legate all'umidità e alla formazione di condensa superficiale, che possono compromettere qualsiasi materiale, accelerandone il degrado. Infatti, la presenza di acqua in punti critici può avere effetti negativi, innescando fenomeni di deterioramento fisico e chimico.

La lama d'aria svolge anche un ruolo cruciale nel prevenire la formazione di ghiaccio durante la stagione fredda. In sua assenza, il ghiaccio potrebbe accumularsi in zone indesiderate, espandendosi e generando danni strutturali, come crepe o varchi nella facciata. Tali aperture non solo comprometterebbero la tenuta complessiva, ma faciliterebbero anche l'ingresso di acqua, aria e altri agenti esterni, accelerando ulteriormente il degrado della struttura (Micunco, 2022).

Oltre ai significativi benefici in termini di isolamento termico e acustico, le facciate ventilate contribuiscono alla riqualificazione energetica degli edifici (Micunco, 2022). Oggigiorno, l'isolamento e l'efficientamento energetico degli edifici sono fondamentali, poiché offrono l'opportunità di diminuire i costi dell'energia e gli impatti ambientali. Risultano indispensabili anche per contrastare il cambiamento climatico e per favorire condizioni ambientali più salubri, contribuendo così a una maggiore sostenibilità e alla tutela della qualità dell'aria (De Trizio, 2024).

In proposito, un altro vantaggio significativo è rappresentato dalla possibilità di mantenere una buona continuità dello strato isolante, proteggendo la struttura primaria e favorendo la riduzione delle temperature superficiali esterne durante i mesi estivi. Questa

caratteristica, unita all'ampia varietà di materiali disponibili per l'isolamento termico, garantisce un eccellente comfort abitativo e una maggiore sostenibilità energetica (Micunco, 2022).

La facciata ventilata ha un impatto visivo rilevante, soprattutto per quanto riguarda la finitura esterna, e offre numerose soluzioni, apprezzate specialmente nel settore terziario per la realizzazione di edifici commerciali, industriali e per uffici. In aggiunta, la flessibilità del sistema permette di adattarlo a una vasta gamma di progetti, sia dal punto di vista strutturale che nella composizione degli strati (Micunco, 2022). Dunque, il progettista è libero di organizzare e comporre il sistema della facciata per rispondere ad esigenze specifiche (Micunco, 2022), definendone così anche il valore sia architettonico che estetico (Ottolenghi, 2023).

Uno dei principali punti di forza è l'elevata lavorabilità del sistema, dal momento che la preparazione preliminare del muro portante risulta quasi superflua, grazie all'alto grado di prefabbricazione dei componenti. Questo aspetto, unito alla possibilità di personalizzare gli elementi direttamente in cantiere, rende il sistema estremamente versatile.

La velocità e la semplicità di installazione costituiscono ulteriori vantaggi, sebbene sia comunque necessaria una formazione adeguata degli operatori per garantire risultati ottimali. Inoltre, i lavori possono essere eseguiti in qualsiasi periodo dell'anno, senza particolari limitazioni legate alle condizioni atmosferiche (Micunco, 2022).

Dal punto di vista della durabilità, la vita utile stimata di una facciata ventilata può raggiungere i 50-100 anni, riducendo così la necessità di interventi frequenti (Micunco, 2022). Questo implica comunque opportuni interventi di manutenzione programmata; tuttavia, i costi di tali interventi saranno contenuti perché, una volta completata l'installazione, il sistema non richiede operazioni complesse o regolari (Ottolenghi, 2023).

I limiti delle facciate ventilate, pur essendo relativamente pochi rispetto ai numerosi vantaggi, si concentrano prevalentemente nelle fasi iniziali di progettazione e installazione. Questo tipo di soluzione comporta un costo iniziale più elevato rispetto ai sistemi di rivestimento o isolamento tradizionali. Inoltre, è indispensabile un'accurata progettazione che tenga conto di tutti gli aspetti del sistema, dalla scelta dei materiali e delle modalità di aggancio alla struttura portante, fino alla pianificazione delle fasi manutentive. La posa in opera, a sua volta, deve essere eseguita da personale qualificato, garantendo così un'installazione professionale e sicura (Ottolenghi, 2023).

La progettazione di un sistema di rivestimento a parete ventilata richiede un'attenta analisi di molteplici fattori, tra cui la tipologia di intervento, il sito di ubicazione, le condizioni climatiche, la destinazione d'uso e l'altezza dell'edificio. Quest'ultimo aspetto riveste un'importanza particolare: con l'aumento dell'altezza, vento e variazioni di temperatura possono differire notevolmente rispetto al livello del piano terra. In queste situazioni, vi è un incremento della differenza di pressione dell'aria e della temperatura tra l'ambiente interno ed esterno, rendendo necessaria una personalizzazione delle strategie di

ventilazione naturale. Una soluzione efficace per edifici alti può essere rappresentata dalla segmentazione del sistema in unità indipendenti, che consente di ottimizzare le prestazioni di ventilazione in base alle specifiche esigenze (Micunco, 2022).

La progettazione di una facciata ventilata implica una valutazione dettagliata e il corretto dimensionamento di ciascuna componente, ossia del rivestimento esterno, dell'intercapedine d'aria, dello strato isolante impermeabile, fino alle aperture di aerazione. I materiali selezionati devono rispondere a requisiti specifici, come si è visto, tra cui resistenza al fuoco, agli agenti atmosferici e ai carichi, assicurando così durabilità ed efficienza del sistema nel tempo (Ottolenghi, 2023).

In conclusione, dal punto di vista della manutenzione, le facciate ventilate offrono numerosi vantaggi. La separazione tra finitura esterna e involucro retrostante facilita le operazioni di controllo periodico, generalmente annuale, per verificare l'integrità del sistema e l'assenza di difetti come crepe, infiltrazioni o ostruzioni nell'intercapedine di ventilazione.

Le attività di manutenzione ordinaria comprendono la pulizia delle lastre di finitura, effettuata solitamente ogni due o tre anni per rimuovere smog e polvere accumulati. Eventuali parti danneggiate o deteriorate devono essere sostituite o riparate tempestivamente, al fine di preservare il livello di efficienza originario e garantire una maggiore resistenza agli agenti atmosferici. Per queste operazioni è sempre consigliabile rivolgersi a professionisti esperti, in grado di assicurare un intervento accurato e conforme agli standard richiesti (Ottolenghi, 2023).

### **Le facciate micro-ventilate**

Le pareti micro-ventilate e pseudo-ventilate rappresentano una variante delle facciate ventilate, condividendo con queste ultime alcune caratteristiche architettoniche e funzionali, pur mostrando differenze significative. Questi sistemi non consentono di controllare e di regolare i flussi d'aria all'interno della lama d'aria in base alle esigenze stagionali o giornaliere. Di conseguenza, le loro prestazioni termiche dipendono in misura maggiore dallo strato isolante, che necessita di spessori maggiori per garantire l'efficacia complessiva del sistema (Micunco, 2022).

Secondo la norma UNI 11018, una parete micro-ventilata è definita come una

*parete opaca di facciata in cui il rivestimento esterno è costituito da elementi di varia fattura, messi in opera a secco tramite dispositivi di sospensione e fissaggio di tipo meccanico, il cui lato nascosto rimane separato dal fronte di parete retrostante (sul quale può trovarsi un pannello termoisolante) tramite un'intercapedine sottile, la quale ha uno spessore comunque sufficiente a interrompere la continuità fisica tra rivestimento esterno e gli strati della parete.*

Per le pareti micro-ventilate, la camera d'aria tra rivestimento esterno e parete portante rappresenta una discontinuità di tipo fisico, la cui funzione principale è proteggere gli strati

situati dietro da pioggia e vento. Affinché il sistema funzioni correttamente, lo spessore dell'intercapedine dovrebbe essere di almeno 2-3 cm. Inoltre, è fondamentale mantenere un equilibrio tra la pressione dell'aria nell'intercapedine e quella all'esterno del rivestimento, per prevenire infiltrazioni d'acqua che potrebbero compromettere l'efficienza termica della struttura; perciò, si consiglia di non procedere alla sigillatura dei giunti del rivestimento (Micunco, 2022).

Relativamente allo strato isolante, è prevedibile che questo possa entrare in contatto con l'acqua durante il suo ciclo di vita. Pertanto, la scelta del materiale isolante è cruciale: deve essere non idrofilo oppure, se idrofilo, adeguatamente protetto da una barriera impermeabile. Questo accorgimento è essenziale per mantenere inalterate le prestazioni del sistema nel tempo e per preservare l'efficienza della chiusura verticale (Micunco, 2022).

## 2.3. La normativa italiana

### 2.3.1. *L'efficienza energetica delle strutture*

Nella società contemporanea, l'efficientamento energetico degli edifici rappresenta un tema importante, poiché è un elemento chiave per ottenere significativi risparmi economici, ridurre i consumi energetici e contribuire positivamente alla sostenibilità ambientale. Tale approccio si inserisce nell'ambito delle strategie di mitigazione del cambiamento climatico, favorendo la riduzione delle emissioni e migliorando l'air quality.

Un aspetto cruciale in questo contesto è rappresentato dalla facciata degli edifici, soprattutto nel caso di strutture di grandi dimensioni, dove l'involucro assume un ruolo predominante per l'efficienza energetica complessiva. La facciata, infatti, costituisce la principale barriera tra l'ambiente esterno e gli spazi interni, influenzando in modo significativo il bilancio energetico dell'intero edificio. Le soluzioni progettuali sono finalizzate a ridurre, durante il periodo estivo, l'assorbimento di calore dovuto all'irraggiamento solare e l'aumento delle temperature interne; mentre, in quello invernale, mirano a garantire un efficace isolamento termico, minimizzando le dispersioni di calore dall'interno verso l'esterno. In questo modo si ottiene un miglioramento del comfort abitativo e una significativa riduzione del fabbisogno energetico.

La normativa ha avuto via via un progresso, in cui i legislatori hanno emanato regole sempre più specifiche e stringenti. Le disposizioni normative si sono allineate alle migliori pratiche tecnologiche e scientifiche, con l'obiettivo di promuovere la sostenibilità ambientale e il comfort indoor. In Italia, le prime normative in questo ambito sono state introdotte in risposta alla crisi energetica degli anni '70. Infatti, tale contesto ha rappresentato un punto di svolta, segnando l'inizio di una regolamentazione mirata al miglioramento dell'efficienza energetica e dell'isolamento termico degli edifici, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e favorire un uso più razionale delle risorse energetiche (De Trizio, 2024).

### **Excursus storico normativo in Italia in merito all'efficientamento energetico**

La prima norma in Italia in materia di efficienza energetica fu la Legge del 30 aprile 1976 n. 373, redatta con l'obiettivo di contenere il consumo energetico per usi termici negli edifici. Venne introdotta a seguito di una crisi petrolifera che provocò, al tempo, un'impennata del prezzo del petrolio a livello europeo. Questa legge stabiliva i vincoli per gli impianti termici, in ambito di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione, nonché regole specifiche per l'isolamento termico degli edifici (BibLus, 2017).

La Legge 9 gennaio 1991 n. 10 fu il passo successivo per diminuire i consumi e per rendere migliori le condizioni di impiego dell'energia in maniera compatibile con l'ambiente, quindi senza recare danni ad esso, allineandosi con la politica della Comunità Economica Europea.

È stata la prima legge quadro a disciplinare le modalità di progetto e gestione del sistema edificio-impianto.

Tra le sue disposizioni principali vi era l'obbligo di verificare l'efficacia dell'isolamento termico delle pareti e dei solai. Inoltre, un aspetto chiave introdotto dalla legge riguardava l'efficienza dei sistemi impiantistici: solo se avessero avuto alti livelli di rendimento, sarebbe stato possibile ottenere un effettivo risparmio energetico.

Un'altra novità era la previsione di un bilancio energetico invernale per gli edifici, che teneva conto sia degli "ingressi" che delle "uscite" in termini di calore.

La legge rappresentava un significativo progresso perché fissava, all'articolo 26 comma 7, l'obbligo del soddisfacimento del fabbisogno energetico per gli edifici pubblici o adibiti ad uso pubblico, anche ricorrendo alle fonti di energia rinnovabili, a meno di limitazioni tecniche o economiche.

Infine, l'articolo 28 della stessa legge stabiliva che il proprietario dell'edificio, o chi ne avesse titolo, dovesse depositare presso il Comune una relazione tecnica, firmata dai progettisti, che attestasse la conformità della struttura alle disposizioni normative, onde evitare un'alta sanzione amministrativa (BibLus, 2017).

Dopo l'emanazione della Legge 10/1991, fu promulgato il relativo decreto di attuazione, il D.P.R. n. 412/1993, che introdusse significative novità: una suddivisione del territorio nazionale in funzione del numero di gradi-giorno, una catalogazione degli edifici in base alla loro destinazione d'uso e la determinazione di criteri per la progettazione energetica.

La classificazione climatica si basava sul concetto di gradi-giorno (GG), definiti come la somma, calcolata sull'intero periodo convenzionale di riscaldamento annuale, delle differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente interna, fissata convenzionalmente a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera, come specificato

nella norma UNI 10349<sup>15</sup>. In funzione dei gradi giorno, il territorio italiano veniva suddiviso in sei zone climatiche, indicate con le lettere dalla A alla F.

Zona climatica	Numero di grado giorno
A	GG ≤ 600
B	600 < GG ≤ 900
C	900 < GG ≤ 1400
D	1400 < GG ≤ 2100
E	2100 < GG ≤ 3000
F	GG > 3000

*Tabella 2.2: Classificazione climatica (D.P.R. 412/1993)*

A ciascuna zona climatica era associato un periodo convenzionale di riscaldamento, definito in termini di durata e tempistiche, allo scopo di ottimizzare i consumi energetici in relazione alle caratteristiche climatiche specifiche di ogni area.

Nella Tabella A allegata al D.P.R. 412/1993 vi è un elenco dei comuni italiani diviso per regioni e provincie nel quale è possibile trovare, accanto a ciascuna località, la corrispondente zona climatica.

Gli edifici erano poi suddivisi in categorie in base alla destinazione d'uso.

<i>Categoria</i>	<i>Sottocategoria</i>
E.1 – Edifici adibiti a residenza e assimilabili	(1) abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena, caserme (2) abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine settimana e simili (3) edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari
E.2 – Edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico	
E.3 – Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici	
E.4 – Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili	(1) cinema e teatri, sale di riunione per congressi (2) mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto (3) bar, ristoranti, sale da ballo

---

<sup>15</sup> La norma UNI 10349 ha una versione del 1994, poi aggiornata e articolata in tre parti distinte, ossia UNI 10349-1:2016, UNI/TR 10349-2:2016 e UNI 10349-3:2016 (tutti e quattro i riferimenti normativi sono disponibili nella bibliografia).

<i>Categoria</i>	<i>Sottocategoria</i>
E.5 – Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili: quali negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni	
E.6 – Edifici adibiti ad attività sportive	(1) piscine, saune e assimilabili (2) palestre e assimilabili (3) servizi di supporto alle attività sportive
E.7 – Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	
E.8 – Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	

*Tabella 2.3: Classificazione generale degli edifici per categorie (D.P.R. 412/1993)*

Tutt'oggi, tale tassonomia è ancora valida.

Inoltre, il D.P.R. 412/1993 fissava le regole per la progettazione energetica, basandosi sulla stima del Fabbisogno Energetico Normalizzato (FEN) e sul rendimento globale stagionale dell'impianto termico.

In particolare, FEN si calcola seguendo la formula:

$$FEN = \frac{FEC}{V \cdot GG} \tag{2.2}$$

dove:

- *FEC* è il fabbisogno energetico convenzionale;
- *V* è il prodotto del volume lordo riscaldato;
- *GG* sono i gradi giorno della zona.

FEN è il precursore degli indici di prestazione energetica e rappresenta la quantità complessiva di energia primaria necessaria, su base annuale, per mantenere una temperatura costante di 20 °C negli ambienti riscaldati, assicurando al contempo un adeguato ricambio d'aria durante la stagione di riscaldamento (BibLus, 2017).

Nel 2002, il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea introdussero la direttiva 2002/91/CE, nota come Energy Performance of Building Directive (EPBD). Questa misura venne ideata per guidare i Paesi membri verso una maggiore efficienza energetica nel settore edilizio, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale e il livello di inquinamento. In linea con gli impegni assunti con il Protocollo di Kyoto, l'EPBD promuoveva strategie per abbattere le emissioni di gas inquinanti, prestando particolare attenzione al rendimento energetico degli edifici. La direttiva considerava le peculiarità climatiche locali e poneva al centro la sostenibilità economica delle soluzioni adottate.

Tra le disposizioni principali, includeva la definizione di un metodo per calcolare il rendimento energetico integrato degli edifici, l'introduzione di requisiti minimi per gli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazioni significative, la certificazione energetica e l'ispezione periodica di caldaie e sistemi di climatizzazione. Una delle innovazioni più rilevanti

riguardava l'attenzione rivolta al miglioramento energetico del patrimonio edilizio esistente, spesso soggetto a normative meno stringenti rispetto alle nuove costruzioni.

La direttiva introdusse anche il concetto di attestato di certificazione energetica, uno strumento chiave per informare i cittadini sull'efficienza energetica degli edifici e favorire scelte più consapevoli in fase di acquisto o locazione. Oltre a riportare i parametri di rendimento energetico, l'attestato doveva includere suggerimenti per migliorare le prestazioni attraverso interventi economicamente sostenibili. L'articolo 7 della direttiva stabiliva che questo documento dovesse essere reso disponibile durante la compravendita o l'affitto di un immobile e ha una validità massima di dieci anni (BibLus, 2017).

Nel 2005, l'Italia recepì la direttiva con il Decreto Legislativo 192/2005, che fissava un quadro normativo per le prestazioni energetiche degli edifici. Tra gli obiettivi principali vi erano la definizione di metodi di calcolo, l'applicazione di requisiti minimi, l'istituzione della certificazione energetica e la regolamentazione delle ispezioni sugli impianti. Il decreto puntava anche a sensibilizzare gli utenti finali sull'uso razionale dell'energia, attraverso campagne informative e programmi di formazione (BibLus, 2017).

Successivamente, il Decreto Legislativo 311/2006 ha introdotto modifiche significative al D.Lgs. 192/2005, inasprendo i limiti relativi alle prestazioni energetiche e introducendo l'Attestato di Qualificazione Energetica (AQE). Questo documento, sebbene facoltativo, anticipava il processo per ottenere la certificazione energetica e conteneva dati come i fabbisogni energetici e la classe dell'edificio, fornendo un riferimento utile per eventuali miglioramenti (BibLus, 2017).

Nel 2009, il D.P.R. 59/2009 armonizzò ulteriormente le normative, precisando metodologie e requisiti per la climatizzazione estiva e invernale, la produzione di acqua calda sanitaria e l'illuminazione degli edifici non residenziali. Lo stesso decreto introdusse norme tecniche nazionali per il calcolo delle prestazioni energetiche, come la UNI/TS 11300<sup>16</sup>, e ribadì l'importanza di utilizzare software certificati per la verifica delle prestazioni (BibLus, 2017).

Più avanti, la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, entrata in vigore il 19 maggio 2010, abrogò la precedente Direttiva 2002/91/CE e introdusse un approccio più mirato alla prestazione energetica degli edifici. Questa normativa ampliò l'ambito delle misure per migliorare l'efficienza energetica degli edifici all'interno dell'Unione Europea, tenendo conto delle differenti condizioni climatiche locali e delle necessità di garantire il comfort interno, pur mantenendo l'efficacia in termini di costi. L'obiettivo centrale della direttiva fu la riduzione del consumo energetico, promuovendo l'utilizzo di fonti rinnovabili e migliorando la prestazione energetica degli edifici esistenti e di nuova costruzione.

---

<sup>16</sup> Il D.P.R. 59/2009 individuava, in particolare, sia la parte 1 sia la parte 2.

Un altro passo importante fu compiuto con il Decreto Legislativo 28/2011, che promosse l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici e prevede obblighi per la comunicazione dell'efficienza energetica nelle compravendite e locazioni. Il decreto impose anche che gli annunci immobiliari riportassero l'indice di prestazione energetica, favorendo una maggiore trasparenza nel mercato (BibLus, 2017).

Infine, il Decreto Legge 63/2013, insieme alla successiva Legge 90/2013, segnò un cambiamento significativo nella certificazione energetica, introducendo l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) in sostituzione dell'Attestato di Certificazione Energetica (ACE). Mentre l'ACE si concentrava principalmente sulle caratteristiche tecniche dell'edificio, l'APE fornisce una valutazione più completa delle performance energetiche, includendo anche raccomandazioni per migliorare l'efficienza e ridurre i consumi. Questa nuova certificazione, obbligatoria anche per le locazioni, includeva una dichiarazione del professionista che garantiva l'accuratezza dei dati forniti. La normativa introdusse anche sanzioni amministrative per chi non rispettava le disposizioni, sottolineando la necessità di conformarsi agli standard vigenti. Il D.L. 63/2013 fu, inoltre, il recepimento in Italia della Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia, un passo importante verso l'armonizzazione con le normative europee e l'incremento dell'efficienza energetica nel settore edilizio (BibLus, 2017).

Nel 2015, con l'emanazione di tre decreti interministeriali, fu completato il quadro normativo in materia di efficienza energetica negli edifici. Questi decreti, racchiusi nel D.M. 26/06/2015, si suddividono in un decreto sui requisiti minimi, una linea guida per il nuovo APE 2015 e un decreto relativo alla relazione tecnica di progetto. In generale, definiscono le prestazioni energetiche, le modalità di certificazione e i criteri di progettazione, stabilendo parametri chiari per il settore. Le linee guida forniscono un riferimento esplicito per i professionisti, garantendo maggiore uniformità e trasparenza nelle procedure (BibLus, 2017). È previsto un aggiornamento normativo nel 2025, ma tali disposizioni rimangono quelle tuttora vigenti.

### **I requisiti di trasmittanza termica**

Le normative di settore stabiliscono numerosi requisiti di prestazione che devono essere rispettati in fase di progettazione<sup>17</sup>. Tra questi, il parametro che riveste un ruolo centrale è la trasmittanza termica, spesso al centro delle valutazioni tecniche del progettista. Questo valore, infatti, rappresenta l'indicatore fondamentale per garantire un adeguato isolamento termico degli edifici, rendendolo il punto focale delle analisi progettuali.

---

<sup>17</sup> Si rimanda alla lettura della normativa vigente per tutti gli altri parametri e prescrizioni che non sono stati trattati nel presente lavoro di tesi.

Il Decreto Legislativo 311/2006 stabiliva, nell'Allegato C (Allegato I, commi 1, 2, 3) – Requisiti energetici degli edifici, i seguenti valori limite di trasmittanza termica, indicata con il simbolo  $U$ :

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2010 $U [W/m^2K]$
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

*Tabella 2.4: Valori limite della trasmittanza termica delle strutture opache verticali (Tabella 2.1, D. Lgs. 311/2006)*

Per le strutture opache orizzontali o inclinate, invece, stabiliva i seguenti valori:

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2010 $U [W/m^2K]$
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

*Tabella 2.5: Valori limite della trasmittanza termica delle coperture (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006)*

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2010 $U [W/m^2K]$
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

*Tabella 2.6: Valori limite della trasmittanza termica dei pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006)*

Mentre, per quanto riguarda la trasmittanza termica delle chiusure trasparenti, i valori limite erano:

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2010 $U [W/m^2K]$
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,4	2,2
F	2,4	2,2	2,0

*Tabella 2.7: Valori limite della trasmittanza termica delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006)*

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2011 $U [W/m^2K]$
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,3	1,7	1,3

*Tabella 2.8: Valori limite della trasmittanza centrale termica dei vetri (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006)*

Nel D.Lgs. 311/2006, le tre soglie temporali (2006, 2008 e 2010/2011) rappresentano aggiornamenti progressivi dei requisiti di prestazione energetica, fissando scadenze per l'introduzione di standard più severi. Ogni fase ha incrementato le richieste di efficienza energetica, spingendo verso un miglioramento continuo delle prestazioni degli edifici. A tal proposito, è possibile notare una diminuzione dei valori limite di trasmittanza termica, segno che i criteri sono diventati via via più stringenti nel tempo.

Dal D.M. 26/06/2015, i valori di trasmittanza termica sono differenti. In particolare, nell'Appendice A (Allegato I, Capitolo 3) – Descrizione dell'edificio di riferimento e parametri di verifica, nella parte "Parametri dell'edificio di riferimento", si hanno tabelle riportate di seguito.

Zona climatica	$U [W/m^2K]$	
	2015	2019/2021
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

*Tabella 2.9: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 1, Appendice A, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	$U [W/m^2K]$	
	2015	2019/2021
A e B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

*Tabella 2.10: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati (Tabella 2, Appendice A, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2019/2021
A e B	0,46	0,44
C	0,40	0,38
D	0,32	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

*Tabella 2.11: Valori di trasmittanza termica delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 3, Appendice A, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2019/2021
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,20
D	2,00	1,80
E	1,80	1,40
F	1,50	1,10

*Tabella 2.12: Valori di trasmittanza termica delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati (Tabella 4, Appendice A, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2019/2021
Tutte le zone	0,8	0,8

*Tabella 2.13: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti (Tabella 5, Appendice A, D.M. 26/06/2015)*

Le tabelle hanno tutte due colonne perché i valori nella colonna sinistra erano i limiti vigenti dal 1 luglio 2015 per tutti gli edifici, mentre in quella di destra vi sono le soglie di trasmittanza vigenti dal 1 gennaio 2019 per tutti gli edifici pubblici e ad uso pubblico e poi vigenti dal 1 gennaio 2021 per tutti gli altri edifici.

Nell'Appendice B (Allegato I, capitolo 4) – Requisiti specifici per gli edifici soggetti a riqualificazione energetica, nella parte “Valori dei parametri caratteristici degli elementi edilizi e impianti tecnici negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica”, vi sono le tabelle:

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2021
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

*Tabella 2.14: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 1, Appendice B, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2021
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

*Tabella 2.15: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 2, Appendice B, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2021
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

*Tabella 2.16: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 3, Appendice B, D.M. 26/06/2015)*

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2021
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

*Tabella 2.17: Valori di trasmittanza termica massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione (Tabella 4, Appendice B, D.M. 26/06/2015)*

Anche in questo caso, le tabelle hanno nella colonna sinistra i limiti vigenti dal 1 luglio 2015 per tutti gli edifici, mentre in quella di destra vi sono le soglie di trasmittanza vigenti dal 1 gennaio 2021 (sempre per tutti gli edifici).

### **2.3.2. La sicurezza antincendio**

La prevenzione incendi rappresenta un aspetto fondamentale nella progettazione e gestione degli edifici, specialmente per quelli di grande altezza.<sup>18</sup> Analizzando il quadro normativo italiano relativo alla sicurezza antincendio degli edifici alti, emerge un'evoluzione che ha portato da disposizioni generali a regole sempre più specifiche e dettagliate, con particolare attenzione alle facciate e alle coperture.

---

<sup>18</sup> Per questo motivo, è stato scelto di parlarne all'inizio del capitolo 1, nella sezione 1.1.

### **Excursus storico normativo in Italia in merito alla sicurezza antincendio**

L'evoluzione delle normative antincendio in Italia ha avuto inizio con il Regio Decreto n. 635 del 6 maggio 1940, che introdusse le prime disposizioni generali in materia di sicurezza pubblica, comprendendo anche riferimenti alla protezione contro gli incendi. Sebbene non specifico per gli edifici alti, tale decreto rappresentò una base per lo sviluppo delle successive regolamentazioni. Successivamente, la Legge n. 966 del 26 luglio 1965 istituì il Servizio Nazionale dei Vigili del Fuoco, consolidando i principi organici di prevenzione incendi applicabili anche alle costruzioni più elevate.

Un passo significativo fu compiuto con il Decreto Ministeriale del 16 febbraio 1982, che incluse tra le attività a rischio gli edifici civili con altezza antincendio superiore ai 24 metri, soggetti a controlli più rigorosi. Questo approccio venne ulteriormente rafforzato dalla Legge n. 818 del 7 dicembre 1984, che rese obbligatoria la conformità alle norme antincendio per le attività sottoposte a vigilanza, imponendo requisiti di sicurezza sempre più stringenti. Con il successivo Decreto Ministeriale del 16 maggio 1987 n. 246, fu modificato il criterio di classificazione degli edifici ad uso civile, sostituendo l'altezza di gronda con l'altezza antincendio come parametro principale per la valutazione dei rischi.

Un momento cruciale nell'armonizzazione delle procedure fu rappresentato dal Decreto Ministeriale del 9 marzo 2007, che introdusse un approccio organico alla sicurezza degli edifici, fornendo un quadro unitario per la prevenzione incendi.

Da allora, la normativa italiana ha continuato a progredire, culminando con l'introduzione del Codice di prevenzione incendi e delle Regole Tecniche Verticali, strumenti che hanno permesso di affrontare in modo specifico i rischi associati agli edifici alti.

Nel 2010, la Lettera Circolare n. 5643 affrontò per la prima volta in Italia la sicurezza antincendio delle facciate degli edifici. Successivamente, nel 2013, il Dipartimento Ministeriale dei Vigili del Fuoco pubblicò la Lettera Circolare n. 5043 che sostituì la precedente aggiornandola.

Infine, con il Decreto Ministeriale del 3 agosto 2015 venne introdotto il Codice di prevenzione incendi, un documento che segnò un cambiamento significativo nel panorama normativo, adottando un sistema prestazionale che consentiva una maggiore flessibilità progettuale, pur mantenendo elevati standard di sicurezza.

Oltre a ciò, si ricorda che in generale le normative italiane si integrano con regolamenti europei, come il Regolamento UE n. 305/2011, che stabilisce i requisiti essenziali per i prodotti da costruzione, compreso il loro comportamento in caso di incendio. Gli Eurocodici, inoltre, forniscono linee guida comuni per la progettazione strutturale a livello europeo, contribuendo a un approccio uniforme nella gestione della sicurezza antincendio nelle costruzioni.

## **La reazione al fuoco**

La reazione al fuoco è una delle strategie all'interno del Codice di prevenzione incendi, o meglio delle misure antincendio da perseguire nella fase pre-flashover (Vancetti, 2022). Dal paragrafo G.1.13 del testo:

*«esprime il comportamento di un materiale che, con la sua decomposizione, partecipa al fuoco al quale è stato sottoposto in specifiche condizioni» (Codice, pag. G.1-15).*

In altre parole, si considera qualsiasi reazione che può avere il materiale sottoposto all'incendio e che viene tradotta in una classe di reazione al fuoco, la quale viene definita allo stesso paragrafo G.1.13:

*«grado di partecipazione di un materiale (o di un prodotto) al fuoco al quale è stato sottoposto; viene attribuita a seguito di prove normalizzate tramite cui valutare specifici parametri o caratteristiche, che concorrono a determinarne il grado di partecipazione all'incendio» (Codice, pag. G.1-15).*

Più avanti, sempre nel Codice si trova al paragrafo S.1.1:

*«La reazione al fuoco è una misura antincendio di protezione passiva che esplica i suoi principali effetti nella fase iniziale dell'incendio, con l'obiettivo di limitare l'innescò dei materiali e la propagazione dell'incendio. Essa si riferisce al comportamento al fuoco dei materiali nelle effettive condizioni d'uso finali, con particolare riguardo al grado di partecipazione all'incendio che essi manifestano in condizioni standardizzate di prova» (pag. S.1-2)*

Gli obiettivi di tale strategia sono abbattere la velocità di propagazione dell'incendio, evitare che quest'ultimo coinvolga altri materiali e fare in modo che aumentino i tempi di evacuazione. Infatti, la reazione al fuoco è una caratteristica che determina le fasi pre-flashover di ignizione e propagazione, mentre nella fase d'incendio generalizzato è sostanzialmente inefficace.

In verità, tre sono le strategie dove il progettista può agire per aumentare il tempo per l'evacuazione e, dunque, per l'esodo: reazione al fuoco (S1), resistenza al fuoco (S2) e compartimentazione (S3). La resistenza al fuoco viene approfondita più avanti, pertanto si rimanda il lettore alla prossima sezione. Per quanto riguarda la compartimentazione, essa stabilisce confini e indipendenze, in modo tale che le aree siano stagne, le une rispetto alle altre, e che gli effetti di un incendio originati in uno di questi spazi non intacchino un altro adiacente, vicino o anche lontano. Quindi, tale strategia gioca sulle distanze e insieme alle prime due può far aumentare i tempi delle prime fasi dell'incendio e, di conseguenza, anche quelli per l'esodo<sup>19</sup> (Vancetti, 2022).

---

<sup>19</sup> L'esodo, tra l'altro, è la strategia S4 nel Codice. Da qui si può notare la retroattività della norma, caratteristica citata precedentemente: le misure antincendio non sono scollegate, ma anzi hanno effetti e conseguenze le une sulle altre.

In passato, in Italia il D.M. 26 giugno 1984, poi modificato il 3 settembre 2001, disciplinava la classificazione di reazione al fuoco dei materiali e la loro omologazione ai fini della prevenzione incendi. Sull'esecuzione di prove sui materiali, essi venivano suddivisi in classi da 0, ossia incombustibili, a 5 e, con il crescere della numerazione, aumentava il grado di partecipazione all'incendio. In verità, esisteva una classificazione a parte per i mobili imbottiti (1 IM, 2 IM, 3 IM).

Successivamente, è stata introdotta la norma UNI EN 13501-1:2009, la quale fornisce una classificazione di reazione al fuoco di tutti i prodotti da costruzione secondo le cosiddette euroclassi: A1 e A2 sono le classi dei materiali incombustibili, a cui seguono B, C, D, E, F, che sono materiali combustibili con un grado di partecipazione all'incendio via via maggiore. I prodotti da costruzione sono differenziati tra pavimenti, identificati con pedice *FL* di *floor*, e gli altri esclusi i pavimenti.

Per un po' di anni, vi è stata questa doppia codifica in cui vi erano queste due classificazioni, quella italiana e quella europea.

Più avanti, con il D.M. del 14 ottobre 2022 il sistema di classificazione italiano è stato abrogato e sono state confermate le euroclassi (Vancetti, 2022).

Euroclasse	Grado di combustibilità
A1	incombustibile (nessun contributo all'incendio)
A2	combustibilità limitata (contributo all'incendio molto limitato)
B	combustibile (contributo limitato all'incendio)
C	combustibile (basso contributo all'incendio)
D	combustibile (medio contributo all'incendio)
E	combustibile (alto contributo all'incendio)
F	combustibile (estremamente infiammabile)

*Tabella 2.18: Classi di reazione al fuoco dei materiali*

Vi è anche una distinzione sulla base dei fumi (*smoke*) e del gocciolamento (*drops*), valutate su una scala che va da 0, cioè assente, a 3, ossia elevato (Vancetti, 2022).

Produzione di fumo		
s1	emissione di fumi molto limitata	bassa velocità
s2	emissione di fumi moderata	media velocità
s3	emissione di fumi elevata	alta velocità

*Tabella 2.19: Classificazione in base alla produzione di fumo*

Gocciolamento	
d0	assenza di gocciolamento
d1	gocciolamento limitato
d2	non classificato

*Tabella 2.20: Classificazione in base al gocciolamento*

La classificazione complementare si avvale anche delle seguenti diciture: *a1*, *a2*, *a3* per la produzione di fumi acidi; *L* per elementi lineari; *ca* per cavi elettrici o di segnalazione (BibLus, 2024b). A volte, oltre *FL* è possibile trovare *ROOF* che indica le coperture (De Trizio, 2024).

Per agevolare il progettista, il Codice introduce dei “gruppi di materiali”, denominati GM, analoghi al vecchio sistema di classificazione italiano poiché vanno da 0 a 4, quindi da GM0 (nessun contributo) a GM4. Racchiudono gruppi di materiali eterogenei, ma con comportamento al fuoco analogo (Vancetti, 2022).

In base alla UNI EN 13501-1, oltre alla capacità di produrre fumo e di gocciolare se sottoposto ad un incendio, i fattori che determinano la reazione al fuoco e, di conseguenza, la classe di reazione al fuoco di un materiale sono l’infiammabilità, ossia l’attitudine a bruciare se vi è un innesco, la velocità di combustione, la quantità e la densità del fumo prodotto, la produzione di calore, la possibile produzione di scintille (BibLus, 2024b) e di sostanze nocive (Micunco, 2022).

Per le prove sperimentali e l’omologazione dei materiali, i riferimenti normativi sono il D.M. 26/06/1984 e il successivo D.M. 10/03/2005. Tuttavia, date le modifiche introdotte successivamente con il D.M. 14/10/2022, si rimanda il lettore direttamente al Testo coordinato sulla Reazione al fuoco dei Vigili del Fuoco.

### **La resistenza al fuoco**

La resistenza al fuoco è la seconda delle strategie all’interno del Codice, ossia è una delle misure della sicurezza antincendio. Con questo termine ci si riferisce alla capacità portante in caso di incendio per una struttura, per una sua parte o elemento strutturale, e anche alla capacità di compartimentazione per gli elementi strutturali di separazione (quali muri, solai e così via) e non strutturali (quali porte, divisori, ecc.). Per quanto riguarda la prima caratteristica, consta nella propensione a mantenere un sufficiente grado di resistenza meccanica anche sotto l’azione del fuoco, oltre a tutte le altre azioni agenti. Mentre, per la seconda, si riferisce alla capacità di restare in possesso anche sotto incendio di sufficienti livelli di prestazione quali l’isolamento termico e la tenuta ai fumi e ai gas caldi di combustione, nonché conservare tutte le altre prestazioni richieste (Vancetti, 2022). Inoltre, si ricorda che la capacità di compartimentazione consta nel rendere gli spazi “stagni”, ossia indipendenti e separati, in modo tale che gli effetti dell’incendio in uno di essi non intacchino gli altri abbattendo, quindi, il rischio di innesco e propagazione (BibLus, 2024c).

Come detto nella sezione precedente, questa strategia è da perseguire nella fase pre-flashover, poiché può avere degli effetti importanti: infatti, aumentando la capacità portante della struttura, aumenteranno i tempi di evacuazione e, di rimando, quelli per l’esodo (Vancetti, 2022).

Il progetto e la realizzazione delle strutture devono essere mirati alla minimizzazione dei rischi derivanti dagli incendi. A tal fine, è necessario assicurare che gli elementi portanti mantengano la stabilità per un tempo sufficiente a consentire l’intervento dei soccorritori, ridurre al minimo la propagazione di fiamme e fumi, garantire la possibilità agli occupanti di abbandonare l’edificio o essere soccorsi in condizioni di sicurezza e, infine, assicurare alle

squadre di soccorso e agli operatori di lavorare e operare anch'essi in sicurezza (BibLus, 2024c).

In Italia, i riferimenti normativi per il calcolo e la verifica di resistenza al fuoco sono il D.M. 16/02/2007 e il D.M. 09/03/2007: il primo decreto, in conformità alla norma europea EN 13501-2, specifica le modalità per individuare le caratteristiche di resistenza al fuoco delle strutture; invece, il secondo decreto disciplina la classificazione, legandosi al precedente, e stabilisce le modalità di calcolo del carico d'incendio. In aggiunta, la normativa italiana fa riferimento all'applicazione degli Eurocodici (EC) e alle relative appendici, nelle quali sono definiti i valori specifici (BibLus, 2024c).

Le caratteristiche fondamentali per valutare la capacità di resistenza al fuoco di un elemento costruttivo sono tre: la resistenza meccanica (R), che misura la capacità di mantenere la stabilità strutturale sotto l'azione del fuoco; l'ermeticità (E), ossia l'attitudine a impedire il passaggio o la formazione di fiamme, gas caldi e vapori sul lato non esposto; e l'isolamento termico (I), ovvero la capacità di limitare la trasmissione del calore (BibLus, 2024c). È necessario specificare che esistono altre tipologie di prestazioni di resistenza al fuoco<sup>20</sup> e, per questo motivo, si rimanda il lettore alla sezione S.2 del Codice.

Le classi di resistenza al fuoco, stabilite dalla normativa REI, sono espresse in minuti (10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 e 360) e rappresentano il periodo durante il quale le prestazioni devono essere garantite. Questi parametri possono essere combinati in sigle, ad esempio: un materiale classificato come REI 60 è in grado di mantenere l'isolamento termico, l'ermeticità e la stabilità strutturale per 60 minuti in caso di incendio (BibLus, 2024c).

La valutazione della resistenza al fuoco può essere realizzata attraverso prove sperimentali<sup>21</sup>, valutazioni analitiche<sup>22</sup> e confronto tabellare<sup>23</sup>.

Il primo metodo prevede l'analisi dei risultati sperimentali dei materiali, studiandone la reazione quando vengono sottoposti alle fiamme e al calore. La valutazione viene effettuata tramite test conformi alle direttive della serie EN 13381 per gli elementi non protetti; invece, per quelli protetti il riferimento delle prove sono le normative della serie EN 13501.

Passando al secondo metodo, il cosiddetto tabellare, esso prevede la valutazione attraverso tabelle appunto: gli elementi strutturali o i singoli componenti devono rientrare in specifiche dimensioni e geometrie per poter garantire una determinata resistenza al fuoco. Infatti, attraverso il Codice il progettista verifica in quale dei livelli di prestazione rientra e a ciascun livello corrisponderanno dei requisiti di resistenza al fuoco per elementi strutturali e non-strutturali. Questa tipologia di verifica mostra una sorta di rigidità, in quanto si applica

---

<sup>20</sup> Si veda, ad esempio, la sezione S.2.11 del Codice di prevenzione incendi.

<sup>21</sup> Si vedano l'Allegato B del D.M. 16/02/2007 e il par. S.2.13 del Codice.

<sup>22</sup> Si vedano l'Allegato C del D.M. 16/02/2007 e il par. S.2.14 del Codice.

<sup>23</sup> Si vedano l'Allegato D del D.M. 16/02/2007 e il par. S.2.15 del Codice.

ai soli elementi contemplati nelle tabelle e non vi sono tutte le casistiche per le possibili verifiche. Inoltre, non si possono interpolare i dati o ricavare valori da queste tabelle.

Infine, si può optare per il metodo analitico, in cui si effettua il calcolo sulla base delle caratteristiche e proprietà dei materiali e di una analisi agli elementi finiti replicando la sezione dell'elemento in condizioni di esercizio reali (BibLus, 2024c).

### **RTV.13 – Chiusure d'ambito di edifici civili**

Nel capitolo V.13 del Codice di prevenzione incendi, vengono presentate tutte le definizioni fondamentali relative alle chiusure d'ambito, che costituiscono il confine esterno di un edificio, sviluppandosi sia in verticale che in orizzontale. Questo capitolo offre una classificazione esaustiva delle diverse tipologie di facciata.

Viene fornita anche una dettagliata categorizzazione delle chiusure d'ambito, che include materiali e tecniche costruttive, con l'obiettivo di garantire una protezione adeguata contro la propagazione del fuoco. Il capitolo stabilisce strategie antincendio chiare e pratiche, fornendo indicazioni sulle soluzioni conformi per quanto riguarda la reazione al fuoco e la resistenza al fuoco dei materiali impiegati nelle facciate. Questi aspetti sono cruciali per la progettazione di edifici sicuri, in quanto la scelta dei materiali influisce direttamente sulla capacità di contenere un incendio e di proteggere gli occupanti.

Particolare attenzione è dedicata alla realizzazione di fasce di separazione, che rappresentano una misura essenziale per limitare la propagazione delle fiamme tra le diverse unità edilizie. Queste fasce non solo contribuiscono a preservare la sicurezza degli occupanti, ma svolgono anche un ruolo fondamentale nella protezione dei soccorritori durante le operazioni di emergenza.

In particolare, tali fasce in facciata devono essere in materiali dotati di classe di reazione al fuoco non inferiore a A2-s1,d0 e realizzate da elementi con classe di resistenza al fuoco almeno E 30-ef (o→i)<sup>24</sup> o, se portanti, RE 30-ef (o→i). Per quanto riguarda la loro geometria, è essenziale garantire uno sviluppo totale maggiore di 1 m.

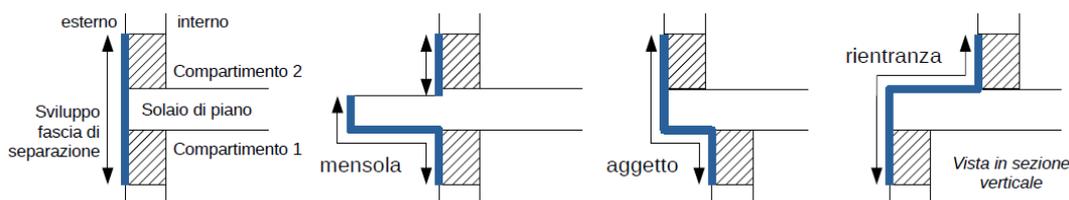
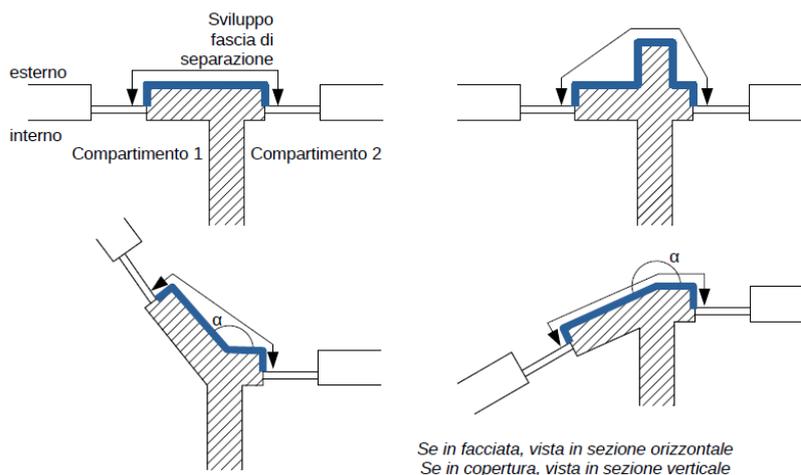


Figure 2.15: Esempi di fascia di separazione orizzontale in facciata (Illustrazione V.13-2, pag. V.13-7, Codice)

<sup>24</sup> ef significa fuoco esterno, mentre (o → i) è l'esposizione al fuoco dall'interno all'esterno.



*Figura 2.16: Esempi di fascia di separazione verticale in facciata o in copertura (Illustrazione V.13-3, pag. V.13-7, Codice)*

La lettura di questo capitolo evidenzia, quindi, l'importanza di un approccio integrato alla progettazione delle facciate, che consideri non solo l'estetica e l'efficienza energetica, ma anche la sicurezza antincendio come priorità assoluta.

Ciò che emerge dal capitolo V.13 è l'importanza di utilizzare materiali appartenenti ai gruppi classificati dal codice come GM2 o GM1, i quali garantiscono adeguate prestazioni in termini di reazione e resistenza al fuoco. Questi materiali comprendono quelli delle categorie A1 e A2, che sono incombustibili, o al più della categoria B, rappresentando materiali combustibili con combustibilità limitata o con un contributo minimo all'incendio.

Per i materiali utilizzati nelle facciate, è richiesta una classificazione minima di B-s2,d0, che implica una limitata partecipazione alla combustione; in altre parole, questi materiali possono bruciare, ma in modo contenuto, emettendo fumi ridotti e senza gocciolamento.

### **RTV.14 – Edifici di civile abitazione**

Nel capitolo V.14 del Codice di prevenzione incendi si affrontano le specifiche misure di sicurezza antincendio applicabili agli edifici di civile abitazione con un'altezza antincendio superiore a 24 metri, corrispondente a edifici di almeno otto piani. Questo capitolo inizia con una classificazione degli edifici in base a diversi criteri, seguita da una sezione dedicata alla valutazione del rischio antincendio, che permette di identificare e analizzare le potenziali minacce legate a incendi in tali strutture.

Successivamente, viene presentata la strategia da seguire per garantire la sicurezza antincendio. Tra le raccomandazioni principali, si evidenziano le indicazioni relative alla reazione al fuoco e alla resistenza al fuoco dei materiali, con una resistenza minima di almeno 60 minuti, fondamentale per contenere la propagazione delle fiamme e garantire il tempo necessario per l'evacuazione degli occupanti.

Il capitolo prosegue con raccomandazioni dettagliate riguardanti la compartimentazione degli spazi, l'esodo degli occupanti, e la gestione complessiva della

sicurezza antincendio. Viene sottolineata l'importanza di sistemi di controllo dell'incendio, inclusi indicazioni sui sistemi di spegnimento, così come i requisiti per la rivelazione e l'allarme, essenziali per una risposta tempestiva in caso di emergenza. Infine, si affrontano aspetti legati all'operatività e alla sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio, assicurando che questi sistemi siano progettati e mantenuti in modo da non compromettere la sicurezza complessiva dell'edificio.

## 3. Gli incendi in facciata

### 3.1. La propagazione dell'incendio in facciata

L'insacco e la propagazione di un incendio possono avvenire in modi differenti e in genere si distinguono in due categorie in base alla loro origine, esterna o interna all'edificio. Gli incendi esterni possono essere causati dalla dispersione di fiamme o tizzoni trasportati dal vento, provenienti da un altro incendio preesistente e in prossimità, oppure dall'esposizione diretta a fonti di calore o fiamme situate in prossimità della costruzione. In questi casi, il trasferimento del calore avviene per irraggiamento o per contatto diretto e l'origine del fenomeno può essere, ad esempio, la combustione di materiali accumulati su terrazzi e balconi o di veicoli parcheggiati nelle immediate vicinanze.

Gli incendi che si sviluppano all'interno di un edificio, invece, rappresentano una delle cause più frequenti (Micunco, 2022).

Possono esserci molteplici ragioni per cui si ha un incendio interno. Per tale ragione, è stato stilato un excursus storico degli incendi più significativi degli edifici alti, ossia con un'altezza superiore a 8 piani, dove è possibile apprendere quali sono le cause più frequenti di incendio interno. In tale sezione saranno disponibili informazioni quali origine appunto, evoluzione, propagazione in facciata, esiti e conseguenze di tali eventi.<sup>25</sup>

Per quanto riguarda gli incendi interni, è fondamentale distinguere tra quelli caratterizzati da scarsa ventilazione (poco o sotto-ventilati), in cui la combustione è limitata dall'apporto di ossigeno, e quelli ben ventilati (anche detti sopra-ventilati), in cui il comburente è presente in quantità sufficiente a sostenere il processo all'interno del compartimento. Nel primo caso, i gas incombusti prodotti dal fuoco possono fuoriuscire dall'ambiente una volta che le superfici vetrate si rompono incendiandosi all'esterno, contribuendo alla propagazione verticale delle fiamme lungo la facciata e facilitandone la diffusione ai piani superiori. Al contrario, per la seconda tipologia, la combustione ha la possibilità di avvenire all'interno del comparto senza impedimenti poiché dispone di tutto il comburente necessario. Pertanto, si avrà una minore intensità delle fiamme che fuoriescono dalle aperture e, di conseguenza, anche un minor rischio di propagazione verticale. Perciò, un incendio sotto-ventilato ha maggiori probabilità di estendersi ai livelli superiori rispetto a un incendio sopra-ventilato (Mazziotti, 2018; De Trizio, 2024).

Quindi, gli scenari della propagazione in facciata possono essere riassunti in tre categorie come riportato nella tabella che segue, a seconda della tipologia di incendio, esterno o interno (Rukavina et al., 2017; De Trizio, 2024).

---

<sup>25</sup> Si veda la sezione 3.2.

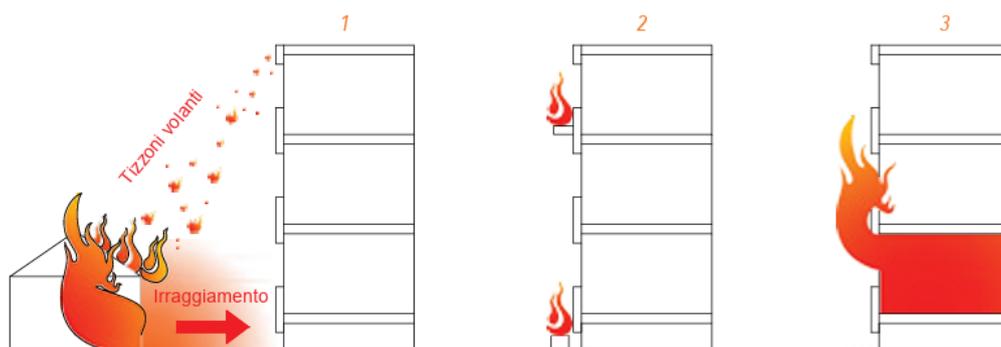


Figure 3.1: Gli scenari tipici di propagazione dell'incendio sulla facciata degli edifici (Rukavina et al., 2017, pag. 12)

Scenario	Tipologia di incendio	Propagazione in facciata	Causa
1	Esterno	Per irraggiamento	Incendio di una struttura adiacente
2	Esterno	Per irraggiamento	Incendio di materiale/i in prossimità dell'edificio stesso
		Per esposizione diretta alle fiamme	
3	Interno	Attraverso le aperture	Molteplici

Tabella 3.1: Sintesi degli scenari di propagazione di incendio in facciata

È opportuno specificare che la diffusione dipende anche dalle condizioni ambientali e dalla configurazione dell'edificio (De Trizio, 2024).

Nel caso di un incendio sviluppatosi all'interno di un edificio, la propagazione può avvenire attraverso le aperture della facciata, come porte, finestre e altro, estendendosi ai piani superiori. Studi specifici evidenziano che, a seguito della rottura di un vetro, le fiamme possono innalzarsi fino a 5 metri oltre il bordo del varco, a seconda delle condizioni del flusso d'aria, indipendentemente dalle caratteristiche costruttive della facciata o dai materiali impiegati (Rukavina et al., 2017; De Trizio, 2024).

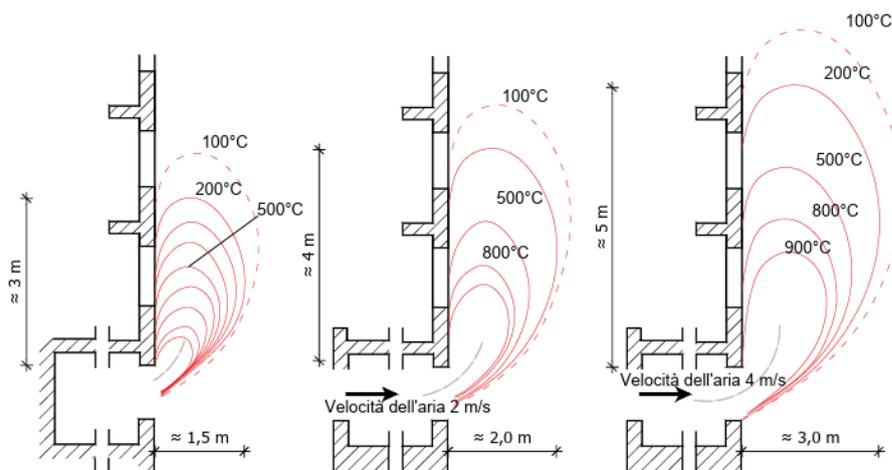


Figure 3.2: Altezze di fiamma con le relative temperature sulla facciata a seconda della velocità di circolazione dell'aria (Rukavina et al., 2017, pag. 13)

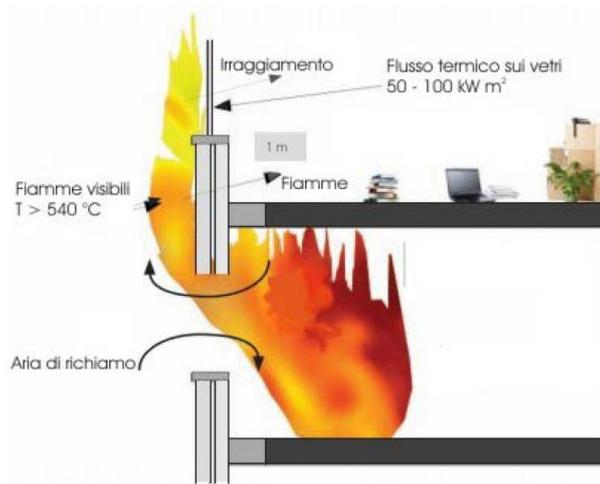


Figura 3.3: La propagazione dell'incendio e delle fiamme in facciata (Giacalone, 2014)

«In generale per una facciata esiste il problema della possibile propagazione di un incendio, dal piano in cui si sviluppa, al piano superiore mediante la fuoriuscita di fiamme esterne.

Alcune sperimentazioni in scala reale con carichi d'incendio di circa  $800 \text{ MJ/m}^2$  hanno mostrato temperature dei fumi che fuoriuscivano dalla finestra della stanza di prova attestate tra i  $400$  ed i  $600 \text{ °C}$  misurate a circa  $1,5 \text{ m}$  dal bordo superiore del vano.

Le altezze delle fiamme hanno superato anche i  $5 \text{ m}$ » (Giacalone, 2014).

Una volta raggiunta la superficie esterna, l'ulteriore diffusione dipende in modo significativo dalle proprietà di reazione e di resistenza al fuoco della facciata (De Trizio, 2024).

Se gli incendi interni non vengono tempestivamente domati, sia tramite l'intervento dei vigili del fuoco sia attraverso l'attivazione di sistemi di spegnimento automatico come gli sprinkler, possono evolvere fino alla fase di pieno sviluppo, ossia raggiungere il flashover (Rukavina et al., 2017; Micunco, 2022).

In questa condizione, le fiamme tendono a estendersi all'esterno coinvolgendo rapidamente la facciata dell'edificio (Micunco, 2022).

La propagazione del fuoco in caso di incendio, esterno o interno, di un edificio e il conseguente coinvolgimento della facciata possono avvenire attraverso diversi meccanismi e modalità (Mazziotti, 2018; Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Le fiamme possono diffondersi direttamente lungo la superficie dell'involucro esterno qualora questa sia costituita da materiali combustibili (Mazziotti, 2018; De Trizio, 2024) o includa elementi tecnologici infiammabili, come i pannelli sottofinestra (Micunco, 2022).

Se l'incendio ha origine all'interno dell'edificio e le aperture sono chiuse, l'aumento di pressione e la produzione di gas caldi determinano la rottura dei vetri, favorendo la fuoriuscita delle fiamme e dei fumi caldi verso l'esterno.

Generalmente, il flusso di calore generato è sufficiente a provocare la rottura delle superfici vetrate entro una decina di minuti, raggiungendo temperature che si aggirano attorno ai 400°C circa e creando condizioni favorevoli alla propagazione convettiva lungo la facciata. Tuttavia, la rottura dei vetri consente anche l'ingresso di aria più fredda dall'esterno, con una conseguente riduzione della temperatura della facciata fino a un centinaio di gradi (Micunco, 2022).

La propagazione del fuoco attraverso le aperture dell'involucro dipende da diversi fattori, tra cui il carico di incendio, la dimensione dell'edificio, la geometria della facciata, le caratteristiche delle aperture e le condizioni di ventilazione (Micunco, 2022). Una volta fuoriuscite, le fiamme possono estendersi verso i piani superiori generando incendi secondari (Mazziotti, 2018; De Trizio, 2024).

La presenza di elementi aggettanti può ridurre il rischio di propagazione, poiché tende ad allontanare le fiamme dal piano della facciata (Micunco, 2022).

Nel caso di facciate ventilate, la propagazione dell'incendio può avvenire attraverso gli spazi vuoti o le intercapedini presenti (Mazziotti, 2018; De Trizio, 2024), con un'accelerazione della combustione lungo la camera di ventilazione (Micunco, 2022).

Per mitigare questo rischio, le normative prevedono una fascia di separazione di estensione al più pari o maggiore di 1 m, come riportato nella Circolare 5043/2013 e poi nella RTV.13 del Codice di prevenzione incendi<sup>26</sup>.

Inoltre, l'incendio può propagarsi attraverso lo spazio vuoto esistente tra la testa del solaio e il lato interno della facciata: in particolare, questa diffusione dell'incendio può essere attribuita a caratteristiche pessime di resistenza al fuoco e tenuta al fumo di tale giunto (Micunco, 2022).

Un'ulteriore modalità di propagazione riguarda la presenza di rivestimenti isolanti esterni applicati all'involucro dell'edificio. Il calore prodotto dalle fiamme può degradare il materiale di protezione, sia combustibile che incombustibile, permettendo al fuoco di penetrare nel pacchetto isolante e determinando il distacco del rivestimento esterno (De Trizio, 2024), che può essere dall'intonaco di finitura (Mazziotti, 2018) al rivestimento esterno delle facciate ventilate.

Inoltre, un aspetto da considerare è il rischio di collasso di elementi della facciata, particolarmente quelli costituiti da materiali fragili come il vetro, che potrebbero cedere a seguito dell'esposizione prolungata al calore (Micunco, 2022).

La caduta di detriti incandescenti o di parti della facciata provocata dall'incendio può a sua volta generare nuovi focolai (secondari) nelle aree adiacenti all'edificio (Mazziotti, 2018; De Trizio, 2024).

Infine, fattori climatici come temperatura, pressione, umidità relativa e vento influiscono sulle dinamiche di propagazione del fuoco e sulle sue conseguenze (Micunco, 2022).

---

<sup>26</sup> Per la RTV.13 si vedano le sezioni 2.3.2 e 4.1, più avanti al capitolo 4.

Quando le fiamme raggiungono lo strato esterno della facciata, la propagazione dell'incendio è determinata dalle caratteristiche dell'involucro edilizio e influenzata da diversi fattori (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Un aspetto rilevante è la reazione al fuoco dei materiali costituenti il sistema di facciata, poiché essi incidono sulla rapidità con cui le fiamme si diffondono lungo l'involucro dell'edificio (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Inoltre, la presenza di aperture come finestre e porte facilita l'ingresso e l'uscita delle fiamme, favorendo la propagazione dell'incendio sia all'interno che all'esterno della struttura (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Un altro elemento critico è rappresentato dalle intercapedini, che possono essere caratteristiche proprie della facciata o formarsi in seguito alla delaminazione di alcuni strati durante l'incendio. Quando una fiamma penetra in tali cavità, può estendersi fino a dieci volte la sua lunghezza iniziale a causa del cosiddetto effetto camino, indipendentemente dalle caratteristiche dei materiali che compongono lo spazio interno della facciata. In assenza di apposite barriere tagliafuoco, tale fenomeno può determinare una rapida propagazione verticale del fuoco, spesso non immediatamente visibile poiché nascosta dal rivestimento esterno (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

La diffusione dell'incendio può, inoltre, essere favorita dalla mancanza di barriere che impediscano il trasferimento delle fiamme tra diverse sezioni della facciata o tra edifici adiacenti. Anche la configurazione geometrica e le condizioni di ventilazione dell'involucro edilizio possono influenzare l'andamento delle fiamme, agevolandone la propagazione sia in verticale sia in orizzontale (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Infine, un ulteriore rischio è rappresentato dalla possibilità di distacco di porzioni bruciate della facciata, che potrebbero compromettere sezioni ancora integre e contribuire all'evoluzione dell'incendio (Micunco, 2022; De Trizio, 2024).

Durante l'incendio in facciata di un edificio, possono emergere diverse criticità legate alla propagazione delle fiamme e alla sicurezza strutturale. Tuttavia, le problematiche principali sono due: la prima legata alla resistenza al fuoco e alla compartimentazione di alcuni elementi, mentre la seconda è legata all'involucro e al rischio di caduta (Micunco, 2022).

Per quanto riguarda il primo aspetto citato, gli elementi progettati per garantire la resistenza al fuoco spesso non riescono a impedire la diffusione dell'incendio da un compartimento all'altro, soprattutto quando i materiali e i componenti costitutivi della facciata o del rivestimento esterno sono combustibili. In questi casi, la facciata non solo favorisce la propagazione delle fiamme, ma può anche alimentare la combustione, incrementando l'intensità dell'incendio (Micunco, 2022).

Per quanto concerne la seconda problematica, oltre a rappresentare un potenziale vettore per la diffusione del fuoco, la facciata funge anche da barriera tra l'interno dell'edificio e l'ambiente esterno, con implicazioni significative in caso di incendi di origine esterna. La presenza di materiali infiammabili o di elementi strutturali non adeguatamente protetti può accrescere il rischio di compromissione dell'involucro edilizio, determinando il distacco di porzioni della facciata e il conseguente pericolo di caduta di detriti, con possibili ripercussioni sulla sicurezza delle persone e delle strutture circostanti (Micunco, 2022).

### 3.2. Antologia dei principali incendi in edifici di grande altezza

Il primo evento significativo risale al 18 aprile 1906: un terremoto di magnitudo 8.3 colpì la costa ovest degli Stati Uniti e provocò danni ingenti, tra i quali danneggiamenti strutturali e l'incendio della San Francisco Tower, un edificio alto ben 91 metri, considerato uno dei più alti a ovest del Mississippi (Scuderi, 2017).

Il 7 dicembre 1946 bruciò l'Ellis Hotel, l'ex Winecoff Hotel, un edificio di 15 piani sito ad Atlanta (Georgia, Stati Uniti). Purtroppo, nell'incendio morirono 119 persone: vi furono molte vittime, soprattutto giovani, poiché in quella giornata si svolgeva una conferenza presso l'hotel (Scuderi, 2017).

Sempre negli Stati Uniti, vi fu un incendio il 21 novembre 1980 nell'hotel Bally's, ex Mgm Grand Hotel and Casino, in cui morirono 85 persone. Questo sfortunato evento è servito come esempio e come monito dstando la giusta attenzione sulla messa in sicurezza degli alberghi americani (Scuderi, 2017).

Qualche anno più tardi, vi fu un incendio alla First Bank a Los Angeles, un grattacielo di 260 metri, il 4 maggio 1988. L'incendio partì dal 12° piano a causa di un probabile problema elettrico, arrivò fino al 16° e durò circa 4 ore (Scuderi, 2017).



*Figura 3.4: Incendio alla First Bank a Los Angeles il 4 maggio 1988 (Kelsey, 1988)*

L'11 settembre 2001 un attacco terrorista coinvolse le Torri Gemelle (New York): due aerei di linea furono dirottati da un gruppo di terroristi e, carichi di carburante, vennero lanciati contro le torri che cominciarono a bruciare. La struttura si degradò via via, sicché in meno di due ore si consumò fino al collasso e allo schianto al suolo. Inoltre, l'impatto degli aerei tranciò parte della struttura indebolendola e contribuendo al crollo. Le vittime furono 2977, esclusi i 19 dirottatori ("Attentati dell'11 settembre 2001", 2024).

Il 17 ottobre 2004 a Caracas (Venezuela), un rogo consumò 22 dei 56 piani di uno dei grattacieli più elevati del Sud America, la Torre Est del Parque Central. Furono necessarie 15 ore e il contributo di oltre 200 vigili del fuoco per domare le fiamme, ma fortunatamente non si registrarono vittime (Hammer, 2006).

Uno degli incendi più significativi è quello del Windsor Building, un grattacielo che ospitava uffici sito nel centro finanziario AZCA di Madrid. Venne costruito nel 1979, era alto 106 metri e aveva 32 piani di cui 3 interrati. Era uno degli edifici più alti della città e dell'intero paese. Il 12 febbraio 2005 venne distrutto da un enorme incendio durante il quale crollò parzialmente per poi essere demolito in un momento successivo (*Torre Windsor*, 2020). Sebbene si sospettasse un attentato, l'incendio partì dal 21° piano per via di un cortocircuito. Le fiamme si propagarono a grande velocità e l'edificio bruciò per 24 ore senza crollare. Fortunatamente l'incendio non creò problemi ai passanti, nonostante fosse situato nel centro della città, e non provocò vittime perché si verificò nel fine settimana, di conseguenza gli uffici erano chiusi; inoltre, il grattacielo era deserto perché stavano ultimando alcuni lavori di ristrutturazione. Purtroppo, il sistema d'allarme interno non si attivò tempestivamente e ciò ritardò l'intervento dei vigili del fuoco, i quali riuscirono a domare le fiamme dichiarando subito dopo il rischio di crollo. Il sindaco Alberto Ruiz Gallardon dichiarò: «è il più grave della storia di Madrid» (*Madrid, spente fiamme nel grattacielo Windsor*, 2005; *In fiamme il grattacielo Windsor di Madrid*, 2016). L'edificio era costituito da un nucleo centrale in cemento armato circondato da colonne in acciaio equispaziate. Questo schema si ripeteva per tutta la struttura tranne che per due piani, il primo alla base e il secondo a metà dell'altezza che erano interamente in cemento armato. Con questo layout, questa lunga durata dell'incendio (24 ore) e, di conseguenza, con questa estesa esposizione, le colonne in acciaio subirono gravi danni strutturali poiché sottoposte alle alte temperature, mentre il nucleo in CA mantenne la sua configurazione ma degradò durante l'incendio, tant'è che successivamente risultava un rischio di crollo. La facciata dell'edificio era in origine principalmente in vetro con elementi di acciaio e venne, poi, parzialmente rivestita con pannelli di alluminio. Durante l'incendio venne completamente distrutta lasciando esposte le travi metalliche, deformate e collassate (Manieri, 2007).



Figura 3.5: Incendio al Windsor Building a Madrid (Engelhardt & Morovat, 2021, pag. 22)

A Mikolc (Ungheria) scaturì un incendio in un edificio residenziale il 15 agosto 2005, alto 11 piani. Le fiamme partirono dal 6° piano da una cucina e si estesero in verticale sulla facciata, la quale era rivestita da pannelli in EPS, a loro volta rifiniti con intonaco. In questo caso, si noti la mancanza di barriere tagliafuoco e lana minerale, in particolare attorno alle finestre (Mazziotti, 2016).

Il 9 febbraio 2009 si verificò un incendio al Mandarin Oriental Hotel (Pechino) in occasione del Festival delle Lanterne per celebrare l'inizio del nuovo anno, il quale fu la presunta causa di innesco. Venne definito un vero e proprio «inferno di cristallo» (*Pechino, inferno di cristallo. Rogo in un hotel*, 2009). Il Mandarin Hotel era una struttura prestigiosa costituita da 51 piani, complessivamente alta 159 metri, nella quale c'erano 241 stanze ed era la sede della televisione di stato, la CCTV – China Central Television (*Rogo Mandarin Oriental Hotel: un morto*, 2009). In una ventina di minuti le fiamme avvolsero l'edificio e il rogo lo distrusse (*Pechino in fiamme, distrutta la sede della CCTV progettata da Rem Koolhaas*, 2009).



Figura 3.6: Il Mandarin Oriental Hotel (Pechino) dopo l'incendio del 9 febbraio 2009 (Pershakov et al., 2016, pag. 3)

A Digione (Francia), il 14 novembre 2010 vi fu un incendio in un edificio residenziale che causò la morte di 7 persone. L'incendio partì da un contenitore dei rifiuti, sistemato esternamente nei pressi della struttura, e tale posizione consentì una sua rapida diffusione lungo la facciata, soprattutto in direzione verticale. Si noti che la facciata era provvista di un sistema di isolamento EPS e barriere antincendio in lana minerale (Mazziotti, 2016).

Tra il 15 e il 16 novembre 2010 un tragico incendio colpì un edificio residenziale di 28 piani nel quartiere Jing'an (Shanghai) (*Shanghai, arrestate 4 persone per l'incendio nel grattacielo*, 2010). Le fiamme causarono la perdita di circa 50 vite e oltre 100 persone vennero ferite, tra cui ustionati e intossicati (*Shanghai, grattacielo in fiamme – Arrestati quattro operai*, 2010). L'incendio coinvolse 10 piani dell'edificio inclusi i vani delle scale antincendio, rendendo difficile per gli occupanti la fuga dal fuoco. Le indagini rivelarono che le cause erano «saldature non autorizzate contrarie alla normativa» e l'«uso negligente di saldatrici elettriche prive di licenza» da parte degli operai. L'utilizzo improprio di attrezzature non conformi alle normative contribuì alla propagazione delle fiamme (*Cina/Incendio grattacielo Shanghai, 53 morti, 4 arresti*, 2010; *In fiamme grattacielo a Shanghai 53 vittime e decine di feriti*, 2010). Alcune testimonianze oculari indicavano l'origine delle fiamme dal materiale da costruzione. Quattro persone vennero arrestate in relazione all'incendio, sebbene non sia tutt'ora chiaro se fossero operai saldatori o responsabili della direzione dei lavori. Le impalcature erette per i lavori di rifacimento giocarono un ruolo fondamentale nella dinamica dell'incendio: la loro presenza ne facilitò l'espansione, agevolando la diffusione delle fiamme lungo la facciata e incoraggiando una sorta di effetto camino (*Shanghai, arrestate 4 persone per l'incendio nel grattacielo*, 2010; *Shanghai, grattacielo in fiamme – Arrestati quattro operai*, 2010). Inoltre, l'utilizzo di schiuma poliuretana come materiale per l'isolamento sulla facciata contribuì alla rapida propagazione delle fiamme (*Shanghai fire*, 2024).

Il 14 maggio 2012 si innescò un incendio alla Torre Mermoz (Francia), una struttura residenziale alta 18 piani. Il fuoco si originò al 2° piano, si diffuse attraverso il rivestimento esterno in ACM e poi salì verso l'alto lungo la facciata, raggiungendo la sommità dell'edificio e procurando una vittima (Mazziotti, 2016).

In Cecenia, il 3 aprile 2013 un incendio piuttosto importante coinvolse la Torre Olympus (*Grozny-City*, 2024; Marotta, 2015). Era un grattacielo facente parte di un complesso di grattacieli, Grozny–City Towers: Olympus di 40 piani (alto 145 metri), un altro di 30, tre di 28 e, infine, due di 18; per un totale di circa 1000 appartamenti. L'incendio partì dal 4° o 5° piano per via di un cortocircuito all'impianto elettrico, in un appartamento rimasto vuoto, e durò circa 8 ore prima che i vigili del fuoco riuscissero a domarlo. Invero, essi furono in grado di spegnere solo le fiamme che coinvolsero la parte inferiore dell'edificio e non la parte superiore che continuò a bruciare. Fortunatamente non ci furono vittime. Le fiamme si diffusero velocemente in facciata e compromisero un intero lato della struttura. Tale propagazione fu molto rapida a causa della presenza di pannelli di rivestimento realizzati in materiale composito in alluminio detti *Aluminium Composite*

*Materials* (ACM) o *Aluminium Composite Panels* (ACP), ossia costituiti da due lamine di alluminio accoppiate ad un nucleo di polietilene (PE), i quali non possedevano un'adeguata caratteristica di reazione al fuoco e, proprio per questo motivo, furono la via preferenziale di propagazione dell'incendio. Nonostante il rivestimento della facciata venne completamente distrutto, la struttura portante in cemento armato resistette al fuoco e rimase integra e in piedi; infatti, anche gli appartamenti interni non subirono danni ingenti (Marotta, 2015).



Figure 3.7: La Torre Olympus, Grozny City (Cecenia) prima, a sinistra, e durante l'incendio del 3 aprile 2013, a destra (Marotta, 2015)



Figure 3.8: La Torre Olympus dopo l'incendio del 3 aprile 2013 (Marotta, 2015)

Il 25 febbraio 2017 si verificò un incendio che coinvolse un albergo di lusso, il HNA Platinum Mix Hotel, a Nanchang, capitale della provincia di Juanxi (Cina). Secondo alcune fonti almeno 9 persone furono ferite, mentre quella di riferimento riporta una decina di vittime. L'edificio era costituito da 4 piani ed era collegato a un palazzo di 24, in cui le

persone rimasero intrappolate durante l'incendio. Si pensò che l'origine potesse essere dolosa (*Cina: incendio in hotel, almeno 10 morti, 2017*).

L'evento più importante della storia degli incendi su edifici alti fu l'incendio della Grenfell Tower a Londra. Era un edificio residenziale di 24 piani, progettato nel 1967 e poi realizzato tra il 1972 e il 1974. La torre era alta 67,3 metri ed era dotata di un unico vano scale centrale. L'incendio si verificò il 14 giugno 2017, innescato dal cortocircuito di un frigorifero difettoso in un appartamento del 4° piano. L'esito tragico fu di 72 persone morte e 74 ferite. Vi furono numerose operazioni di spegnimento e soccorso, e altrettanto numerosi furono i mezzi impiegati e il numero di soccorritori coinvolti. I vigili del fuoco dichiararono di essere riusciti inizialmente a spegnere il fuoco all'interno dell'appartamento da cui è partito l'incendio; tuttavia, nel frattempo le fiamme raggiunsero il rivestimento esterno dell'edificio propagandosi a una «velocità terrificante» verso i piani superiori. La difficoltà principale riscontrata dagli operatori fu proprio spegnere un incendio non solo in verticale ma anche in elevazione, in quanto con i mezzi e la tecnologia a disposizione i vigili del fuoco poterono (e possono anche attualmente) raggiungere solo altezze limitate. Pertanto, date queste complicazioni, le fiamme furono completamente domate il 16 giugno. L'effetto camino, la mancanza di adeguati interventi di compartimentazione e di appositi impianti antincendio giocarono ruoli fondamentali. Durante la successiva inchiesta per indagare le cause, emerse che i materiali utilizzati per il rivestimento esterno e la copertura, applicati nella ristrutturazione avvenuta tra il 2015 e il 2016, avevano un alto rischio di infiammabilità e il loro certificato di prova antincendio non era sufficientemente attendibile, e ciò fu cruciale nella dinamica dell'incendio (D'Apolito, 2020; Olivetto, 2022).



*Figura 3.9: Incendio della Grenfell Tower (Londra) del 14 giugno 2017 (Selwyn, 2017)*

Nel corso delle ricerche ci si è imbattuti in Dubai, la metropoli che sfortunatamente registra il record di incendi avvenuti.

Ad esempio, il 28-29 aprile 2012 prese fuoco la torre Al Tayer di 40 piani, a causa presumibilmente un mozzicone di sigaretta. Fortunatamente, un centinaio di famiglie riuscirono a mettersi in salvo.

Lo stesso anno anche la Torre Tamweel di 37 piani andò in fiamme sempre per via di un mozzicone di sigaretta.

Un altro esempio è l'incendio di un albergo, un grattacielo andato a fuoco durante i festeggiamenti di Capodanno 2015 (Scuderi, 2017).

In verità molti grattacieli vicini al Burj Khalifa, il più alto del mondo, andarono a fuoco proprio in occasione delle celebrazioni per l'anno nuovo, come l'Address Downtown Hotel (*L'incendio di un grattacielo a Dubai*, 2016). In questo caso, la causa di innesco fu una luce difettosa e l'incendio si diffuse poi sul rivestimento esterno combustibile dell'edificio (Peacock, 2024).

Molto celebre è anche l'incendio alla Torch Tower a Marina Bay del 4-5 agosto 2017 (*Nuovo rogo alla Torch Tower di Dubai, nessun ferito*, 2017), la quale aveva già subito un rogo il 21 febbraio del 2015 (*Brucia La "Torcia" Di Dubai*, 2015; *Dubai's Torch Tower catches fire for second time in two years*, 2017; Mairs, 2015; Mairs, 2017). Il primo incendio partì dal 51° piano raggiungendo il 70° piano, in quell'occasione alimentato anche dal forte vento, mentre il secondo partì dal 67° piano; successivamente, la torre ebbe un altro incendio di minore entità nel 2019. La Torch Tower era una struttura di 79 piani fuori terra, dotata di alcuni piani interrati, ed era alta 336 metri. Non vi furono vittime per fortuna, ma non venne accertata la causa dell'incendio (*The Marina Torch*, 2024). È ben noto, però, che il rivestimento delle facciate era costituito da alluminio e poliuretano (Mairs, 2017), come del resto lo sono molti degli edifici alti a Dubai e molti di quelli incontrati durante la ricerca (Commissione Tecnica ANPE, 2021): questi materiali sono molto economici e leggeri, ma anche molto infiammabili. Pertanto, questa caratteristica consentì alle fiamme di coinvolgere una grande porzione della facciata dell'edificio e di raggiungere altezze notevoli, sia in questo specifico caso sia negli altri. Un'altra conseguenza del rogo, da considerare quando ci si imbatte in questi incendi di facciata di edifici alti, è l'annessa caduta di porzioni di rivestimento della facciata che, in questo caso, fortunatamente non coinvolse nessuno, ma spaventò i testimoni e i passanti (Webb & Lockett, 2017).

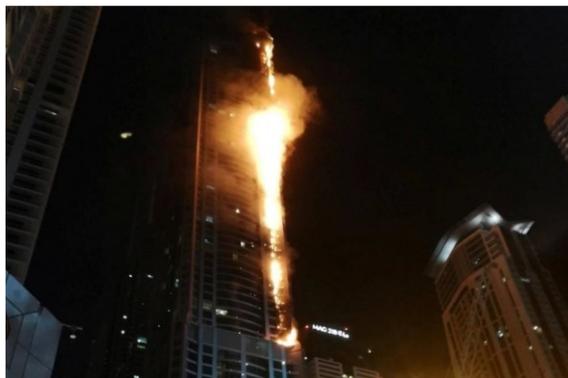


Figura 3.10: L'incendio della Torch Tower a Dubai il 21 febbraio del 2015 (Micunco, 2022, pag. 13)

Più avanti, il 7 novembre 2022 scaturì un incendio in un grattacielo di 35 piani, facente parte di un complesso residenziale di 8 torri Boulevard Walk di Emaar. Il fuoco partì da un balcone al 4° o 5° piano e si diffuse rapidamente lungo la facciata dell'edificio, forse a causa di sigarette accese abbandonate, luci esterne difettose o un barbecue lasciato acceso e incustodito. Il fuoco coinvolse i materiali ACM del rivestimento, simili a quelli adottati nella Grenfell Tower di Londra, che sono combustibili e altamente infiammabili. All'epoca l'edificio, situato anch'esso vicino al Burj Khalifa e completato nel 2008, stava subendo lavori di ristrutturazione. La configurazione dei balconi e i materiali impiegati favorirono la propagazione delle fiamme, creando un effetto trincea che permise al fuoco di salire velocemente dal podio al tetto. Nonostante l'incendio accadde di notte, quindi con un rischio maggiore per le persone perché a letto e non vigili, fortunatamente non ci furono feriti grazie ad una tempestiva evacuazione. L'edificio era dotato di sistemi antincendio come gli sprinkler e non vi era un protocollo di *stay-put*, ossia rimanere e proteggersi sul posto in attesa dei soccorritori; in effetti, questa scelta fu vincente poiché permise a tutti di uscire rapidamente. L'intervento rapido dei vigili del fuoco impedì che l'incendio causasse ulteriori danni. Questo incidente mise in luce l'importanza della progettazione architettonica nella prevenzione degli incendi; infatti, balconi sporgenti e rivestimenti continui possono creare percorsi pericolosi per il fuoco (Peacock, 2022b).



*Figure 3.11: Il grattacielo del complesso residenziale di 8 torri Boulevard Walk di Emaar (Dubai) prima, a sinistra, e durante l'incendio del 7 novembre 2022, a destra (Peacock, 2022b, pag. 1 e 12)*

Il 29 agosto 2021 vi fu un incendio che coinvolse la Torre dei Moro a Milano. Questo fu un altro evento piuttosto rilevante nella storia degli incendi recenti, soprattutto in Italia. La torre è una struttura di 18 piani ad uso residenziale di circa 60 metri di altezza, poiché costituita da 18 piani fuori terra, e ospita circa 60 famiglie. I prospetti principali sono sostanzialmente due vele e queste consistono in un traliccio metallico ancorato sull'edificio a cui sono fissati i pannelli di rivestimento di tipo ACM che risultano distanziati dalle pareti esterne. L'incendio partì dal 15° piano e fortunatamente non vi furono vittime (Carlson, 2021; Guglielmini, 2023). La ricerca delle cause si focalizzò sul cappotto esterno apposto in facciata, ma sono tuttora in corso accertamenti (Evangelista, 2024). Tuttavia, il materiale aveva un buon comportamento al fuoco (Commissione Tecnica ANPE, 2021). Si ritiene che

l'incendio fosse avvenuto presumibilmente per cause accidentali (Burrizzo, 2021) e che alcuni fattori possano aver contribuito alla dinamica dell'incendio quali la geometria dell'edificio (Garofalo, 2021), l'effetto del vento in genere prevalente in edifici di grande altezza e, infine, la geometria stessa della facciata, nello specifico quello spazio tra pareti esterne e rivestimento potrebbe aver favorito un effetto camino (Burrizzo, 2021).



Figure 3.12: L'incendio alla Torre dei Moro (Milano) del 29 agosto 2021 a sinistra e la struttura post-incendio a destra (Commissione Tecnica ANPE, 2021, pag. 4)

Il 16 settembre 2022 un violento incendio devastò il Lotus Garden a Changsha (Cina). L'edificio in questione era una torre alta 218 metri (quindi oltre 40 piani) e ospitava gli uffici della China Telecom, poiché ne era la sede principale (*Inferno di cristallo in Cina, in fiamme un grattacielo*, 2022; Peacock, 2022a). Nonostante l'incendio, le telecomunicazioni non subirono interruzioni significative; tuttavia, non mancarono segnalazioni da parte di alcuni utenti di problemi con la telefonia mobile (*Inferno di cristallo in Cina, in fiamme un grattacielo*, 2022). Le fiamme avvolsero diverse decine di piani, ma furono domate dopo circa un'ora di sforzi intensi dei soccorritori. Sebbene i media locali avessero riportato la presenza di vittime, il numero esatto rimane tuttora sconosciuto e le cause dell'incidente sono ancora ignote. Il materiale di rivestimento esterno, probabilmente ACM, alimentò rapidamente le fiamme causando la fusione dei pannelli e la caduta di detriti infuocati dall'alto. La mancanza di elementi orizzontali favorì la diffusione delle fiamme lungo la facciata, che fu anche in senso orizzontale, mentre la fusione dei pannelli contribuì alla propagazione dell'incendio compromettendo la compartimentazione dell'edificio (Peacock, 2022a).

Il 3 marzo 2023 un incendio colpì un grattacielo in costruzione nel rinomato quartiere dello shopping di Hong Kong. Situato sul lungomare, l'edificio alto 42 piani appartenente all'Empire Group venne avvolto dalle fiamme nella tarda serata di giovedì 2 marzo. La struttura si trovava nella zona di riqualificazione del Mariners' Club, nel densamente popolato quartiere di Tsim Sha Tsui, sulla penisola di Kowloon (Grundy, 2023; Leung, 2023; Zhou & Pang, 2023). L'incendio coinvolse diversi piani della struttura, comprese le impalcature, e si propagò rapidamente minacciando anche edifici residenziali, centri commerciali e hotel circostanti (Leung, 2023). Durante la notte, oltre un centinaio di

persone furono evacuate dalle strutture vicine per ragioni di sicurezza. Le autorità governative annunciarono che l'incendio fu in gran parte domato entro la mattina di venerdì, dopo un intervento durato circa 10 ore, e fortunatamente non si registrarono vittime. Non è tuttora nota la causa dell'incendio nonostante le indagini; tuttavia, le fiamme vennero individuate subito in prossimità delle impalcature di bambù collocate nella parte alta dell'edificio, le quali crearono non pochi problemi ai soccorritori (Grundy, 2023; Leung, 2023): non solo perché furono d'intralcio e d'ostacolo, ma anche perché erano anch'esse di materiale combustibile, come del resto la restante parte dei materiali edili presenti per via dei lavori; in più, questo fece sì che i rischi legati all'incendio fossero maggiori, sia per il maggior carico d'incendio appunto, sia per il rischio di caduta di detriti dall'alto, pericoloso sia per gli esodanti che per i soccorritori; infine, le impalcature e la loro presenza stessa favorirono anche l'effetto camino.

Il 2 giugno 2023 vi fu un incendio in una palazzina residenziale di 8 piani a Roma, evento che provocò la morte di un uomo e numerosi feriti. La struttura era oggetto di lavori di ristrutturazione per migliorare l'efficienza termica con il Superbonus 110%, coinvolgendo l'applicazione di rivestimenti termici e pannelli isolanti. Le cause dell'incendio, ancora incerte, potrebbero essere accidentali o dolose. Si ipotizza che l'accensione di materiali da costruzione combustibili avesse generato le fiamme e da quello fosse scaturito l'incendio (Peacock, 2023a; Treccarichi, 2023). In loco venne ritrovato molto materiale da costruzione a base di polistirene, tra cui si trovarono pannelli in EPS impiegati per il rivestimento della facciata. Il materiale isolante in XPS potrebbe aver contribuito alla rapida propagazione delle fiamme perché di classe E, quindi combustibile e con medio-alta partecipazione all'incendio, e dunque fortemente suscettibile al fuoco; per questi motivi, andava protetto sia durante l'uso, sia durante la posa che durante lo stoccaggio. Infatti, nella scheda informativa del prodotto pubblicata sul sito del produttore si specifica: «se soggette a una fonte intensa di fuoco, bruciano rapidamente». Si noti che, in effetti, le lastre di questi prodotti contenevano un additivo ritardante atto a scongiurarne l'accensione in presenza di una piccola sorgente di fiamma; nonostante ciò, questo non ne evitò totalmente l'ignizione (Treccarichi, 2023). L'incendio venne poi aggravato dalla presenza di impalcature che favorirono, anche in questo caso, l'effetto camino.

Una finestra del nucleo scala ceduta compromise le vie di fuga, consentendo l'ingresso di fumo e fiamme all'interno dell'edificio, causando numerose ustioni tra i residenti (Peacock, 2023a).

Il 22 agosto 2023 un incendio colpì l'edificio Xintiandi, un grattacielo di 27 piani situato nel distretto di Hexi a Tianjin (Cina). Questo fu uno dei due grandi incendi scoppiati simultaneamente in città, il secondo avvenne in una fabbrica vicina. L'incendio iniziò sull'esterno dell'edificio, probabilmente partendo dal sistema di rivestimento in ACM, e le fiamme si propagarono rapidamente lungo la facciata sfruttando gli angoli rientranti e le fasce verticali. Le finestre cedettero, permettendo così al fuoco di entrare nell'edificio e causando danni all'interno. L'incendio venne domato dopo l'intervento di 284 vigili del

fuoco con 62 mezzi. Nonostante la gravità dell'incendio non ci furono vittime o feriti gravi, ma i danni all'edificio furono significativi (Peacock, 2023b).

Il 20 febbraio 2024 vi fu un incendio al grattacielo Aler, una torre di 16 piani a Milano. Le fiamme coinvolsero prima un materasso e successivamente una lavatrice abbandonati sul pianerottolo del 14° piano, generando una densa nube di fumo nero che si diffuse lungo le trombe delle scale, rendendole inservibili per l'esodo degli occupanti. Fortunatamente, non vi furono né danni strutturali all'edificio, né feriti o intossicati e l'incendio fu rapidamente domato dai vigili del fuoco, sventando ulteriori conseguenze (Gulli & Gemme, 2024; Prandina, 2024).

Uno degli incendi in facciata più recenti ed importanti fu l'incendio verificatosi a Valencia il 22 febbraio 2024, che devastò un complesso residenziale composto da due blocchi collegati, uno di 14 piani e l'altro di 10. Le fiamme si svilupparono sul balcone in un appartamento al 7° piano del blocco più alto, a causa di un guasto elettrico in una tenda da sole, e si propagarono all'8° piano soprastante. Il fuoco si diffuse rapidamente sulla facciata ventilata sia in verticale che in orizzontale, data la presenza di materiali combustibili e alimentato dal forte vento che soffiava a 60 chilometri orari. Infatti, il rivestimento della facciata era del tipo combustibile già incontrato, ovvero era costituito da pannelli ACM altamente infiammabili, simili a quelli presenti sulla Grenfell Tower, sulla Torre dei Moro e su altri edifici visti in precedenza. Inoltre, l'isolamento della facciata era costituito da lana minerale e PIR, ovvero un materiale isolante poliuretano combustibile (più precisamente si tratta di *poliisocianurato*). Nonostante la politica del "rimanere sul posto" già precedentemente menzionata come *stay-put*, molti dei residenti presenti tentarono di fuggire e alcuni di loro si misero in salvo; tuttavia, alcuni rimasero rinchiusi nei propri appartamenti, mentre altri per sfuggire alle fiamme e cercare di mettersi in salvo rimasero intrappolati sui balconi. L'esito dell'incendio fu purtroppo, oltre a feriti e intossicati, 10 persone e un cane morti. La gravità dell'evento richiese l'intervento di circa 100 vigili del fuoco e persino dell'esercito. Le indagini sulle cause dell'incendio sono ancora in corso, con alcune controversie riguardo ai materiali utilizzati nel rivestimento esterno dell'edificio (Peacock, 2024).



Figure 3.13: Il complesso residenziale di Valencia prima e durante l'incendio del 22 febbraio 2024 (Peacock, 2024, pag. 5 e 30)



Figure 3.14: Il complesso residenziale di Valencia dopo l'incendio del 22 febbraio 2024 (Peacock, 2024, pag. 52)

Il 29 marzo 2024 si verificò un incendio su un grattacielo di 28 piani in costruzione a Recife (Brasile). Per sicurezza, in tale occasione vennero evacuati anche gli edifici vicini. Non vennero dichiarate vittime e non si conoscono ancora le cause; infatti, sono in corso le indagini e gli accertamenti (*Brasile, incendio in un grattacielo a Recife: le fiamme distruggono il palazzo di 28 piani*, 2024).

### 3.3. Osservazioni e riflessioni sugli incendi di facciata accaduti

L'evoluzione e la propagazione degli incendi di facciata sono influenzate da molteplici fattori.

In primo luogo, si ribadisce che la scelta dei materiali da parte del progettista, sia per l'isolamento che per il rivestimento degli edifici, riveste un ruolo cruciale. La natura dei materiali comprende non solo la tipologia, ma anche proprietà fisiche fondamentali come densità e caratteristiche termiche, quali calore specifico e conduttività. Per i materiali combustibili, sono rilevanti il calore di combustione associato alla pirolisi, la temperatura di ignizione e la velocità di combustione.

Inoltre, il comportamento al fuoco di questi materiali sulle facciate degli edifici è di fondamentale importanza. Come suggerito dal Codice di prevenzione incendi, i materiali utilizzati devono attualmente essere di classe di reazione al fuoco al più A2 o B, come visto in precedenza, e idealmente B-s2,d0. Ciò significa che dovrebbero essere combustibili con una scarsa partecipazione alla combustione, emettendo poco fumo e non gocciolando, per garantire una maggiore sicurezza in caso di incendio.

Inoltre, un aspetto significativo è rappresentato dallo stato di conservazione dei materiali, poiché il degrado può influire notevolmente sulla loro performance in caso di incendio. La mancanza di rivestimenti può esporre materiali isolanti altamente combustibili alle fiamme, creando vie preferenziali per la propagazione del fuoco. Inoltre, la compromissione dell'integrità di un sistema di facciata, progettato per garantire un buon comportamento al fuoco, può ridurre drasticamente le sue proprietà protettive. Situazioni di deterioramento avanzato come buchi o squarci possono generare aree prive di materiale dovute a

condizioni atmosferiche avverse o a caduta. Tali "mancanze" possono dar luogo a geometrie interne particolari, favorendo l'evoluzione e la propagazione dell'incendio.

Pertanto, la manutenzione e la conservazione degli edifici risultano essenziali per preservare lo stato dei materiali e, di conseguenza, ridurre il rischio di incendi di facciata.

Negli edifici realizzati decenni fa, si trovano spesso materiali combustibili che, all'epoca della loro costruzione, erano considerati standard. Tuttavia, oggi le schede tecniche di questi materiali sono difficilmente reperibili, poiché sono stati rimossi dal mercato. La scelta di mantenere questi materiali nelle facciate è stata inizialmente motivata da esigenze di isolamento termico. Con il passare del tempo, l'attenzione si è spostata verso l'efficientamento energetico continuando a utilizzare materiali che, sebbene economici, presentano rischi significativi.

Per di più, è importante considerare che la sicurezza antincendio è un campo di applicazione relativamente recente. In Italia, ad esempio, solo dopo l'incendio del cinema Statuto a Torino nel 1983 si è iniziato a prestare maggiore attenzione a questo aspetto, segnando un punto di svolta nella consapevolezza riguardo alla necessità di garantire standard di sicurezza adeguati nelle costruzioni (Vancetti, 2022).

È importante sottolineare che, per valutare le proprietà dei materiali e il loro comportamento al fuoco, ci si basa spesso su test di laboratorio. Sebbene questi test forniscano indicazioni utili, non possono replicare completamente le condizioni reali di un edificio. Ad esempio, in laboratorio non si può simulare il vento che soffia sul materiale, il che rende difficile riprodurre specifiche situazioni e contesti che richiedono studi con sperimentazioni su scala reale, preferibilmente su scala medio-grande.

La soluzione ottimale e più sostenibile, sia dal punto di vista economico che ambientale, è la realizzazione di modellazioni di incendio utilizzando software come FDS (Fire Dynamics Simulator), metodologia che consente di studiare tali fenomeni e di realizzare una valutazione più accurata delle dinamiche di incendio.

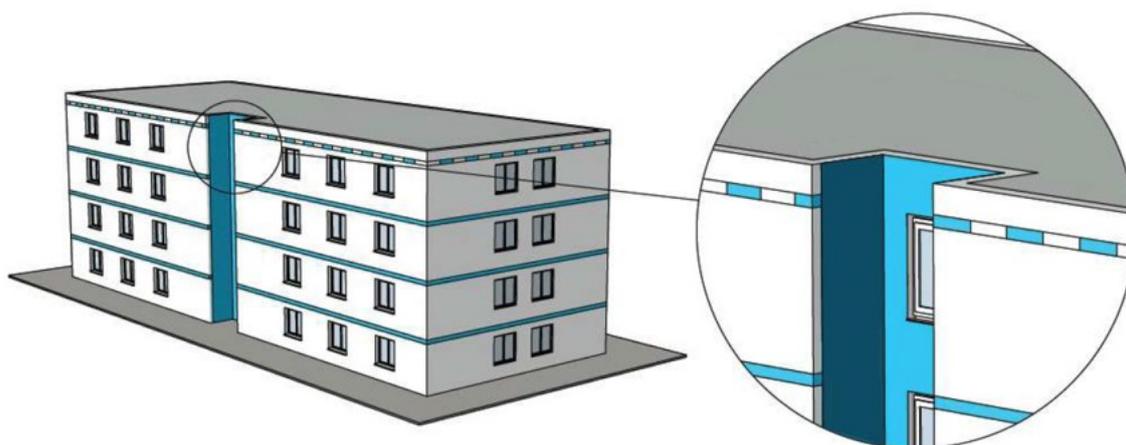
In genere, per i materiali utilizzati in facciata, si adotta il test BS8414, che verifica la resistenza al fuoco dei sistemi di facciata in condizioni simulate. Se il test viene superato, si ottiene la conformità; tuttavia, è importante notare che questo approccio non considera la combinazione dei materiali o il tipo di costruzione, elementi che possono influenzare significativamente il comportamento al fuoco in situazioni reali.

Un altro parametro fondamentale che può influenzare la propagazione dell'incendio è la geometria. Questo aspetto comprende sia la geometria del singolo elemento, come sporti e balconi, sia la macro-geometria della facciata e dell'intero edificio, insieme alla configurazione dei materiali in facciata. Le dimensioni e la disposizione di questi elementi possono avere un impatto significativo sul comportamento delle fiamme e sulla loro capacità di diffondersi, rendendo essenziale considerare attentamente la progettazione geometrica e la configurazione dei materiali in fase di costruzione.

A causa della configurazione geometrica dell'edificio, può manifestarsi il cosiddetto effetto trincea, un fenomeno che si verifica in presenza di rientranze, canali verticali o forme a U. Questo meccanismo accelera la propagazione delle fiamme su superfici inclinate, favorendo un rapido avanzamento dell'incendio. L'effetto trincea deriva dall'interazione tra due fenomeni distinti: l'effetto Coandă e il flashover (Giacalone, 2024).

L'effetto Coandă si manifesta quando un flusso di gas veloce tende a seguire il profilo di una superficie vicina, a causa della differenza di pressione tra quest'ultima e l'ambiente circostante. Questa caratteristica contribuisce a guidare le fiamme lungo le pareti, intensificando la propagazione del fuoco (Giacalone, 2024).

Il flashover, invece, rappresenta una transizione improvvisa verso un incendio generalizzato, come già spiegato in precedenza<sup>27</sup>. Si ricorda che esso si verifica quando le superfici di un ambiente chiuso riscaldandosi rilasciano gas infiammabili che, raggiunta una temperatura critica, si accendono spontaneamente. Nel contesto dell'effetto trincea, le fiamme riscaldano progressivamente i materiali sovrastanti, provocando l'emissione di vapori combustibili che, innescando il flashover, accelerano ulteriormente la diffusione dell'incendio (Giacalone, 2024).

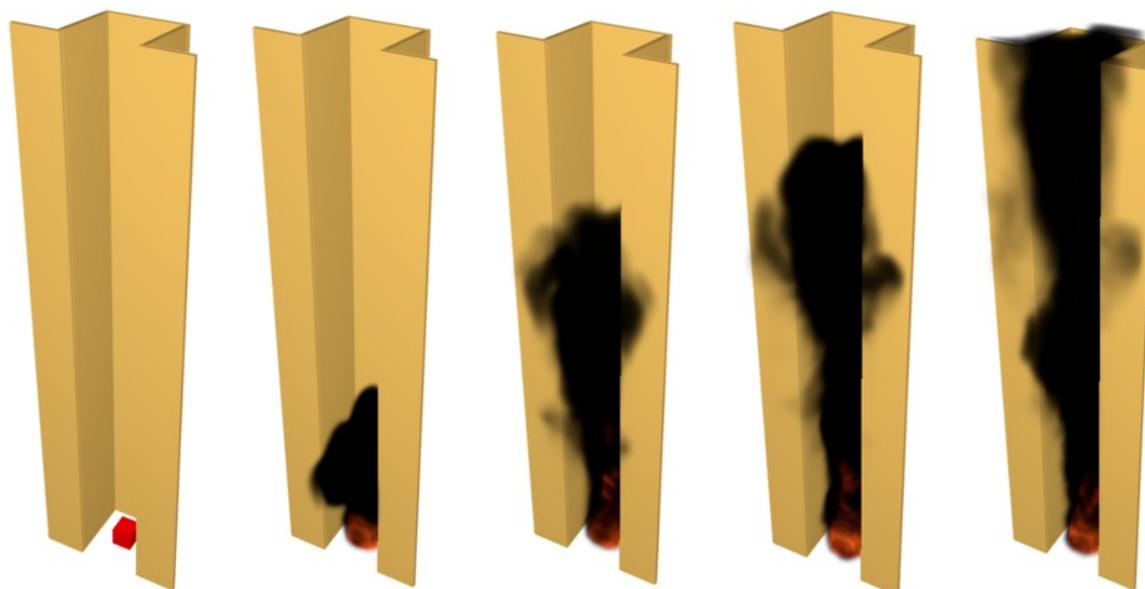


*Figura 3.15: Un esempio di geometria in cui si manifesta l'effetto trincea (Giacalone, 2024)*

È stato realizzato un modello sul software PyroSim per mostrare graficamente l'effetto trincea. Si seguito si riportano alcune immagini estrapolate dalla simulazione.

---

<sup>27</sup> Si rimanda al capitolo 1.



*Figure 3.16: La rappresentazione grafica dello sviluppo dell'effetto trincea*

Queste rientranze possono derivare dalla progettazione originale dell'edificio, ma possono anche manifestarsi quando manca un pannello in facciata o una porzione estesa della stessa. È quindi cruciale considerare lo stato della facciata e la sua manutenzione, oltre a studiare l'evoluzione e la propagazione degli incendi in facciata per comprendere come e quanta parte della facciata stessa possa essere coinvolta, e come possa bruciare e cadere verso il basso.

Le rientranze fungono anche da zone di accumulo per i prodotti della combustione in caso di incendio, come gas caldi, fumi, calore e fiamme. Questo porta ad un innalzamento delle temperature in quelle aree, creando zone di discontinuità nella struttura. Queste zone rappresentano punti critici che il progettista deve considerare attentamente, soprattutto durante le verifiche antincendio.

Tali punti e zone di discontinuità possono diventare vie preferenziali per la propagazione dell'incendio e delle fiamme. Possono anche manifestarsi come spigoli o vertici della struttura, evidenziando l'importanza della geometria nella propagazione dell'incendio. Tuttavia, nelle modellazioni di incendio, si tende a studiare il fenomeno indipendentemente dalla geometria, riservando quest'ultima per analisi specifiche su edifici particolari, come nel caso dell'analisi post-incendio della Grenfell Tower.

È fondamentale considerare che ogni edificio ha la sua geometria unica, e diventa necessario partire da alcune ipotesi. Una di queste è la semplificazione della geometria della facciata.

Sempre a proposito della geometria, come in parte già detto in precedenza, la presenza dei balconi rappresenta un ostacolo significativo all'evoluzione dell'incendio, che tende a propagarsi verso l'alto. I balconi fungono da vere e proprie barriere orizzontali; in effetti, sporti e balconi sono suggeriti come soluzioni nel Codice di prevenzione incendi.

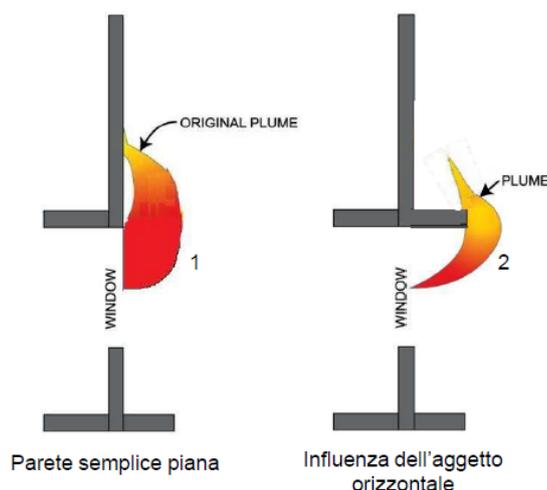


Figure 3.17: L'influenza degli aggetti orizzontali (Giacalone, 2024)

Tuttavia, la sola presenza di balconi non garantisce che l'incendio venga ostacolato e rimanga confinato, poiché le fiamme potrebbero, come nell'incendio di Valencia, propagarsi in orizzontale seguendo principalmente le linee dei balconi (Peacock, 2024).

I balconi rappresentano, quindi, un altro punto o zona di discontinuità dell'edificio e queste aree devono essere particolarmente considerate dal progettista, soprattutto in fase di verifica antincendio.

La valutazione post-incendio di eventi tragici del passato suggerisce di rivedere i materiali di rivestimento e le configurazioni strutturali per ridurre i rischi, oltre a raccomandare l'installazione di sistemi di rilevamento esterni e barriere antifiamma tra i piani.

Una soluzione proposta per le facciate ventilate, che presentano un'intercapedine d'aria tra la facciata interna e il rivestimento esterno, è l'uso delle *cavity barriers*. Questi elementi, resistenti al fuoco e rivestiti di materiale intumescente, dovrebbero espandersi ad una certa temperatura di attivazione ostacolando la propagazione delle fiamme e dell'incendio. È importante notare che diventano inefficaci se il rivestimento è combustibile, evidenziando nuovamente la necessità di prestare attenzione ai materiali utilizzati.

Poi ci sono altri fattori, o meglio condizioni al contorno, come il vento e la configurazione dell'edificio e del contesto urbano in cui è inserito, dove possono svilupparsi correnti, pressioni e ventosità particolari. Le condizioni meteorologiche avverse, come un forte vento, possono influenzare significativamente la velocità e la gravità dell'incendio.

Oltre a ciò, esistono condizioni al contorno che possono essere caratteristiche e peculiari di quel frangente, come ad esempio la presenza di impalcature. Queste possono aumentare momentaneamente il carico di incendio, poiché spesso sono costituite di materiali combustibili e possono estendere la superficie che brucia. Inoltre, come si è visto, può verificarsi l'effetto camino a causa della loro presenza e ciò fa salire calore, temperature e fumi, concentrandoli e indirizzandoli verso l'alto. Questo fenomeno è accentuato da meccanismi fluido-dinamici, soprattutto dall'aumento della turbolenza.

Di base, è noto che edifici molto alti possono generare proprie correnti d'aria a seguito di variazioni della pressione dell'aria intorno al proprio profilo geometrico, portando alla formazione di vortici e a zone di suzione, dette *suction zone*. Quest'ultime possono rappresentare un'altra sorta di punto, o meglio, zona di discontinuità (Peacock, 2024).

A volte, nonostante il vento sia molto forte, la geometria prevale e fa sì che la propagazione dell'incendio avvenga seguendo percorsi che non seguono necessariamente la verticalità dell'edificio. Questo significa che l'incendio può svilupparsi anche in direzioni opposte e contro-intuitive, come percorsi "stravaganti" dall'alto verso il basso, orizzontali o addirittura in diagonale. Ciò è dovuto alla geometria stessa dell'edificio e alla configurazione e disposizione dei materiali in facciata. In realtà, c'è sempre una concomitanza di più fattori.

Si noti che il vento non deve necessariamente essere "a favore" dell'incendio e delle fiamme, né deve essere forte o debole.

Per avere l'effetto più favorevole per la propagazione dell'incendio, basta che il vento sia sufficientemente forte e soffi nella direzione migliore per fornire un apporto di ventilazione.

Ciò nonostante, non importa se il vento sia a favore o a sfavore: vi sono stati casi in cui la propagazione dell'incendio è continuata anche con vento contrario, manifestando una "progressione controcorrente" (Peacock, 2024).

La velocità dell'incendio può variare notevolmente sia nella fase pre-flashover che in quella post. Ad esempio, può essere molto rapida all'inizio e poi rallentare, oppure può mantenere una velocità elevata fin dall'inizio. Le combinazioni sono molteplici e questa variabilità dipende dalla natura dei materiali e dalla configurazione geometrica della facciata dell'edificio.

In generale, la propagazione verticale delle fiamme in un incendio è più veloce, mentre quella orizzontale è più lenta<sup>28</sup>. Man mano che la facciata e il rivestimento vengono coinvolti, l'evoluzione dell'incendio si intensifica rapidamente. Il rivestimento si scioglie progressivamente, producendo fumi e gocce che cadono verso il basso. Questo può risultare pericoloso sia per l'esodo degli occupanti, sia per i passanti nei pressi dell'edificio, sia per i soccorritori. È importante prestare attenzione, poiché i detriti che cadono possono innescare altri incendi nei piani inferiori di un edificio.

Un aspetto interessante riguarda l'evoluzione nelle facciate ventilate. Come detto in precedenza, nelle intercapedini le fiamme possono estendersi circa 10 volte rispetto alla loro lunghezza iniziale, a causa dell'effetto camino, e ciò può determinare una rapida propagazione del fuoco nascosta al di sotto del rivestimento (Micunco, 2022; De Trizio,

---

<sup>28</sup> Questo vale, ad esempio, in assenza di vento. Tuttavia, se si ha vento orizzontale favorevole questa affermazione potrebbe essere smentita. Quindi, quanto riportato vale in linea generale, ma bisogna sempre considerare tutte le condizioni e le caratteristiche del caso in esame.

2024).<sup>29</sup> Tuttavia, in un articolo dell'Ing. Peacock (2024) si esclude l'effetto camino, poiché il materiale brucia rapidamente sulla facciata e, di conseguenza, non si manifesta tale effetto nell'intercapedine d'aria.

Come già detto, gli incendi che coinvolgono le facciate degli edifici possono avere origine sia all'interno che all'esterno della struttura. Gli incendi indoor possono scaturire, ad esempio, da cortocircuiti elettrici come quelli provocati da elettrodomestici all'interno di un appartamento. Gli incendi outdoor, invece, si sviluppano all'esterno dell'edificio e possono derivare da diverse cause, tra cui l'incendio di un cassonetto dei rifiuti, di un veicolo parcheggiato ai piedi dell'edificio o di un'auto elettrica, la cui origine può essere ricondotta a malfunzionamenti del sistema elettrico.

Le fonti di innesco di un incendio possono essere molteplici e variegate, spesso riconducibili a malfunzionamenti o cortocircuiti di dispositivi comunemente presenti negli edifici. Negli edifici residenziali, tali fonti possono includere elettrodomestici o altre apparecchiature, mentre negli uffici o nei cantieri possono essere coinvolti macchinari specifici. Il meccanismo di innesco è generalmente semplice: una scintilla entra in contatto con un materiale combustibile, dando avvio al fuoco.

Sebbene l'identificazione della fonte di innesco sia fondamentale, è importante considerare che è impossibile eliminare completamente il rischio di incendio. Tra le cause di innesco figura anche il dolo che, pur non essendo abitualmente incluso nei piani di prevenzione e analisi dei rischi, rappresenta una possibilità da non escludere.

Le cause più comuni sono spesso attribuite a inneschi accidentali di origine umana, ma non intenzionalmente dolosi. Tra questi si annoverano mozziconi di sigaretta, scintille prodotte da fuochi d'artificio accesi per celebrare festività o ricorrenze, e malfunzionamenti elettrici, analoghi ai casi precedentemente descritti. Tuttavia, le fonti di innesco reali non vengono sempre rese note, e lo stesso vale per molti incendi recenti.

In aggiunta, il fenomeno delle fake news e dei titoli sensazionalistici amplifica la confusione e rende complesso l'accesso a informazioni affidabili. Spesso, gli aggiornamenti sulle indagini, l'evoluzione dell'incidente e le condizioni dell'edificio o dei residenti sono assenti o difficilmente verificabili. Anche quando disponibili, tali informazioni possono risultare parziali o non adeguatamente validate. Ad esempio, dettagli sui materiali utilizzati nella costruzione, che potrebbero essere stati rimossi dal mercato, sono spesso incompleti e l'assenza delle relative schede tecniche complica ulteriormente la ricostruzione accurata degli eventi.

Gli incendi di facciata comportano una serie di effetti dannosi e pericolosi, tra cui la compromissione della compartimentazione, la produzione di fumi e calore, e la caduta di materiali incendiati. Questi fenomeni possono mettere a rischio la vita delle persone

---

<sup>29</sup> Si rimanda il lettore alla sezione 3.1.

all'interno e nei pressi dell'edificio, rendendo più difficoltose le operazioni di evacuazione e di soccorso.

Uno degli effetti immediati è la rottura dei vetri, causata dall'elevato calore generato dall'incendio. Questo fenomeno consente ai fumi, al calore e alle fiamme di penetrare nuovamente all'interno dell'edificio, invadendo gli ambienti e compromettendo la sicurezza delle persone presenti. Se una stanza è chiusa e la porta diventa inutilizzabile per l'effetto dell'incendio, gli occupanti rischiano di rimanere intrappolati, con gravi conseguenze per la loro incolumità. Se invece le porte rimangono aperte, i fumi possono diffondersi rapidamente verso le vie di esodo, in particolare quelle principali, ostacolando le evacuazioni verso i piani inferiori. Poiché il fumo e il calore tendono a salire, anche i piani superiori diventano rapidamente inaccessibili.

La caduta di materiali dalla facciata rappresenta un ulteriore rischio. I materiali incendiati possono staccarsi o gocciolare verso il basso, colpendo persone che si trovano nelle vicinanze, inclusi passanti, esodanti e soccorritori. Questo fenomeno aumenta significativamente il pericolo in prossimità dell'edificio in fiamme.

Un aspetto critico è la perdita della compartimentazione verticale e orizzontale, progettata per limitare la propagazione dell'incendio. La compartimentazione verticale separa le diverse aree dell'edificio con muri, porte e altri elementi resistenti al fuoco, mentre quella orizzontale utilizza solai e, in alcuni casi, balconi per ostacolare la propagazione verso l'alto. Tuttavia, in caso di incendio, entrambe possono risultare inefficaci, permettendo alle fiamme e ai fumi di diffondersi senza barriere.

La compromissione della compartimentazione ha conseguenze dirette anche sulle vie di esodo. Un esempio emblematico è rappresentato dall'incendio di Valencia, dove i residenti, non potendo utilizzare le vie di fuga principali, furono costretti a rifugiarsi sui balconi per sfuggire alle fiamme (Peacock, 2024). Questo scenario sottolinea l'importanza di progettare edifici con soluzioni antincendio efficaci, che preservino la compartimentazione e garantiscano vie di fuga sicure anche in situazioni di emergenza.

Un aspetto critico nella gestione degli incendi è rappresentato dalla strategia di esodo. La strategia *stay-put* o *defend in place*, nota anche come soluzione "*one-size*" o in italiano "taglia unica", si è dimostrata inefficace in molti casi, in quanto non si adatta a tutte le situazioni di incendio (Peacock, 2024). La scelta della strategia di esodo deve essere calibrata sulle specifiche condizioni dell'edificio, del tipo di incendio e delle persone presenti.

Inoltre, è fondamentale progettare una sicurezza antincendio inclusiva, che tenga conto delle necessità delle persone con disabilità motorie, sensoriali o cognitive. Oltre a considerare chi ha limitazioni fisiche, bisogna pensare anche a categorie più complesse, come le persone nello spettro autistico, che potrebbero reagire in modo diverso durante

un'emergenza. Garantire vie di fuga accessibili e procedure inclusive è essenziale per ridurre i rischi e salvaguardare tutte le vite umane.

Molti eventi incendiari registrano un numero relativamente basso di vittime solo perché avvengono di giorno, quando molte persone sono fuori casa per lavoro o altre attività. Tuttavia, il rischio aumenta notevolmente durante la notte, quando gli occupanti dormono e sono meno consapevoli del pericolo. In queste circostanze, la possibilità che le persone vengano colte di sorpresa, non abbiano il tempo di reagire e rimangano intrappolate è altissima, trasformando l'incendio in una tragedia.

Gli edifici interessati da incendi di facciata sono spesso strutture miste, che ospitano sia residenze che attività commerciali o uffici ai piani inferiori. Un incendio può causare danni non solo alle vite umane, ma anche a livello economico, interrompendo attività lavorative o lasciando le persone senza casa. Per i residenti, questo può significare perdere tutto ciò che possiedono, ritrovarsi con mutui da pagare per appartamenti distrutti e affrontare lunghi periodi senza una sistemazione abitativa stabile.

È essenziale, quindi, considerare sempre sia il lato umano, legato alla perdita di vite e alla sicurezza delle persone, sia il lato economico, che impatta direttamente sulla qualità della vita di chi subisce un incendio. La prevenzione degli incendi e la progettazione di edifici più sicuri non sono solo questioni tecniche, ma investimenti fondamentali per il benessere collettivo e la sostenibilità delle comunità.

### 3.4. Il comportamento al fuoco delle facciate ventilate

Le facciate a doppia pelle possono favorire la propagazione verticale di un incendio, aumentando il rischio di diffusione delle fiamme da un piano all'altro. Questo fenomeno è stato confermato da diversi incendi di grande entità, anche recenti, che hanno coinvolto edifici alti (Giacalone, 2014).

Nelle facciate ventilate, la configurazione stessa dell'involucro crea un effetto camino verticale, accentuando il rischio di propagazione dell'incendio.

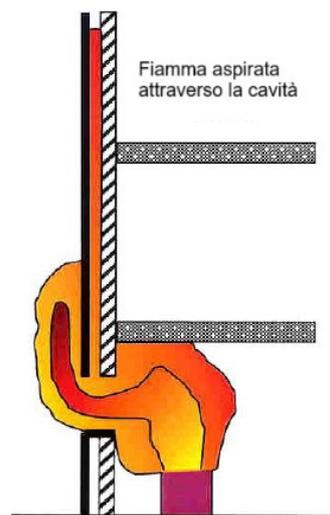


Figura 3.18: L'evoluzione dell'incendio in una facciata ventilata (Giacalone, 2014)

Si veda nell'immagine successiva il confronto tra alcune tipologie di parete.

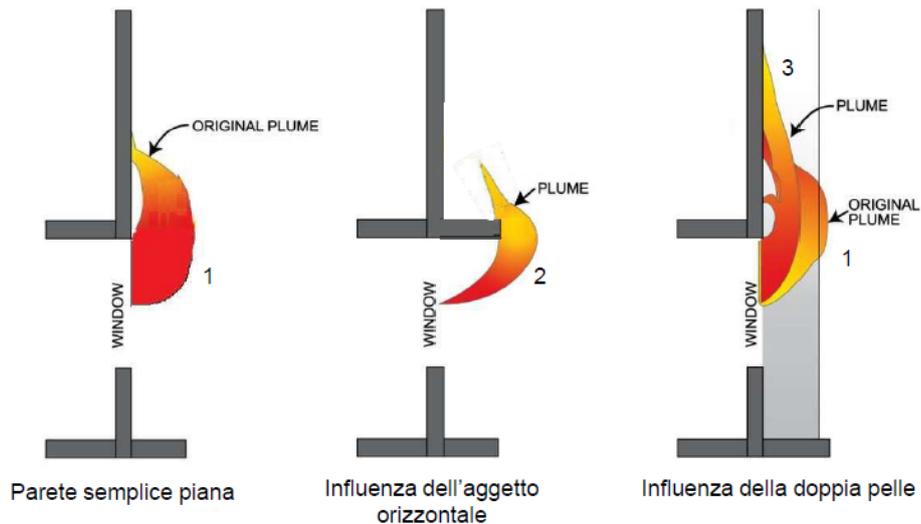


Figure 3.19: Il confronto tra parete semplice, parete con aggetto orizzontale e facciata ventilata (Giacalone, 2024)

Si noti che l'influenza della conformazione cambia notevolmente la forma, l'estensione e l'altezza raggiunta dalle fiamme.

Tale *plume* viene studiato con diverse correlazioni di tipo matematico e svariati modelli. Dal punto di vista geometrico, può essere schematizzato per prevederne lo sviluppo spaziale, con particolare attenzione all'altezza della fiamma, come illustrato nelle immagini seguenti.

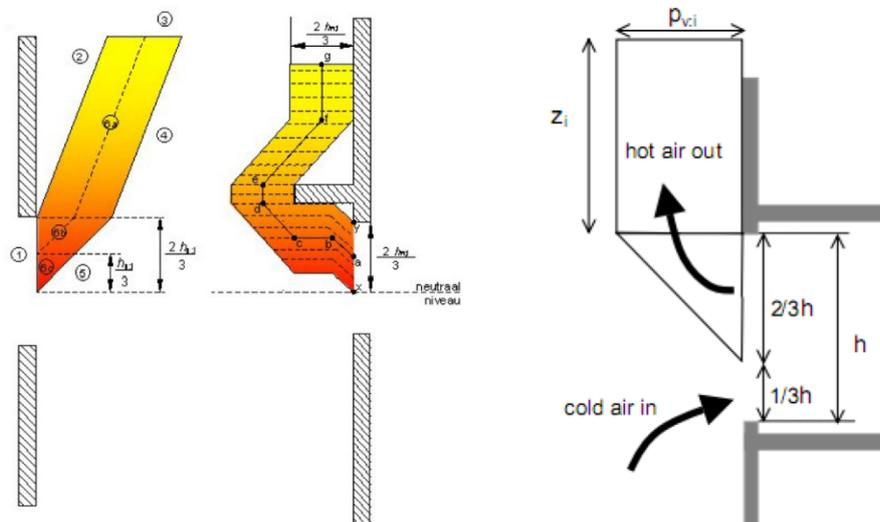


Figure 3.20: Schematizzazione del plume (Giacalone, 2014)

La probabilità di propagazione dell'incendio ai piani superiori è fortemente influenzata da specifiche caratteristiche della facciata, tra cui la larghezza della cavità, la presenza e le dimensioni di eventuali aggetti, nonché il tipo di ventilazione adottato.

Quello che accade nella facciata ventilata, ossia lo scenario d'incendio all'interno, può essere spiegato con le rappresentazioni successive.

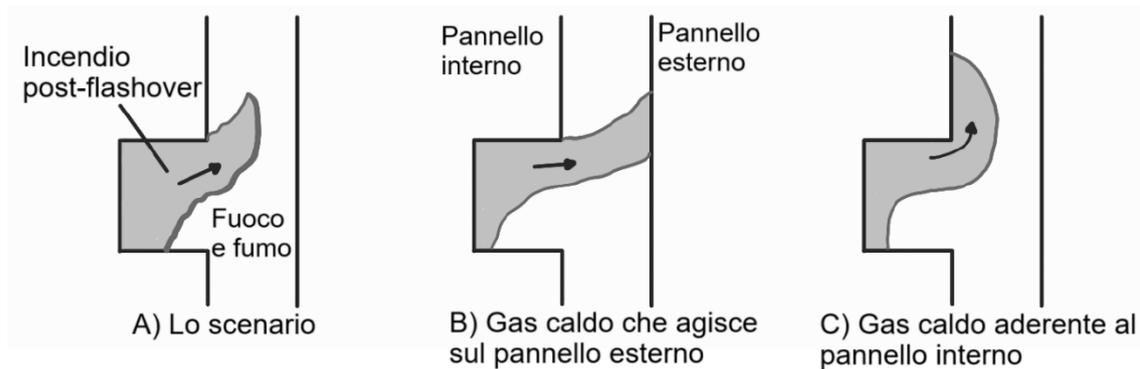


Figure 3.21: Lo sviluppo di uno scenario d'incendio interno ad una facciata ventilata (riproduzione di immagini prese da Giacalone, 2014)

L'adesione dei gas caldi alla superficie interna della facciata incide significativamente sul trasferimento termico, coinvolgendo in modo particolare la parte superiore dell'involucro edilizio.

La propagazione delle fiamme può manifestarsi in modalità differenti a seconda della larghezza della cavità presente tra gli elementi della facciata.

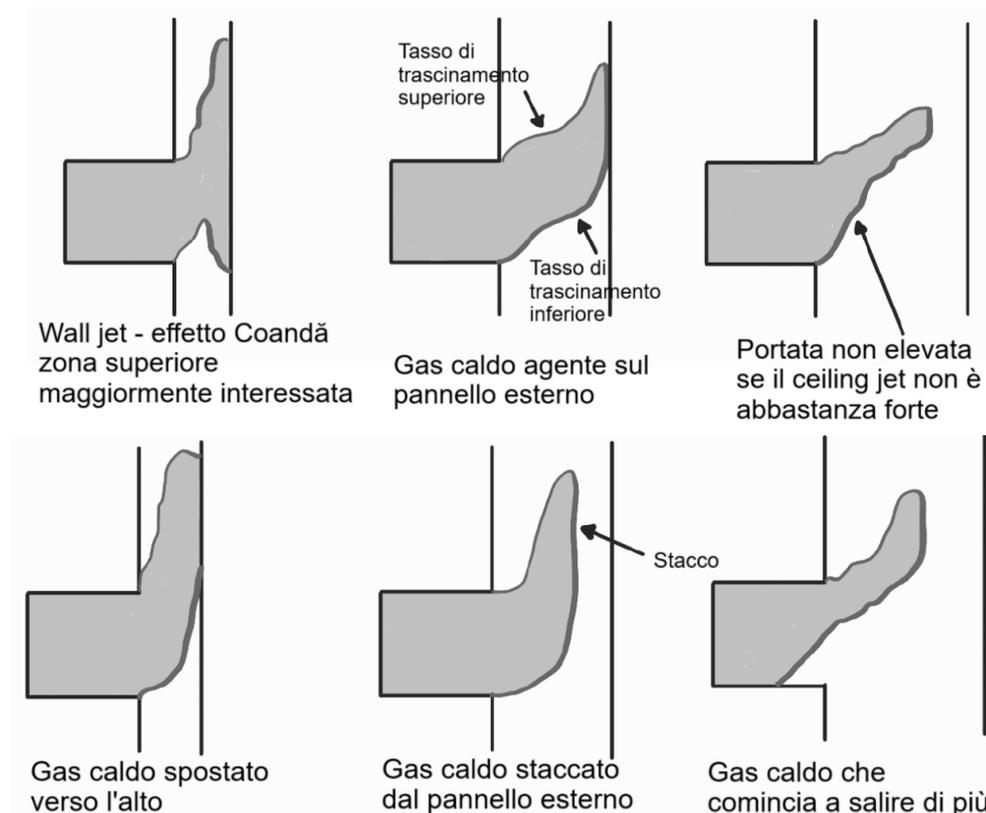


Figure 3.22: Altri scenari dello sviluppo di un incendio interno ad una facciata ventilata da tenere in considerazione (riproduzione di immagini prese da Giacalone, 2014)

Una progettazione efficace ai fini della sicurezza antincendio deve perseguire tre obiettivi principali: ridurre la probabilità di propagazione delle fiamme attraverso

l'intercapedine, limitare gli effetti di un incendio esterno ed evitare o contenere il rischio di distacco di parti della facciata (Giacalone, 2014).

La traiettoria delle fiamme e il profilo termico all'esterno dell'edificio sono influenzati da diversi fattori. Tra questi, assumono particolare rilevanza l'area e l'altezza delle aperture, la geometria del locale in cui si sviluppa l'incendio, la quantità e la velocità di combustione del materiale coinvolto, nonché l'intensità e la direzione del vento (Giacalone, 2014).

Inoltre, è stata analizzata l'influenza della larghezza della cavità interparete, prendendo in esame valori standard di 0.5 m, 1.0 m e 1.5 m. I risultati hanno evidenziato che un'intercapedine più ampia favorisce il contenimento del rischio, mentre una cavità di soli 0.5 m aumenta la probabilità di rottura del rivestimento esterno qualora questo sia vetrato. Sebbene ciò possa facilitare il deflusso dei fumi verso l'esterno, comporta anche il pericolo di caduta di materiale. La cavità di 1.0 m si è rivelata particolarmente critica poiché favorisce la rottura dei vetri interni, incrementando così la propagazione verticale delle fiamme.

Le diverse tipologie di vetro impiegate nelle facciate a doppia pelle ricoprono un ruolo determinante nei meccanismi di propagazione del fuoco. Le moderne tecnologie di produzione permettono oggi di ottenere vetri con elevata resistenza sia meccanica che termica. Tuttavia, ai fini di una corretta modellazione del fenomeno, è fondamentale comprendere i meccanismi di rottura del vetro sottoposto a sollecitazione termica. La formazione di cricche nella lastra si verifica generalmente quando la differenza di temperatura tra il telaio e il vetro supera gli 80-100 K (o 80-100°C)<sup>30</sup>, generando tensioni strutturali significative (Giacalone, 2014).

La rottura del vetro ha conseguenze rilevanti sulla dinamica dell'incendio, influenzando la circolazione dei gas e il comportamento termico della facciata. Ad esempio, per i vetri monocamera e i vetri temperati con spessori superiori a 5 mm, questo fenomeno si verifica a temperature superiori ai 450 °C (Giacalone, 2014).

#### *3.4.1. I rischi e le strategie di progettazione dei sistemi delle facciate ventilate*

Nella progettazione di sistemi di facciate ventilate, è fondamentale considerare alcuni rischi specifici, in particolare quelli legati alla compartimentazione e alla scelta dei materiali. Tali aspetti rivestono un ruolo cruciale nella prevenzione e nella limitazione della propagazione degli incendi (Micunco, 2022).

La compartimentazione è uno dei principali fattori di rischio, infatti, affinché un sistema di facciata ventilata garantisca un adeguato livello di sicurezza, è essenziale che essa sia mantenuta tanto in senso verticale quanto in senso orizzontale. In assenza di un'efficace compartimentazione, il rischio di propagazione delle fiamme aumenta considerevolmente, poiché non vi sono barriere fisiche in grado di ostacolare la diffusione dell'incendio. Una sua corretta realizzazione consente di delimitare le aree al fine di renderle indipendenti ed

---

<sup>30</sup> Si ricorda che quando si tratta di differenze di temperatura i gradi possono essere sia kelvin che celsius.

ermetiche le une rispetto alle altre, garantendo così che un eventuale incendio resti confinato all'interno di un singolo compartimento, senza compromettere quelli adiacenti. Ciò contribuisce significativamente a contenere i danni e a garantire maggiore sicurezza nei confronti della salvaguardia della vita umana.

La compartimentazione può essere migliorata attraverso l'interruzione di alcuni elementi e l'uso di materiali resistenti al fuoco, come quelli intumescenti, che ostacolano la propagazione delle fiamme e ne riducono l'estensione (Micunco, 2022).

La stabilità del sistema della facciata dipende soprattutto dalla resistenza alle alte temperature dei materiali, degli elementi strutturali e di quelli di collegamento, garantendo la tenuta dell'intero sistema in caso di incendio (Micunco, 2022). Per questo motivo, è importante che il progettista verifichi la resistenza al fuoco degli elementi strutturali e delle connessioni metalliche che supportano e ancorano il rivestimento alla parete portante (Vancetti, 2023).

Un ulteriore elemento critico riguarda le caratteristiche dei materiali impiegati nella facciata: ad esempio, alcuni materiali a causa della loro natura (eventualmente combustibile) o delle modalità di installazione possono facilitare la propagazione del fuoco. Una posa non conforme agli standard di sicurezza, una scarsa manutenzione e il degrado dei materiali nel tempo rappresentano ulteriori fattori di rischio, potenzialmente in grado di compromettere l'integrità strutturale e la sicurezza dell'edificio. È quindi imprescindibile adottare materiali certificati e conformi alle normative vigenti, nonché garantire un'installazione accurata e una manutenzione periodica.

Il primo aspetto rilevante per la sicurezza antincendio riguarda la selezione dei materiali per la facciata, in particolare la loro reazione e resistenza al fuoco (Micunco, 2022). Tuttavia, oltre a queste caratteristiche, occorre considerare proprietà termiche, estetiche e di comfort termoacustico, specialmente in interventi di ristrutturazione, restauro o, ad esempio, di riqualificazione energetica. Ciò nondimeno, le esigenze legate all'estetica, al comfort indoor e alla sicurezza antincendio possono risultare contrastanti tra loro. Pertanto, il progettista deve individuare soluzioni che garantiscano un equilibrio ottimale tra questi aspetti, conciliando le diverse necessità e riuscendo a soddisfare i requisiti di progetto, senza compromettere la sicurezza dell'edificio e dei suoi occupanti (Vancetti, 2023).

Una corretta progettazione deve partire da un'attenta valutazione dei rischi poiché, sebbene non sia possibile eliminare completamente il pericolo d'incendio, è fondamentale adottare misure antincendio volte alla sua mitigazione. A tale scopo, il progettista deve attenersi alle disposizioni contenute nel Codice di prevenzione incendi (Vancetti, 2023).

Un secondo aspetto da considerazione riguarda la disposizione dei materiali, la quale incide fortemente sulla propagazione del fuoco. La geometria della facciata, sia a livello macroscopico che del singolo pannello o del singolo elemento, può influenzare i percorsi di diffusione dell'incendio (Micunco, 2022).

Altri fattori cruciali sono i costi e le tempistiche di realizzazione. In passato, l'impiego di materiali combustibili è stato motivato da esigenze economiche, portando tuttavia a incendi con conseguenze devastanti. Per questo motivo, è essenziale trovare un equilibrio tra costi, tempi di posa, risorse impiegate e necessità di manutenzione.

Un altro aspetto da tenere in considerazione è il pericolo derivante dalla caduta di detriti dall'alto. Durante un incendio, infatti, i materiali possono subire un deterioramento significativo rilasciando fumo e gas tossici, frammentarsi e precipitare quindi a terra. Inoltre, occorre valutare il rischio di distacco degli elementi e della rottura dei vetri delle finestre e portefinestre, fattori che aumentano al crescere dell'altezza dell'edificio. Per quanto riguarda il distacco degli elementi, bisogna tenere in considerazione il pericolo dato dalla caduta di porzioni di materiale o parti intere di pannelli di dimensioni anche considerevoli. Per quanto riguarda la rottura dei vetri, invece, bisogna tenere presente che la loro caduta verso il basso possa essere altrettanto pericolosa.

Tali fenomeni, in fase di evacuazione, costituiscono una minaccia per l'incolumità sia degli occupanti sia dei soccorritori impegnati nelle operazioni di emergenza. Pertanto, nella progettazione delle facciate, la sicurezza delle persone deve essere la priorità assoluta, adottando soluzioni tecniche mirate alla riduzione di questi rischi e garantendo il rispetto delle normative di sicurezza antincendio. In particolare, per ridurre il pericolo di rottura dei vetri, è consigliabile l'impiego di vetri temprati ad alta resistenza agli shock termici (Micunco, 2022).

### *3.4.2. Sistemi di protezione passiva alla propagazione incendi*

Quando si progetta una struttura, si prevede che un incendio possa verificarsi almeno una volta nel corso della sua vita utile. Per questo motivo, è essenziale adottare strategie costruttive volte a limitare e contenere la propagazione del fuoco sia sulle superfici interne che su quelle esterne. L'efficacia di queste misure dipende dalla capacità di compartimentare l'incendio e garantire la protezione delle connessioni tra gli elementi strutturali, in modo da impedire la diffusione incontrollata delle fiamme e dei fumi (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

L'obiettivo principale della sicurezza antincendio è tutelare la vita degli occupanti e dei soccorritori, oltre a proteggere i beni e l'ambiente. Affinché ciò sia possibile, il fuoco e il fumo devono essere confinati in zone dedicate, indipendentemente dalla complessità della configurazione dell'edificio, dai materiali utilizzati o dalle soluzioni costruttive adottate (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023). I principali percorsi attraverso cui il fuoco e il fumo possono propagarsi all'interno di una costruzione sono:

- I. Attraverso elementi di separazione, in particolare pareti e solai.
- II. Attraverso giunti tra elementi separatori di compartimenti adiacenti e tolleranze di costruzione associate.
- III. Attraverso giunzioni tra parti dell'edificio o intersezioni strutturali.
- IV. Attraverso le penetrazioni e le aperture destinate ai servizi dell'edificio.
- V. Attraverso cavità costruttive nascoste.

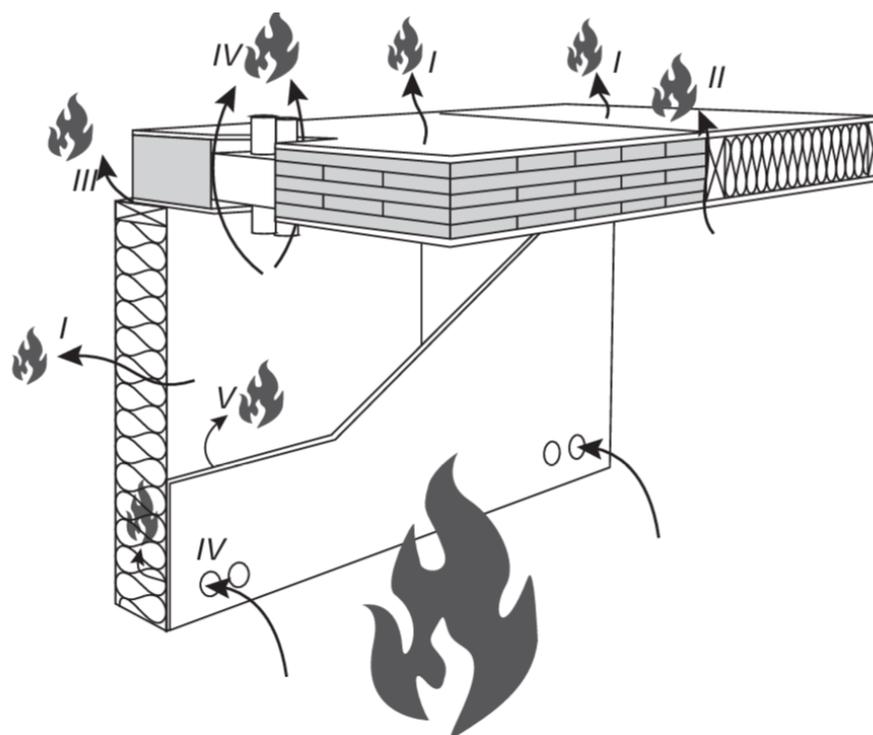


Figura 3.23: Percorsi di propagazione dell'incendio (Global Design Guide, 2022, pag. 338)

Tali percorsi di diffusione dell'incendio devono essere considerati e adeguatamente gestiti durante le fasi di progettazione, installazione e manutenzione, con controlli regolari nel corso della sua occupazione. Questo approccio rientra nelle strategie di protezione passiva antincendio; in particolare, la gestione della propagazione del fuoco negli spazi nascosti (percorsi III-V) è un aspetto critico della sicurezza antincendio. Il rischio principale è rappresentato dalla presenza di cavità, vani tecnici e altri spazi vuoti che fanno parte della costruzione di un edificio. In questi ambienti il fuoco può diffondersi inosservato, eludendo la compartimentazione e altre misure antincendio, aumentando significativamente il pericolo per occupanti e soccorritori, oltre ai danni materiali (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

La propagazione incontrollata di fumo e fiamme viene contrastata mediante l'installazione di cavity barriers e fire stops, posizionati in corrispondenza di giunti, passaggi tra elementi strutturali e aperture alle interfacce. Inoltre, a causa di tolleranze dimensionali di costruzione e variazioni del materiale dovute al restringimento come accade, ad esempio, per il legno, si possono generare fessure che devono essere adeguatamente sigillate per evitare percorsi di propagazione occulti (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

L'obiettivo delle cavity barriers e dei fire stops è quello di contenere la diffusione del fuoco e del fumo, o al più frenarla, mantenendo questi prodotti della combustione all'interno di zone delimitate per consentire l'evacuazione degli occupanti e garantire un accesso sicuro ai soccorritori (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

Oltre a ciò, queste soluzioni bloccano il percorso verso il basso di particelle infiammate e la propagazione di gas infiammabili lungo il sistema perimetrale della facciata, migliorando ulteriormente la sicurezza antincendio (Micunco, 2022).

Queste due soluzioni sono in verità due prodotti distinti, ma spesso confusi perché hanno le stesse finalità. Per tale ragione, si ritiene necessario distinguerli e vederne le caratteristiche e il posizionamento.

Le cavity barriers hanno la funzione di sigillare le aperture presenti nella struttura, limitando l'afflusso di aria attraverso le cavità e ostacolando il passaggio del fumo. Tuttavia, è importante sottolineare che una barriera di questo tipo da sola non riesce a garantire un sufficiente grado di compartimentazione, ma può essere determinante complessivamente nella strategia antincendio.

Queste barriere tagliafuoco sono generalmente necessarie ai bordi delle intercapedini, attorno alle aperture come finestre e porte, nonché nei punti di entrata e uscita dei servizi e degli impianti tecnici. Inoltre, devono essere installate nell'intercapedine in corrispondenza dei giunti tra parete esterna e solaio/parete che divide un compartimento da un altro. Allo stesso modo si devono installare tra una parete interna, dotata anch'essa di intercapedine, e ogni solaio di compartimento o altre pareti e porte resistenti al fuoco. La loro presenza è fondamentale anche nei sottotetti, nelle facciate e nei rivestimenti esterni, oltre che a protezione delle vie di fuga (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

Il fire stop è una soluzione impiegata per garantire continuità in corrispondenza di fessure, giunti, aperture e imperfezioni presenti negli elementi strutturali resistenti al fuoco. Questi prodotti sono specificamente formulati per sigillare piccoli spazi e aperture, ripristinando così la continuità del sistema di compartimentazione e mantenendo le prestazioni antincendio originali di pareti e pavimenti. È fondamentale che il fire stop possieda la stessa capacità di resistenza al fuoco dell'elemento strutturale a cui viene applicato, assicurando l'integrità della protezione antincendio complessiva (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

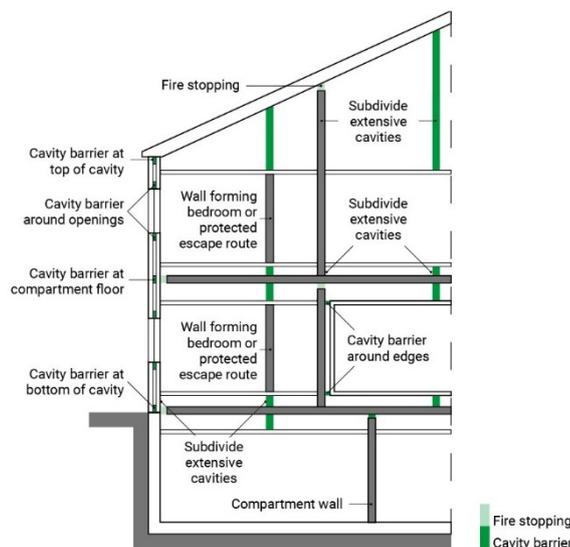


Figura 3.24: Il posizionamento e le funzioni differenziali tra cavity barrier e fire stop (Wilkinson, 2021)

Il posizionamento di tali soluzioni realizza una vera e propria interruzione nell'intercapedine che si ripete ritmicamente e, talvolta, con un certo passo o schema (Micunco, 2022).

Cavity barriers e fire stops sono comunemente realizzati con materiali incombustibili e installati all'interno delle intercapedini e delle cavità, sia orizzontali sia verticali, degli edifici (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023). I materiali utilizzati per la loro realizzazione possono includere lana minerale, come ad esempio la lana di roccia, oppure possono essere listelli di legno, profili e elementi piatti forati in acciaio, oppure ancora possono consistere in strisce di materiale intumescente<sup>31</sup>.

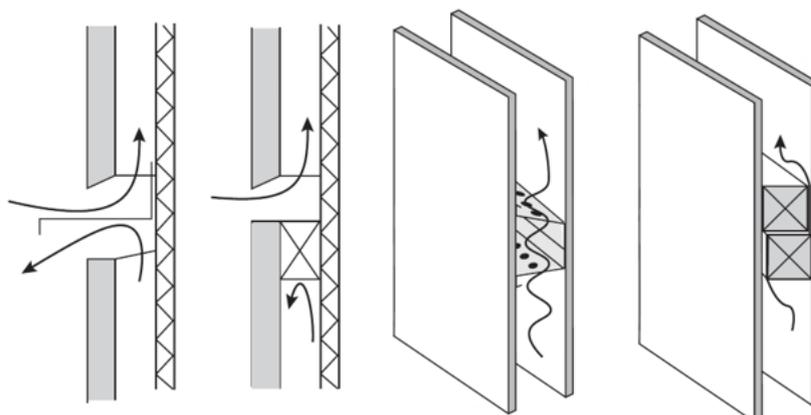


Figure 3.25: Le diverse tipologie di barriera (*Global Design Guide*, 2022, pag. 340)

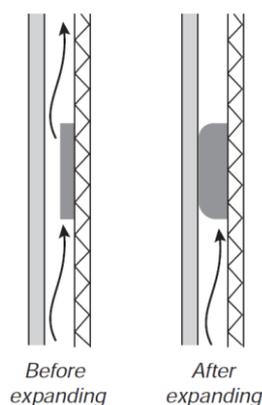


Figure 3.26: Il funzionamento del materiale intumescente (*Global Design Guide*, 2022, pag. 340)

La scelta del materiale e della tipologia di prodotto dipende da diversi fattori, tra cui: il movimento previsto dell'edificio, che può derivare da fenomeni quali assestamenti futuri, dilatazioni termiche differenziali, flessioni o oscillazioni degli elementi strutturali; la possibilità di crollo o deformazione delle strutture o delle superfici a cui il prodotto è ancorato; la presenza di impianti, come condotti o tubazioni, che potrebbero interferire con l'installazione o il funzionamento della barriera stessa o del fire stop (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

<sup>31</sup> Ad una determinata temperatura, il materiale è in grado di espandere. In genere, nella scheda tecnica del materiale, viene indicata la *temperatura di attivazione* a cui corrisponde tale espansione di volume.

Indipendentemente dal tipo di prodotto scelto, è fondamentale che sia certificato, contrassegnato con il marchio CE e testato secondo gli standard appropriati, per garantire la sua efficacia in situazioni di emergenza. Non esistono standard e metodi di prova per testare i materiali validi a livello internazionale: essi cambiano da Paese a Paese e non c'è conformità e perfetta aderenza tra l'uno e l'altro. In genere, nelle schede tecniche, il produttore indica le norme di riferimento, gli standard di prova, i risultati dei test, la classe risultate dopo l'esecuzione di tali test e tutti i dati di certificazione del prodotto (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

Si noti, inoltre, che sia la Circolare 5043/2013 sia il Codice di prevenzione incendi non danno delle indicazioni precise in merito a tali prodotti, nonostante qualche cenno e vaga raccomandazione all'impiego di tali soluzioni.

Sebbene la funzione principale delle barriere sia quella di impedire la propagazione del fuoco, è altrettanto importante che esse non compromettano le prestazioni della facciata ventilata. Nello specifico, se il progettista opta per queste soluzioni, ossia cavity barriers e fire stops, l'intercapedine d'aria deve mantenere la capacità di consentire la convezione naturale o forzata qualora sia stata prevista in progetto. Ciò implica che queste soluzioni antincendio debbano essere progettate in modo tale da garantire il corretto funzionamento della ventilazione della parete, pur assicurando una protezione adeguata in caso di incendio (*Cavity Barriers and Fire Stops*, 2023).

In altre parole, queste barriere devono soddisfare due requisiti contrastanti: da un lato, devono arrestare o intercettare fiamme, fumi e gas o ritardare la loro diffusione; mentre, dall'altro lato, al contempo devono permettere la circolazione dell'aria senza interferire con la ventilazione interna se prevista (Micunco, 2022).

## 4. Le linee guida per la sicurezza antincendio delle facciate

Negli ultimi anni la progettazione ha subito un'evoluzione significativa orientandosi sempre più verso un approccio multidisciplinare. La complessità degli edifici moderni richiede una visione integrata che consideri simultaneamente diversi aspetti, quali la progettazione strutturale, architettonica, energetica, impiantistica e di sicurezza antincendio (Vancetti, 2022; Vancetti, 2023). Quest'ultima, in particolare, assume un ruolo centrale nella definizione delle soluzioni progettuali, richiedendo l'applicazione di metodologie avanzate per garantire livelli adeguati di sicurezza.

In tale contesto, la normativa di riferimento per la sicurezza antincendio delle facciate è rappresentata dalla RTV. 13 del Codice di Prevenzione Incendi, che definisce gli obiettivi fondamentali per la limitazione della propagazione del fuoco sia dall'interno che dall'esterno dell'edificio, nonché per la prevenzione della caduta di elementi costruttivi che possano compromettere le operazioni di soccorso o l'esodo degli occupanti.

Parallelamente all'evoluzione normativa, si è affermato l'approccio prestazionale basato sulla Fire Safety Engineering (FSE), il quale consente di valutare il comportamento al fuoco degli edifici attraverso strumenti di modellazione e simulazione avanzata. Tale metodologia si distingue per la capacità di fornire soluzioni progettuali ottimizzate, adattandosi alle specifiche caratteristiche del manufatto e garantendo il rispetto degli obiettivi di sicurezza definiti dalla normativa vigente.

### 4.1. Gli obiettivi e la metodologia generale del progettista

Uno degli obiettivi principali di questa tesi è offrire un supporto concreto al progettista nella fase di progettazione e verifica di una struttura, con un focus specifico sul comportamento della facciata ventilata in caso di incendio. In questo capitolo vengono illustrati gli step fondamentali e le considerazioni tecniche utili a guidare il professionista nell'analisi e nella valutazione del progetto, fornendo strumenti e metodologie per una disamina accurata e consapevole.

Prima di tutto bisogna capire quale tipo di intervento verrà realizzato, perché vi è un'ovvia differenza tra la realizzazione di una nuova costruzione e gli interventi su un edificio esistente.

In generale, gli interventi edilizi possono essere di manutenzione ordinaria, manutenzione straordinaria, restauro e risanamento conservativo, ristrutturazione edilizia, nuova costruzione e ristrutturazione urbanistica, come riportato nella Parte I del Titolo I nel Capo I all' art.3 del Testo Unico Edilizia (D.P.R. 380/2001; Perero, 2024).

Per quanto riguarda strutture e facciate, il progettista sarà sicuramente orientato agli interventi di manutenzione straordinaria, restauro e risanamento conservativo, ristrutturazione edilizia o, al più, nuova costruzione.

Gli interventi di riqualificazione edilizia, a seconda della loro entità, possono rientrare in una delle categorie precedentemente elencate: possono rientrare nella categoria di ristrutturazione edilizia nel caso in cui comportino modifiche rilevanti, come la sostituzione dell'impianto di riscaldamento, il rifacimento del cappotto termico o la sostituzione di infissi con modifiche strutturali; mentre, rientrano nel restauro e nel risanamento conservativo se risultano finalizzati a migliorare l'efficienza energetica senza alterare la struttura e gli elementi tipologici dell'edificio, come il consolidamento di parti degradate o la sostituzione di impianti con altri equivalenti in termini di posizione e dimensioni. In alcuni casi, se si tratta solo di interventi minori come, ad esempio, la sostituzione della caldaia o l'installazione di pannelli solari senza modifiche sostanziali, potrebbero rientrare anche nella manutenzione straordinaria (Perero, 2024).

In ogni caso, si rimanda il progettista alla lettura delle normative di riferimento, quali il Testo Unico Edilizia, i riferimenti trattati nella sezione 2.3.1 del presente lavoro di tesi per soddisfare i requisiti di efficienza energetica e, infine, al Codice di prevenzione incendi per la sicurezza antincendio.

Nel caso di una nuova costruzione, il progettista ha il compito di definire la configurazione della facciata, selezionando materiali, spessori e stratigrafia, per poi procedere alla verifica delle prestazioni energetiche. Al contrario, nel caso di un edificio esistente, la configurazione della facciata è già determinata e il progettista deve concentrare la propria attenzione sull'acquisizione delle informazioni necessarie tramite rilievi, ispezioni visive e analisi documentali. Sarà quindi fondamentale determinare l'epoca di costruzione, la storia degli interventi subiti e le caratteristiche originarie dell'involucro edilizio. L'obiettivo principale è acquisire dati relativi alla geometria, ai dettagli costruttivi e alle proprietà dei materiali impiegati. Qualora le informazioni disponibili risultino insufficienti, il progettista può integrare le conoscenze attraverso prove in situ o analisi di laboratorio su campioni prelevati in loco. In entrambe le situazioni, è imprescindibile disporre delle schede tecniche dei materiali, ottenute direttamente dai fornitori nel caso di nuove costruzioni o derivate da test e documenti storici per edifici esistenti. Una volta completata questa fase, è necessario valutare la destinazione d'uso dell'edificio e la tipologia di intervento da effettuare.

A questo punto, prima di apprestarsi alla progettazione della sicurezza antincendio, occorre innanzitutto determinare se la struttura rientri tra le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. Si rimanda alla lettura del capitolo 1.1 del presente lavoro di tesi e al Codice di prevenzione incendi; tuttavia, per venire incontro al lettore, si riporta in seguito uno schema di sintesi che può risultare utile al progettista per capire quando può o deve applicare il Codice.

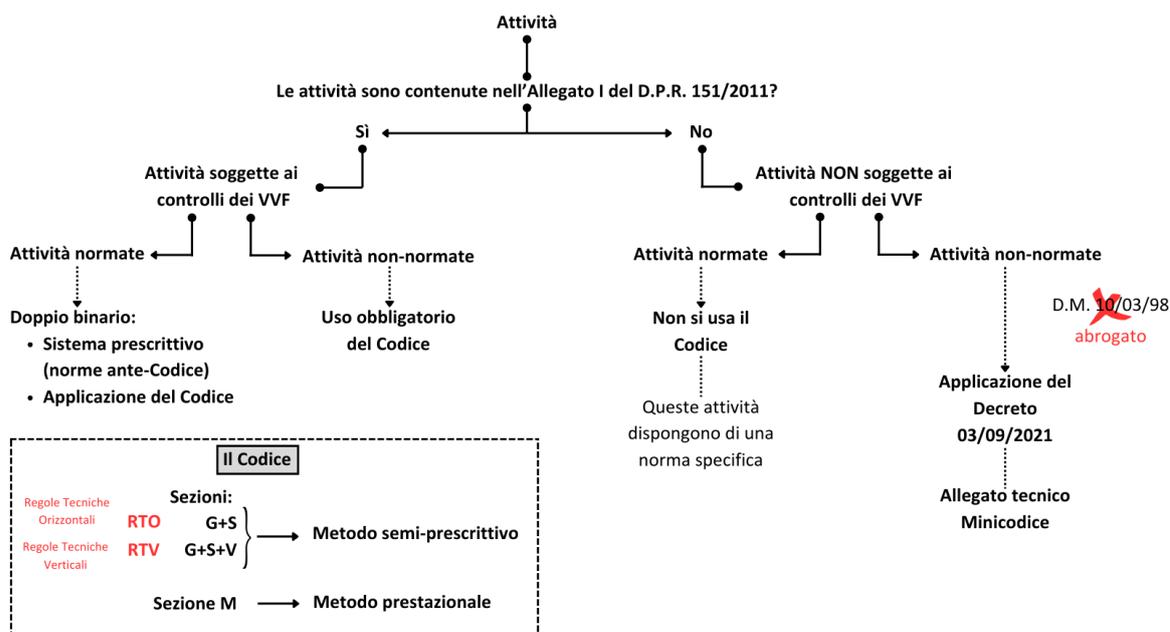


Figura 4.1: Schema riassuntivo di attività soggette e non soggette, normative e non normative, con specchietto del Codice di prevenzione incendi (Vancetti, 2022)

Quindi, uno step importante è la valutazione del rischio d'incendio, la quale risulta obbligatoria solo per le attività classificate come luoghi di lavoro ai sensi del D.Lgs. 81/2008 e per quelle ricomprese nel D.P.R. 151/2011. A tal proposito, si noti che il Codice di prevenzione incendi generalmente non si applica a tutti gli edifici civili (ad uso residenziale o altro) salvo quelli di grande altezza: infatti, nel D.P.R. 151/2011 vi è solamente l'attività 77 che comprende gli edifici di civile abitazione con altezza antincendio superiore a 24 metri e, per questo motivo, esiste la RTV.14.

Invece, per quanto riguarda le facciate, il Codice prescrive l'applicazione della RTV.13, ossia le chiusure d'ambito di edifici civili, non necessariamente solo ad uso residenziale.

Di seguito si illustrano i punti salienti per il progettista che, appurata la necessità di una valutazione del rischio incendio di facciate di strutture ad uso civile, con particolare riferimento a quelle ventilate, deve applicare le disposizioni e le prescrizioni normative del Codice di prevenzione incendi. Tuttavia, è giusto dire che sarebbe sempre opportuno considerare un'analisi del rischio incendio indipendentemente dall'obbligatorietà normativa, per garantire la salvaguardia della vita umana e, in secondo luogo, quella di beni e ambiente.

La RTV.14, *Edifici di civile abitazione*, del Codice si applica a strutture residenziali con altezza antincendio superiore a 24 metri, ossia edifici di altezza pari a 8 piani circa. È stata introdotta con il D.M. 19/05/2022 ed è entrata in vigore dal 29/06/2022, quindi è piuttosto recente.

Nella regola tecnica, nella sezione V.14.2, vi è una classificazione degli edifici che si basa sulla massima quota dei piani  $h$ :

HC	$h \leq 32 \text{ m} \Rightarrow h = 24 \div 32 \text{ m}$	$h \cong 8 \div 10 - 11 \text{ piani}$
HD	$h \leq 54 \text{ m} \Rightarrow h = 32 \div 54 \text{ m}$	$h \cong 10 - 11 \div 18 \text{ piani}$
HE	$h \leq 80 \text{ m} \Rightarrow h = 54 \div 80 \text{ m}$	$h \cong 18 \div 26 - 27 \text{ piani}$
HF	$h > 80 \text{ m}$	$h > 26 - 27 \text{ piani}$

*Tabella 4.1: Classificazione degli edifici in base all'altezza dei piani dalla RTV.13 (Codice di prevenzione incendi, pag. V.14-2)*

Segue una classificazione delle aree dell'attività (pag. V.14-2):

*TA: unità adibite a civile abitazione o ad uso esclusivo (es. appartamenti, ...);*

*TB: unità destinate a piccole attività di tipo civile (es. attività artigiane o commerciali, magazzini, attività professionali, uffici, ...);*

*TC: spazi comuni (es. scale e corridoi condominiali, atri, androni, terrazzi condominiali, rampe e passaggi in genere, sale riunioni con basso affollamento, ...);*

*TM1: depositi o archivi di superficie lorda  $\leq 25 \text{ m}^2$  con carico di incendio specifico  $q_f \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$ , oppure di superficie lorda  $\leq 100 \text{ m}^2$  con carico di incendio specifico  $q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2$ ;*

*TM2: depositi o archivi di superficie lorda  $\leq 400 \text{ m}^2$  con carico di incendio specifico  $q_f \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$ , oppure di superficie lorda  $\leq 1000 \text{ m}^2$  con carico di incendio specifico  $q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2$ ;*

*TO: locali con affollamento  $> 100$  occupanti (es. locali ad uso collettivo, sale conferenze, sale riunioni, ...);*

*TT: locali tecnici rilevanti ai fini della sicurezza antincendio;*

*TZ: altre aree.*

Si esegue una valutazione del rischio incendio seguendo la metodologia illustrata al capitolo G.2 del Codice e si individuano i profili di rischio seguendo il capitolo G.3.

Successivamente, si applicano tutte le misure antincendio della sezione V del Codice, attribuendo i livelli di prestazione in base ai relativi criteri di attribuzione. Per quanto riguarda la reazione al fuoco, si applicano le prescrizioni del capitolo V.1. Invece, per le chiusure d'ambito si applicano le prescrizioni del capitolo V.13.

I dettami successivi forniscono le prescrizioni complementari o sostitutive alle soluzioni conformi previste dai corrispondenti livelli di prestazione della Regola Tecnica Orizzontale (RTO)<sup>32</sup>, di cui si riportano i punti salienti: la reazione al fuoco, la resistenza al fuoco e la compartimentazione.

---

<sup>32</sup> Applicare la RTO significa applicare le sezioni G e S del Codice, seguendo l'approccio semi-prescrittivo.

Per quanto concerne la reazione al fuoco:

- non si richiedono requisiti minimi di reazione al fuoco per le aree TA;
- devono essere utilizzati materiali appartenenti al gruppo GM2 di reazione al fuoco nelle vie d'esodo verticali, nei percorsi d'esodo e negli spazi calmi;
- devono essere utilizzati materiali appartenenti almeno al gruppo GM1 di reazione al fuoco nelle vie d'esodo verticali, percorsi d'esodo e spazi calmi negli edifici di tipologia HE e HF;
- escludendo gli edifici di tipo HE e HF, si possono utilizzare materiali appartenenti al gruppo GM3 di reazione al fuoco nei percorsi d'esodo, a patto che il livello di prestazione per rilevazione ed allarme venga aumentato di almeno un livello rispetto alla prescrizione conforme.

Per quanto riguarda la resistenza al fuoco, la RTV.14 prevede che la classe di resistenza comunque non sia inferiore alle prescrizioni in tabella V.14-1.

Compartimenti	Attività			
	HC	HD	HE	HF
Fuori terra	60			90
Interrati	60			90

*Tabella 4.2: Classi di resistenza al fuoco dalla RTV.14 (tabella V.14-1, pag. V.14-3)*

Per la compartimentazione, sono ammessi compartimenti multipiano per piani con quota > -5 m e ≤ 12 m e per piani con quota superiore, ossia > 12 m e ≤ 32 m, con massimo dislivello fra i piani ≤ 7 m. Le aree dell'attività devono avere le caratteristiche di compartimentazione previste in tabella V.14-2.

Aree	Attività			
	HC	HD	HE	HF
TA, TB, TC, TM1	Nessun requisito aggiuntivo			
TM2, TO, TT	Di tipo protetto			
TZ	Secondo risultanze della valutazione del rischio			

*Tabella 4.3: Requisiti di compartimentazione dalla RTV.14 (tabella V.14-2, pag. V.14-4)*

Ci sono alcune riflessioni che si possono fare dalla lettura e consultazione della RTV.14.

Nelle aree TA, cioè nelle unità abitative o ad uso esclusivo come gli appartamenti, non sono richiesti requisiti minimi di reazione al fuoco e questo fa sì che vi possa essere la presenza di materiali combustibili. Di conseguenza, tale presenza giustifica e avvalorata l'ipotesi che un incendio possa originarsi all'interno di un appartamento (incendio indoor) come molti degli eventi accaduti in passato, già visti e trattati anche nello storico degli incendi (sezione 3.2) e in tanti altri eventi di minore entità non affrontati in questa tesi.

Solamente per gli edifici HE e HF, quindi con altezza superiore ai 18 piani, il Codice di prevenzione incendi impone l'uso di materiali del gruppo GM1 nelle vie d'esodo verticali, nei percorsi d'esodo e spazi calmi. In queste aree, quindi, dovranno esserci generalmente materiali quanto più incombustibili o con combustibilità limitata, ossia con una classe di

reazione al fuoco incombustibile o con contributo alla combustione molto limitato, con emissione dei fumi “molto limitata” o “limitata” e con assenza di gocciolamento o gocciolamento “limitato”.

In tutti gli altri casi, quindi in edifici di altezza compresa tra 8 e al più 18 piani, sempre nelle vie d’esodo verticali, nei percorsi d’esodo e spazi calmi, si prescrivono i gruppi di materiali GM2 o GM3 a condizione che si aumenti il livello di prestazione per rilevazione e allarme. Pertanto, in questi casi si avranno dei materiali sicuramente più combustibili e con una reazione al fuoco peggiore.

Si noti che, in effetti, il legislatore del Codice non spiega perché, per quanto riguarda la reazione al fuoco, esista questo fattore discriminante associato ai 18 piani di altezza di un edificio. Perché 54 metri di altezza dovrebbero costituire un limite? Vi saranno molti studi e considerazioni a riguardo, ma si noti che nel Codice non vi è una giustificazione a tale vincolo.

A tal proposito, dato che nelle vie d’esodo verticali, nei percorsi d’esodo e spazi calmi degli edifici di tipo HE e HF (cioè edifici di 18 piani o più) si prescrivono materiali del gruppo GM1, il lettore del Codice o il progettista potrebbe aspettarsi che, nelle stesse aree per strutture di categoria HC (da 8 a 10-11 piani circa) e HD (da 10-11 a 18 piani), siano raccomandati materiali appartenenti rispettivamente ai gruppi GM3 e GM2, secondo una sorta di ordine gerarchico. Invece, tale prescrizione non è stata contemplata nel Codice; pertanto, ci si limita ad osservare le scelte del legislatore.

Queste semplici considerazioni in merito alle prescrizioni legislative vogliono essere spunti di riflessione utili per il professionista che si appresta ad effettuare valutazioni di sicurezza antincendio.

Inoltre, si osservi che il legislatore mette in luce in maniera indiretta che con il crescere dell’altezza aumentano le criticità, come si è visto nel corso della trattazione della presente tesi; infatti, al crescere dell’altezza della struttura il legislatore prescrive requisiti via via più stringenti.

Si noti, poi, che la classe di resistenza al fuoco minima corrisponde a 60 minuti. Ovviamente per edifici molto alti, come quelli di categoria HF (più di 26-27 piani d’altezza), si prescrive una classe di resistenza al fuoco pari a 90 minuti. In effetti, visti gli eventi del passato, garantire queste classi implica dare modo sia agli occupanti di mettersi in salvo sia ai soccorritori di prestare soccorso, ma soprattutto fornire la possibilità ai Vigili del Fuoco di intervenire per domare l’incendio, che può durare diversi minuti, ore, persino giorni nei casi peggiori.

Bisogna dire che la RTV.14 non dà informazioni esaustive e accenna appena alle facciate, rimandando il progettista direttamente alla consultazione della RTV.13, di cui si riportano i punti salienti.

La RTV.13, *Chiusure d'ambito*, si applica alle chiusure d'ambito degli edifici civili quali, ad esempio, strutture sanitarie, scolastiche, alberghiere, commerciali, uffici, residenziali e così via. È stata introdotta con il D.M. 30/03/2022 ed è entrata in vigore dal 07/07/2022, quindi anche questa regola è abbastanza recente.

Gli obiettivi sono contenere la probabilità di propagazione di un incendio, di natura interna o esterna all'edificio, attraverso le chiusure d'ambito della struttura ed escludere o abbattere il rischio di caduta di parti di esse.

All'inizio della regola tecnica verticale vi è una serie di definizioni, in parte già riprese più volte nel corso della presente trattazione, in cui si stabiliscono termini quali chiusura d'ambito, facciata, copertura e così via; inoltre, vi sono le definizioni sulle varie tipologie di facciata, già trattate nel presente lavoro di tesi nella sezione 2.2.

Segue una classificazione delle chiusure d'ambito (Codice, pag. V.13-2):

*SA: chiusure d'ambito di:*

- i. edifici aventi le quote di tutti i piani comprese tra  $-1\text{ m} < h \leq 12\text{ m}$ , affollamento complessivo  $\leq 300$  occupanti e che non includono compartimenti con  $R_{vita}$  pari a D1, D2<sup>33</sup>;*
- ii. edifici fuori terra, ad un solo piano;*

*SB: chiusure d'ambito di edifici aventi quote di tutti i piani ad  $h \leq 24\text{ m}$  e che non includono compartimenti con  $R_{vita}$  pari a D1, D2;*

*SC: chiusure d'ambito di altri edifici.*

Dopo la classificazione, la RTV.13 prosegue con le misure delle strategie antincendio, riportando le soluzioni conformi e suggerendo l'ammissibilità delle soluzioni alternative. Anche in questo caso, si riportano i punti salienti per il progettista.

Per quanto riguarda la reazione al fuoco, i materiali e le componenti costituenti isolanti termici, sistemi di isolamento esterno in kit, guarnizioni, sigillanti e materiali di tenuta<sup>34</sup> e altri componenti<sup>35</sup> devono possedere i requisiti della tabella V.13-1.

Chiusura d'ambito	Gruppo di materiali
SB	GM2
SC	GM1

*Tabella 4.4: Gruppi di materiali per la reazione al fuoco degli elementi delle chiusure d'ambito dalla RTV.13 (tabella V.13-1, pag. V.13-3)*

---

<sup>33</sup> Corrisponde al caso in cui ci sono occupanti che ricevono cure mediche (sezione G.3 del Codice, pag. G.3-5).

<sup>34</sup> qualora occupino complessivamente una superficie > 10% dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito (Codice, pag. V.13-3).

<sup>35</sup> ad esclusione dei componenti in vetro, qualora occupino complessivamente una superficie > 40% dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito (Codice, pag. V.13-3).

Mentre per coperture e facciate di tipo SA non sono richiesti requisiti di reazione al fuoco.

Per le facciate, i gruppi di materiali di interesse per il progettista sono riportati nelle seguenti tabelle, che sono le stesse del Codice di prevenzione incendi (capitolo S.1, pag. S.1-6).

Descrizione materiali	GM1	GM2	GM3
	EU	EU	EU
Rivestimenti a soffitto [1]	A2-s1,d0	B-s2,d0	C-s2,d0
Controsoffitti, materiali di copertura [2], pannelli di copertura [2], lastre di copertura [2]			
Pavimentazioni sopraelevate (superficie nascosta)			
Rivestimenti a parete [1]	B-s1,d0		
Partizioni interne, pareti, pareti sospese			
Rivestimenti a pavimento [1]	B <sub>fl</sub> -s1	C <sub>fl</sub> -s1	C <sub>fl</sub> -s2
Pavimentazioni sopraelevate (superficie calpestabile)			
[1] Qualora trattati con prodotti vernicianti ignifughi omologati ai sensi del DM 6/3/1992, questi ultimi devono essere idonei all'impiego previsto e avere la classificazione indicata di seguito (per classi differenti da A2): GM1 e GM2 in classe 1; GM3 in classe 2; per i prodotti vernicianti marcati CE, questi ultimi devono avere indicata la corrispondente classificazione. [2] Si intendono tutti i materiali utilizzati nell'intero pacchetto costituente la copertura, non soltanto i materiali esposti che costituiscono l'ultimo strato esterno.			

*Tabella 4.5: Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento (tabella S.1-6)*

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

*Tabella 4.6: Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento (tabella S.1-7)*

Per la resistenza al fuoco e la compartimentazione, nella sezione V.13.4.2 (pag. V.13-4), la RTV.13 fornisce le prescrizioni che seguono.

1. *Le chiusure d'ambito di tipo SB ed SC devono possedere i requisiti di resistenza al fuoco di cui ai seguenti paragrafi.*
2. *Non sono richiesti requisiti di resistenza al fuoco per le chiusure d'ambito di edifici:*
  - a. *che hanno carico d'incendio specifico  $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$  in tutti i compartimenti, al netto del contributo rappresentato dagli isolanti eventualmente presenti in facciata ed in copertura;*
  - b. *dotati di misure di controllo dell'incendio di livello di prestazione V (capitolo S.6).*
3. *Non sono richiesti requisiti di resistenza al fuoco per le chiusure d'ambito di tipo SA.*
4. *Le fasce di separazione devono essere realizzate con le caratteristiche e la geometria descritte al paragrafo V.13.5.*

5. *La conformità della chiusura d'ambito ai requisiti di resistenza al fuoco è comprovata con riferimento ad uno dei metodi indicati nel paragrafo V.13.6.*

Per quanto riguarda la tipologia di facciata a doppia pelle ventilata, si rimanda alla sezione V.13.4.2.3 del Codice e si riportano le prescrizioni contenute nella tabella V.13-2 (pag. V.13-5).

Facciata	Caratteristiche intercapedine	Caratteristiche delle pelli
Non ispezionabile, con pelle esterna chiusa	In corrispondenza di ogni piano [1], l'intercapedine è interrotta da setti di compartimentazione E 30, o E 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.	Per la <i>pelle interna</i> devono essere applicate le stesse prescrizioni previste per le <i>facciate semplici</i> .
	Qualsiasi	Per l'intera altezza e per tutti i piani [1], la <i>pelle interna</i> deve essere EW 30, o EW 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.
Non ispezionabile, con pelle esterna aperta	In corrispondenza di ogni piano [1], l'intercapedine è interrotta da setti di compartimentazione E 30, o E 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.	Per la <i>pelle interna</i> devono essere applicate le stesse prescrizioni previste per le <i>facciate semplici</i> .
	Qualsiasi	Per l'intera altezza e per tutti i piani [1], la <i>pelle interna</i> deve essere EW 30, o EW 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.
Ispezionabile, con pelle esterna chiusa	In corrispondenza di ogni piano [1], l'intercapedine è interrotta da setti di compartimentazione E 30, o E 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.	Per le <i>pellì interna ed esterna</i> devono essere applicate le stesse prescrizioni previste per le <i>facciate semplici</i> .
	Qualsiasi	Per l'intera altezza e per tutti i piani [1], la <i>pelle interna</i> deve essere EW 30 (i→o), o EW 60 (i→o) per chiusure d'ambito di tipo SC. [2]
Ispezionabile, con pelle esterna aperta	Qualsiasi	Per le <i>pellì interna ed esterna</i> devono essere applicate le stesse prescrizioni previste per le <i>facciate semplici</i> .
Ispezionabile, con pelle esterna aperta o chiusa	L'intercapedine è provvista di sistema automatico di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio esteso a tutta la facciata [3] (capitolo S.6) e dotata di smaltimento di fumi e calore [4].	Nessuna
<p>[1] Sono ammesse aperture nella compartimentazione se provviste di serranda tagliafuoco o sistema equivalente a chiusura automatica in caso di incendio, con i medesimi requisiti di resistenza al fuoco della facciata.</p> <p>[2] Se l'elemento di facciata non poggia direttamente sul solaio e nelle facciate <i>curtain walling</i>, l'elemento di giunzione tra la facciata e le compartimentazioni, orizzontali e verticali, deve avere classe di resistenza al fuoco EI 30, o EI 60 per chiusure d'ambito di tipo SC.</p> <p>[3] Se ad acqua, dimensionato per densità di scarica <math>\geq 10 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2</math>. Sono ammesse superfici vetrate in vetro temperato. La portata dell'impianto è aggiuntiva a quella di altri eventuali impianti di spegnimento previsti. Deve essere garantito il funzionamento contemporaneo in erogazione degli ugelli del piano immediatamente superiore a quello interessato dall'incendio, per una durata pari a 60 minuti. I dispositivi di erogazione devono essere orientati verso la pelle interna.</p> <p>[4] Ad esempio tramite superfici di ventilazione naturale, alla base ed in sommità della facciata, ciascuna di area pari al 10% della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.</p>		

*Tabella 4.7: Caratteristiche di resistenza al fuoco per facciate a doppia pelle ventilate (tabella V.13-2)*

In presenza di materiali combustibili, il progettista è tenuto a realizzare una fascia di separazione a protezione della chiusura d'ambito che può essere interessata da un eventuale incendio, come prescritto nella sezione V.13.4.2.4 del Codice (pag. V.13-5).

Segue la sezione V.13.5 in cui viene spiegato come realizzare le fasce di separazione, tema già trattato in precedenza in questa tesi. Pertanto, si rimanda alla lettura della sezione 2.3.2 del presente lavoro di tesi, in cui è stato anticipato tale argomento, e alla sezione V.13.5 del Codice.

Anche in questo caso, ci sono alcune osservazioni da fare dopo la lettura e la consultazione della regola tecnica verticale.

Si noti che la RTV.13, a differenza della RTV.14, considera tutti gli edifici classificandoli sì in base alle quote dei piani, ma contemplando altezze differenti: il gruppo SA comprende, infatti, sia strutture con un solo piano fuori terra sia edifici costituiti con quote di tutti i piani comprese tra -1 e 12 m, quindi si tratta di strutture con al più 4 piani, con un affollamento contenuto (meno o al più 300 occupanti) e dove non vi siano persone che ricevono cure mediche; nella categoria SB vi sono edifici con quote di tutti i piani comprese tra i 12 e i 24 metri (da 4 a 8 piani fuori terra); infine, in SC sono ricomprese le chiusure d'ambito di tutti gli altri edifici che non rientrano nelle categorie precedenti.

Per gli edifici SA non vi sono requisiti di reazione al fuoco; quindi, il materiale può essere anche pessimo per quanto riguarda la combustibilità. Mentre, per gli edifici SB e SC si prescrivono i materiali appartenenti rispettivamente ai gruppi GM2 (materiali con partecipazione alla combustione limitata o scarsa) e GM1 (materiali dotati di incombustibilità o partecipazione alla combustione molto limitata). Anche in questo caso, si noti che al crescere dell'altezza dell'edificio, il legislatore impone requisiti più severi, perché in aggiunta aumenta l'estensione della chiusura d'ambito dell'edificio.

Si osservi, però, che per edifici di tipo SA non esistono vincoli sia di reazione sia di resistenza al fuoco; pertanto, si potrebbe idealmente optare per materiali con scarsissime proprietà di comportamento al fuoco, come pannelli di ACM in classe E di reazione al fuoco, gli stessi impiegati in passato<sup>36</sup>.

Dunque, sarà il progettista a dover ponderare la scelta del materiale della facciata. Si consiglia di seguire le prescrizioni del Codice e di optare per scelte più restrittive ove si ritiene necessario, sempre a favore di sicurezza.

Quindi, per riassumere, per edifici di tipo SA e SB (edifici da 1 a 4 piani e da 4 a 8 piani) è contemplato l'impiego di materiali combustibili in facciata; invece, per edifici di categoria SC i materiali impiegati devono avere requisiti migliori, essendo incombustibili o al più con contributo alla combustione "molto limitato" o "limitato".

---

<sup>36</sup> Si rimanda il lettore alla sezione 3.2.

Si noti che l'impiego di materiali di classe di reazione al fuoco E è stato fortemente contenuto. Certamente ciò deriva dagli eventi accaduti in passato, soprattutto dall'incendio della Grenfell Tower, il quale ha messo in luce che la presenza di tali materiali peggiorasse la situazione in caso di incendio. Infatti, si osserva come il legislatore del Codice abbia deciso di adottare misure più stringenti per la sicurezza antincendio, promuovendo l'uso di materiali incombustibili o combustibili con una classe di reazione al fuoco minima pari a C, come nel caso dei rivestimenti<sup>37</sup>, o D, come nel caso degli isolanti<sup>38</sup>.

Parallelamente, i produttori di materiali per facciate ventilate hanno orientato la loro offerta verso soluzioni sempre più sicure, sviluppando e commercializzando, ad esempio, rivestimenti con classe di reazione al fuoco A2 o B, al più B-s2,d0. Questa tendenza è stata confermata dall'analisi delle schede tecniche reperibili online sui siti dei produttori.

In questo contesto, legislatori, produttori e progettisti condividono un obiettivo comune: garantire elevati standard di sicurezza, adottando materiali e soluzioni costruttive che minimizzino il rischio di propagazione dell'incendio.

Per quanto riguarda la resistenza e la compartimentazione, non ci sono molte riflessioni in merito poiché la RTV.13 è piuttosto esplicativa. Oltre a raccomandare la realizzazione delle fasce di separazione, un aspetto interessante è la prescrizione di porre queste fasce proprio dove si ha la presenza di materiale combustibile. Quindi, per esempio, potrebbe essere utile realizzare una fascia di separazione dove vi è la presenza di cassonetti oppure parcheggi o stazioni di ricarica per le auto elettriche ai piedi dell'edificio.

Mentre, un'altra cosa interessante da notare nella tabella V.13-2 del Codice è la classe di resistenza al fuoco minima per le facciate ventilate, che è pari a circa 30 o talvolta 60 minuti.

In conclusione, la prevenzione incendi e la Fire Safety Engineering (FSE) negli edifici di grande altezza risultano più vantaggiose in termini di sicurezza, poiché criticità e rischi sono di maggior entità e numero. Invece, negli edifici di altezza inferiore si tende a ritenere il rischio più contenuto e, di conseguenza, non sempre si adottano misure specifiche. Inoltre, l'approccio prestazionale alla sicurezza antincendio viene solitamente impiegato solo laddove risulti economicamente vantaggioso, considerando l'impatto in termini di tempi, costi ed energie necessarie per l'analisi e la progettazione.

Alla luce di queste considerazioni, l'applicazione del Codice agli edifici alti consente di giustificare un approccio prestazionale con strumenti di FSE per garantire livelli di sicurezza adeguati e una progettazione ottimale dell'involucro edilizio. Tuttavia, il progettista rimane libero di scegliere in base ai suoi criteri, esigenze e considerazioni.

---

<sup>37</sup> Si veda Tabella 4.5.

<sup>38</sup> Si veda Tabella 4.6.

## 4.2. L'approccio prestazionale e la metodologia FSE di base

### 4.2.1. I modelli di calcolo

Il professionista antincendio ha la possibilità di scegliere tra diversi codici di calcolo disponibili per realizzare i modelli. I modelli di incendio possono essere modelli analitici o numerici (Vancetti, 2023).

In generale, i modelli analitici offrono stime precise degli effetti dell'incendio, come ad esempio la previsione del tempo di flashover. Per analisi più complesse, caratterizzate da interazioni dipendenti dal tempo tra diversi processi fisici e chimici, si ricorre invece all'impiego di modelli numerici. Tra questi si trovano:

- simulazione incendio a zone per ambienti confinati (CFAST, Ozone);
- simulazione incendio di campo (FDS, e varie interfacce grafiche come PyroSim, ecc.);
- analisi termo-strutturale (Adina, Ansys, Strauss, Prosap, ecc.).

Invece, i modelli numerici si fondano sui principi della chimica e fisica dell'incendio, quali la conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto (Vancetti, 2023).

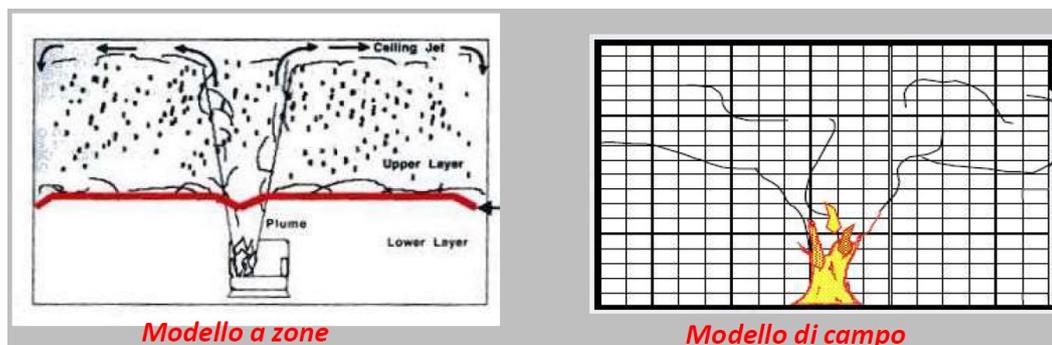


Figura 4.2: Confronto tra modello a zone e modello di campo (Vancetti, 2023)

Tra questi modelli si distinguono i modelli a zone, generalmente utilizzati quando si hanno geometrie semplici, e modelli di campo, impiegati in presenza di geometrie più complesse (Vancetti, 2023).

Nello specifico, un modello a zone simula la dinamica di un incendio in ambiente confinato, risolvendo le equazioni di conservazione di massa ed energia relativamente ad un numero basso di zone macroscopiche, di norma due zone omogenee così distinte: una zona superiore, dove sono presenti i prodotti della combustione quali fumi e gas caldi, e una zona inferiore, la quale risulta libera da fumo e più fresca di quella superiore (Vancetti, 2023).

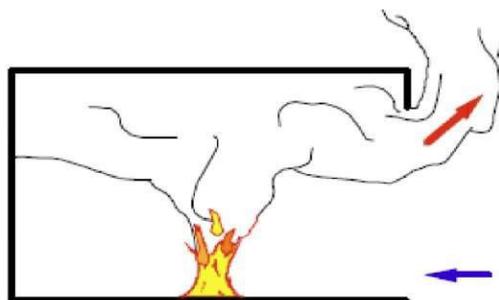


Figura 4.3: Schema di un incendio in un ambiente confinato (Vancetti, 2023)

È importante notare che, in questo caso, l'ambiente è confinato e presenta un numero finito di macroregioni, solitamente due. All'interno di ciascun volume, le temperature e le altre proprietà sono spazialmente uniformi ma variabili nel tempo. Inoltre, vengono trascurati i modelli di turbolenza e di combustione (Vancetti, 2023).

Il rapporto di altezza tra le due zone cambia con lo sviluppo dell'incendio. I modelli a zone stimano nel tempo le temperature medie dello strato inferiore e superiore, la posizione dell'interfaccia tra le zone, la concentrazione di ossigeno, la concentrazione di ossido di carbonio, la visibilità e infine il flusso in entrata e uscita da aperture verso l'esterno o altri locali. Questi modelli sono generalmente applicabili ad ambienti con geometria semplice, ovvero regolare e compatta, sebbene possano essere collegati tra loro e dotati di aperture. Tuttavia, questi non risultano idonei per ambienti stretti e lunghi, poiché l'ipotesi di uniformità spaziale delle proprietà termodinamiche in ciascuna zona non è soddisfatta. Inoltre, non sono appropriati per sistemi complessi, in quanto privi di modelli di combustione e di turbolenza, fenomeni che possono condizionare scambi termici convettivi e radianti, propagazione di fumi e gas e l'interazione fluidodinamica con le pareti. Per di più, i dati di input sono significativamente inferiori rispetto a quelli necessari per i modelli di campo: è necessario fornire in input le caratteristiche del focolaio iniziale, quindi la curva RHR, le caratteristiche degli oggetti presenti nell'ambiente e le caratteristiche degli eventuali bersagli dell'incendio (Vancetti, 2023).

Per quanto concerne i modelli di campo, questi rappresentano l'ambiente nel modo più adeguato alle necessità. Stimano l'incendio per via numerica, dividendo lo spazio in un numero elevato di celle e risolvendo le equazioni di conservazione di massa ed energia (equazioni di Navier-Stokes in volumi finiti e definiti) all'interno di ciascuna cella, mediante il metodo agli elementi finiti, ossia il cosiddetto Finite Element Method (FEM). Grazie alla definizione di celle tridimensionali, è possibile studiare geometrie diverse e complesse, ottenendo risultati molto più dettagliati rispetto a quelli forniti dai modelli a zone (Vancetti, 2023).

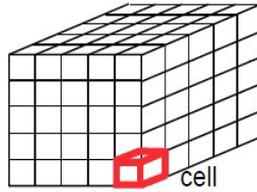


Figura 4.4: Schema di una mesh (Vancetti, 2023)

Per avere una maggiore accuratezza le celle devono essere di dimensioni ridotte, comprese tra i 20 cm e i 50 cm per lato della singola cella, e devono essere molto numerose, con un totale che può raggiungere anche alcune centinaia di migliaia di celle. È importante considerare che un numero maggiore di celle comporta un tempo di elaborazione più lungo per il calcolatore. Ciò può rappresentare una limitazione nel caso in cui non si disponga di un hardware adeguato o si abbia a disposizione un tempo limitato per il calcolo.

In ogni caso, i modelli di campo forniscono valori per tutte le variabili calcolate in ciascuna cella del dominio computazionale, quali le concentrazioni delle specie chimiche, la distribuzione delle temperature, le pressioni, la visibilità e le velocità di gas e fumi. È da notare che tali modelli possono richiedere un tempo di calcolo considerevole (Vancetti, 2023).

Le simulazioni numeriche offrono numerosi vantaggi: rispetto alle prove sperimentali, presentano costi inferiori e permettono di ottenere rapidamente i risultati, con la possibilità di modificare nell'immediato i parametri delle geometrie, le proprietà, le condizioni iniziali e quelle al contorno. Inoltre, consentono di simulare scenari, sia ideali che reali, e di analizzare qualsiasi grandezza fisica in tutto il dominio di calcolo. Tuttavia, l'accuratezza dei risultati dipende fortemente dal livello di conoscenza dell'utente e dalla qualità del modello matematico impiegato. Con modelli approssimati si possono generare risultati non attendibili e non aderenti alla realtà compromettendo la validità dell'analisi, mentre gli errori numerici possono rendere complessa la verifica dell'esattezza della simulazione (Basile, 2024).

Il progettista deve quindi valutare attentamente in quali contesti sia più conveniente adottare simulazioni numeriche rispetto a prove sperimentali, e viceversa (Basile, 2024). L'utilizzo di simulazioni d'incendio può risultare vantaggioso quando le prove sperimentali comportano costi elevati e impatti ambientali significativi, a causa delle emissioni di fumo o rischi legati alla propagazione dell'incendio in strutture o, ad esempio, su porzioni di facciata. D'altro canto, le prove sperimentali offrono una maggiore affidabilità in quanto riproducono l'evoluzione reale del fenomeno. Per questa ragione, i codici di calcolo vengono costantemente aggiornati al fine di migliorare l'accuratezza delle simulazioni e ottenere risultati sempre più coerenti con le evidenze sperimentali (Vancetti, 2023).

Un aspetto cruciale riguarda l'accuratezza del modello matematico e l'individuazione degli elementi da analizzare prima di avviare la simulazione (Basile, 2024). Il progettista deve condurre un'analisi preliminare accurata del fenomeno, definendo le ipotesi di base e selezionando i parametri più appropriati per la modellazione (Vancetti, 2023).

Un altro fattore determinante è la convergenza della mesh (Basile, 2024), che incide significativamente sulla qualità della simulazione. La scelta di un passo di griglia adeguato è fondamentale: una mesh troppo grossolana può compromettere la precisione dei risultati, mentre una mesh eccessivamente fitta, sebbene più accurata, può introdurre errori numerici e aumentare il costo computazionale, rendendo più complessa l'analisi dei risultati in fase di post-processing (Vancetti, 2023).

Infine, la validazione sperimentale delle simulazioni rappresenta una sfida, poiché le prove sperimentali presentano un'elevata variabilità e sono di difficile riproducibilità. Inoltre, le simulazioni avanzate richiedono una potenza di calcolo significativa, spesso non sostenibile con le risorse hardware comunemente disponibili (De Trizio, 2024). Per mitigare questi limiti, è consigliabile adottare un approccio progressivo, partendo da modelli semplificati per ridurre le incertezze e affinando successivamente la simulazione in funzione dei risultati ottenuti (Vancetti, 2023).

#### *4.2.2. L'architettura comune dei codici commerciali*

Tutte e due le tipologie di modelli visti in precedenza, modelli a zone e modelli di campo, possono essere analizzate mediante la fluidodinamica computazionale detta Computational Fluid Dynamics (CFD), una disciplina della meccanica dei fluidi che consente di studiare il moto dei fluidi, i processi di scambio termico e di massa, nonché le reazioni chimiche associate. La CFD si basa sull'analisi numerica delle equazioni che regolano tali fenomeni e, per risolvere ed eseguire quest'analisi, sfrutta algoritmi e codici che si basano sui modelli di calcolo, mediante l'impiego di un computer (Basile, 2024; De Trizio, 2024).

In genere, la struttura dei codici commerciali di CFD è articolata in: pre-processore, solutore e post-processore. Ciascuna di queste parti dell'architettura del codice svolge un ruolo specifico all'interno del processo di simulazione (Basile, 2024; De Trizio, 2024).

Il pre-processore consente di definire la geometria del dominio di calcolo, suddividerlo nello spazio attraverso la generazione di una griglia (mesh) adeguata e indicare le caratteristiche e le proprietà delle sue frontiere. Il dominio così configurato viene successivamente importato nel solutore per l'elaborazione numerica (Basile, 2024; De Trizio, 2024).

Il solutore permette di impostare le condizioni iniziali e quelle al contorno, oltre a selezionare i modelli numerici più appropriati per la simulazione. Il suo compito principale è integrare numericamente le equazioni di trasporto accoppiate, approssimando le variabili di flusso incognite e risolvendo il sistema di equazioni algebriche risultante mediante tecniche di discretizzazione spaziale e temporale (Basile, 2024; De Trizio, 2024).

Il post-processore consente di analizzare ed elaborare i risultati della simulazione. Attraverso questo strumento è possibile visualizzare la geometria del dominio e la relativa griglia di calcolo, rappresentare graficamente i campi vettoriali e scalari e, nel caso di simulazioni transitorie, generare animazioni che illustrano l'evoluzione temporale delle grandezze di interesse (Basile, 2024; De Trizio, 2024).

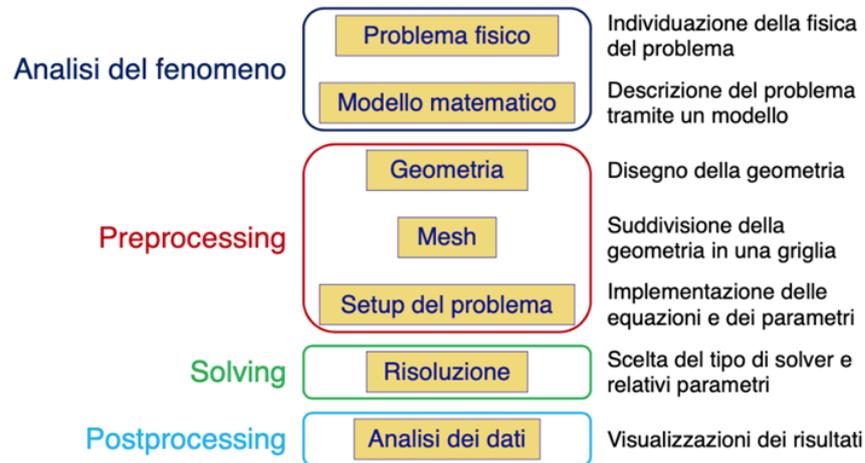


Figura 4.5: Le fasi di una simulazione numerica (Basile, 2024, pag. 6; De Trizio, 2024, pag. 5)

### 4.3. La modellazione e le simulazioni di incendio in PyroSim

Esistono alcuni software per effettuare modellazioni e simulazioni di incendio. Per il presente lavoro di tesi è stato impiegato il software PyroSim ideato dalla Thunderhead Engineering. Questo programma è un'interfaccia grafica di Fire Dynamics Simulator (FDS), ossia è un modello di CFD elaborato dai ricercatori della National Institute of Standards and Technology (NIST). Per le simulazioni e i modelli contenuti in questa tesi, è stata utilizzato PyroSim 2024.2.1209 – FDS Version 6.9.1.

In generale, i modelli FDS possono prevedere i fenomeni fluidodinamici associati agli incendi, consentendo di analizzare la diffusione dei fumi, la variazione della temperatura, la presenza di monossido di carbonio e altre sostanze o l'analisi di altre grandezze fisiche. I risultati delle simulazioni sono utilizzati per validare la sicurezza antincendio prima della costruzione di nuovi edifici, per valutare la sicurezza di strutture esistenti e per ricostruire le dinamiche di un incendio durante le indagini successive all'evento. Inoltre, la modellazione può essere un utile strumento di supporto per l'addestramento dei Vigili del Fuoco.

In sintesi, gli aspetti generali nello sviluppo di un modello comprendono:

- la definizione della mesh,
- la definizione delle geometrie,
- la selezione della reazione di combustione,
- la definizione delle condizioni al contorno.

In aggiunta, è possibile modificare le condizioni iniziali e quelle al contorno, ossia parametri ambientali quali la pressione atmosferica, la direzione del vento e altri fattori pertinenti.

L'interfaccia grafica del software PyroSim è riportata nell'immagine successiva.

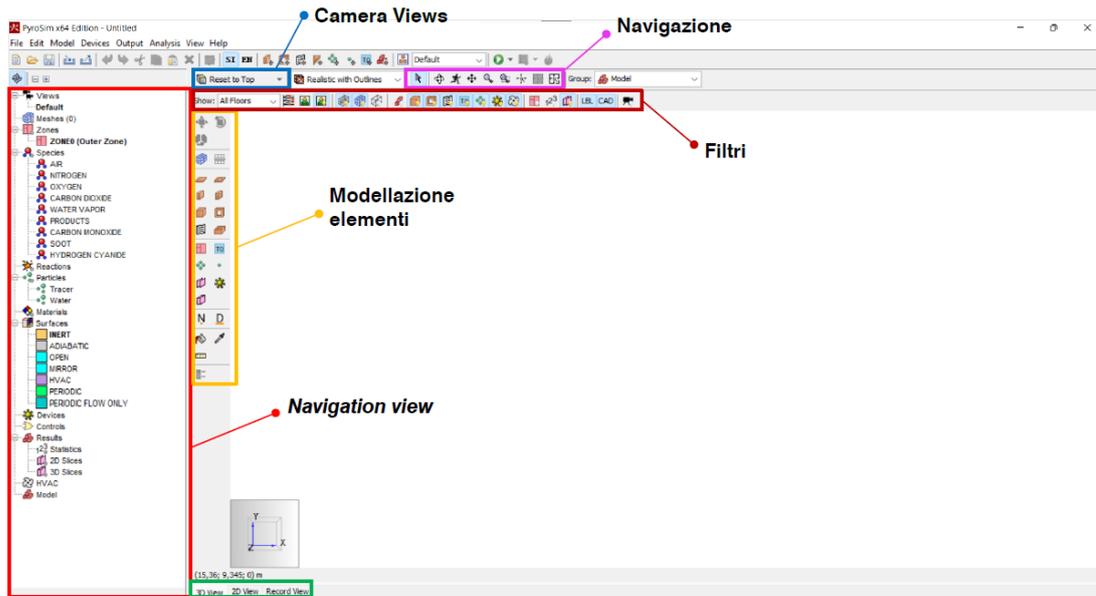


Figura 4.6: L'interfaccia grafica di PyroSim

Al posto di questa interfaccia grafica, è possibile sfruttare la *Record View*, un'altra interfaccia dove si impiega un linguaggio di programmazione, il *Fortran*. Le due interfacce sono del tutto equivalenti: infatti, gli oggetti creati sfruttando l'interfaccia grafica vengono automaticamente riportati anche nella *Record View*. L'utente può quindi decidere di realizzare il modello nella modalità che preferisce. Di seguito, si riporta un esempio di ciò che è possibile trovare nella *Record View*.

```

A* A~
Model Records (Read-Only):
1 Sim_01.fds
2 Generated by PyroSim - Version 2018.3.1210
3 8-mag-2019 9.56.04
4
5 &HEAD CHID='Sim_01'/
6 &TIME T_END=350.0/
7 &DUMP RENDER_FILE='Sim_01.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/
8
9 &MESH ID='Mesh01', IJK=80,56,14, XB=10.0,50.0,-25.0,3.0,-1.0,6.0/
10
11
12 &REAC ID='REAZIONE 01',
13 FUEL='REAC_FUEL',
14 C=1.0,
15 H=1.6,
16 O=0.4,
17 AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,
18 CO_YIELD=0.1,
19 SOOT_YIELD=0.0745/
20
21 &DEVC ID='TEMPERATURA', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=23.5,-3.5,2.8/
22 &DEVC ID='Visibilità 180cm', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=23.5,-3.5,1.8/
23
24 &SURF ID='Fuoco',
25 COLOR='RED',
26 HRRPUA=3590.9,
27 RAMP_Q='Fuoco_RAMP_Q'/
28 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=161.08, F=0.0/
29 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=172.86, F=0.035896/
30 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=186.28, F=0.115096/
31 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=202.48, F=0.275391/
32 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=222.27, F=0.543012/
33 &RAMP ID='Fuoco_RAMP_Q', T=233.46, F=0.674761/
    
```

Figura 4.7: Record View in PyroSim

Nel programma sono presenti quattro modalità di vista per la gestione del modello FDS: la vista 2D, quella 3D, la vista di navigazione (*Navigation view*) e la *Record view*.

Di seguito, è possibile vedere l'*albero del modello*: in questo punto si possono reperire tutte le informazioni di ciò che viene inserito nel modello. Ciò è molto utile sia nei casi in

cui il modello viene ripreso, dopo un po' di tempo, dallo stesso modellatore o progettista oppure in quei casi in cui "passa" nelle mani di un altro utente.

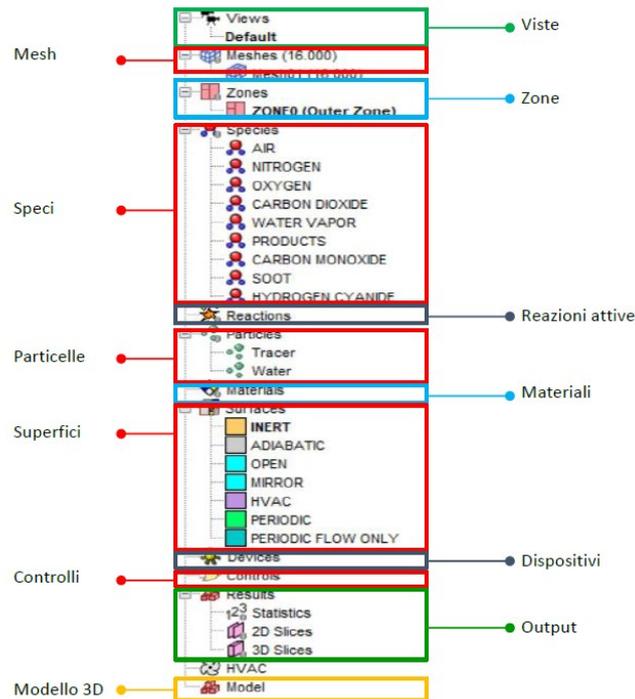


Figura 4.8: L'albero del modello in PyroSim

PyroSim è un modello di campo che esegue calcoli all'interno di un dominio computazionale definito dall'utente tramite la mesh e i relativi comandi. L'ambiente del dominio viene suddiviso in celle e i calcoli vengono effettuati singolarmente per ciascuna di esse. La dimensione della mesh, o meglio la sua estensione spaziale, riveste un'importanza cruciale: essa deve includere il fuoco e tutti gli elementi interessati dalle fiamme, ovvero tutto ciò che si intende studiare. È fondamentale che il dominio computazionale abbia dimensioni adeguate, poiché il software non può eseguire calcoli se ad esempio il dominio è ridotto a un punto o è eccessivamente piccolo.

È importante notare che la mesh viene ulteriormente suddivisa in numerose celle tridimensionali, cioè piccole porzioni del dominio. Il principio alla base di questa suddivisione è simile, per fare un esempio, a calcolare il perimetro o l'area di un disegno su un foglio sfruttando una quadrettatura: associando un'unità elementare, come mezzo centimetro, si facilita il calcolo di tale perimetro o area; nel caso delle celle 3D, il concetto è del tutto analogo, anche se si attua non su misure lineari e di area ma su volumi. All'interno di ciascuna cella vengono risolte le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Per l'analisi di fenomeni di fluidodinamica, infatti, le equazioni di Navier-Stokes vengono risolte per un determinato volume di controllo, che risulterà quindi essere un fattore determinante.

La dimensione delle celle della mesh viene stabilita a priori; essa non deve essere né troppo grande né troppo piccola, ma deve essere adeguata all'oggetto di studio dell'analisi.

Naturalmente, all'aumentare delle dimensioni del dominio e del numero di celle, ovvero "infittendo la mesh", aumentano anche i calcoli che il calcolatore deve eseguire cella per cella, con conseguente incremento dei tempi di simulazione.

Ogni elemento presente nella simulazione, come oggetti, ingombri o aperture, deve essere conforme alla mesh. Durante la simulazione, PyroSim converte automaticamente le ostruzioni (gli oggetti realizzati) in blocchi allineati agli assi richiesti da FDS. Qualora la posizione di un oggetto non corrisponda esattamente alla mesh, esso verrà riposizionato automaticamente durante la simulazione. Questo implica che, se le dimensioni di un oggetto non sono compatibili con quelle della suddivisione in celle, l'oggetto verrà modificato e il suo ingombro sarà adattato in base alla configurazione delle celle scelta. Ciò può rappresentare un problema per un modellatore o progettista poco esperto del software; quindi, è bene fare attenzione a questo aspetto già all'inizio della modellazione. È bene accorgersi subito di tale errore, ad esempio, attivando il comando *Preview FDS Blocks*, comando che mostra all'utente come sarà il modello in FDS. Questo passaggio non va sottovalutato poiché potrebbe essere la fonte di gravi errori nel modello.

Eventuali oggetti solidi, detti *obstructions*, o prese d'aria, in generale *vents*, che si estendono oltre il limite del dominio computazionale definito vengono eliminati oltre il confine della mesh senza che FDS segnali alcun errore. Pertanto, non vengono eseguiti calcoli per tutto ciò che non è incluso nel dominio.

Per ottenere risultati ottimali, è fondamentale utilizzare celle di mesh che abbiano dimensioni approssimativamente uniformi in tutte e tre le direzioni. È possibile, comunque, creare mesh multiple; tuttavia, è necessario prestare particolare attenzione all'allineamento tra di esse.

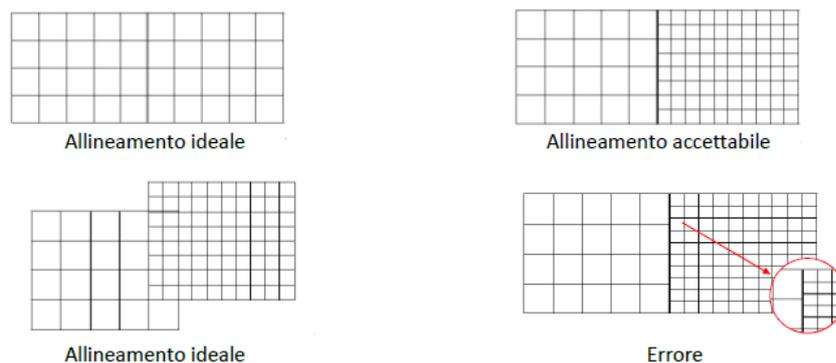


Figure 4.9: Esempi di allineamento delle mesh

Le informazioni provenienti da altre mesh vengono ricevute esclusivamente al confine di una data maglia. Una mesh completamente incorporata in un'altra riceve informazioni solamente al suo confine; tuttavia, la mesh più grande non riceve informazioni dalla mesh più piccola incorporata all'interno. In sostanza, la mesh più grande, tipicamente più grossolana, esegue la propria simulazione senza essere influenzata dalle mesh più piccole al suo interno.

In generale, le analisi di sensibilità della mesh per determinare la dimensione corretta (il passo della mesh) consistono nella creazione di un file input in FDS utilizzando una mesh relativamente grossolana, per poi affinarla gradualmente finché non si osservano differenze significative nei risultati. Il punto di equilibrio è raggiunto quando i risultati dell'ultimo calcolo sono molto vicini a quelli ottenuti con la mesh leggermente più grossolana, e il costo computazionale in termini di tempo è ritenuto accettabile; si arriva, quindi, a una vera e propria convergenza.

In FDS, le ostruzioni sono rappresentate da solidi allineati agli assi. Le proprietà della superficie vengono assegnate a ciascuna faccia dell'ostruzione. PyroSim consente di creare ostruzioni di qualsiasi forma, con un numero illimitato di facce e superfici diverse applicate a ciascuna di esse.

Se si vuole realizzare il modello tridimensionale di una struttura, è possibile importare un modello già realizzato (ad esempio, formati IFC, DXF, DWG, FBX) oppure editarne uno direttamente all'interno del software. Oltre agli ingombri, è possibile realizzare aperture e fori tramite entità di tipo *hole*. È altresì possibile editare materiali e superfici.

Per quanto riguarda i materiali, si può scegliere di utilizzare una libreria predefinita oppure definire un materiale personalizzato, ossia creato dall'utente. In quest'ultimo caso, è necessario specificare il tipo di materiale, se solido o liquido e le proprietà termiche, in particolare la densità, il calore specifico, la conduttività, l'emissività e il coefficiente di assorbimento<sup>39</sup>; se si tratta di un materiale combustibile, bisogna indicarne il calore di combustione per la pirolisi.

Si consiglia al progettista di creare un *material* per ognuno dei materiali, indicando per ciascuno le proprietà dette in precedenza. Generalmente, le informazioni sono disponibili nelle schede tecniche dei materiali.

Dopo aver definito i materiali e la geometria delle ostruzioni e degli ingombri, è possibile procedere alla definizione delle superfici. Anche in questo caso, esistono delle *surfaces* predefinite oppure si possono editare. Sono previste diverse tipologie, quali *adiabatic*, *inert*, *burner*, *supply*, *exhaust*, *layered*. In particolare, è interessante la possibilità di definire superfici di tipo *layered*, dove si sfruttano i materiali definiti in precedenza con gli spessori opportuni.

Si consiglia al progettista di creare delle *surfaces* di tipo *layered* e seguire una delle due strade: o si dispone tutta la stratigrafia di interesse seguendo materiali, spessori e successione degli strati; oppure si creano più superfici di tipo *layered* con un unico materiale e spessore corrispondente dello strato di interesse. In quest'ultimo caso, adottando questa strategia il software simulerà, per esempio, la combustione di un materiale combustibile; al

---

<sup>39</sup> Durante il lavoro di tesi, si è notato che l'emissività e il coefficiente di assorbimento non influiscono molto sui risultati delle simulazioni. Al contrario, le altre caratteristiche e proprietà sono molto importanti e determinanti nelle simulazioni.

contrario, optando per la prima strategia di simulazione, non si avranno gli stessi risultati dalla simulazione e l'esito delle analisi sarà differente.

Speciale attenzione va posta per le *surface properties*, in particolare sulla temperatura iniziale interna di default posta a 20°C. Un'altra impostazione essenziale è il *backing*, che consente di poter modellare superfici di tipo *exposed*, *air gap* oppure *insulated*. Questa scelta nella configurazione della superficie permette di tenere in considerazione differenti fenomeni di scambio termico. L'impostazione *air gap* si traduce in un'intercapedine d'aria nello spazio compreso tra le due superfici dell'ostruzione creata; *insulated* impedisce la perdita di calore dal retro del materiale; infine, *exposed* consente il trasferimento di calore nello spazio retrostante il materiale.

Si consiglia al progettista di adottare la tipologia *exposed*, affinché la simulazione tenga conto correttamente dei fenomeni di scambio termico.

Un passaggio importante è la definizione della *reaction* della superficie, che può essere regolata dal materiale della superficie oppure può essere editata manualmente dall'utente. In questo secondo caso è possibile definire la potenza termica rilasciata o la velocità di combustione; si può anche stabilire e imporre la temperatura di ignizione del materiale e, dunque, della superficie. Un'altra impostazione importante è *allow obstruction to burn away*, che consente di visualizzare il materiale che scompare man mano che brucia poiché partecipa completamente alla combustione, simulando graficamente cosa accade durante il processo e come si consumano gli oggetti nel dominio di calcolo, a condizione che siano combustibili.

Una volta definite le superfici, queste vengono assegnate alle entità geometriche dalle *obstruction properties*, specificamente nella voce *surfaces*.

Un ulteriore passaggio della modellazione è la definizione del fuoco, ossia del *burner*. Nella maggior parte delle simulazioni di incendio, la pirolisi è definita specificando un tasso di rilascio di calore per unità di superficie (HRRPUA). Un altro possibile approccio, più complesso, è quello di definire un materiale con una reazione di pirolisi. Anche in questo caso, è possibile o utilizzare una reazione data da una libreria predefinita oppure decidere di editare una reazione di combustione.

Nel caso in cui si voglia realizzare una reazione definita da utente è consigliato usare il SFPE handbook of fire protection engineering, che contiene valori relativi ai prodotti della combustione per i materiali più comuni (Vancetti, 2023).

Dopo aver effettuato le valutazioni dei rischi e definito gli scenari di incendio, si procede collocando il focolaio nella posizione esatta in cui si ipotizza l'incendio. Generalmente, si crea un'ostruzione che rappresenta il *fire* (ad esempio un cubetto di lato 1 m, ma è possibile utilizzare anche altre geometrie) e a questa si associano una o più superfici di tipo *burner*. Queste superfici rappresentano le superfici da cui si sprigiona l'incendio, includendo un tasso di rilascio di calore e contenendo le informazioni della curva RHR o della perdita di

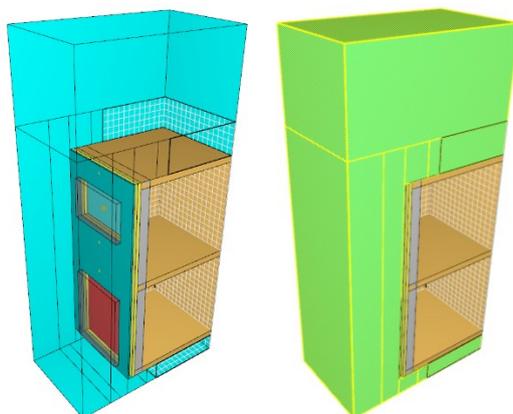
massa combustibile. Ad esempio, si può avere una superficie con un tasso di rilascio di calore di  $500 \text{ kW/m}^2$  applicato a una area di  $2 \text{ m}^2$  comporterebbe un incendio con picco di  $1000 \text{ kW}$ . È anche possibile editare la curva RHR tramite il *ramp-up time* e altre proprietà, come le proprietà termiche, in particolare le *thermal boundary conditions*: per esempio, la *surface temperature* che si ha sulla superficie *burner* dall'inizio della simulazione.

Ai fini della caratterizzazione quantitativa del focolare il professionista antincendio può scegliere tra le seguenti opzioni:

- utilizzare dati sperimentali ottenuti da misurazioni dirette in laboratorio secondo metodologie scientifiche consolidate;
- adottare dati pubblicati da fonti autorevoli e condivise, utilizzando un approccio ragionevolmente conservativo;
- impiegare delle metodologie di stima, come descritto nel paragrafo M.2.6 del Codice, dove vengono presentate alcune metodologie;
- in alternativa, utilizzare focolari predefiniti (Tabella 1.4) specificati al paragrafo M.2.7 del Codice, nel rispetto delle limitazioni indicate (Vancetti, 2023).

Successivamente, un passaggio fondamentale prima di avviare una simulazione di incendio è aprire i confini della mesh o delle mesh create tramite il comando *open mesh boundaries*, per garantire superfici aperte di ventilazione che permettano all'incendio di sprigionarsi. Questo step è cruciale perché, se non si effettua, il programma dà un messaggio di errore.

Aprire le superfici perimetrali di ventilazione della mesh o delle mesh è fondamentale, però può tornare utile avere delle superfici chiuse, o meglio non avere delle *vents* di tipo *open*: rimuovendo la ventilazione in un determinato punto, si può simulare una chiusura. Nel presente lavoro di tesi questo principio è stato sfruttato per modellare meno elementi tramite ostruzioni e ingombri, sfruttando le superfici chiuse per simulare ambienti confinati oppure la modularità della facciata.



*Figure 4.10: Ottimizzazione della mesh con superfici non aperte alla ventilazione per simulare un compartimento chiuso*

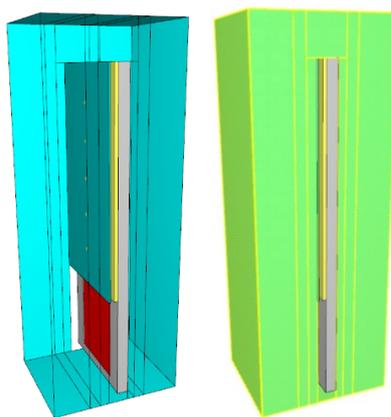


Figure 4.11: Ottimizzazione della mesh con superfici non aperte alla ventilazione per simulare la modularità della facciata ventilata

Nelle immagini precedenti, si notino le superfici evidenziate corrispondenti alle superfici aperte alla ventilazione (*vents* di tipo *open*).

Un ulteriore passaggio è definire la reazione di combustione, sotto la voce *reaction* appunto. Il modello di combustione utilizzato da FDS considera una singola specie di combustibile composta da C, H, O e N che reagisce con l'ossigeno in una fase controllata dalla miscela per formare H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, fuliggine (*soot*) e CO. In questo caso, l'utente può scegliere nuovamente se editare manualmente una reazione di combustione oppure può optare per una predefinita reperibile nella libreria del programma. Se il modellista o progettista opta per la prima strada, si consiglia di consultare il lavoro di tesi di Laurea Magistrale di M. Micunco (2022) dove si spiega come si può eseguire la definizione di tale *reaction*, precisamente alla sezione 4.2.3.

Per le analisi e le valutazioni, è essenziale lo studio di temperature, calore, gas e fumi rilasciati. I risultati più rilevanti riguardano principalmente le temperature dei gas e la visibilità, seguiti da informazioni più specifiche a seconda degli obiettivi della simulazione. Ad esempio, se l'obiettivo è comprendere la temperatura superficiale di un'ostruzione, sarà necessario impostare un controllo su tale parametro. A tal fine, è importante considerare *devices*, *slices* e isosuperfici.

I *devices* sono utilizzati per registrare quantità fisiche nel modello (come, ad esempio, la temperatura del gas aria) o per rappresentare sensori più complessi, come rilevatori di fumo, sprinkler e termocoppie. Dai dati da essi raccolti è possibile ottenere grafici in output. I dispositivi possono essere spostati, copiati, ruotati e ridimensionati. Quando viene definito un *device*, è possibile impostare un valore soglia che può essere utilizzato per attivare o disattivare altri oggetti (ad esempio per regolare l'apertura degli evacuatori di fumo e calore) mediante dei controlli.

A tal proposito, i controlli possono essere essenziali per la modellazione. Ad esempio, si possono usare per impostare la disattivazione di elementi quali i vetri oppure per attivare un oggetto come fire stop e cavity barrier. Si imposta un *device* dedicato per il *control* in corrispondenza dell'ostruzione di interesse, si marcano la voce *enable setpoint* inserendo la

temperatura di attivazione o disattivazione (di failure) e la voce *trigger only once*. Successivamente, si imposta il *control* come *detector (input type)* e *action to perform*, *activate* o *disactivate*. Si consiglia l'uso di tali controlli per rendere la simulazione quanto più aderente alla realtà, facendo attenzione al settaggio durante la fase di modellazione.

Tornando ai *devices*, si consiglia al progettista di utilizzare le termocoppie (*thermocouples*, THCP) per la misurazione delle temperature del fluido aria e le sonde del tipo *solid-phase device* per la misurazione della quantità *wall temperature*, i quali consentono la misurazione della temperatura superficiale delle pareti. Oltre al giusto numero di sonde e alla disposizione ottimale in pianta o nei prospetti, è importante scegliere l'opportuna tipologia di sensore e orientare correttamente termocoppie e sonde. Ciò potrebbe risultare scontato, ma non lo è: la scelta del sensore e il corretto posizionamento, soprattutto l'orientazione, sono cruciali per i risultati e le analisi.

Vi sono poi le *slices*, che sono dei piani passanti per il dominio computazionale in grado di rappresentare mediante una scala cromatica informazioni relative a molteplici parametri. Tra i valori che possono essere visualizzati vi sono, ad esempio, la temperatura, la visibilità o la velocità del fluido gassoso aria.

Si consiglia al progettista di impiegare *slices* che mostrino dei risultati in termini di temperatura; per le facciate ventilate, può essere utile anche studiare, con *slices* impostate su *w-velocity*, i risultati della velocità in direzione verticale del fluido aria per analizzare l'effetto camino e il fenomeno in caso di incendio.

Si possono anche sfruttare le isosuperfici che rappresentano il contorno tridimensionale delle quantità di fase gassosa.

Esistono poi dei *Plot 3D*, che possono risultare sempre utili per vedere nello spazio cosa accade fisicamente durante il fenomeno incendio. Anche in questo caso, si possono settare differenti quantità fisiche (temperature, velocità dei fluidi, ecc.) che possono risultare molto utili nell'analisi del fenomeno incendio, soprattutto dal punto di vista grafico.

Nelle impostazioni della simulazione, possono essere importanti per l'*output* le *animated boundary quantities*. Sebbene vi siano numerose impostazioni, si consiglia al progettista di impostare *gas temperature*, *wall temperature* ed eventualmente *backwall temperature*. Così facendo si avranno al termine della simulazione dei risultati grafici (*color maps*) molto utili per le analisi.

La simulazione va poi impostata anche in termini di tempi. Si può optare per 300 o 600 o 1000 secondi, e così via. La scelta dipende dal fenomeno che si vuole studiare, quindi dall'evoluzione della curva RHR, ad esempio, oppure se si vogliono analizzare fenomeni legati all'esodo. Si deve tenere conto che avere tempi più lunghi può essere sì utile, ma può anche dilatare il tempo di attesa dei risultati poiché appesantisce l'onere computazionale e rallenta il calcolatore e la simulazione stessa.

Un passaggio che si consiglia al progettista è l'impostazione *restart*, affinché il programma esegua dei salvataggi automatici. Per esempio, per i modelli della presente tesi sono stati settati dei salvataggi ogni 100 secondi. Questo step è consigliato perché, nonostante questo ulteriore setup rallenti le simulazioni e il calcolatore, è risultato essenziale evitando di perdere dati e risultati per riavvii o spegnimenti involontari del PC.

È importante anche la modalità di simulazione (*simulation mode* o *simulation type*), la quale terrà in conto i fenomeni di fluido dinamica in maniera differente. Vi sono quattro modalità di simulazione: Direct Numerical Simulation, DNS; Large Eddy Simulation, LES; Very Large Eddy Simulation, VLES; Simple Very Large Eddy Simulation, SVLES. Queste modalità differiscono principalmente nel livello di dettaglio con cui vengono trattate le turbolenze. La DNS garantisce la massima precisione, ma richiede un elevato costo computazionale, rendendola impraticabile per domini di grande estensione. La LES si concentra sulla risoluzione dei vortici di grande scala, modellando le piccole turbolenze con appositi modelli. Sebbene meno costosa della DNS, LES richiede comunque risorse computazionali significative. La VLES semplifica ulteriormente il trattamento delle piccole scale turbolente, riducendo il carico computazionale ma sacrificando una parte dell'accuratezza. Infine, la Simple Very Large Eddy Simulation (SVLES) adotta una fisica ulteriormente semplificata, con l'intento di velocizzare la simulazione a fronte di una minore precisione nelle dinamiche di flusso. Sebbene la SVLES non offra lo stesso livello di dettaglio delle altre metodologie, risulta utile per simulazioni rapide dove la precisione fine non è un requisito imprescindibile.

VLES è la predefinita del software ed è quella consigliata anche nel [forum di riferimento](#) e dai manuali per l'utente. Per queste ragioni, si consiglia al progettista di adottare tale modalità.

#### 4.3.1. Il confronto tra le modalità di simulazione (modelli 1-4)

I primi quattro modelli creati sono stati realizzati proprio per vedere e mettere in luce la differenza tra queste modalità di simulazione.

#### **Settings comuni dei modelli seguenti**

Non vi sono *materials* e le *surfaces* sono state impostate come segue:

- È stato utilizzato il materiale di tipo di INERT.
- Superficie bruciatore – *Burner*
  - Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 1000,0 kW/m<sup>2</sup>
  - Ramp-Up Time: RHR costante

Time (s)	Fraction
0,0	1,0
60,0	1,0

La mesh è stata impostata come segue:

	Min X	Max X	Min Y	Max Y	Min Z	Max Z
Mesh Boundary	-0,3 m	1,3 m	-0,3 m	1,3 m	-0,3 m	1,3 m

Cell Size (m): 0,1 x 0,1 x 0,1

Number of cells for mesh: 4096

La *reaction* impostata è la *SFPE POLYURETHANE\_GM27* (predefinita), che si trova nella libreria delle *reactions*.

Per quanto riguarda le *slices*:

Name	XYZ Plane	Plane Value	Gas Phase Quantity	Use Vector?	Cell Centered?
Slice_y	Y	0,5 m	Temperature	NO	NO
Slice_x	X	0,5 m	Temperature	NO	NO

Infine, sono state impostate in output le seguenti *animated boundary quantities*: *gas temperature* e *wall temperature*.

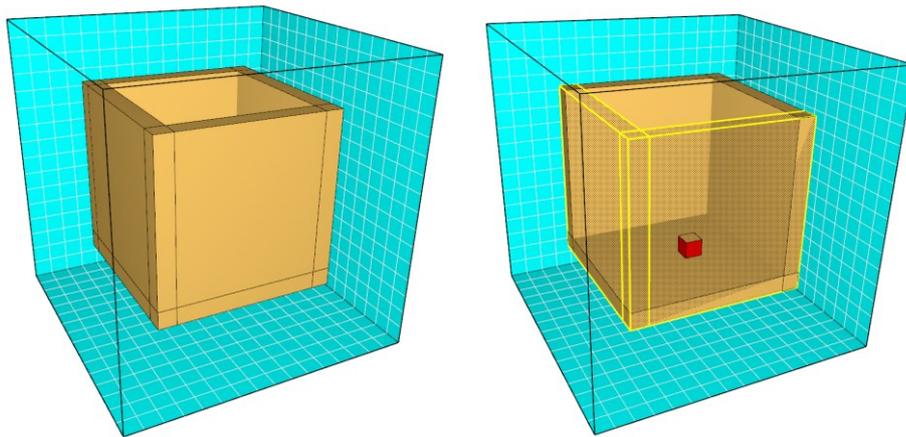


Figure 4.12: Configurazione grafica di base dei primi quattro modelli per il confronto delle modalità di simulazione

La geometria è la seguente:

Obstructions	Face					
	Min X	Max X	Min Y	Max Y	Min Z	Max Z
Soletta	0,0 m	1,0 m	0,0 m	1,0 m	0,0 m	0,1 m
Parete 1	0,0 m	1,0 m	0,0 m	0,1 m	0,0 m	1,0 m
Parete 2	0,9 m	1,0 m	0,0 m	0,1 m	0,0 m	1,0 m
Parete 3	0,0 m	1,0 m	0,9 m	1,0 m	0,0 m	1,0 m
Parete 4	0,0 m	0,1 m	0,0 m	1,0 m	0,0 m	1,0 m
Burner	0,5 m	0,6 m	0,5 m	0,6 m	0,1 m	0,2 m

Le *surfaces* sono state impostate così:

Obstructions	Face					
	Min Z	Max Z	Min Y	Max Y	Min Z	Max Z
Soletta	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT
Parete 1	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT
Parete 2	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT
Parete 3	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT
Parete 4	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT	INERT
Burner	Burner	Burner	Burner	Burner	INERT	INERT

## Risultati

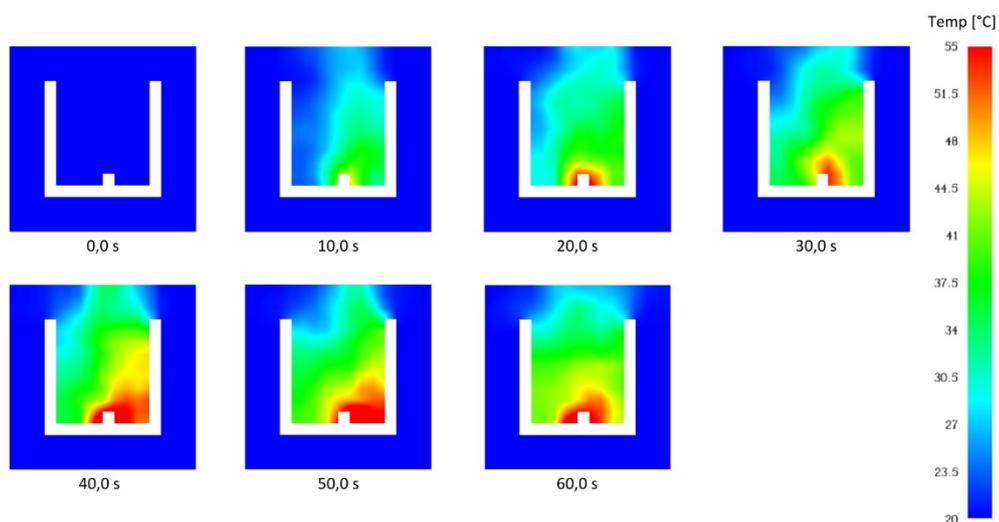


Figure 4.13: I risultati della simulazione del modello 1 in modalità DNS

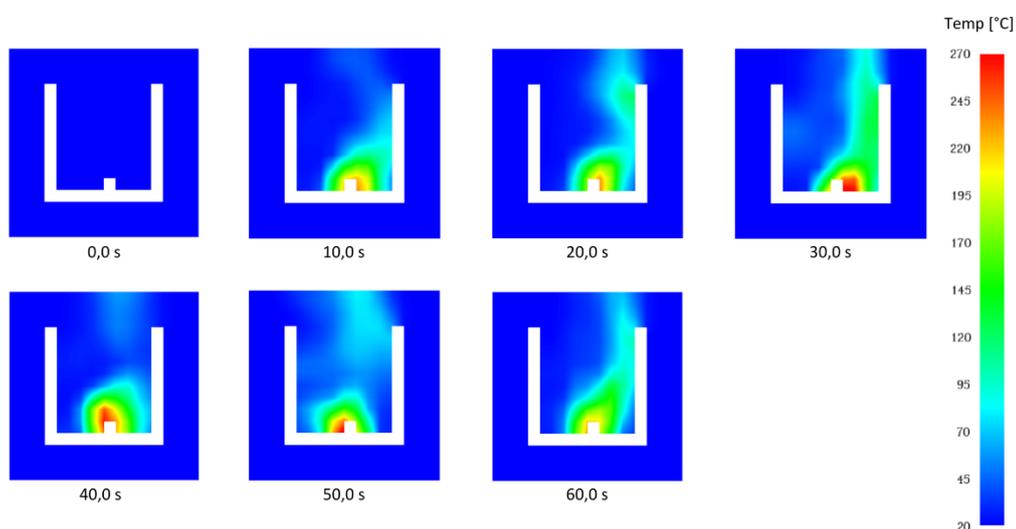


Figure 4.14: I risultati della simulazione del modello 2 in modalità LES

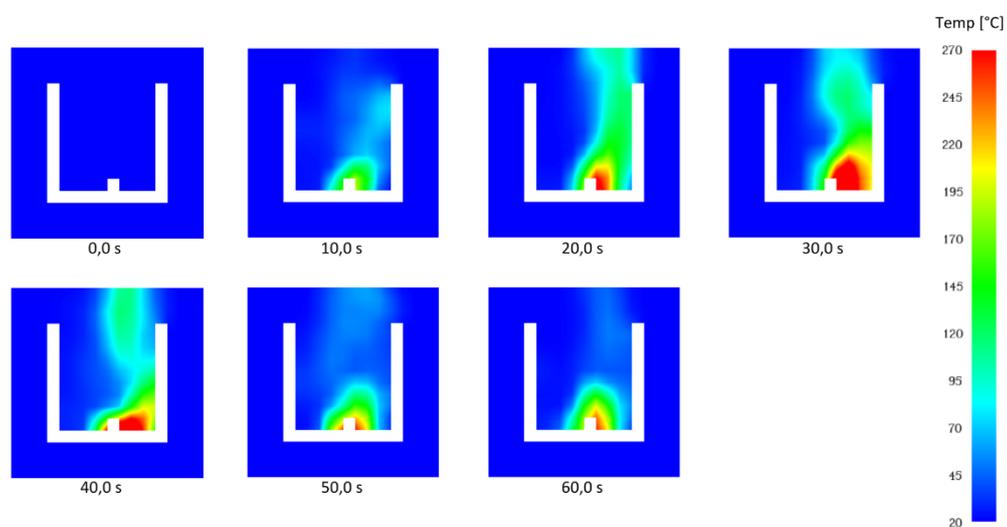


Figure 4.15: I risultati della simulazione del modello 3 in modalità VLES

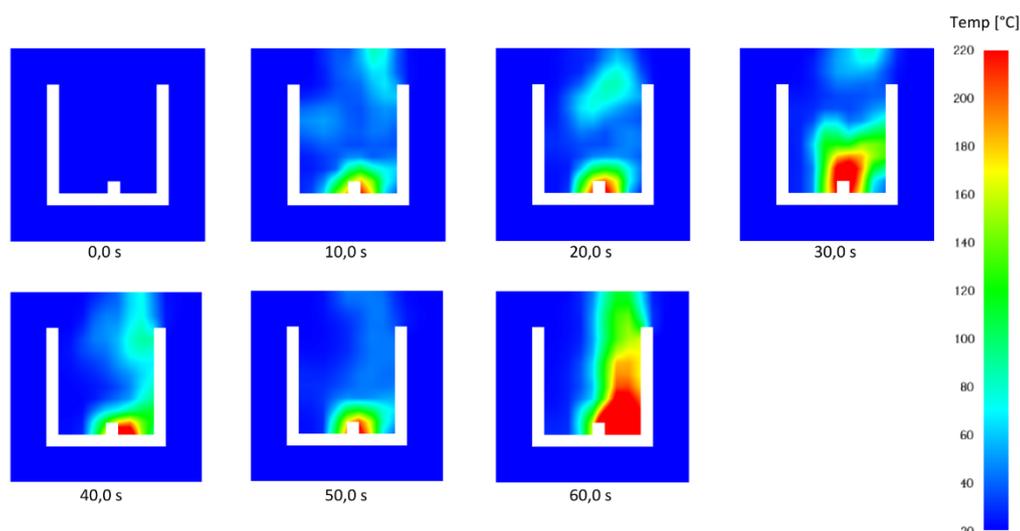


Figure 4.16: I risultati della simulazione del modello 4 in modalità SVLES

### **Osservazioni e conclusioni**

Dai risultati grafici si emerge che le modalità di simulazione non sono paragonabili poiché:

- DNS risulta completamente diversa: si ha molto fluido aria coinvolto, ma temperature nettamente minori;
- LES, VLES, SVLES sono confrontabili per via delle temperature, perché si hanno range di temperature (20-270°C) anche prossimi; tuttavia, la forma del *plume* in termini di temperature si vede che differisce nettamente tra le varie modalità.

Si vedono delle similarità, però si percepisce guardando la *color map* che il problema fluidodinamico è stato risolto in maniera molto diversa.

Per i modelli e le simulazioni successive è stata scelta la modalità di simulazione VLES perché è la tipologia predefinita di PyroSim, è consigliata dal manuale del software e quella maggiormente consigliata per modellisti e progettisti dai fondatori e dai modellatori ([forum di PyroSim](#)).

## 5. Analisi della propagazione di incendi in intercapedine di facciate ventilate con metodi FSE

### 5.1. Obiettivi e metodologie

L'obiettivo delle modellazioni di incendio condotte in questa tesi è lo studio dell'evoluzione dell'incendio quando si hanno delle facciate ventilate, in particolare ci si è focalizzati sul comprendere il fenomeno all'interno dell'intercapedine d'aria. L'attenzione è stata posta sulla variazione delle temperature nel tempo. Tale indagine si basa sulle considerazioni sviluppate nei capitoli precedenti, che riguardano sia la dinamica dell'incendio sia il quadro normativo delineato dalle RTV.14 e RTV.13.

Considerando l'analisi sulla propagazione del fuoco in facciata e il contesto storico degli edifici di grande altezza, si è scelto di focalizzarsi su uno scenario di incendio indoor, ovvero originato all'interno di un locale al piano terra della struttura. Il picco della potenza termica della curva RHR è stato fissato a 5000 kW, valore tratto dai focolari predefiniti del Codice di prevenzione incendi (Tabella 1.4). Si è deciso di collocare il focolare in prossimità di un'apertura, in modo da consentire la fuoriuscita diretta della fiamma verso la facciata ventilata e verso l'intercapedine d'aria; così si è ricreato lo scenario peggiore possibile, ossia il caso di sfogo dell'incendio direttamente in facciata e lo sfogo diretto di fumi, gas e fiamme nell'intercapedine d'aria.

Il Codice di prevenzione incendi consente l'impiego di materiali sia combustibili che incombustibili per le facciate. La RTV.14 non fornisce prescrizioni specifiche in merito, rimandando direttamente alla RTV.13, la quale distingue gli edifici in diverse categorie in base alla classificazione di sicurezza antincendio. Per edifici di tipo SA, ossia da 1 piano fuori terra fino a 4 piani fuori terra, non sono previsti requisiti di reazione e resistenza al fuoco. Gli edifici di tipo SB, ossia strutture da 4 a circa 8 piani fuori terra, richiedono l'impiego di materiali appartenenti al gruppo GM2, con classificazioni minime B-s2,d0 per il rivestimento e D-s2,d2 per l'isolante. Per gli edifici SC, ossia con numero di piani maggiore a 8, si impone l'uso di materiali GM1, con rivestimenti di classe minima di reazione al fuoco pari a A2-s1,d0 o B-s1,d0 e isolanti di classe minima di reazione al fuoco pari a C-s2,d0 o A2-s1,d0.

La prima analisi ha riguardato una facciata ventilata combustibile continua, ossia priva di finestre vetrate, rappresentativa di edifici realizzati prima dell'emanazione delle Lettere Circolari, delle RTV.13 e RTV.14 del Codice di prevenzione incendi, dunque antecedenti al 2010. Tale configurazione, caratterizzata da una struttura modulare, è stata studiata considerando un modulo di facciata di larghezza fissa pari a 3 metri per tutti i modelli. Per considerare il caso peggiore, in fase preliminare si è ipotizzato che tale facciata fosse parte di un edificio di grande altezza collocato al nord d'Italia, verosimilmente a Milano dove effettivamente ci sono molti edifici alti, a cui corrisponde una zona climatica pari ad E. Tale

ipotesi è stata utile anche per la verifica degli standard normativi per l'efficienza energetica del sistema di facciata, in particolare per la valutazione della trasmittanza termica.

A causa delle limitazioni computazionali del software utilizzato, che ha ostacolato la simulazione di edifici superiori agli 8 piani per via dell'elevato onere di calcolo e dei tempi di elaborazione estremamente lunghi, è stato scelto di modellare prima sistemi di facciate ventilate appartenenti ad edifici di altezza inferiore e, in un secondo tempo, sistemi di facciata ventilata appartenenti a strutture più alte.

Si rammenta che l'approccio prestazionale con strumenti di FSE è fortemente consigliato nei casi in cui risulta economicamente vantaggioso in termini di tempi, costi ed efficienza progettuale. Nel caso di edifici alti, l'applicazione della FSE per la sicurezza antincendio risulta particolarmente vantaggiosa poiché tali strutture rientrano sia nella RTV.14 sia nella RTV.13 del Codice di prevenzione incendi. Tuttavia, l'impiego della FSE si rivela utile anche per edifici di minori dimensioni, come quelli di 2 o 3 piani, al fine di analizzare il comportamento al fuoco delle facciate ventilate. In questi casi, pur essendo necessario rispettare la RTV.13, la modellazione dell'incendio consente di comprendere meglio l'evoluzione del fenomeno sulle facciate ventilate, contribuendo ad un approccio progettuale più consapevole e basato su dati concreti.

La soluzione adottata ha previsto la simulazione di moduli con larghezza fissa di 3 metri e un'altezza variabile tra 2 e 3 piani fuori terra, scelta che ha consentito di ridurre gli errori e rendere più gestibile l'analisi del fenomeno. Inizialmente, il focolare in input è stato impostato con una curva RHR costante di 5000 kW.

Successivamente, è stato realizzato un modello rappresentativo di una facciata ventilata continua incombustibile, conforme ai requisiti normativi sia in termini di reazione al fuoco sia di efficienza energetica. Il confronto tra i due modelli ha consentito di valutare le differenze di comportamento tra facciate combustibili e incombustibili.

L'analisi è stata poi estesa a modelli con altezze superiori, passando da un modulo di facciata continua di 3x6 m a uno di 3x9 m.

Ulteriori simulazioni hanno investigato la variazione dello spessore dell'intercapedine d'aria, sia per facciate combustibili che incombustibili, mantenendo inalterato il setup iniziale.

Non è stata condotta un'analisi sulle facciate microventilate a causa delle problematiche legate alla mesh: per mantenere gestibili i tempi di calcolo, si è scelto di adottare un passo di 5 cm che, però, ha impedito di modellare un'intercapedine di 2,5 cm – valore verosimile con le lame d'aria delle facciate microventilate. Un tentativo di riduzione della mesh a 2,5 cm è stato effettivamente realizzato, ma ha evidenziato un eccessivo onere computazionale con tempi di simulazione incompatibili con le risorse disponibili. Questo limite potrebbe essere superato disponendo di maggiore potenza hardware e tempi di attesa delle simulazioni più lunghi.

Per ottenere un modello più realistico, è stata introdotta la presenza di finestre con vetro, simulandone la rottura a temperature di *failure* di 450°C e successivamente di 250°C. Contestualmente, è stata adottata una curva RHR più realistica, caratterizzata da una fase di crescita parabolica seguita da un plateau orizzontale con un picco massimo di 5000 kW.

A partire da questo modello, con temperatura di *failure* del vetro pari a 250°C, sono state simulate due soluzioni note per il miglioramento della sicurezza delle facciate ventilate: le fasce di separazione e le cavity barriers. Il confronto tra queste soluzioni ha consentito di evidenziare vantaggi, svantaggi e le relative implicazioni in termini di mitigazione del rischio.

Gli ultimi modelli realizzati hanno simulato cosa accade in una facciata ventilata di un edificio di 8 piani. Purtroppo, l'onere computazionale e i tempi di attesa delle simulazioni sono stati d'ostacolo e hanno richiesto parecchie settimane. Non disponendo di un hardware più potente e di ulteriori risorse temporali, si è deciso di riportare comunque l'esito di tali simulazioni. In effetti, solo una simulazione è arrivata a termine dopo circa un mese, mentre un'altra è arrivata a circa metà. Se ne riportano comunque i risultati perché questi potrebbero essere utili per il progettista che vuole studiare il fenomeno su strutture più alte poiché, in ogni caso, la geometria, il layout e l'estensione maggiore danno luogo ad alcune differenze rispetto agli altri modelli.

A differenza di altri studi focalizzati sull'altezza della fiamma, l'attenzione è stata posta sull'andamento delle temperature all'interno dell'intercapedine. Tale scelta deriva dalla limitata affidabilità del software nel fornire una stima quantitativa dell'altezza delle fiamme; mentre, se si intende avere una stima qualitativa dell'altezza di fiamma, il software dà un risultato molto affidabile. Al contrario, si ritiene che la stima quantitativa delle temperature sia molto affidabile e che queste risultino essere un parametro più significativo per la valutazione della propagazione dell'incendio nelle facciate ventilate.

Infine, a causa delle limitazioni del software PyroSim, è stata analizzata la resistenza al fuoco delle connessioni metalliche utilizzando il software CDM Dolmen, in particolare il tool IS Fuoco, poiché continuavano a persistere diverse problematiche relative alle mesh all'interno dell'intercapedine.

## 5.2. I casi studio per le simulazioni d'incendio

Come già detto, per il primo modello è stata considerata una facciata ventilata combustibile costruita prima del 2010, quindi antecedente alle Linee Guida delle Circolari e all'introduzione delle RTV.13 e RTV.14 del Codice di prevenzione incendi. Si è supposto di avere una parete portante in cemento armato, uno strato di isolamento di scarse qualità di reazione al fuoco e un rivestimento ACM con classe E di reazione al fuoco. Questa stratigrafia è stata adottata per valutare il caso peggiore in termini di sicurezza antincendio, risultando molto simile ad alcune soluzioni largamente diffuse e adottate in passato.

Per considerare invece la situazione conforme agli standard attuali, è stata analizzata anche una facciata ventilata incombustibile, progettata quindi nel rispetto delle prescrizioni delle RTV.13 e RTV.14 del Codice. Questa seconda configurazione rappresenta la prassi odierna e garantisce una maggiore sicurezza antincendio.

Ci si è inoltre assicurati che entrambe le configurazioni, sia la facciata ventilata combustibile che quella incombustibile, rispettassero i requisiti di efficientamento energetico.

### 5.2.1. Materiali e stratigrafie adottate

A seguito delle ricerche condotte per l'exkursus storico sugli incendi in edifici alti riportato nella sezione 3.2, sono stati ipotizzati specifici materiali e stratigrafie per le facciate ventilate, successivamente implementati nei modelli di simulazione. Le caratteristiche principali di tali configurazioni sono sintetizzate nella tabella seguente.

	Facciata combustibile	Facciata incombustibile	Spessori
Parete portante	Cemento	Cemento	30 cm
Isolante	EPS	Lana di roccia	10 cm
Intercapedine	Aria	Aria	-
Rivestimento	Pannello in ACM	Kerlite (gres)	5 cm

Tabella 5.1: Materiali e stratigrafie comuni adottate nei modelli

Si noti che nella casistica peggiore, ossia in presenza di una facciata ventilata combustibile, lo strato isolante ha pessime caratteristiche di comportamento al fuoco e il rivestimento è di classe di reazione al fuoco E; mentre nella casistica migliore, ossia in presenza di una facciata incombustibile, sono stati considerati materiali di natura incombustibile, certamente conformi agli standard attuali di sicurezza antincendio.

### La verifica della trasmittanza termica

Come accennato in precedenza, tutti i casi studio sono stati preliminarmente situati nella città di Milano; questa scelta è stata mantenuta anche successivamente nonostante si siano evidenziate diverse limitazioni e difficoltà nella realizzazione di un modello d'incendio di un edificio alto 8 o più piani in PyroSim. In ogni caso Milano, come molte delle città al nord d'Italia, ricade nella zona climatica E come stabilito dal D.P.R. n. 412/1993 e tale aspetto influisce sulle prestazioni termiche richieste per l'involucro edilizio.

Queste prestazioni sono state verificate mediante il software Termus di ACCA Software. Le stratigrafie di base per i due layout di facciata, rispettivamente combustibile e incombustibile, sono state impostate ed elaborate direttamente dal software. Inoltre, nell'immagine in alto a sinistra sono riportati i valori delle trasmittanze termiche calcolati automaticamente da Termus, fornendo una base tecnica per l'analisi delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio.

**Stratigrafia parete combustibile [550,00]**  
 $U = 0.2924 [W/m^2K]$  -  $M_s = 809$  -  $M_{sT} = 809 [kg/m^2]$

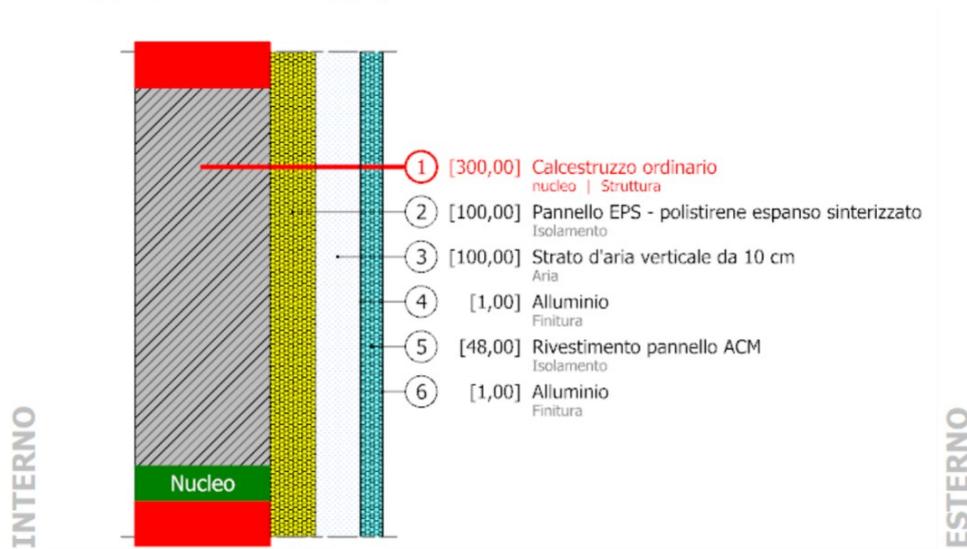


Figura 5.1: Stratigrafia di base della facciata ventilata combustibile realizzata con Termus - ACCA Software

**Stratigrafia parete incombustibile [550,00]**  
 $U = 0.2512 [W/m^2K]$  -  $M_s = 845$  -  $M_{sT} = 845 [kg/m^2]$

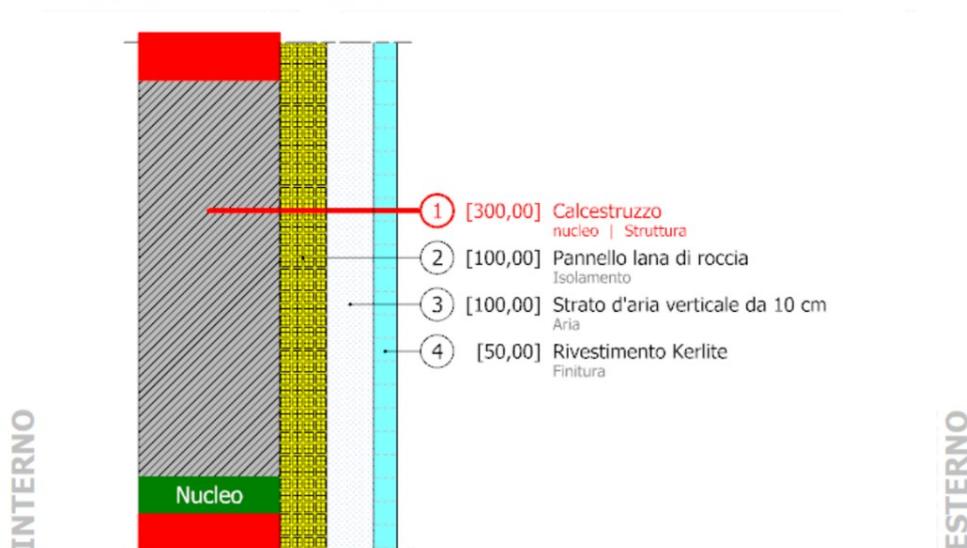


Figura 5.2: Stratigrafia di base della facciata ventilata incombustibile realizzata con Termus - ACCA Software

Dal Decreto Legislativo 311/2006 è stata considerata la seguente tabella.

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2008 $U [W/m^2K]$	Dall'1 gennaio 2010 $U [W/m^2K]$
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Tabella 5.2: Verifica dei valori limite della trasmittanza termica delle strutture opache verticali (Tabella 2.1, D. Lgs. 311/2006)

Come si vede, per quanto riguarda la facciata ventilata costruita ipoteticamente prima del 2010, i requisiti energetici di trasmittanza termica sono soddisfatti.

Dal D.M. 26/06/2015 è stata considerata la seguente tabella.

Zona climatica	U [W/m <sup>2</sup> K]	
	2015	2019/2021
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 5.3: Verifica dei valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 1, Appendice A, D.M. 26/06/2015)

Anche in questo caso si nota che il requisito di trasmittanza termica per la facciata ventilata di tipo incombustibile rispetta i requisiti energetici imposti dalla norma attualmente vigente.

### 5.2.2. I modelli realizzati in PyroSim

I modelli realizzati con il software PyroSim vengono riassunti nelle tabelle che seguono.

Il primo gruppo di casi studio è rappresentato da una facciata ventilata continua, cioè priva di finestre, dotata delle seguenti stratigrafie, caratteristiche e geometrie dell'involucro riportate in una tabella di sintesi.

ID Modello	Comportamento al fuoco della facciata	Tipologia della facciata	Dimensioni della facciata al di sopra del focolare	Durata della simulazione	Curva RHR
5	Combustibile	Continua	3 m x 6 m	600 s	Costante a 5000 kW
6	Combustibile		3 m x 9 m		
7	Incombustibile		3 m x 6 m		
8	Incombustibile		3 m x 9 m		

Tabella 5.4: Il primo gruppo di modelli realizzati con facciata ventilata continua

Da queste simulazioni sono state tratte alcune osservazioni e un confronto dei risultati.

Il secondo gruppo di modelli è stato dedicato all'analisi di un incendio su una facciata ventilata continua (priva di finestre) dotata di differenti spessori dell'intercapedine d'aria.

ID Modello	Comp. al fuoco della facciata	Tipologia della facciata	Dimensioni della facciata al di sopra del focolare	Durata della simulazione	Curva RHR	Spessore dell'intercapedine d'aria
9	Combustibile	Continua	3 m x 6 m	300 s	Costante a 5000 kW	5 cm
10						10 cm
11						20 cm
12						40 cm
13	Incombustibile					5 cm
14						10 cm
15						20 cm
16						40 cm

Tabella 5.5: Il secondo gruppo dedicato alla variazione dell'intercapedine d'aria

In questo caso, è stato effettuato un confronto tra i risultati dei diversi modelli.

Il terzo gruppo di modelli è stato realizzato per studiare il sistema di facciata ventilata con delle soluzioni volte alla sicurezza antincendio. È stato realizzato un primo modello d'incendio di base dotato di una facciata ventilata incombustibile, con la presenza di una finestra vetrata al piano primo, di dimensioni totali 3 m x 6,4 m (interpiano di 3,2 m). Questo modello è stato duplicato per realizzare la simulazione della rottura dei vetri a differenti

temperature di *failure*. Poi, è stato realizzato un secondo modello, identico al precedente, ma con la presenza di una fascia di separazione di 1 metro. Infine, è stato realizzato un quarto modello, identico al primo, ma con la presenza di una cavity barrier.

ID Modello	Comp. al fuoco della facciata	Dimensioni della facciata	Durata della simulazione	Curva RHR	Presenza di finestre in vetro	Temp. di rottura del vetro	Fascia di separazione > 1 m	Cavity barrier (materiale INERT)
17	Incombustibile	3 m x 6,4 m	600 s	Crescita parabolica con successivo plateau costante a 5000 kW	Sì	450°C	No	No
18						250°C	No	No
19							Sì	No
20						No	Sì	

Tabella 5.6: Il terzo gruppo per simulare una situazione più aderente alla realtà e le diverse soluzioni suggerite dalla sicurezza antincendio

Per tale gruppo di simulazioni si noti che l'obiettivo è stato realizzare una situazione più realistica e confrontare le diverse soluzioni antincendio che si possono predisporre in facciata. Perciò, si è impostata una curva RHR con un primo tratto crescente di tipo parabolico e un successivo plateau costante a 5000 kW<sup>40</sup>, in seguito sono state disposte le aperture e le finestre simulandone poi la rottura alla temperatura di *failure*. Lo scopo è stato paragonare le diverse soluzioni suggerite dalla sicurezza antincendio, per metterne in luce punti di forza e debolezza, vantaggi e svantaggi, potenzialità e limiti.

Infine, è stato realizzato solo in parte un gruppo di modelli per cercare di simulare porzioni di facciata ventilata più estese, appartenenti a strutture alte almeno 8 piani. Tali modelli rappresentano un sistema di facciata ventilata di 8 piani fuori terra, con interpiano 3,2 m e la presenza di finestre vetrate ai piani superiori a partire dal piano primo. Le stratigrafie di base sono le stesse adottate negli altri modelli (si veda Tabella 5.1). La temperatura di *failure* del vetro è stata impostata a 250°C e la curva RHR ha un andamento crescente parabolico seguito da un plateau orizzontale pari a 5000 kW.

ID Modello	Comp. al fuoco della facciata	Dimensioni totali della facciata	Durata della simulazione	Soluzione in facciata	Realizzazione del modello	Esito
21	Combustibile	3,2 m x 8 piani	600 s	-	È stato realizzato	Non completato $\frac{322,8 s}{600 s}$ (53,8%)
22	Incombustibile			-	È stato realizzato	Completato
23				Fascia di separazione di almeno 1 m tra un piano e l'altro	Non è stato realizzato	-
24				Cavity barrier tra un piano e l'altro	Non è stato realizzato	-

Tabella 5.7: Il quarto gruppo di modelli per simulare una porzione di facciata corrispondente ad una struttura di 8 piani

In questo caso, l'intento è stato capire se esistano delle differenze tra i modelli di strutture più basse e quelli di strutture più alte, cercando di superare e testare le limitazioni

<sup>40</sup> Si ha sempre la stessa potenza termica di picco, presa dai focolari predefiniti del Codice (Tabella 1.4).

dell'analisi FDS. Purtroppo, solo uno di questi è arrivato a termine, mentre l'altro è arrivato poco oltre la metà poiché le risorse strumentali e temporali non sono state sufficienti.

### 5.2.3. Il setup delle simulazioni in PyroSim

I materiali principali sono stati impostati con le proprietà riassunte nella successiva tabella.

		Facciata combustibile			Facciata incombustibile			
		Cemento	Isolante EPS	Riv. ACM	Cemento	Isolante lana di roccia	Riv. Kerlite (gres)	
Proprietà termiche	Densità	kg/m <sup>3</sup>	2400	15	1700	2400	50	2400
	Calore specifico	kJ/(kg K)	1,04	1,4	1,5	1,04	1,03	0,9
	Conducibilità	W/(m K)	1,8	0,03	0,6	1,8	0,035	1,3
	Emissività	-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,85	0,85
	Coefficiente di assorbimento	1/m	5,0E+4	1,0E-10	5,0E+4	5,0E+4	5,0E+4	5,0E+4
Pirolisi	Calore di combustione	kJ/kg	-	4,3E+4	1,5E+4	-	-	-

Tabella 5.8: Il setup delle proprietà dei materiali su PyroSim

Per quanto riguarda il terzo e il quarto gruppo di simulazioni, il vetro delle finestre è stato modellato impostando le seguenti proprietà:

		Proprietà	Unità di misura	Vetro
Proprietà termiche	Densità		kg/m <sup>3</sup>	2400
	Calore specifico		kJ/(kg K)	1,04
	Conducibilità		W/(m K)	1,8
	Emissività		-	0,9
	Coefficiente di assorbimento		1/m	5,0E+4
Pirolisi	Calore di combustione		kJ/kg	-

Tabella 5.9: Le proprietà del materiale vetro per il terzo gruppo di modelli

Le superfici sono state impostate come riportato nella tabella seguente.

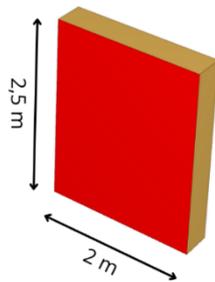
		Facciata combustibile	Facciata incombustibile	Surface Props			
		Material Layers			Temperature		
Surface type		Material Composition		Mass Fraction	Thickness (m)	Initial temperature	Backing
Parete portante	Layered	Cemento	Cemento	1,0	0,30	Constant (20°C)	Exposed
Isolante		EPS	Lana di roccia	1,0	0,10		
Rivestimento		Pannello in ACM	Kerlite (gres)	1,0	0,05		

Tabella 5.10: Il setup delle superfici su PyroSim

In tutti i modelli sono state impiegate superfici di tipo *layered* dedicate a ciascun materiale e non è stata realizzata un'unica *surface* che includesse tutta la stratigrafia. Le ragioni di questa scelta sono sostanzialmente due: FDS non avrebbe dato dei risultati grafici di ciò che

accadeva all'interno dell'intercapedine; scegliendo questa via il materiale combustibile è riuscito a bruciare e scomparire graficamente perché partecipa completamente alla combustione.

Per quanto concerne il focolare, la superficie *burner* è stata impostata in tutti i modelli come segue.



Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA): 1000,0 kW/mq

$$1000,0 \text{ kW/mq} \times (2 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}) = 1000,0 \text{ kW/mq} \times 5,0 \text{ mq} = 5000,0 \text{ kW}$$

#### Dal Codice di prevenzione incendi

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio $t_0$	150 s ( <i>fast</i> )	75 s ( <i>ultra-fast</i> )
RHR <sub>max</sub> totale	5 MW	50 MW
RHR <sub>max</sub> per m <sup>2</sup> di superficie del focolare	250-500 kW/m <sup>2</sup> [1]	500-1000 kW/m <sup>2</sup> [1]

Figure 5.3: Setup del burner

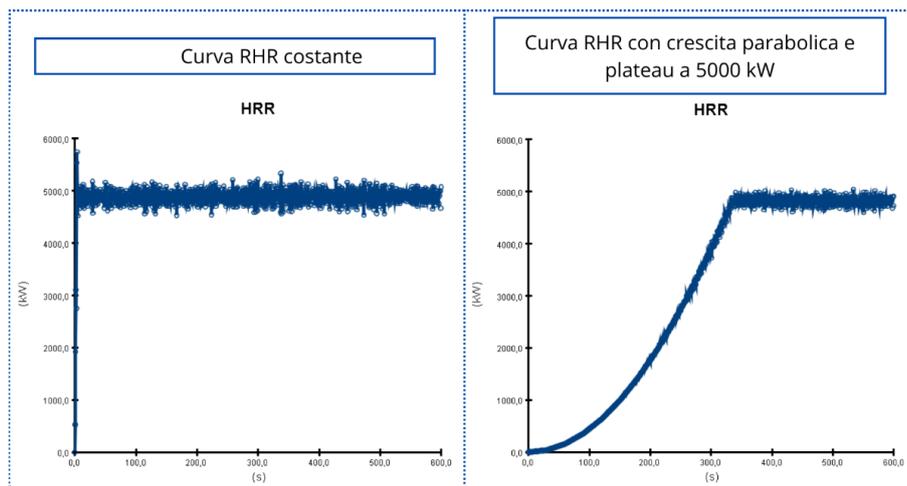


Figure 5.4: Curve RHR impostate in input

Le ulteriori impostazioni del *burner*, in *Thermal*, hanno previsto i seguenti settaggi:

- *Convective Heat Transfer Model: Default;*
- *Thermal Boundary Conditions:*
  - *Boundary Condition Model: Fixed temperature*
  - *Emissivity: 0,9*
  - *Surface Temperature: 300°C*

Le proprietà dell'ostruzione associate al *burner* hanno incluso la sua attivazione in modalità *always on* e la rimozione del flag sulla proprietà *permit holes*; per quanto concerne le altre impostazioni, sono state lasciate di default. Solo una superficie dell'ostruzione creata è stata impostata come *burner*, mentre tutte le altre facce sono state definite con materiale e superficie di tipo inerte.

È stata creata un'apertura (*hole*) al piano terra di dimensioni 2x2,5 m, corrispondente alla superficie del *burner*. Il *fire* è stato posizionato in corrispondenza dell'apertura per consentire all'incendio di propagarsi direttamente verso la facciata.

I modelli di facciata ventilata continua sono stati realizzati con la seguente configurazione. Nelle immagini successive sono stati riportati anche i *devices* impiegati e il loro posizionamento.

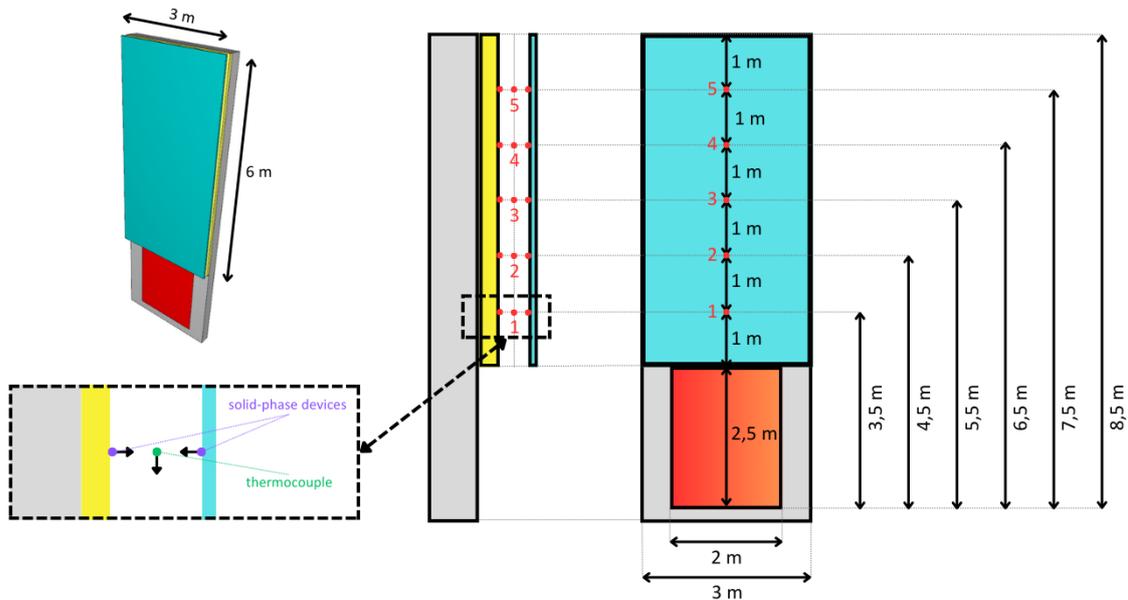


Figura 5.5: Facciata ventilata continua combustibile e incombustibile nei modelli 5, 7, 9-16

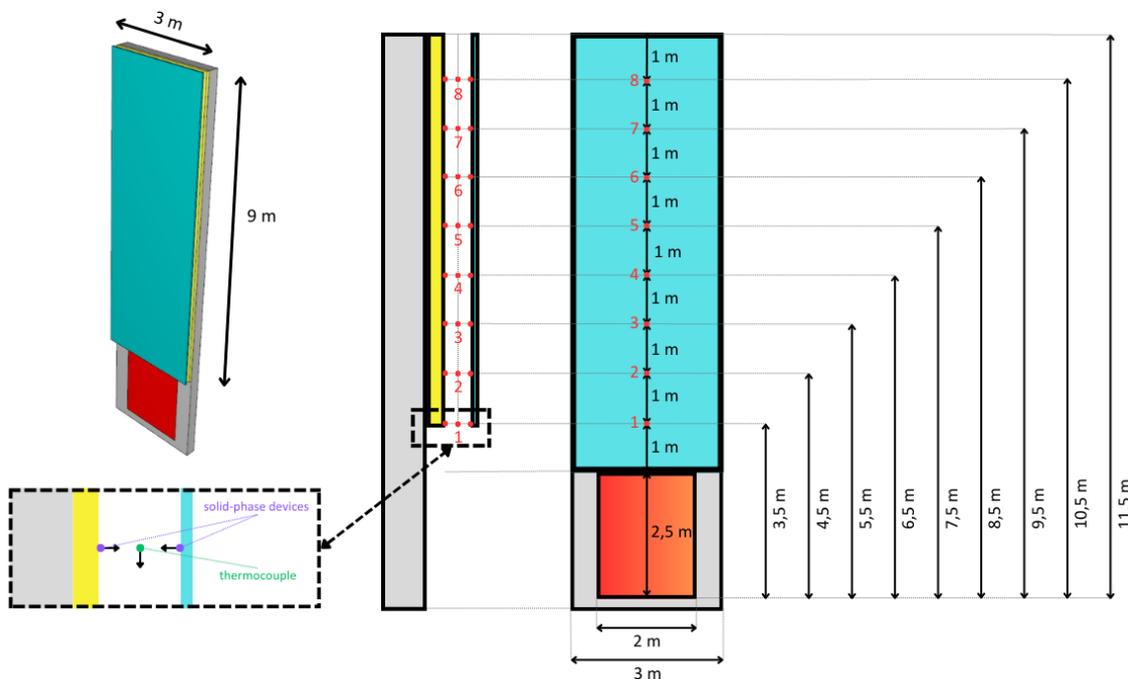


Figura 5.6: Facciata ventilata continua combustibile e incombustibile nei modelli 6 e 8

Nei modelli in cui è stato variato lo spessore dell'intercapedine (modelli 9-16), si è seguita la stessa configurazione della Figura 5.5.

Per gli ultimi modelli (in particolare per i modelli 17-18), invece, è stata realizzata la seguente configurazione a 2 piani fuori terra con la presenza di finestra vetrata al piano primo. Con tali modelli l'obiettivo è simulare una situazione più realistica e aderente alla realtà.

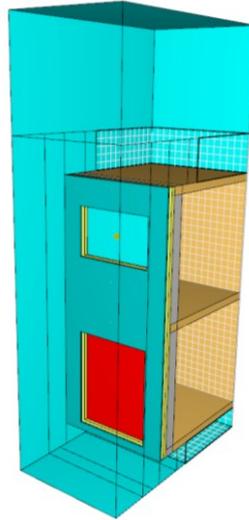


Figura 5.7: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra in PyroSim – modelli 17 e 18

Malgrado le già sottolineate limitazioni del software, si è comunque deciso di realizzare altri quattro modelli di facciata ventilata di altezza pari a 8 piani fuori terra; tuttavia, soltanto due di tali modelli sono stati effettivamente realizzati e solo una simulazione è stata completata con successo, mentre l'altra è stata sospesa. Si segnala che l'unica simulazione portata a termine ha richiesto ben 5 settimane, l'altra è stata messa in pausa dopo 3 settimane.

Per di più, la grande estensione delle *meshes* da realizzare, la presenza di molti *devices*, controlli e il setup dei parametri della simulazione hanno portato a tempi di simulazione molto lunghi, ossia settimane o mesi di attesa per l'ottenimento dei risultati. Sfortunatamente, non si disponeva di queste risorse di tempo.

Si consiglia al progettista di partire da modelli quanto più semplici e poi renderli complessi una volta che si è padroni nell'uso del software e nell'interpretazione dei risultati, consci delle limitazioni di PyroSim e dei codici di calcolo commerciali; poiché, realizzando un modello più complesso, il rischio è avere meno controllo sulla correttezza dei risultati.

Nell'immagine successiva sono stati riportati anche i *devices* impiegati e il loro posizionamento.

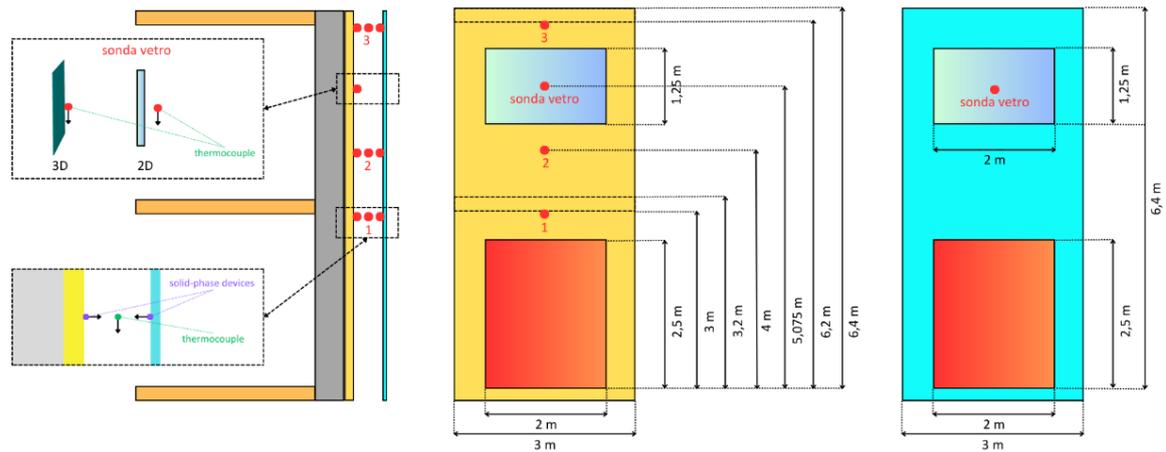


Figura 5.8: Layout della facciata e posizionamento dei devices – modelli 17, 18, 19 e 20

Per modellare la finestra, è stato creato un *hole* nella facciata di dimensioni 2x1,25 m, successivamente chiuso con un'ostruzione delle stesse dimensioni<sup>41</sup> di spessore 5 mm<sup>42</sup>. Per la modellazione del vetro, è stato impiegato il materiale precedentemente definito, con la superficie corrispondente ad esso associata (anch'essa di tipo *layered*). È stato poi impostato un controllo di disattivazione dell'ostruzione finestra, associato ad un *device* (termocoppia) prossimo all'ostruzione stessa, che si attivasse al raggiungimento di una temperatura di *failure* pari a 450°C o 250°C a seconda del modello, realizzando il cedimento del vetro della finestra.

Il modello della facciata ventilata incombustibile, costituita da 2 piani fuori terra, con la presenza di una finestra al piano primo e una fascia di separazione di 1 m al di sopra di tale apertura come soluzione in facciata, è stato realizzato come segue.

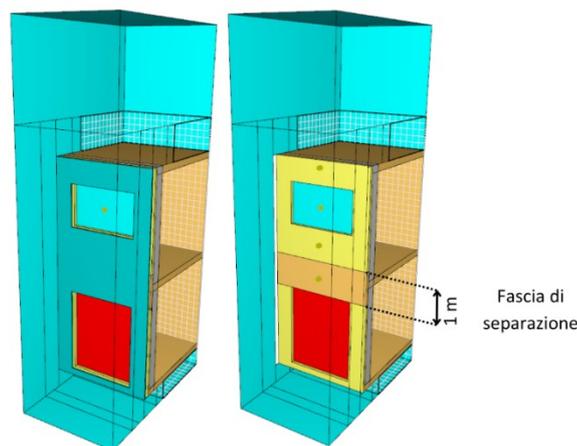


Figura 5.9: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra e una fascia di separazione di 1 m in PyroSim – modello 19

<sup>41</sup> È stato disattivato il comando *permit holes*.

<sup>42</sup> È importante notare che FDS approssima questa dimensione al passo della mesh rappresentando, sfortunatamente, un limite intrinseco ed ulteriore di questi codici di calcolo.

Per quanto riguarda il posizionamento di termocoppie e le altre sonde, è stato seguito lo stesso layout dei modelli precedenti; quindi, si faccia riferimento alla Figura 5.8.

Per testare l'efficacia di tale soluzione in facciata, è stato deciso di partire da una configurazione incombustibile perché si ritiene che non abbia senso predisporre una soluzione antincendio su una facciata combustibile, la quale prenderà sicuramente fuoco e sarà parte dell'incendio. In tal modo verrà certamente a mancare la facciata, la compartimentazione e i requisiti di reazione e resistenza al fuoco. Inoltre, potrebbe venire a mancare il supporto per la fascia stessa e anche la sua efficacia, perché oscurata dalle alte temperature e dal sopravvento degli effetti dell'incendio. Pertanto, in generale, si consiglia al progettista di predisporre tale soluzione in quei casi di facciata incombustibile.

Il modello della facciata ventilata incombustibile, costituita da 2 piani fuori terra con la presenza di una finestra al piano primo e una cavity barrier come soluzione in facciata, posta alla stessa altezza del solaio del piano primo, è stato realizzato come segue.

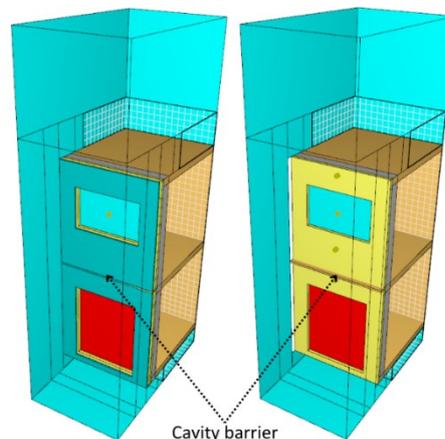


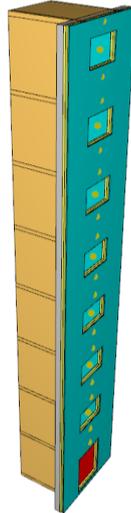
Figura 5.10: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra e un cavity barrier nell'intercapedine in PyroSim – modello 20

Per simulare la presenza della cavity barrier, l'elemento è stato modellato come un'ostruzione di forma parallelepipedica con base di 25x5 cm ed estensione di 3 m. È stato impiegato un materiale inerte (*inert*) e impostato un controllo di attivazione associato a una termocoppia posizionata nelle vicinanze della cavity barrier, che si attivasse al raggiungimento di una temperatura di 180°C.

Per quanto riguarda il posizionamento delle termocoppie e delle altre sonde, è stato seguito lo stesso layout dei modelli precedenti 17-19; quindi, si faccia riferimento alla Figura 5.8.

Anche in questo caso si è scelto di disporre la cavity barrier in una facciata ventilata di tipo incombustibile, poiché valgono le stesse considerazioni fatte al caso precedente, ovvero al caso della fascia di separazione di 1 m: se la facciata fosse combustibile, oltre a prendere parte all'incendio, verrebbe a mancare il supporto per la cavity barrier e tale soluzione perderebbe totalmente di efficacia e utilità.

Per quanto riguarda l'ultimo gruppo di simulazioni, l'obiettivo è riproporre le configurazioni dei modelli 18, 19 e 20 ma in un layout più alto, realizzando facciate ventilate di un edificio di 8 piani. In questo modo, sapendo che l'approccio prestazionale risulta essenziale per facciate di edifici di grande altezza, si vuole verificare l'efficacia dell'impiego degli strumenti della FSE. Quindi, si è deciso di partire dai modelli precedenti ed estenderli, realizzando le stesse facciate con un'estensione maggiore.



*Figura 5.11: Il layout del quarto gruppo di simulazioni d'incendio - modelli 21 e 22*

Come già detto, sfortunatamente non è stato possibile realizzare tutti e quattro i modelli<sup>43</sup>. In effetti, solo due modelli sono stati realizzati: il modello 21, in cui è stata modellata una facciata ventilata combustibile, e il modello 22 (gemello del modello 18), in cui è stata modellata una facciata incombustibile. Per di più, solamente una simulazione è arrivata al termine, mentre l'altra ha superato di poco metà del completamento.

In ogni caso, si riportano comunque gli esiti di tali modelli d'incendio perché potrebbero essere utili per ricerche e studi futuri in merito alle facciate ventilate.

In questi modelli, oltre alla stessa configurazione del sistema di facciata ventilata, è stato riproposto anche il medesimo posizionamento di *slices* e *devices* di quelli precedenti.

---

<sup>43</sup> Come indicato in Tabella 5.7.

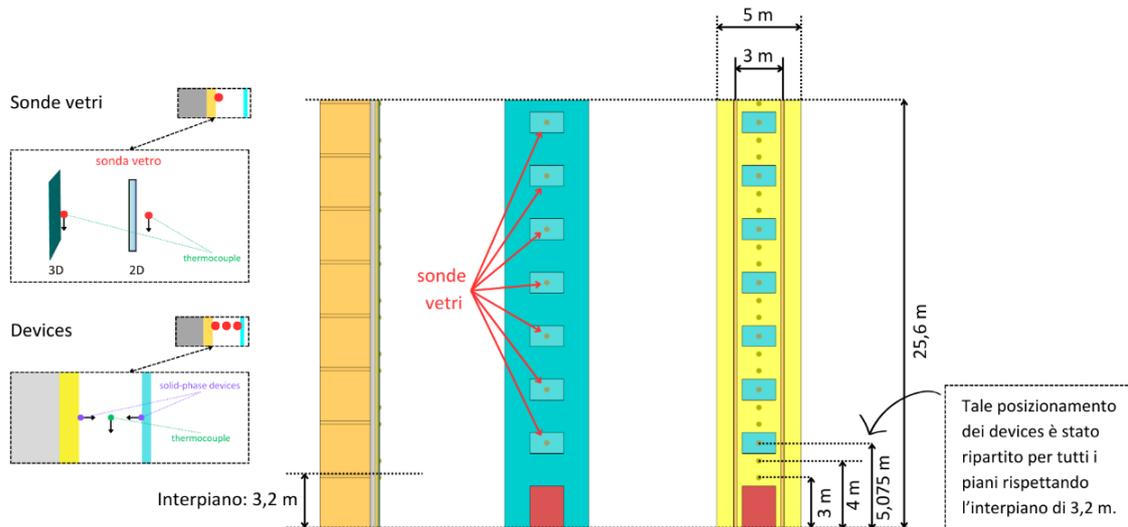


Figura 5.12: Configurazione della facciata e posizionamento dei sensori dei modelli 21 e 22

Sono state realizzate più mesh con differenti caratteristiche: una mesh più fitta, con passo di 5 cm, è stata dedicata esclusivamente all'intercapedine e alla stratigrafia, per cogliere tutti gli spessori degli strati e avere dei risultati ottimali per i differenti layout della lama d'aria; mentre le altre sono state affiancate garantendo l'allineamento tra le varie mesh.

Inoltre, è stata realizzata una mesh superiore per incrementare il volume d'aria all'interno del dominio di calcolo, poiché si è osservato che la curva RHR in output non corrispondeva a quella in input.<sup>44</sup>

Le mesh realizzate per i vari modelli sono costituite da centinaia di migliaia di celle, determinando quindi tempi di simulazione considerevoli, come già sottolineato in precedenza.

Anche in questi casi, si è utilizzato il comando *open mesh boundaries* e sono state rimosse delle superfici di ventilazione di tipo *open*, per realizzare delle superfici di ventilazione chiuse. Quest'ultimo step è stato fatto per simulare la modularità della facciata ventilata e ambienti confinati, come discusso nel capitolo precedente (si vedano Figure 4.10 e Figure 4.11).

Per quanto riguarda la *reaction*, in tutti i modelli è stata selezionata sempre la *SFPE POLYURETHANE\_GM27*, tratta dalla libreria predefinita del programma nella categoria *gas-phase reactions*.

Per quanto riguarda le *output boundaries*, in particolare le *animated boundary quantities*, sono state impostate *gas temperature* e *wall temperature*.

<sup>44</sup> In particolare, il picco di potenza di 5000 kW previsto in input non veniva raggiunto in output. Infatti, dopo vari tentativi e consultazione di [guide e manuali FDS \(https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html\)](https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html), si è deciso di ampliare il volume di controllo della mesh poiché, aumentandolo in direzione verticali, la curva RHR in output corrisponde a quella in input e l'analisi FDS valuta i fenomeni fluidodinamici dell'incendio con precisione e correttezza superiori.

Sono state inoltre definite *slices* per misurare temperature e velocità del fluido aria in direzione verticale (*w-velocity*) al fine di studiare il comportamento delle facciate ventilate. Queste *slices* sono state posizionate sia in direzione trasversale, in modo tale da attraversare la facciata, sia in direzione longitudinale, in modo da passare proprio a metà dello spessore dell'intercapedine.

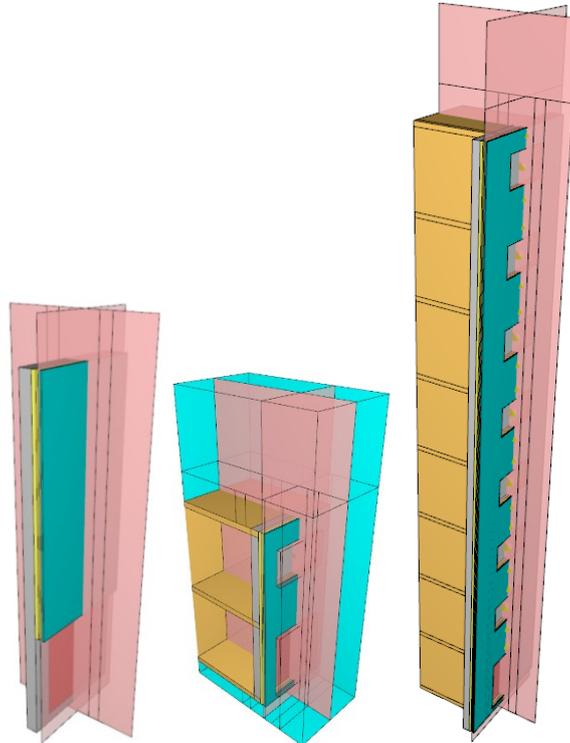


Figura 5.13: Posizionamento delle slices nei modelli in PyroSim

Sono state anche impostate delle *3D slices* di temperatura e *w-velocity*, ma non sono state poi prese in considerazione per le analisi e i confronti perché ci si è focalizzati sulle temperature all'interno dell'intercapedine e sulle temperature superficiali degli elementi della facciata.

I parametri delle simulazioni, comuni a tutti i modelli, hanno previsto:

- il tempo iniziale: 0 secondi;
- il tempo finale: 300 o 600 secondi, a seconda della simulazione;
- la tipologia o modalità di simulazione (*simulation type – simulator*): *Very Large-Eddy Simulation (VLES)*;
- *Output* con flag su *enable 3D smoke visualization* e *smoke quantity: soot density (default)*;
- *Output file write intervals* con *restart* a 100 s e *3D slice* ogni 0,25 s.

### 5.3. I risultati

Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti, a partire dalle *slices* che rappresentano la distribuzione della temperatura e della velocità del fluido in direzione verticale (*w-velocity*). Successivamente, vengono riportate le *color maps* relative alle temperature superficiali (*wall temperature*), con particolare attenzione all'isolante sulla parete interna dell'intercapedine e al rivestimento, sia sul lato interno dell'intercapedine che sul lato esterno. Dopodiché, si riportano i grafici ottenuti dalle sonde, strato per strato e/o quota per quota. Per alcuni dei modelli, come anticipato, ci sono confronti tra le casistiche. Infine, ove necessario, sono stati riportati commenti e osservazioni.

#### 5.3.1. La facciata ventilata continua combustibile – modello 5

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura e *w-velocity*.

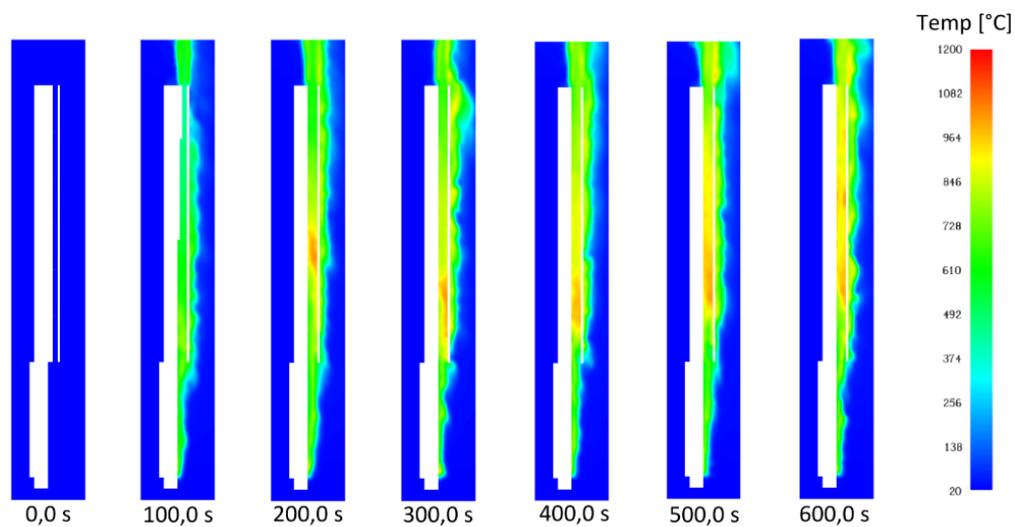


Figure 5.14: *Slice\_x* di temperatura – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

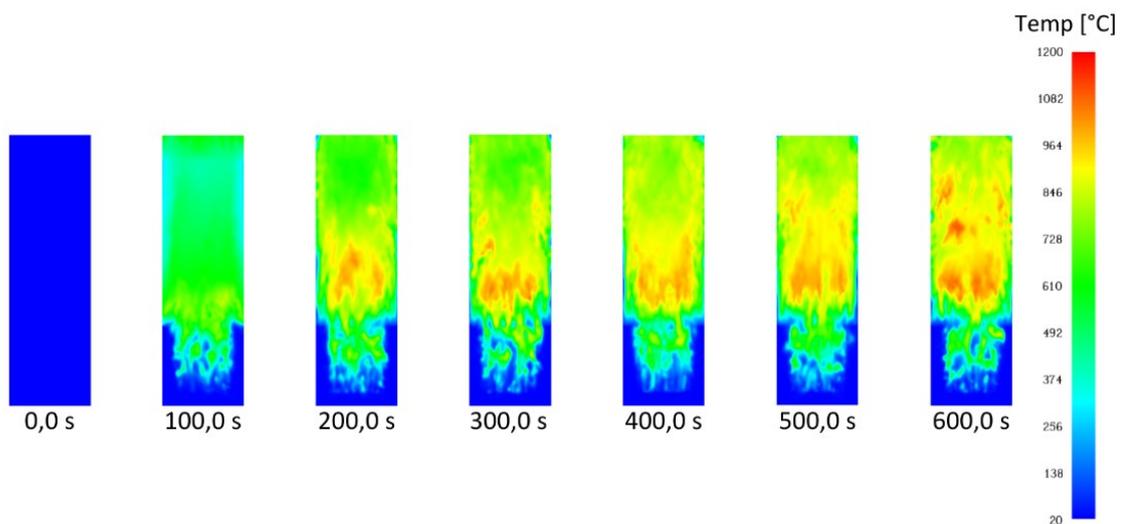


Figure 5.15: *Slice\_y* di temperatura – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

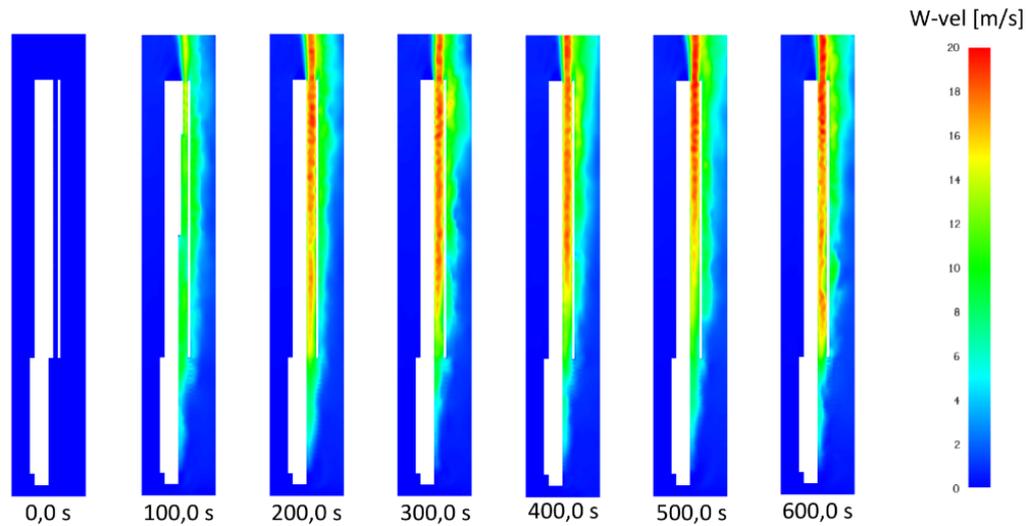


Figure 5.16: Slice\_x di w-velocity – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

Si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura superficiale dei vari layer della stratigrafia ottenute in output dalla simulazione.

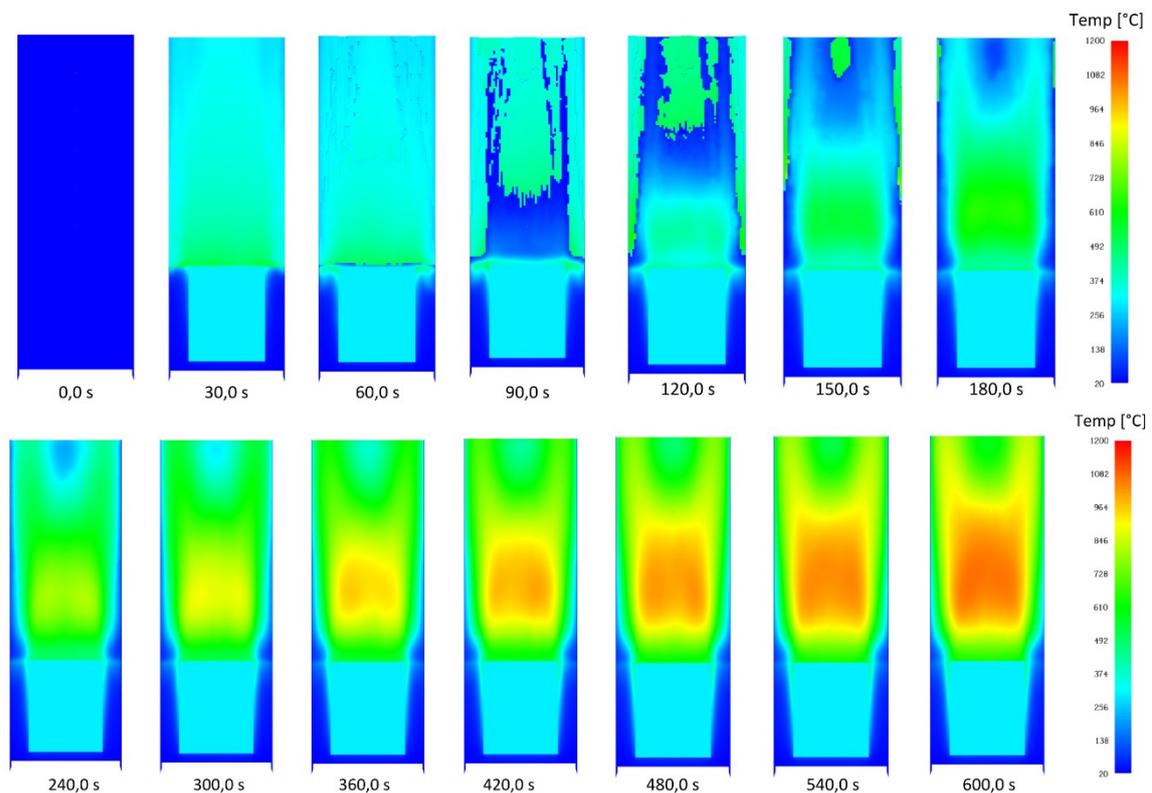


Figure 5.17: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

In questo caso, si può notare graficamente che l'isolante “scompare” perché partecipa completamente alla combustione prima ancora che la simulazione raggiunga metà del processo.

Si vede più precisamente l'istante in cui le varie porzioni dell'isolante partecipano completamente al processo di combustione nei grafici successivi di temperatura in funzione del tempo (in particolare si veda Figura 5.21).

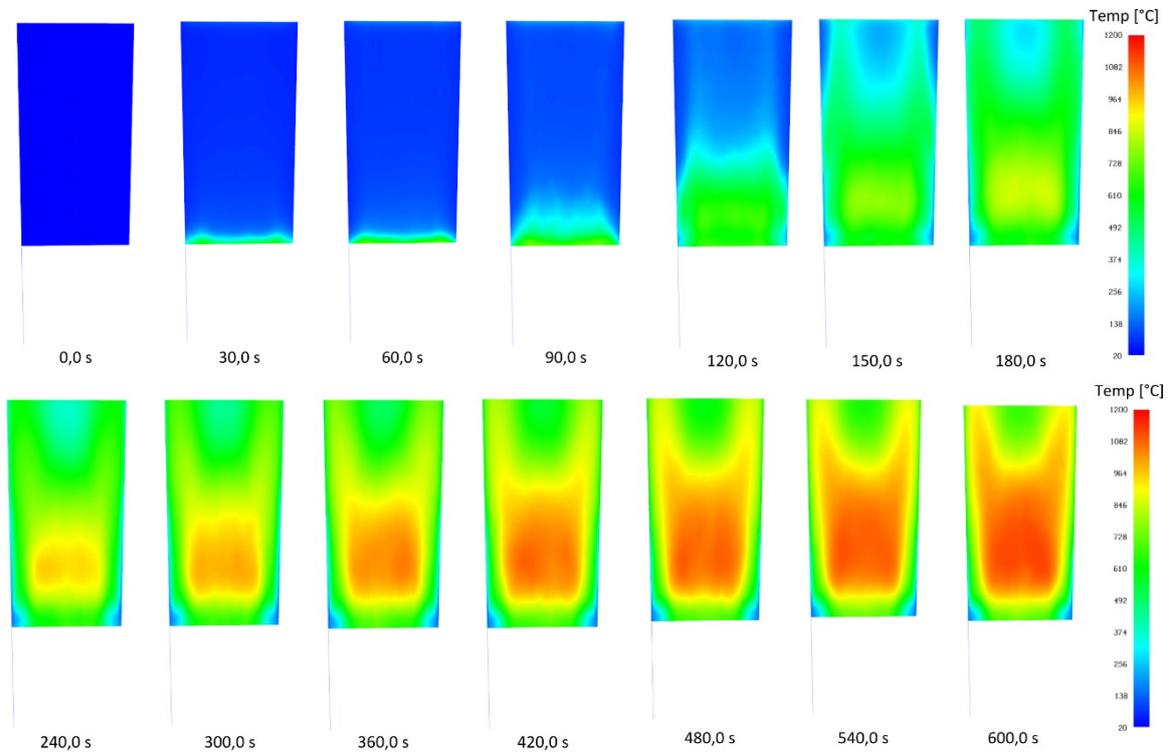


Figure 5.18: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

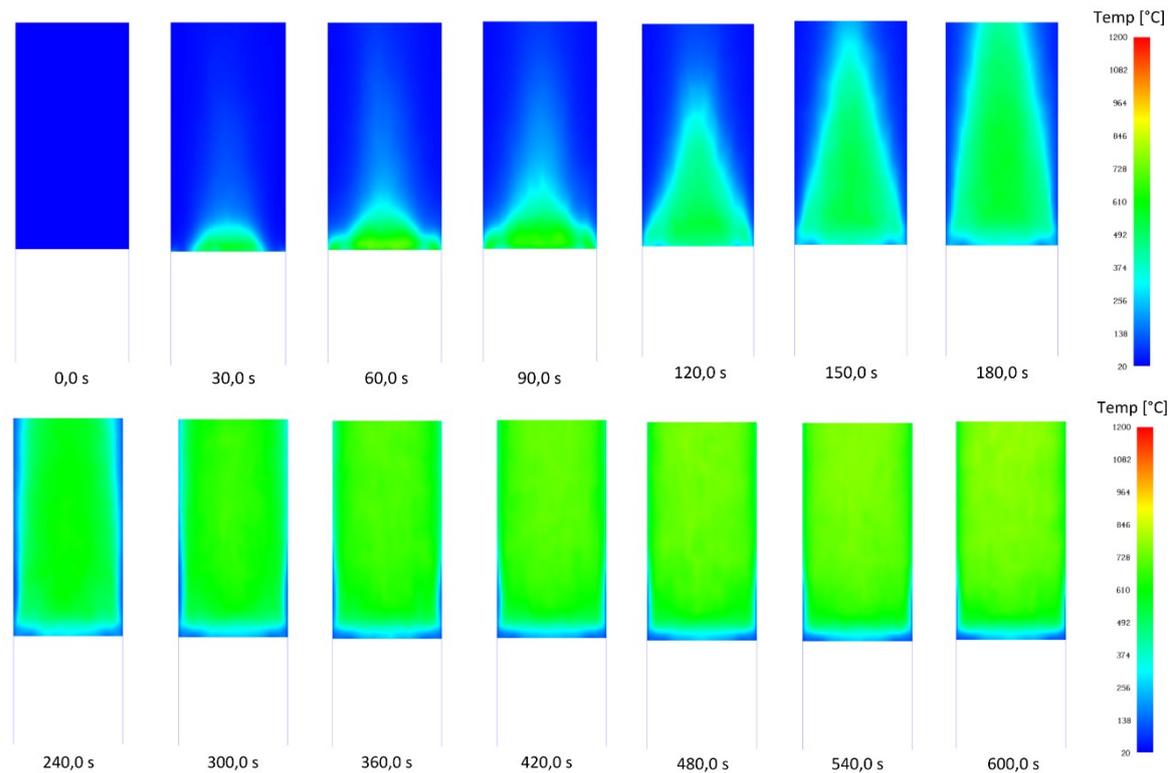


Figure 5.19: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)

Dalle immagini precedenti, si può apprezzare l'evoluzione e l'andamento del fenomeno in termini di temperature nel tempo durante la propagazione.

Si osservi la forma del *plume* delle temperature, coerente con quanto studiato e trovato in letteratura.

Inoltre, da queste immagini si può capire l'ordine di grandezza delle temperature raggiunte nel corso dell'evoluzione del fenomeno, in tutte le parti e in tutti gli strati costituenti la stratigrafia del sistema della facciata.

Per avere dei dati analitici, però, si guardano i risultati ottenuti dalle sonde.

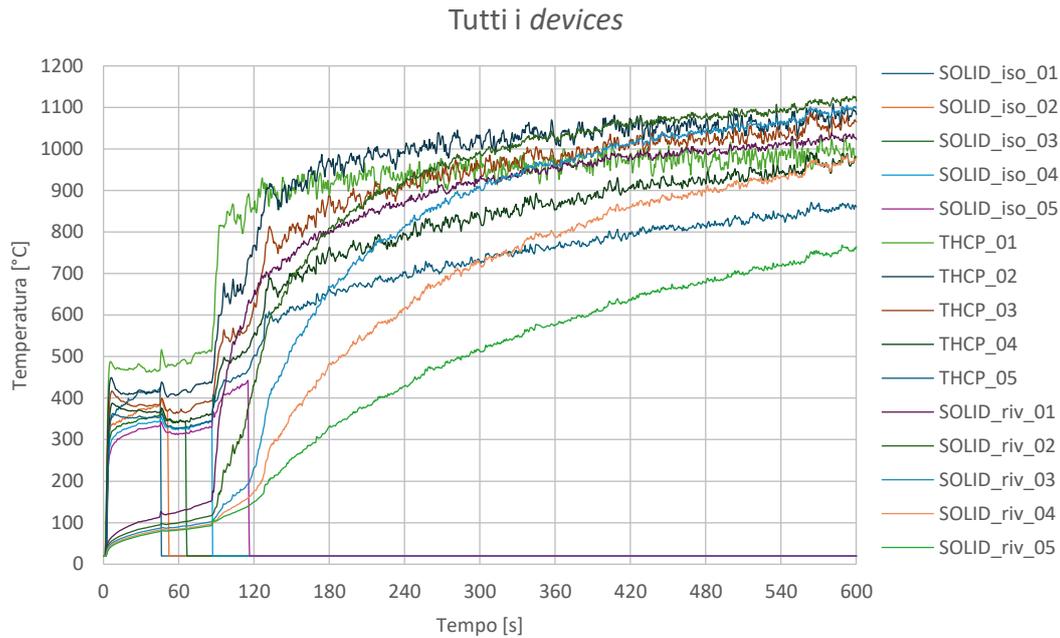


Figura 5.20: I risultati di tutti i devices dal modello di facciata ventilata continua combustibile – modello 5

Data la complessità dei risultati in output, i dati delle sonde sono stati analizzati prima in base allo strato della stratigrafia di pertinenza e poi a parità di posizionamento, ossia a parità di quota.

Si osserva che quasi tutti gli andamenti presentano delle oscillazioni. Questo non deve allarmare il progettista o il lettore, poiché tali comportamenti a zig-zag sono dovuti al calcolo di FDS e riflettono la precisione e l'accuratezza dei risultati. Aumentando le iterazioni, variando la mesh e il suo passo, variando la tipologia di simulazione e altri parametri, tali oscillazioni possono aumentare o diminuire, infittirsi o diradarsi, manifestare un'ampiezza più o meno marcata.

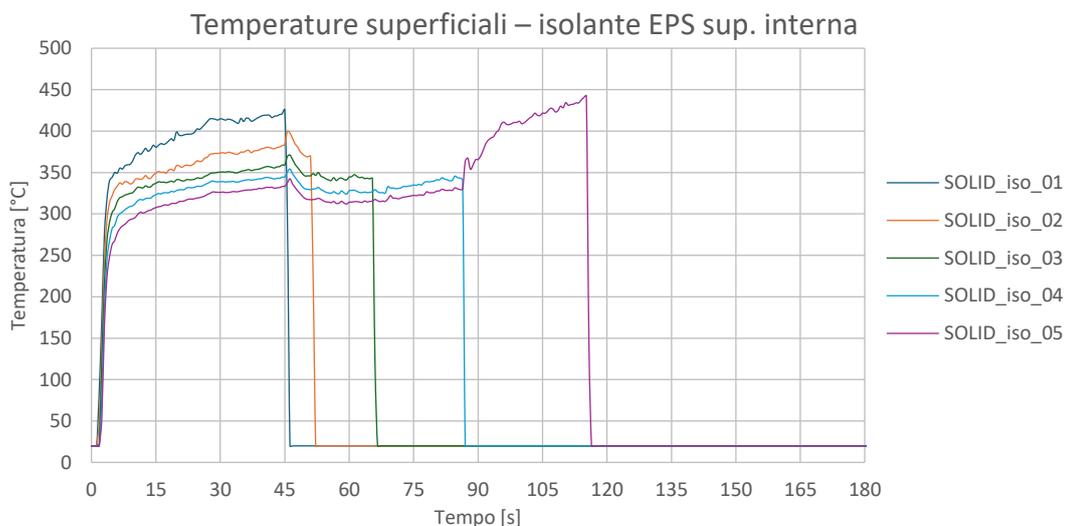


Figura 5.21: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento combustibile – modello 5

Nella Figura 5.21 si può notare un crollo delle temperature nei vari andamenti dato dalla completa partecipazione dell'isolante combustibile al processo di combustione. Questo corrisponde alla "scomparsa" del materiale di isolamento apprezzabile nelle precedenti Figure 5.17. Le temperature finali si attestano a 20°C per via del impostazioni di default delle sonde nel software PyroSim.

Si noti che gli andamenti si discostano di poche decine di gradi celsius e sono molto simili per tutte le sonde tra gli 0 secondi e i 45 secondi. Successivamente, man mano tutto il materiale brucia e partecipa totalmente alla combustione, ma gli andamenti continuano ad evidenziare lo stesso tipo e forma di sviluppo delle temperature, sempre a meno di piccoli scostamenti dell'ordine di decine di gradi celsius.

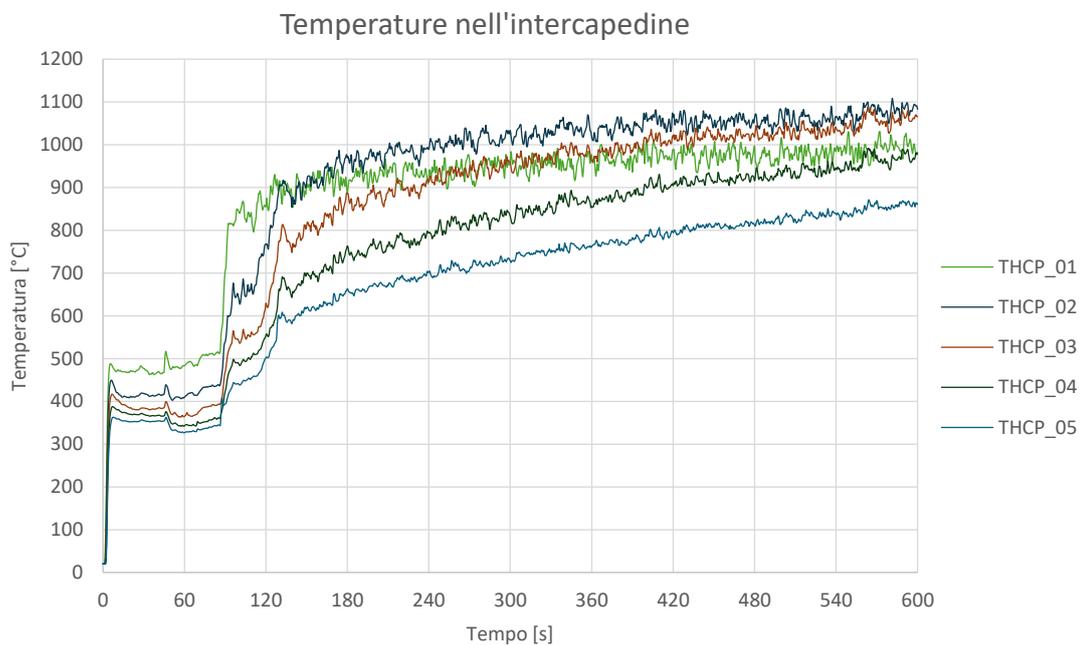


Figura 5.22: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 5

In Figura 5.22 si osserva nuovamente che l'andamento delle temperature è simile per tutte le termocoppie con scostamenti più ampi rispetto a quelli riscontrati in Figura 5.21, soprattutto dopo 90 secondi. Nell'intorno di 90 secondi, infatti, si può notare un flesso nell'andamento delle temperature che corrisponde certamente al flashover dell'incendio e ad un aumento della velocità di crescita delle temperature, riscontrabile dall'aumento della pendenza degli andamenti.

Dopo circa 135-140 secondi si nota che tale pendenza diminuisce, di conseguenza diminuisce la velocità di crescita delle temperature. La temperatura si attesta a valori compresi tra i 980°C e i 1080°C per le termocoppie 1, 2, 3 e 4. Mentre per la termocoppia 5, la più distante dal burner e la più prossima alla sommità della facciata, si hanno temperature finali dell'ordine dei 860°C.

Anche in questo caso, la similarità degli andamenti delle temperature nel tempo è molto evidente. Tuttavia, l'unico trend di dati leggermente differente è quello dato dalla

termocoppia 1. Tale sonda, in effetti, è posizionata ad 1 metro di distanza dal *burner* e, data la sua collocazione, ci si aspetterebbe risultati in termini di temperature molto più alte, coerenti con quanto si riscontra nei primi 120-130 secondi di simulazione. Questo non accade e, quindi, si osserva un aspetto molto importante: si apprende, infatti, che le temperature più alte non si riscontrano in prossimità dell'origine dell'incendio ma a distanza di qualche metro (si vedano le termocoppie 2 e 3).

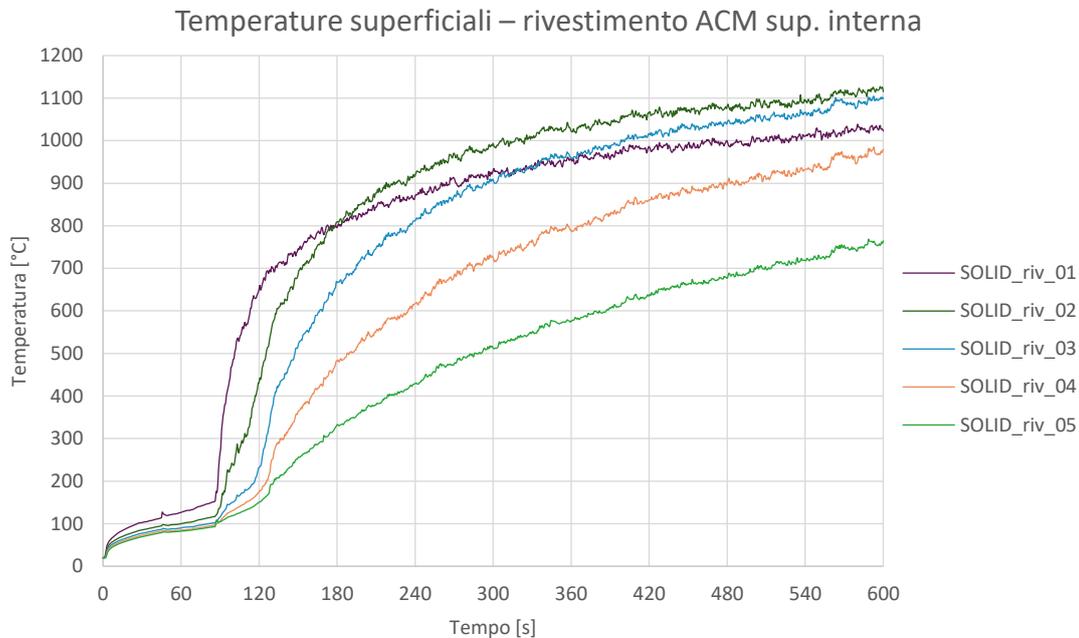


Figura 5.23: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 5

In primo luogo, si osserva che a differenza dell'isolante il rivestimento, sebbene sia anch'esso combustibile, non partecipa completamente alla combustione durante l'incendio.

Anche in questo caso, in Figura 5.23 si nota immediatamente la similarità degli andamenti delle temperature nel tempo. Da 0 secondi a 90 secondi si riscontra quasi lo stesso andamento, a meno di lievissime differenze in termini di temperature. Poi, dopo il flashover, si nota un incremento della pendenza degli andamenti, ossia un aumento della velocità di crescita delle temperature. Da qui gli scostamenti tra i dati delle sonde crescono notevolmente, con differenze anche dell'ordine di 100, 150 o 200°C.

Dopo circa 135-140 secondi, anche in questo caso si nota che la pendenza dei trend diminuisce, di conseguenza diminuisce la velocità di crescita delle temperature. La temperatura si attesta a valori compresi tra i 980°C e i 1100°C per le sonde 1, 2, 3 e 4. Sono valori anche più alti rispetto a quelli di Figura 5.22 perché per quanto riguarda il rivestimento si tratta di materiale solido, mentre per le termocoppie nell'intercapedine si registra ciò che accade nel fluido aria. Mentre per la sonda 5, la più distante dal *burner* e la più prossima alla sommità della facciata, si hanno temperature finali dell'ordine dei 770°C.

Il fatto che tale temperatura sia più bassa non deve stupire: rispetto al caso precedente, si tratta di un materiale solido che reagisce in maniera differente al fenomeno dell'incendio e, in più, interagisce anche con l'aria, sia quella presente nell'intercapedine, sia quella di apporto proveniente dall'apertura della struttura della facciata in sommità.

In ogni caso, si osserva gli andamenti di Figura 5.23. I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 5 sono totalmente coerenti con quelli di Figura 5.22, soprattutto il trend della sonda 1 che mostra lo stesso comportamento della termocoppia 1.

A questo punto, i dati dei *devices* sono stati analizzati a parità di posizione, ossia a parità di quota.

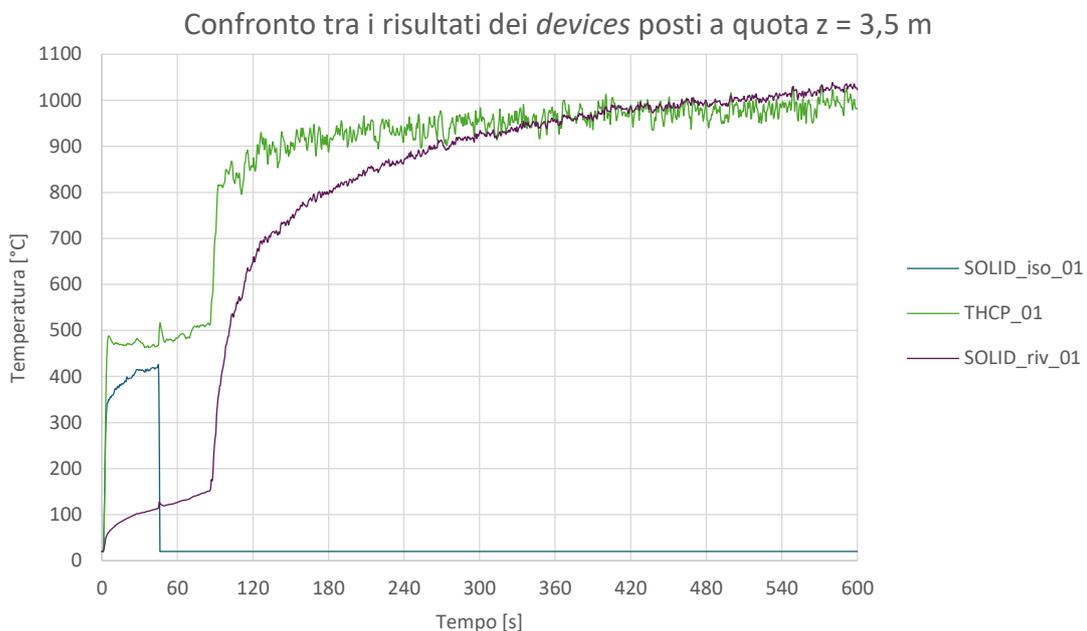


Figura 5.24: Le temperature dei *devices* ad 1 metro dal burner – modello 5

Confronto tra i risultati dei *devices* posti a quota  $z = 4,5$  m

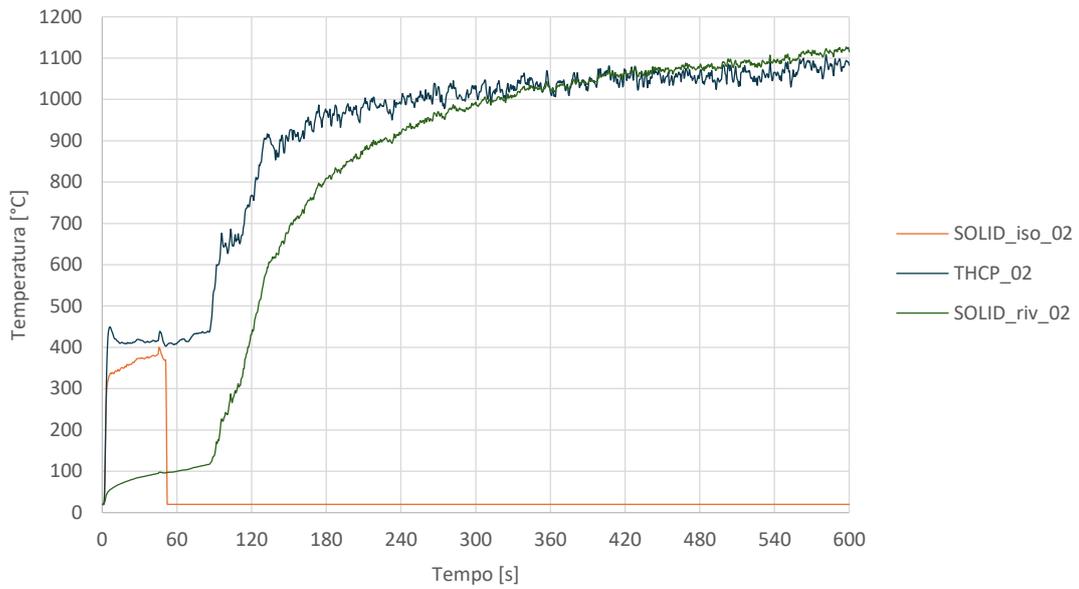


Figura 5.25: Le temperature dei *devices* a 2 metri dal burner – modello 5

Confronto tra i risultati dei *devices* posti a quota  $z = 5,5$  m

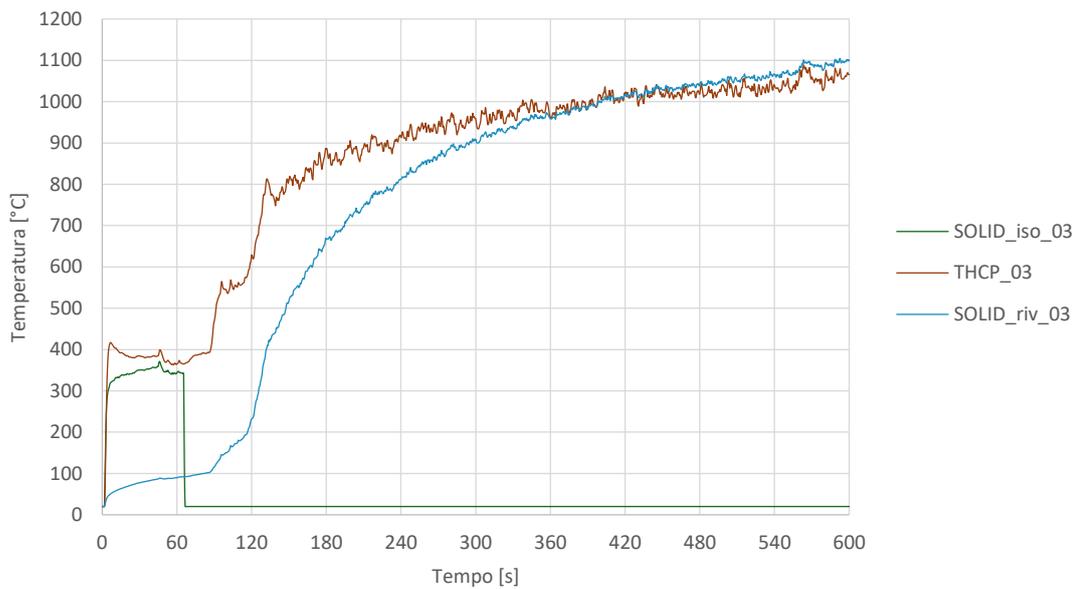


Figura 5.26: Le temperature dei *devices* a 3 metri dal burner – modello 5

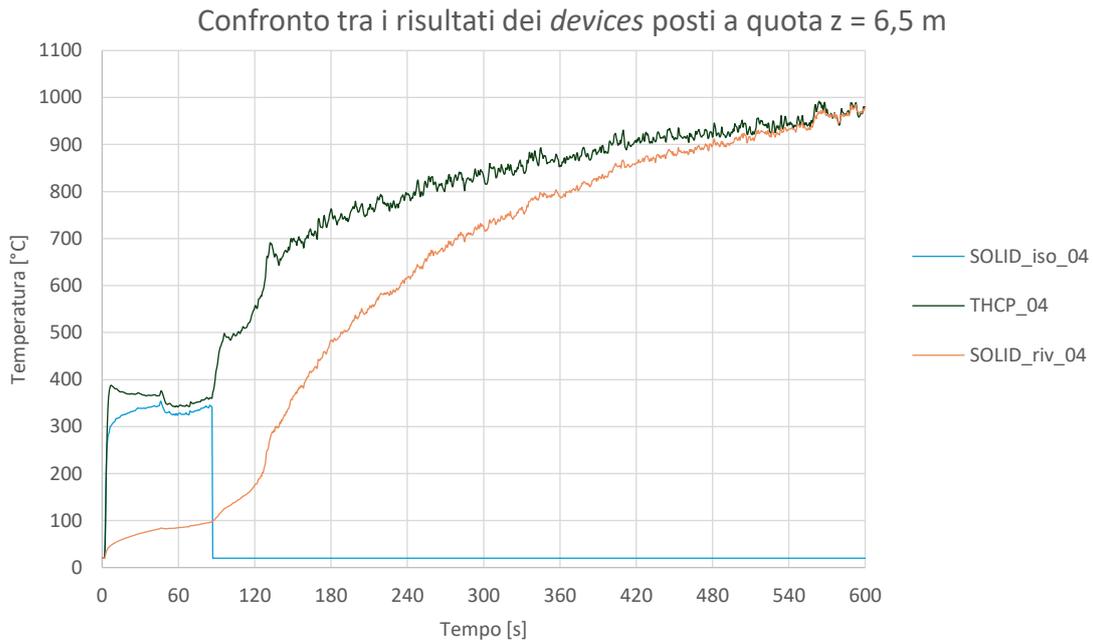


Figura 5.27: Le temperature dei *devices* a 4 metri dal burner – modello 5

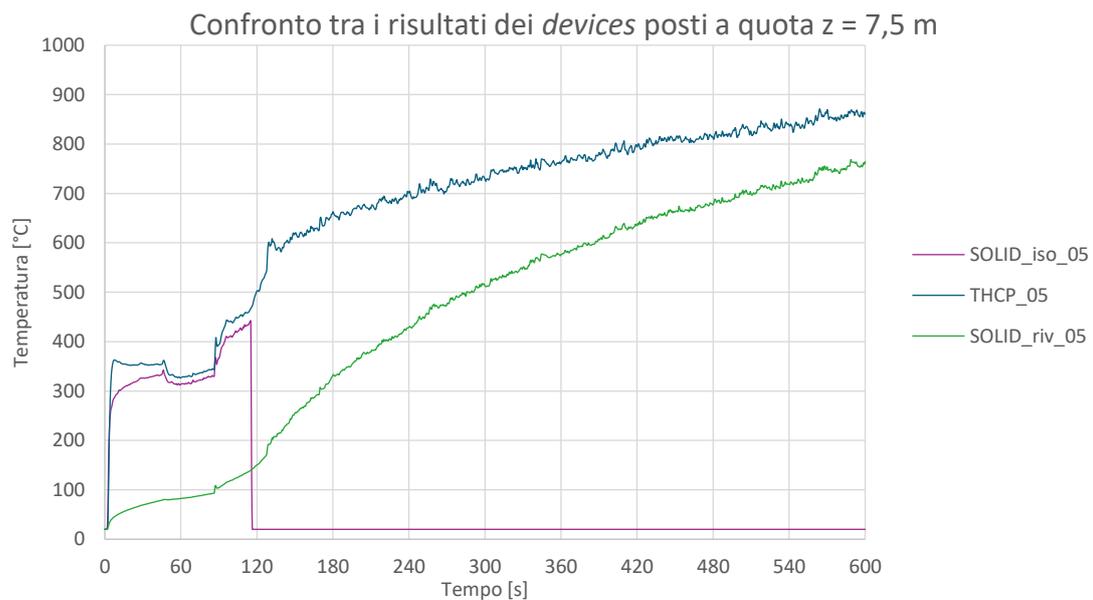


Figura 5.28: Le temperature dei *devices* a 5 metri dal burner – modello 5

Disponendo i risultati in questi grafici, è stato possibile notare ancora di più la similarità tra termocoppie e sonde appartenenti al rivestimento. In effetti, soprattutto per i grafici della Figura 5.24, della Figura 5.25, della Figura 5.26 e della Figura 5.27, si vede che termocoppie e sonde del rivestimento raggiungono pressoché le stesse temperature finali. Al contrario, nella Figura 5.28 vi è uno scostamento marcato tra termocoppia e sonda del rivestimento dovuto, come già detto, alla posizione più lontana dal *burner* e vicina all'apertura in sommità della facciata ventilata, dove vi è sicuramente apporto di aria e un'interazione diversa con tale fluido.

Inoltre, si osserva un fenomeno importante: gli andamenti delle sonde dell'isolante e quelli delle termocoppie nell'intercapedine, soprattutto nelle ultime quattro immagini (Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27 e Figura 5.28), manifestano una sorta di aderenza, via via più marcata a mano a mano che ci si allontana dal *burner*. Questo comportamento potrebbe essere dovuto sia all'effetto trincea sia all'effetto del layout. Il primo, l'effetto trincea è provocato all'interazione di due fenomeni, cioè l'effetto Coandă e il flashover, come già visto nella sezione 3.3. Invece, il secondo effetto deriva sia dalla geometria e dalla configurazione della facciata ventilata, sia dalla contemporanea presenza del fluido aria e del materiale isolante, i quali sono sicuramente molto coinvolti nel processo di combustione.

Dopo che l'isolante è venuto a mancare, "scomparendo" per via della sua completa partecipazione al fuoco, si nota in questi grafici che si ha un aumento di pendenza più o meno evidente, ossia un aumento della velocità di crescita in termini di temperature. Questo accade perché, venendo a mancare l'isolante, l'intercapedine si allarga e ciò favorisce la propagazione dell'incendio.

### 5.3.2. La facciata ventilata continua incombustibile – modello 7

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura e *w-velocity*.

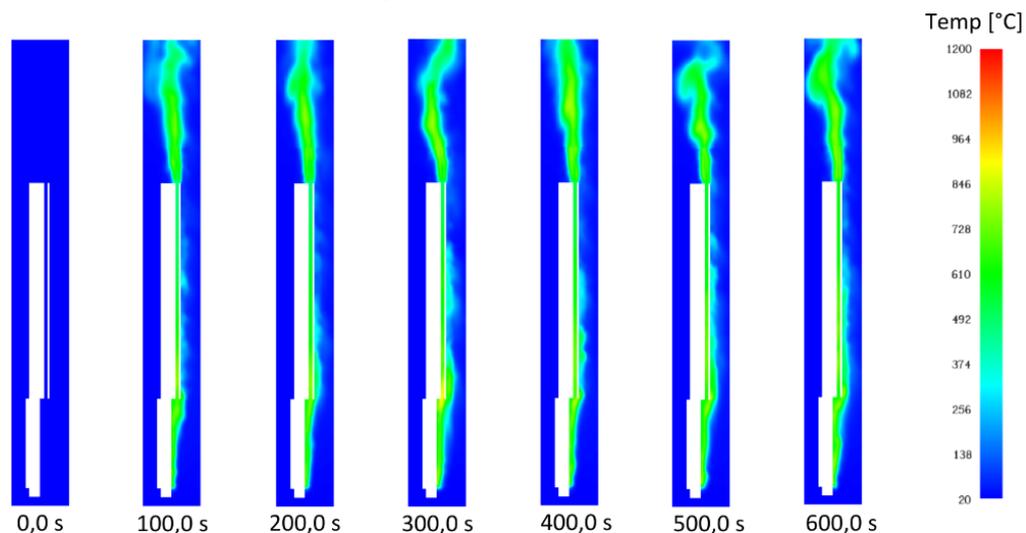


Figure 5.29: *Slice\_x* di temperatura – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

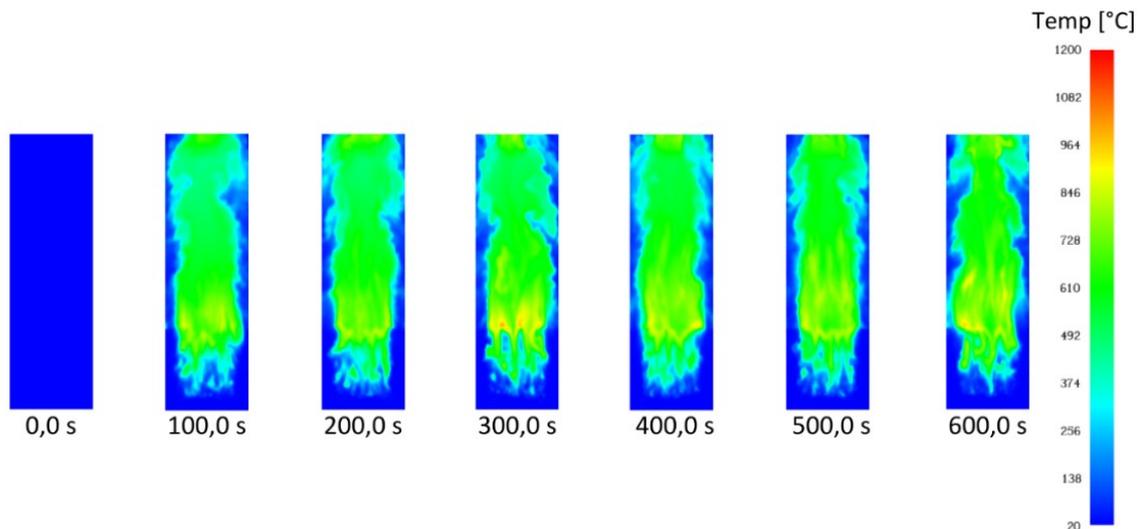


Figure 5.30: Slice\_y di temperatura – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

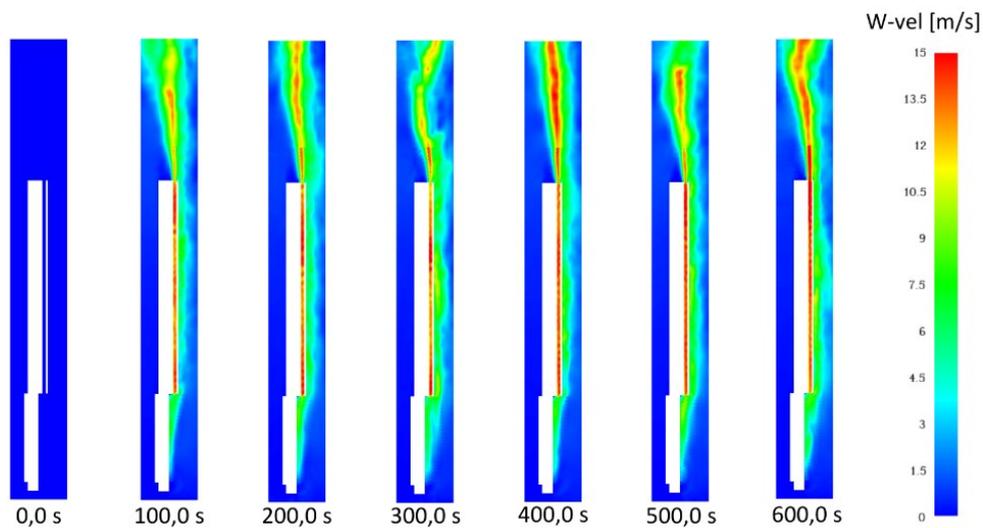


Figure 5.31: Slice\_x di w-velocity – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

Se si confrontano le Figure 5.29 con le Figure 5.14 e le Figure 5.30 con le Figure 5.15, si nota un abbattimento delle temperature se si adotta la facciata realizzata con materiali incombustibili, conforme alle prescrizioni normative del Codice.

Se si confrontano le Figure 5.31 con le Figure 5.16, si possono notare delle differenze nelle velocità del flusso del fluido aria nell'intercapedine. Ciò potrebbe essere molto utile se si vuole studiare l'effetto camino, già precedentemente citato più volte nella presente trattazione. Tuttavia, per questo lavoro di tesi si è scelto di focalizzarsi solamente sull'andamento delle temperature per studiare l'incendio nelle facciate ventilate.

Si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

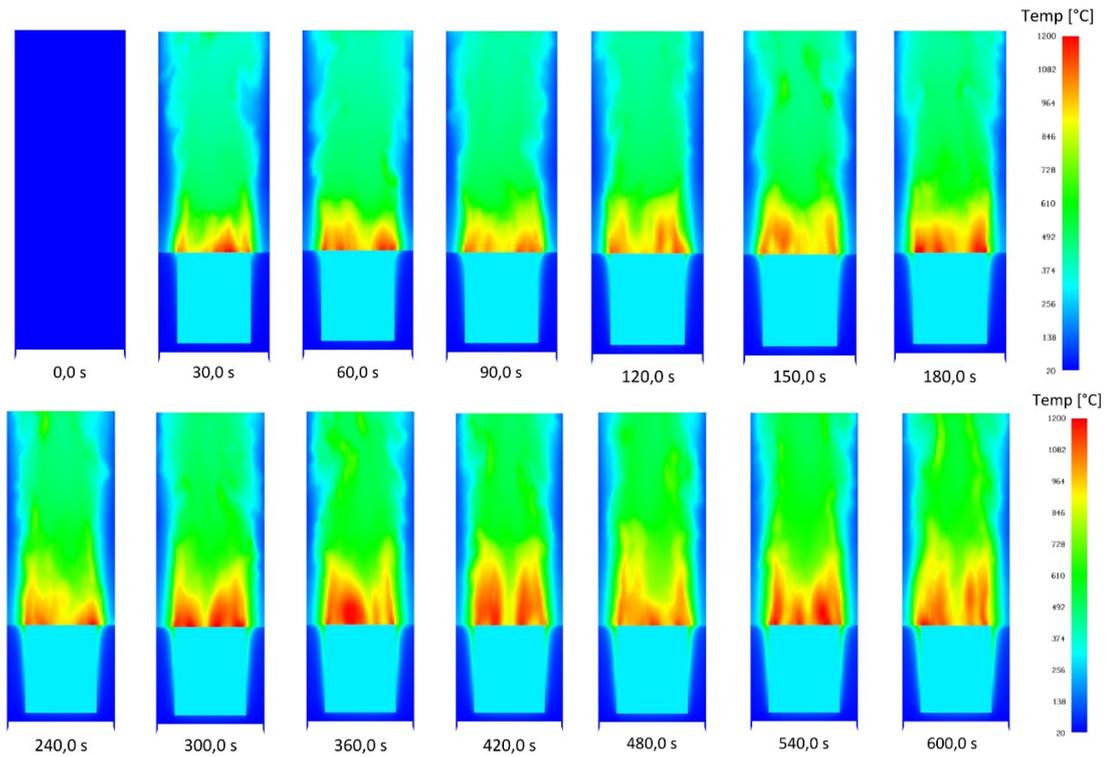


Figure 5.32: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

In questo caso, si noti che non vi è la scomparsa del materiale dell'isolamento poiché esso non brucia, quindi non partecipa completamente alla combustione come nel caso delle Figure 5.17. Si noti anche la diversa forma assunta dal *plume* delle temperature, riscontrabile anche nelle immagini successive.

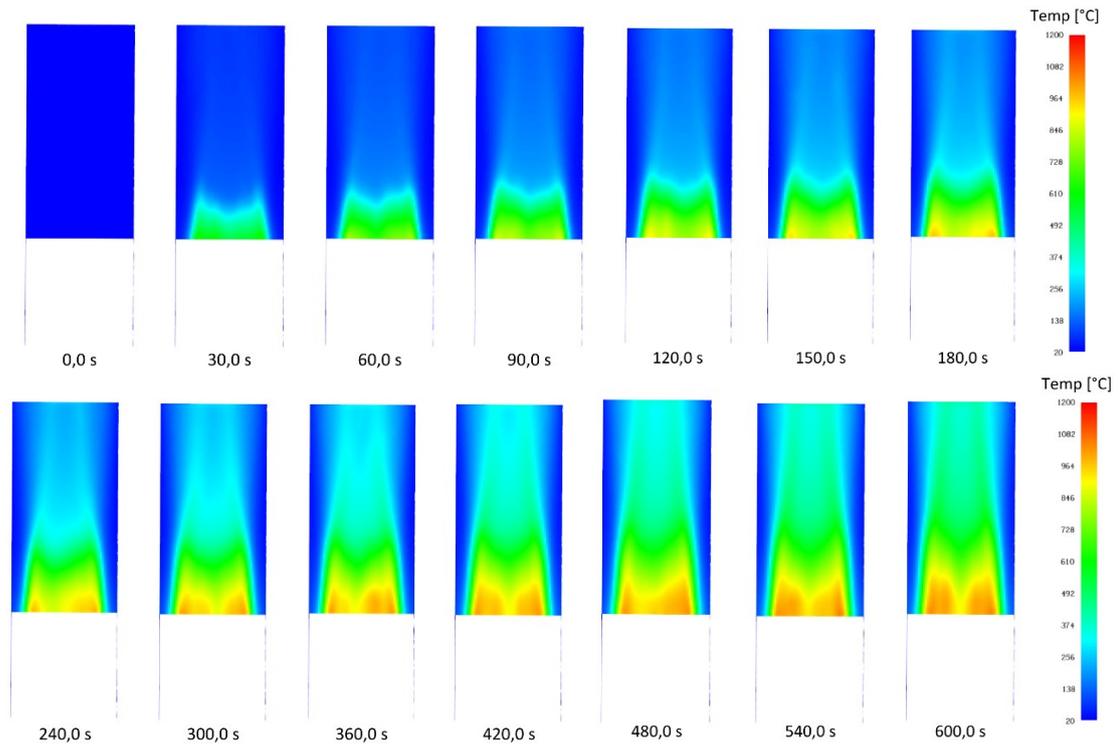


Figure 5.33: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

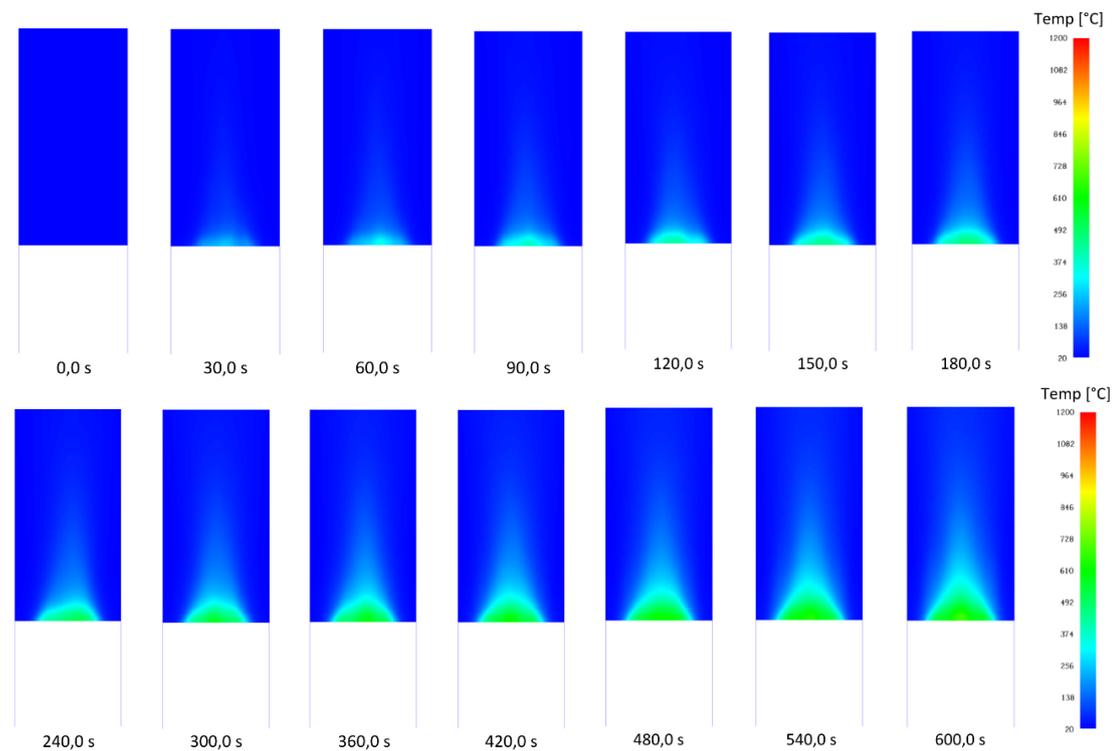


Figure 5.34: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7)

Se si confrontano le Figure 5.32 con le Figure 5.17, le Figure 5.33 con le Figure 5.18 e le Figure 5.34 con le Figure 5.19, si nota un *plume* delle temperature molto differente.

Come per il caso precedente, da queste immagini si può capire l'ordine di grandezza delle temperature raggiunte nel corso dell'evoluzione dell'incendio in tutte le superfici delle parti della stratigrafia del sistema della facciata.

Tuttavia, per avere dei dati analitici si guardano i risultati ottenuti dalle sonde.

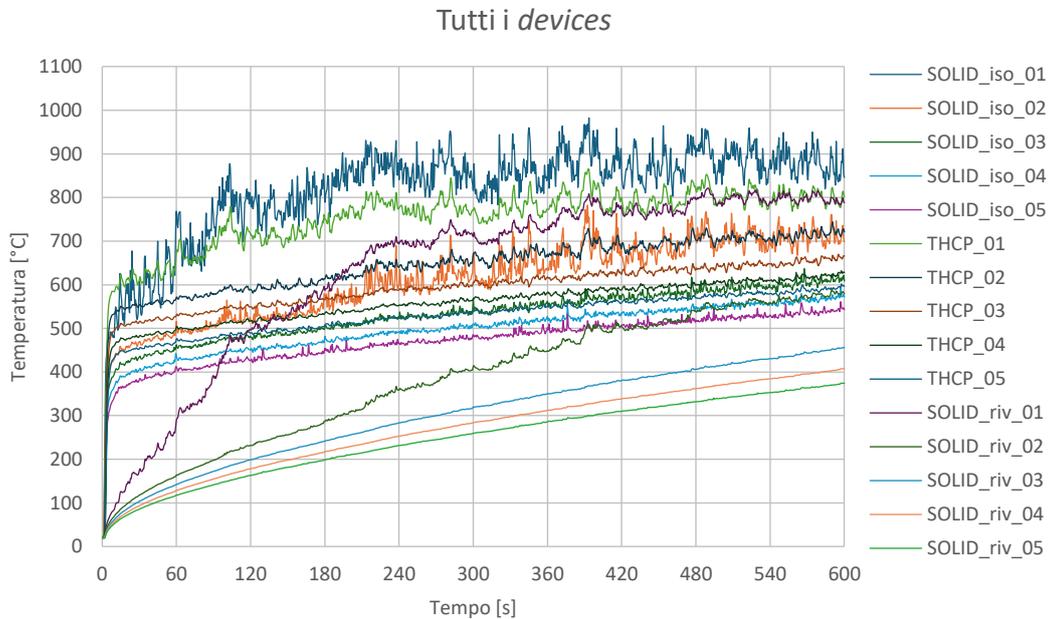


Figura 5.35: I risultati di tutti i devices dal modello di facciata ventilata continua incombustibile – modello 7

Data la complessità dei risultati in output, i dati delle sonde sono stati analizzati prima in base allo strato della stratigrafia di pertinenza e poi a parità di posizionamento, ossia a parità di quota.

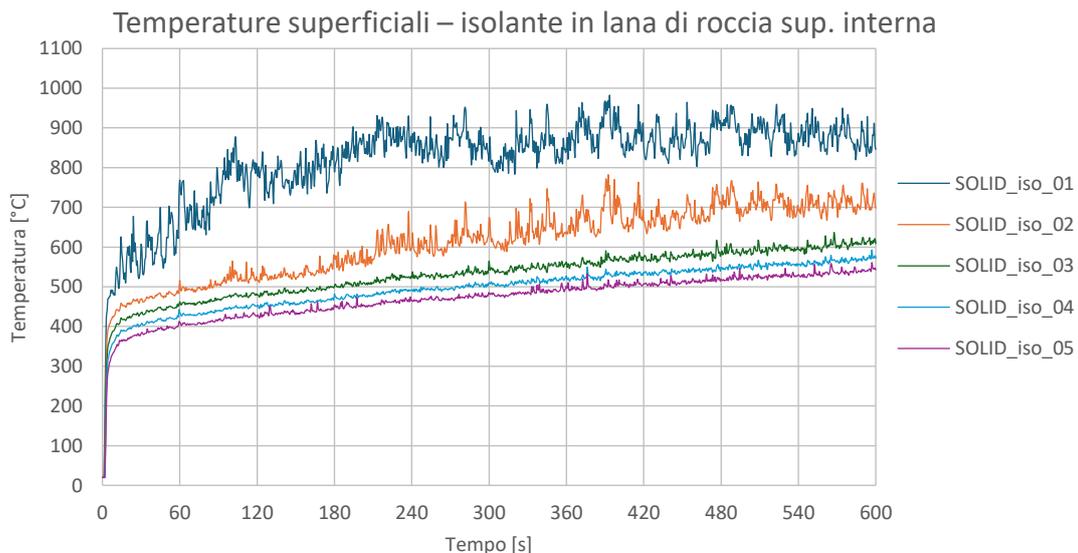


Figura 5.36: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento incombustibile – modello 7

Nella Figura 5.36 non ci sono crolli di temperatura perché il materiale è incombustibile e le sonde continuano a registrare dati per tutta la simulazione.

Anche in questo caso si nota una similarità negli andamenti.

I dati ottenuti dalla sonda 1, quella più vicina al *burner*, sono i più alti in termini di temperature, arrivando a temperature pari a circa 900°C. Questo comportamento è in linea con i risultati attesi dall'analisi, poiché intuitivamente è lecito assumere che la sonda più prossima al *burner* registri temperature più alte rispetto agli altri *devices* più lontani.

La sonda 2 ha un andamento quasi intermedio tra quello della sonda 1 e quello della sonda 3. La curva temperatura-tempo della sonda 2 segue i trend delle sonde 3, 4 e 5 fino ai 180-200 secondi circa; successivamente, il suo andamento è molto oscillante<sup>45</sup> come quello della sonda 1. Questo comportamento conferma l'osservazione fatta al caso precedente di facciata combustibile: le temperature riscontrate sono alte non solo in prossimità del *burner*, ma anche ad un paio di metri da esso.

Invece, i risultati delle sonde 3, 4 e 5 sono molto prossimi, con scostamenti dell'ordine di una decina di gradi celsius. Si ricorda che tali sonde sono più lontane dal *burner*, rispetto alle sonde 1 e 2.

Il grafico conferma quanto già visto dalle *color maps*, ovvero che le temperature raggiunte nel corso dell'incendio sono nettamente inferiori rispetto al caso precedente di facciata combustibile.

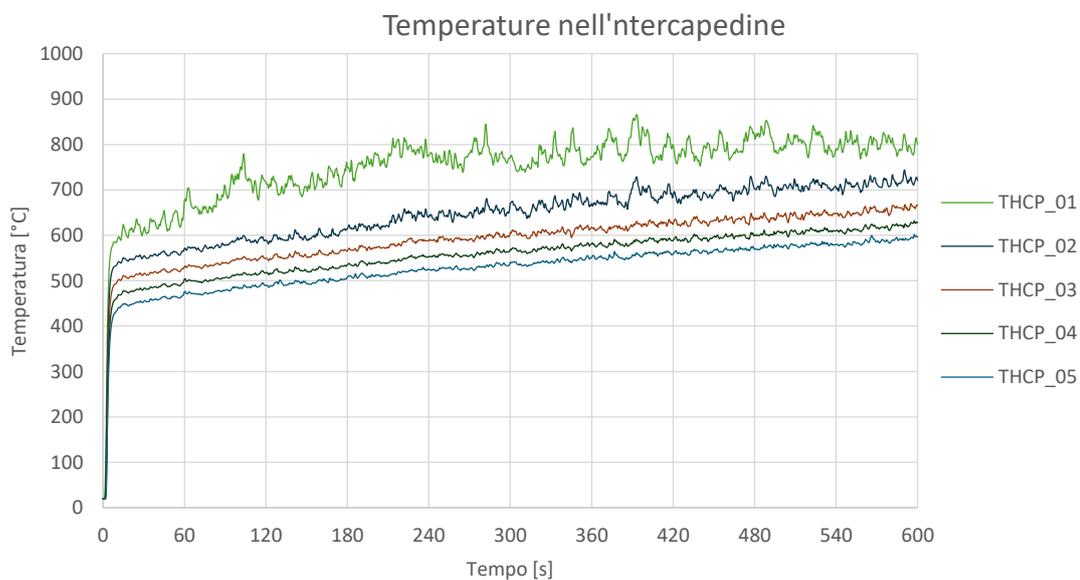


Figura 5.37: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 7

Per quanto riguarda la Figura 5.37, valgono analoghe considerazioni fatte per la Figura 5.36.

<sup>45</sup> Queste oscillazioni, come già detto, sono del tutto normali tra i risultati delle analisi FDS e sono sintomo di precisione e accuratezza.

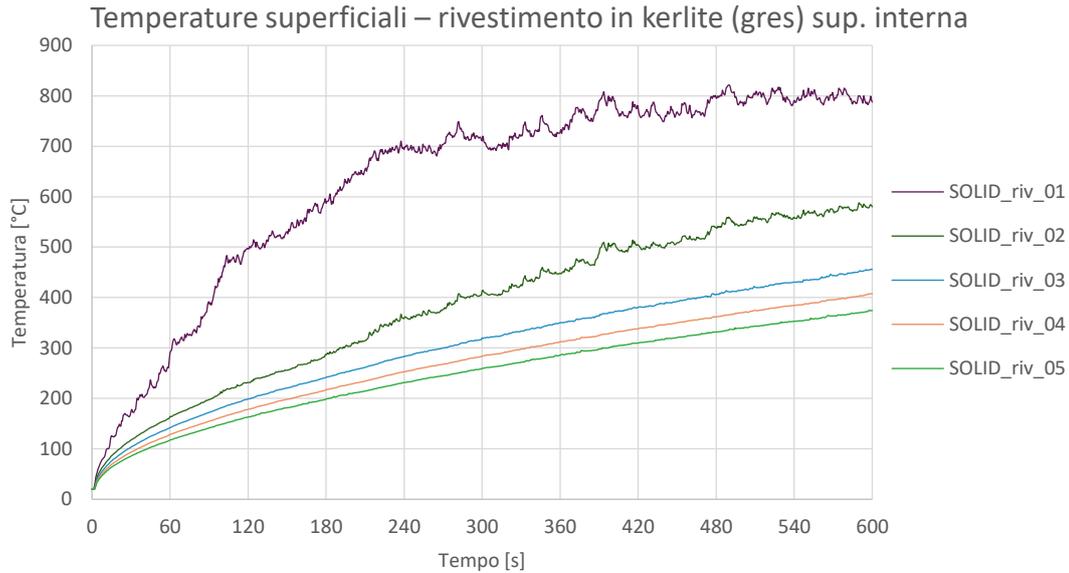


Figura 5.38: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 7

Per la Figura 5.38, valgono analoghe considerazioni di Figura 5.36.

Tuttavia, qui si osserva in maniera molto netta e marcata la differenza tra le sonde 1 e 2 del rivestimento rispetto alle altre, che sono molto simili tra di loro con differenze di qualche decina di gradi celsius. Tale comportamento risulta molto marcato per i materiali solidi dello strato isolante e del rivestimento nella Figura 5.36 e nella Figura 5.38, mentre si percepisce di meno nella Figura 5.37.

A questo punto, i dati dei *devices* sono stati analizzati a parità di posizione, ossia a parità di quota.

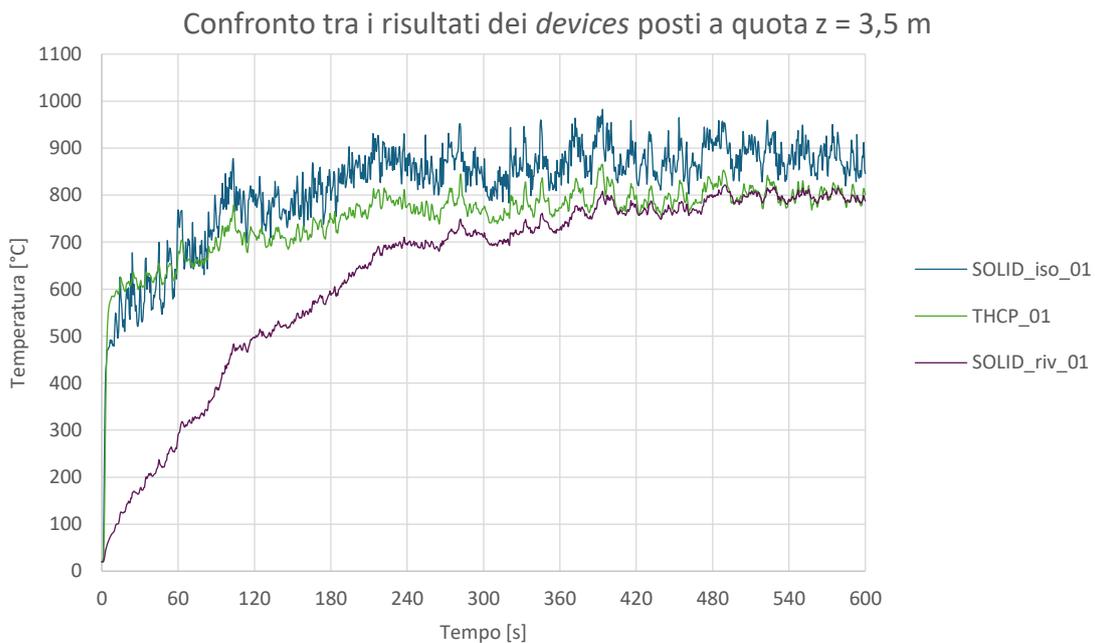


Figura 5.39: Le temperature dei *devices* ad 1 metro dal burner – modello 7

Confronto tra i risultati dei *devices* posti a quota  $z = 4,5$  m

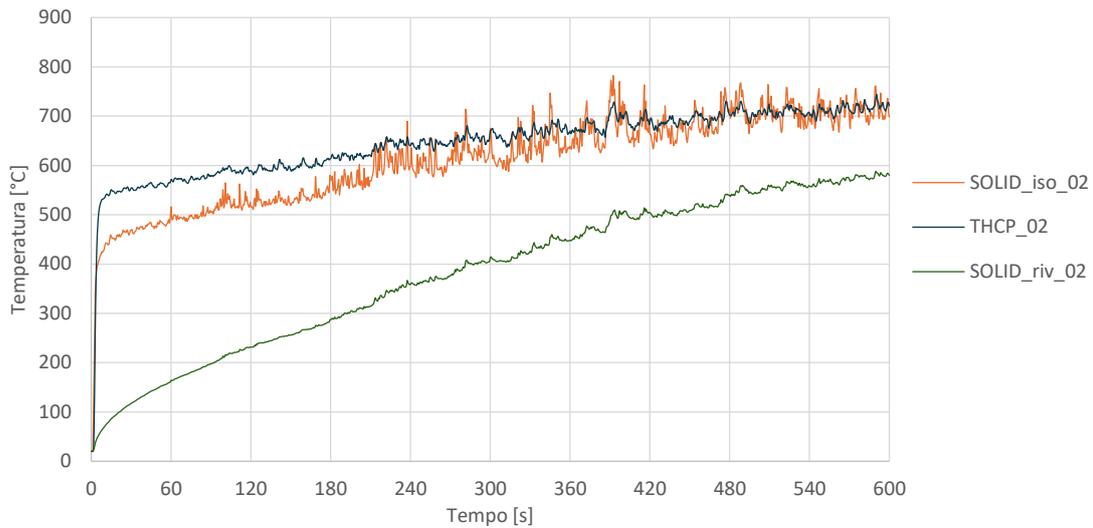


Figura 5.40: Le temperature dei *devices* a 2 metri dal burner – modello 7

Confronto tra i risultati dei *devices* posti a quota  $z = 5,5$  m

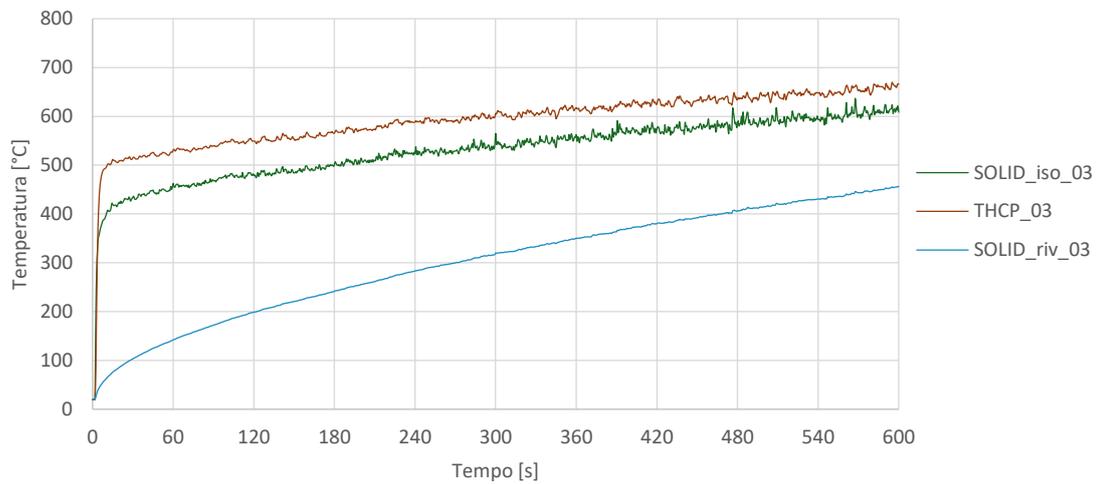


Figura 5.41: Le temperature dei *devices* a 3 metri dal burner – modello 7

Confronto tra i risultati dei *devices* posti a quota  $z = 6,5$  m

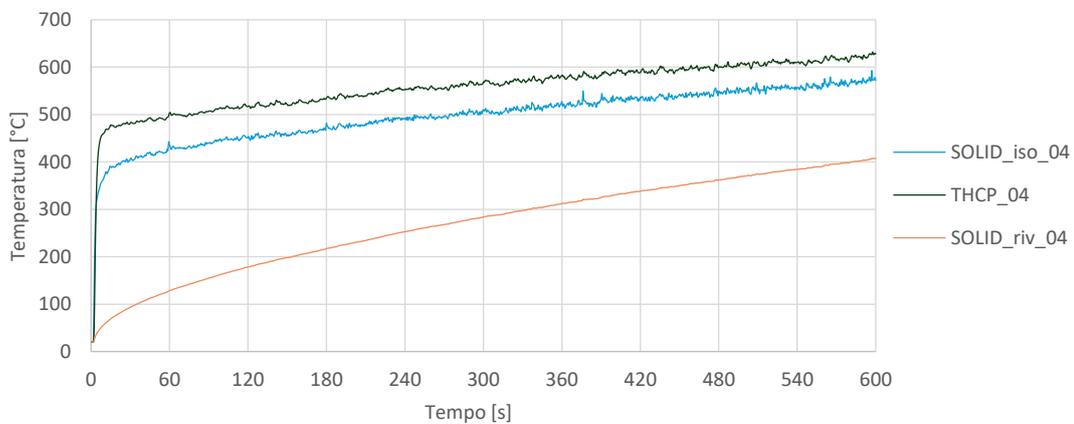


Figura 5.42: Le temperature dei *devices* a 4 metri dal burner – modello 7

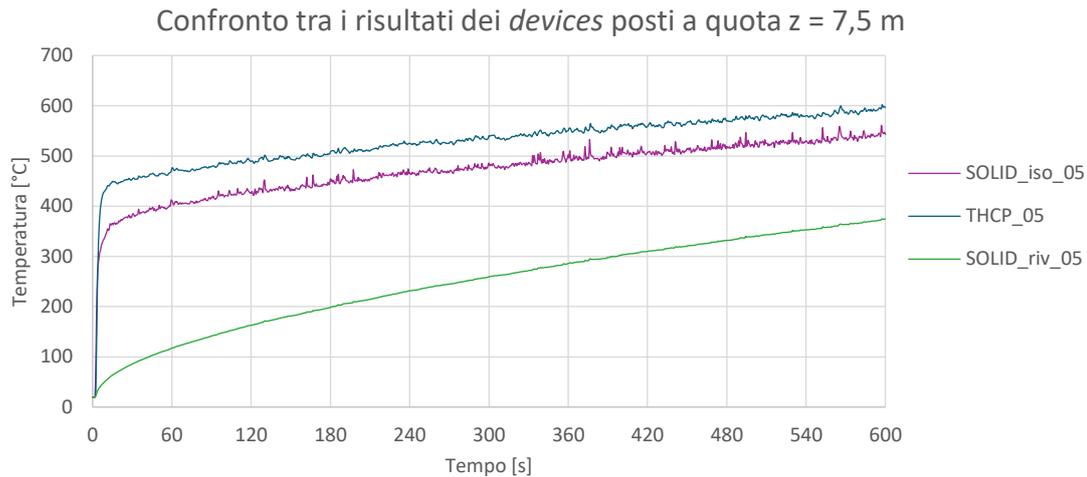


Figura 5.43: Le temperature dei *devices* a 5 metri dal burner – modello 7

Dalla Figura 5.39 si nota che isolante e intercapedine hanno andamenti molto prossimi, confermando il comportamento aderente notato nei grafici precedenti (si vedano Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27, Figura 5.28 e i commenti riportati dopo tali figure). Si noti che isolante e lama d'aria interagiscono fin da subito; al contrario, il rivestimento non manifesta tale interazione, perché distanziato rispetto all'isolante e per via dell'azione di protezione da parte della lama d'aria. Di certo, isolante, aria e rivestimento hanno temperature molto prossime dopo 300 secondi che si attestano tra i 800°C e i 900°C al massimo, con andamento quasi costante verso la fine della simulazione. Queste temperature massime sono quelle più alte in output anche data la vicinanza con il *burner*, poiché sono i risultati delle sonde più prossime al *fire*.

Dalla Figura 5.40 si nota nuovamente questa affinità tra l'andamento della sonda posta sull'isolamento, che registra la temperatura superficiale dello strato, e la termocoppia nell'intercapedine, che registra la temperatura interna della lama d'aria appunto. Il rivestimento, invece, manifesta a tale quota uno scostamento maggiore con gli altri due: già a 2 metri dal *fire* si ha un notevole abbattimento delle temperature rispetto agli strati di aria e isolante vicini, distanti solo 5 o 10 cm rispetto al punto di misura. Sicuramente ciò manifesta uno dei vantaggi nella scelta di una facciata ventilata di tipo incombustibile.

Per la Figura 5.41, la Figura 5.42 e la Figura 5.43 valgono le stesse osservazioni: le sonde dell'isolante e le termocoppie dell'intercapedine d'aria presentano andamenti di forma e evoluzione simili, con uno scostamento di circa 50-60°C; le sonde del rivestimento hanno un andamento completamente a sé rispetto alle sonde dell'isolamento e dell'intercapedine, mostrando una distanza marcata degli andamenti di temperatura e riflettendo l'effetto benefico di tale soluzione; man mano che ci si allontana dal *burner*, gli andamenti delle sonde 3, 4 e 5 del rivestimento hanno uno scostamento via via maggiore con gli andamenti delle sonde dell'isolante e dell'intercapedine.

### 5.3.3. Il confronto tra la facciata ventilata continua combustibile e incombustibile – modelli 5 e 7

#### Le sonde poste sullo strato di isolamento

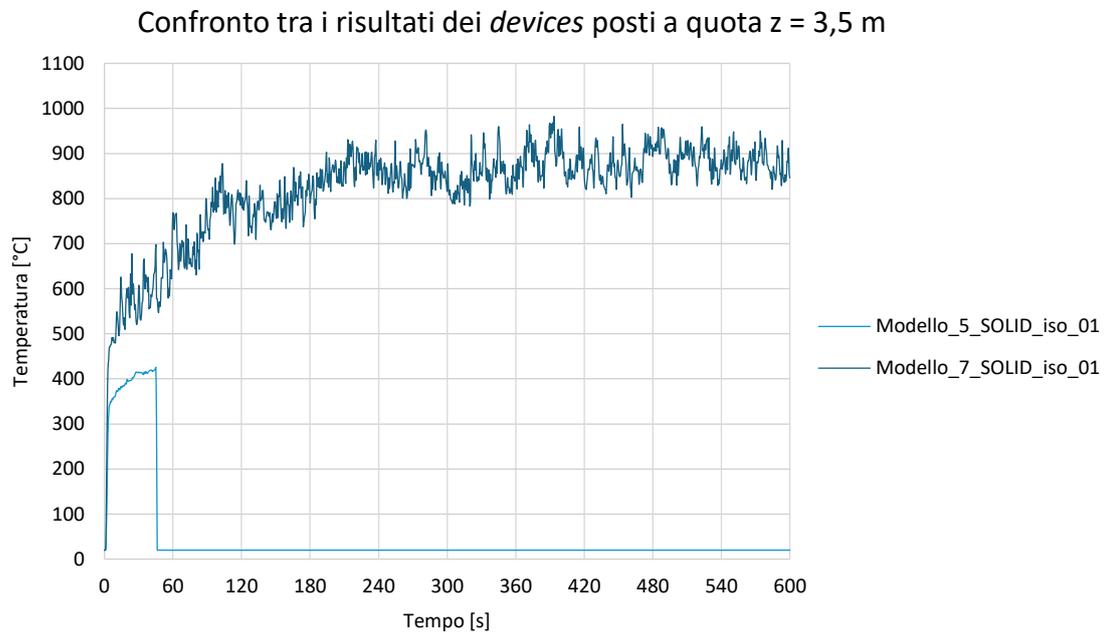


Figura 5.44: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

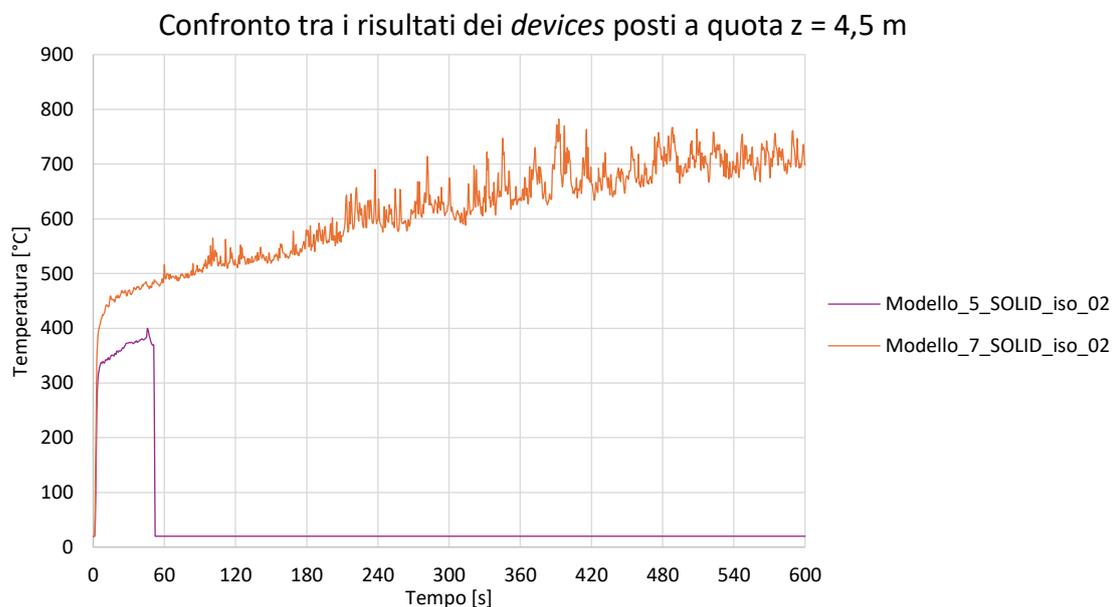


Figura 5.45: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 2 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

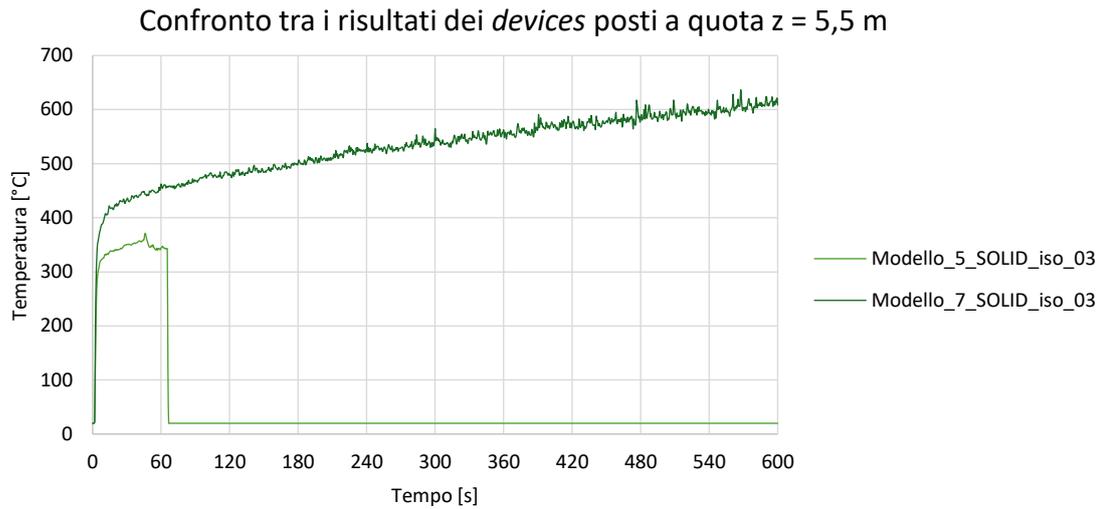


Figura 5.46: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

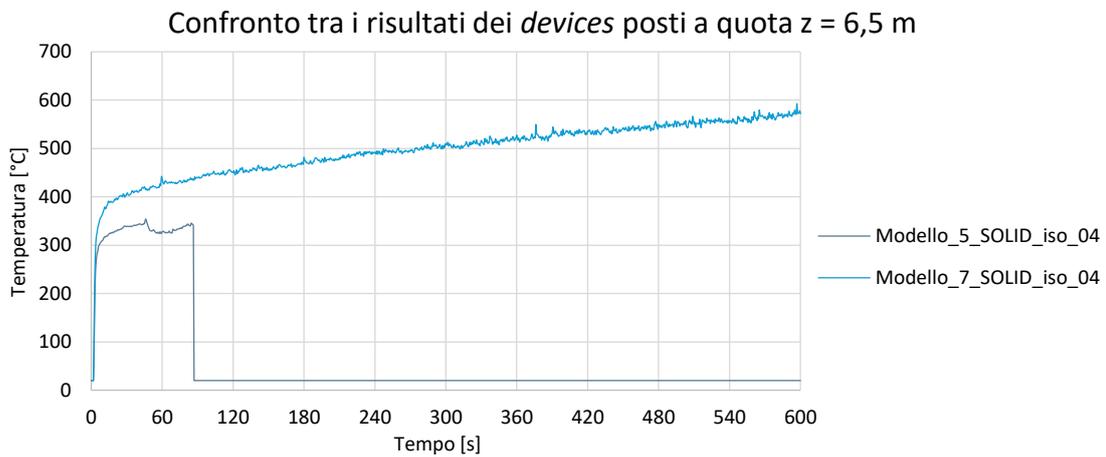


Figura 5.47: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 4 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

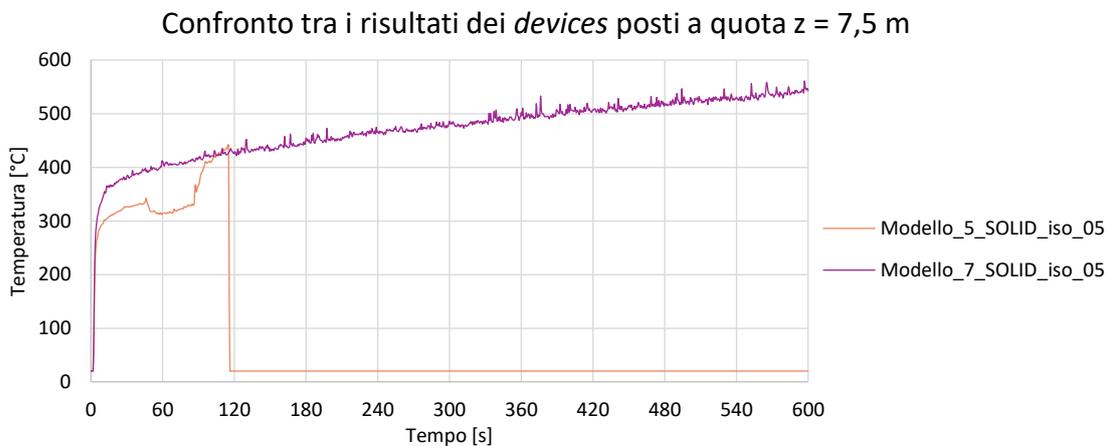


Figura 5.48: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

Dalle figure precedenti, si nota in maniera molto evidente che il comportamento al fuoco è molto differente: infatti, si tratta di materiali che hanno nature completamente opposte, combustibile per il modello 5 e incombustibile per il modello 7. Dai grafici si osserva che il materiale incombustibile, ovvero la lana di roccia, del modello 7 non brucia ma vi è comunque uno sviluppo di temperature superficiali, anche molto alte; mentre, il materiale combustibile del modello 5, ossia l'EPS, mostra un crollo nell'andamento temperatura-tempo, il quale corrisponde alla sua completa partecipazione al fuoco, come già visto in precedenza.

### Le termocoppie al centro dell'intercapedine d'aria

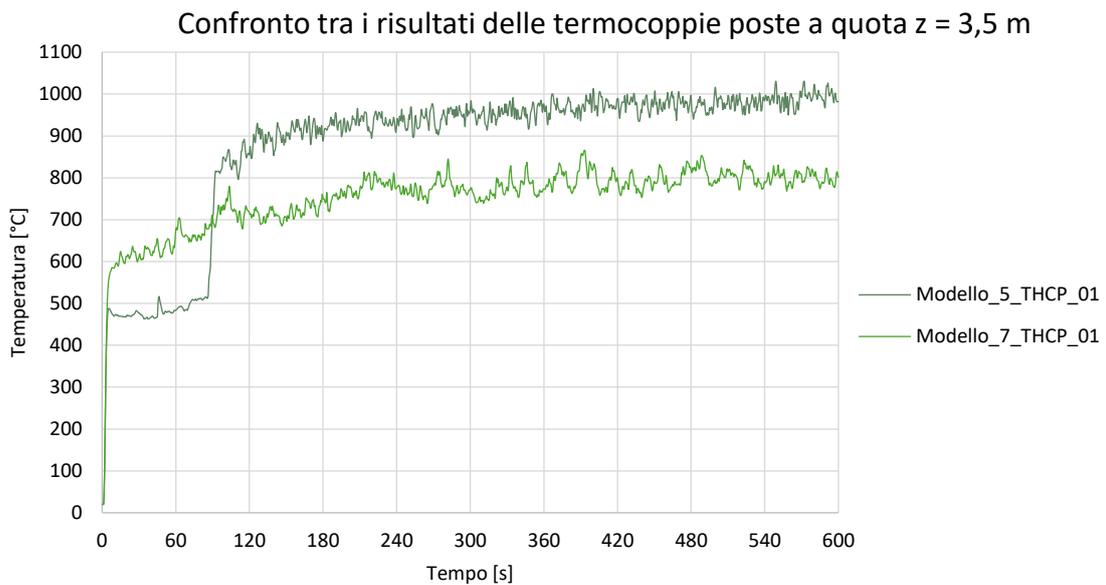


Figura 5.49: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

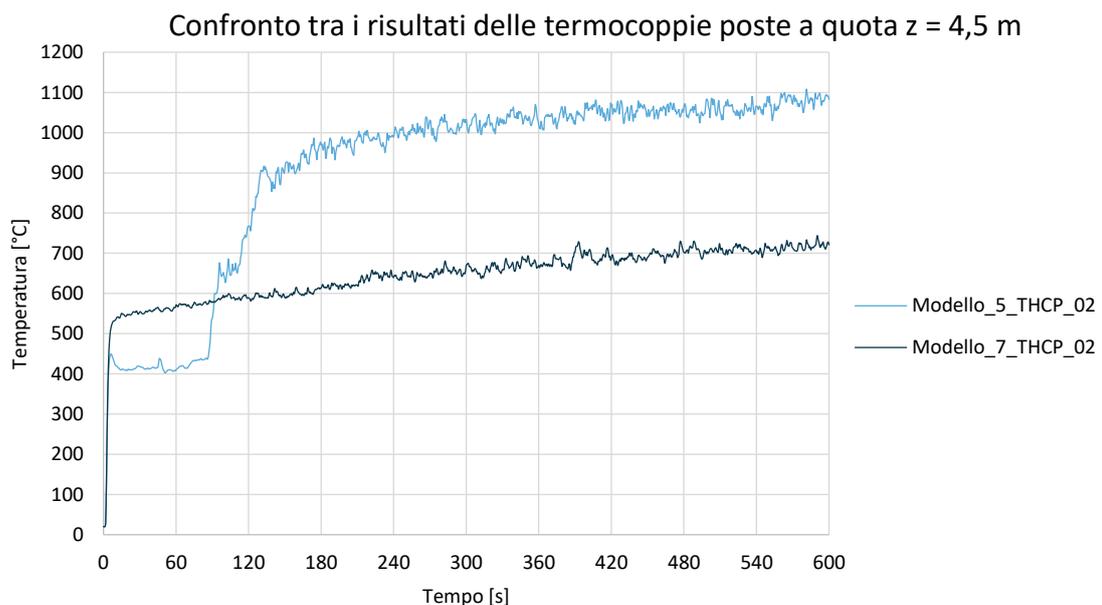


Figura 5.50: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 2 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

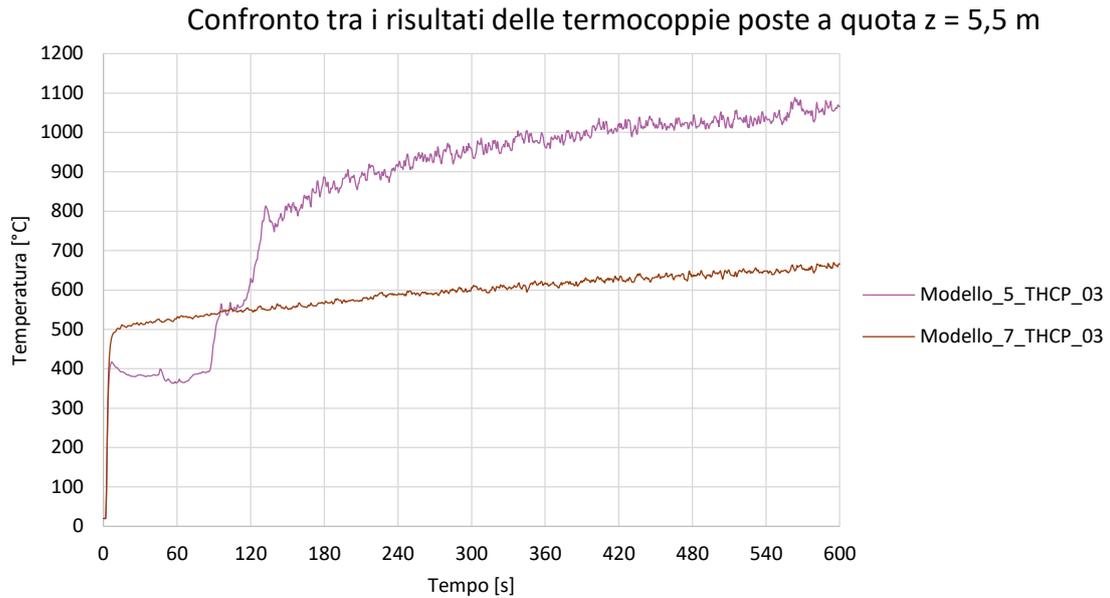


Figura 5.51: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

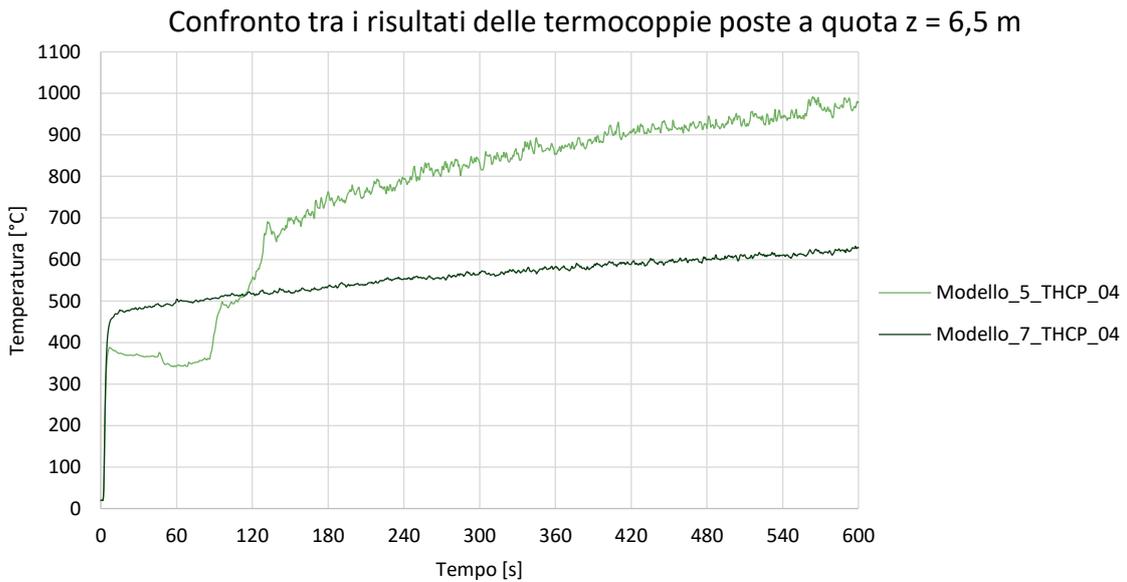


Figura 5.52: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 4 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

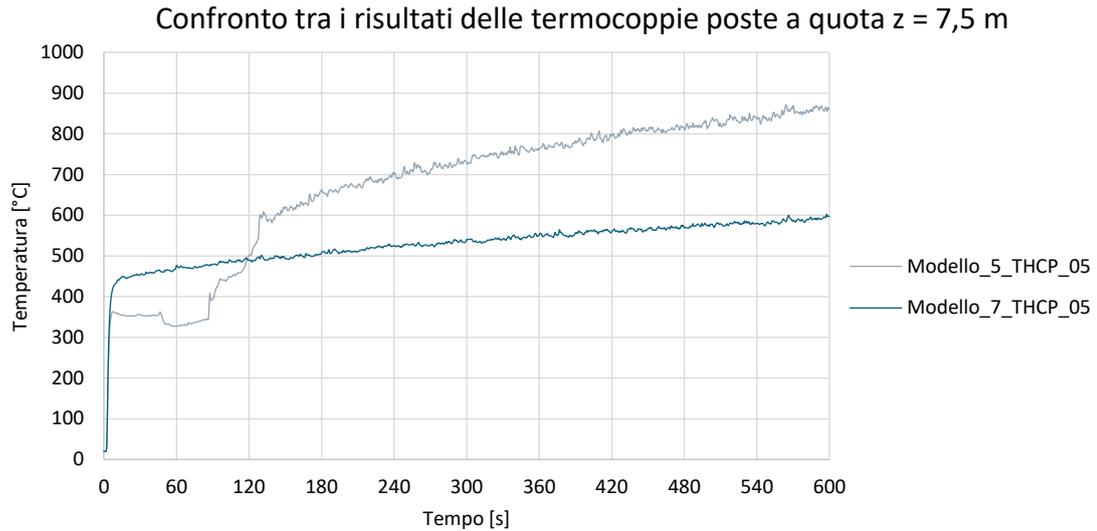


Figura 5.53: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

Dalle figure precedenti si nota che gli andamenti temperatura-tempo nel caso di facciata combustibile (modello 5) mostrano un andamento più coerente con le curve naturali d'incendio, in cui si può individuare il flashover; al contrario, questo non è possibile nelle curve temperatura-tempo nel caso di facciata incombustibile (modello 7). Invero, bisogna ricordare che in questo caso la curva RHR non ha un andamento che riflette uno sviluppo con fase di ignizione, crescita, incendio generalizzato ed estinzione, ma ha un andamento costante a 5000 kW e ciò si riflette nell'andamento delle temperature del modello incombustibile.

Inoltre, nel caso di facciata ventilata combustibile, le temperature hanno questo andamento perché i suoi materiali costituenti, bruciando durante l'incendio, aumentano il carico d'incendio e l'area della curva RHR, che in output risulterà avere questa forma:

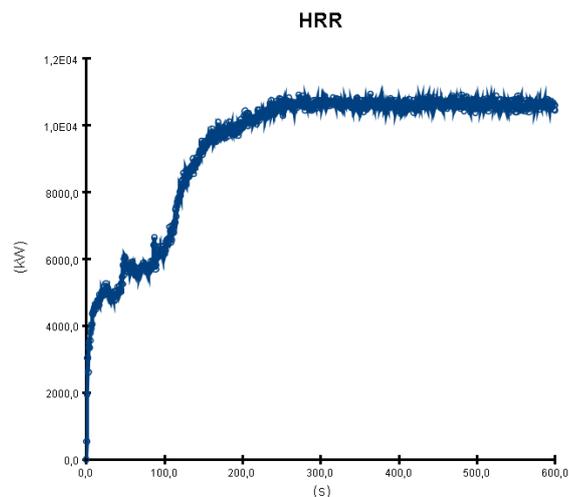


Figura 5.54: La curva RHR in output nel caso di facciata ventilata combustibile (modello 5)

Lo stesso accade per il modello di facciata ventilata combustibile con estensione maggiore, ossia per il modello 6. Ciò va tenuto in conto quando si modella una facciata combustibile.

Nel caso di facciata incombustibile, questo non accade: la curva RHR in input rimane la stessa in output.

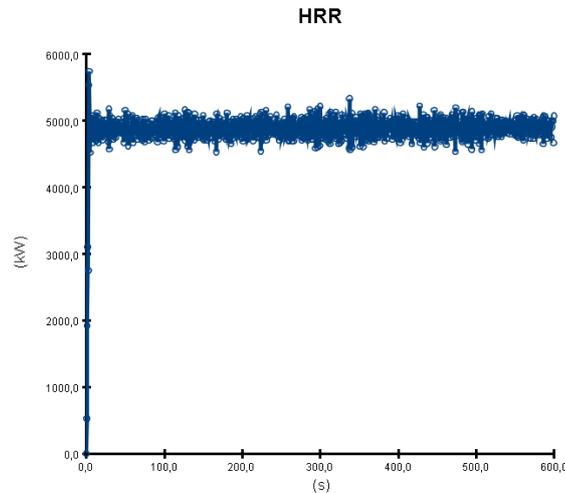


Figura 5.55: La curva RHR in output nel caso di facciata ventilata incombustibile (modello 7)

Tuttavia, si nota che le temperature raggiunte nel caso di incombustibilità sono nettamente inferiori rispetto al caso di materiali combustibili. Ciò conferma che la scelta del materiale incombustibile è vantaggiosa per quanto riguarda la sicurezza antincendio.

### Le sonde poste sul rivestimento, lato interno all'intercapedine

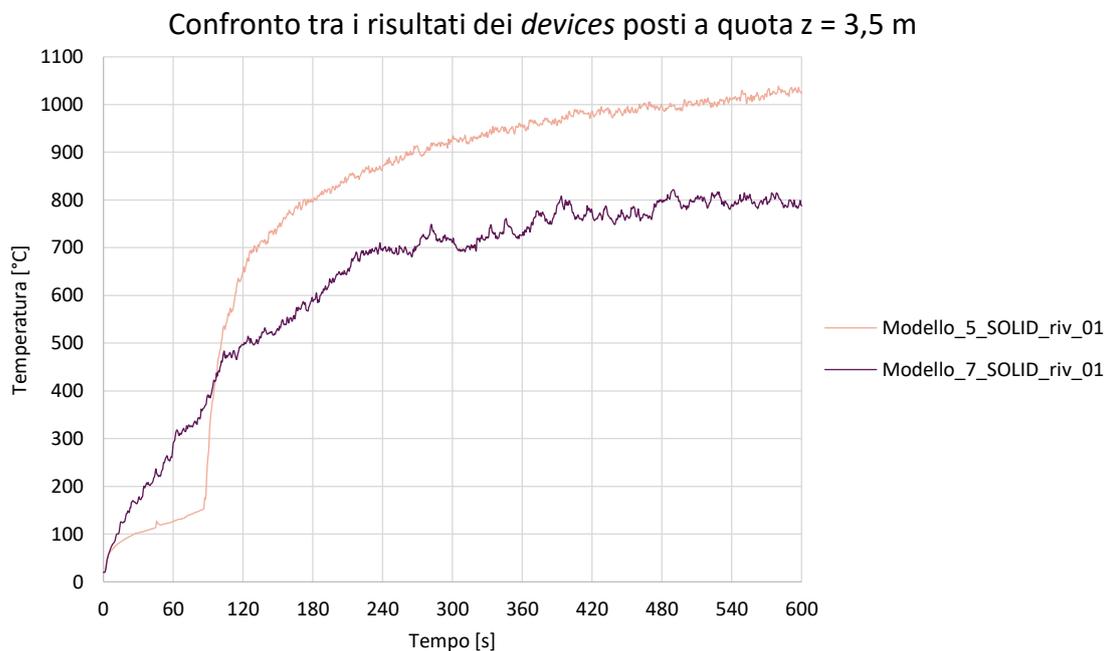


Figura 5.56: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

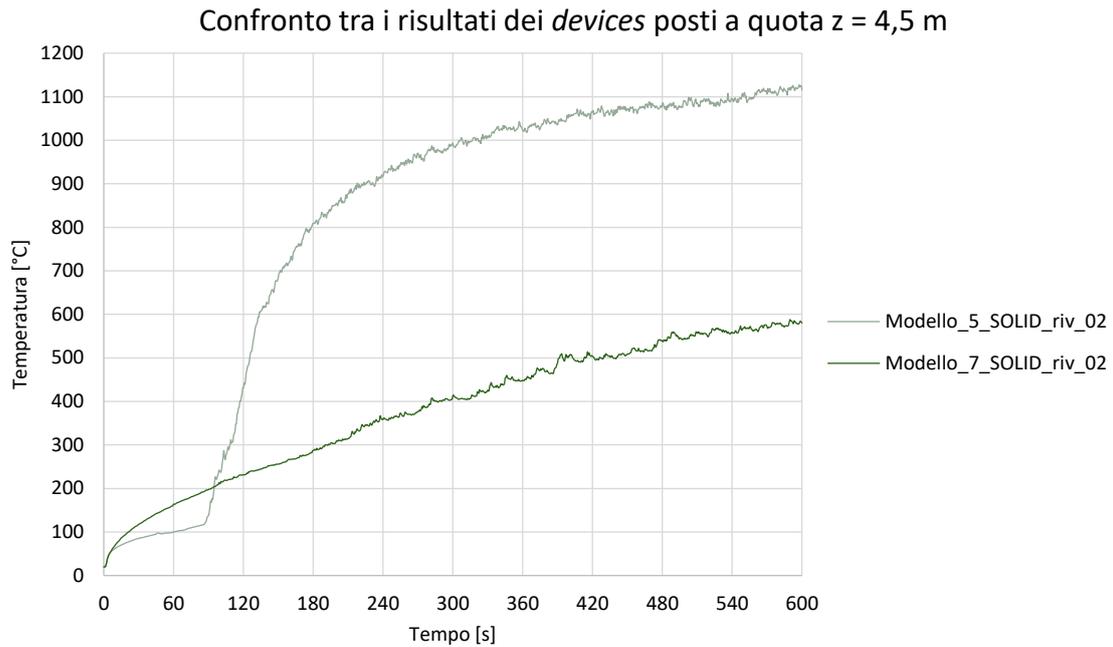


Figura 5.57: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 2 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

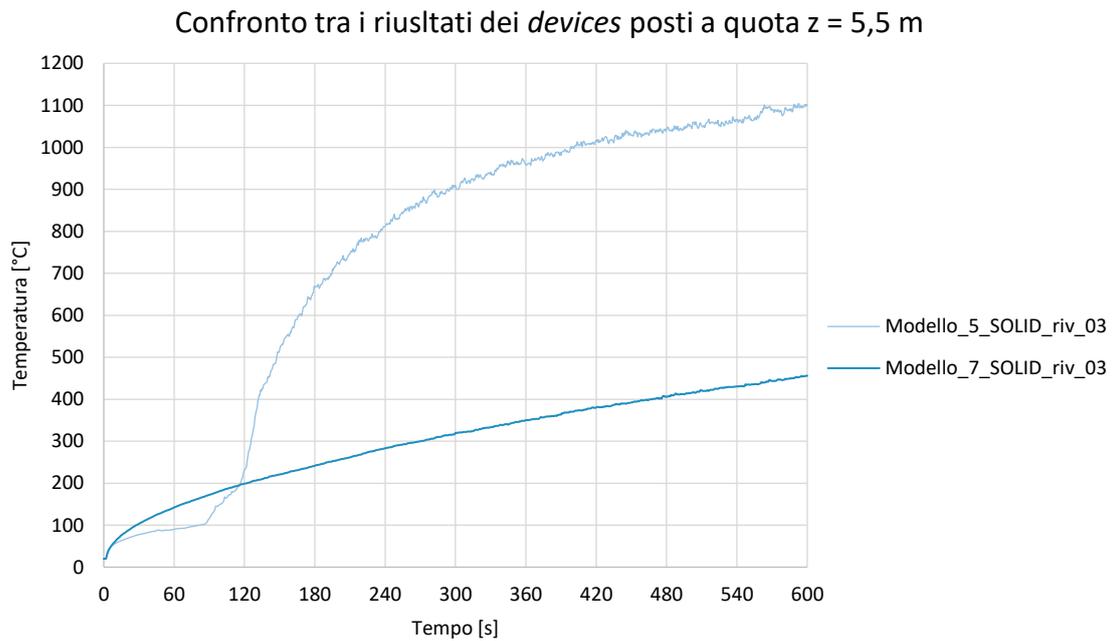


Figura 5.58: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

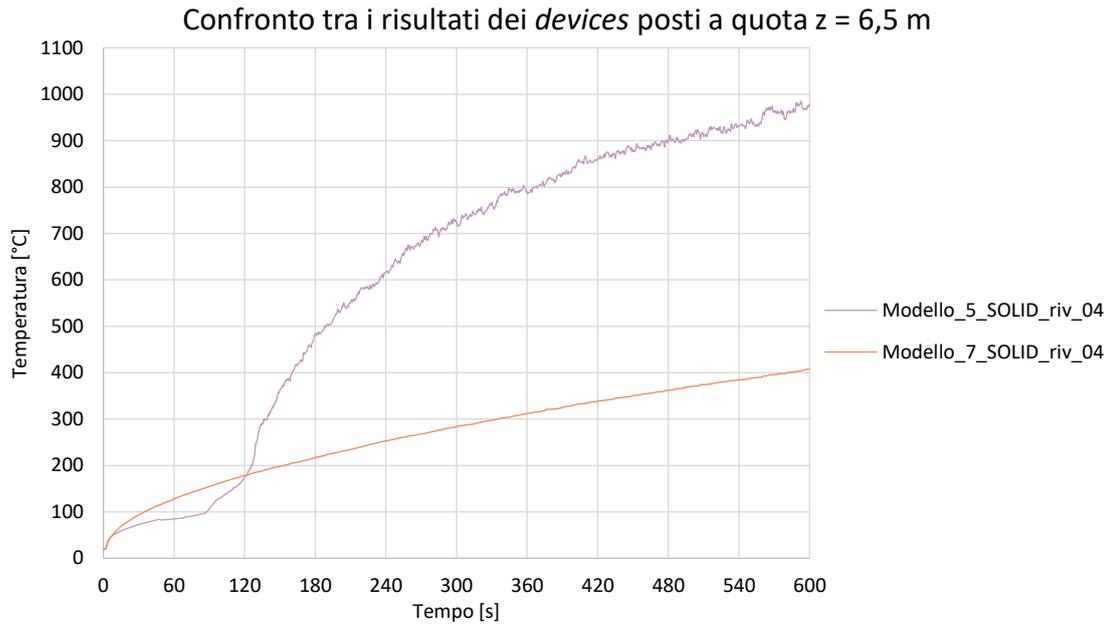


Figura 5.59: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 4 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

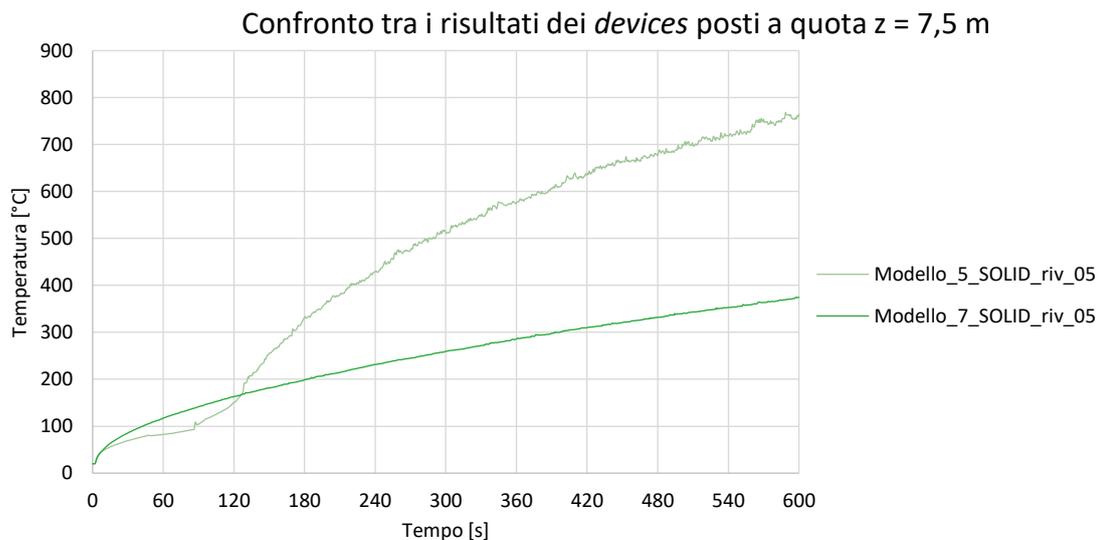


Figura 5.60: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

Le figure precedenti mostrano un comportamento analogo a quello che mostrano le termocoppie. Tuttavia, da queste immagini risulta ancora più evidente che la soluzione combustibile manifesta temperature decisamente più alte rispetto alla soluzione di facciata incombustibile, dimostrandosi la scelta migliore per la sicurezza antincendio.

### 5.3.4. Il confronto facciata continua alta 6 m e 9 m rispetto al burner – il paragone tra modelli 7 e 8

Dopo aver creato il modello 5 e il modello 7, che sono due tipologie di facciata ventilata rispettivamente di tipo combustibile e incombustibile, con stessi spessori della stratigrafia ma materiali diversi, stesse dimensioni della facciata, con assenza di aperture e vetri in facciata, sono stati creati i modelli 6 e 8. Questi modelli sono molto simili ai precedenti, l'unica cosa che è stata variata è l'altezza del sistema di facciata. L'obiettivo è verificare cosa cambia con una configurazione più estesa, effettuando così un confronto tra i modelli 7-8 e 5-6.

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

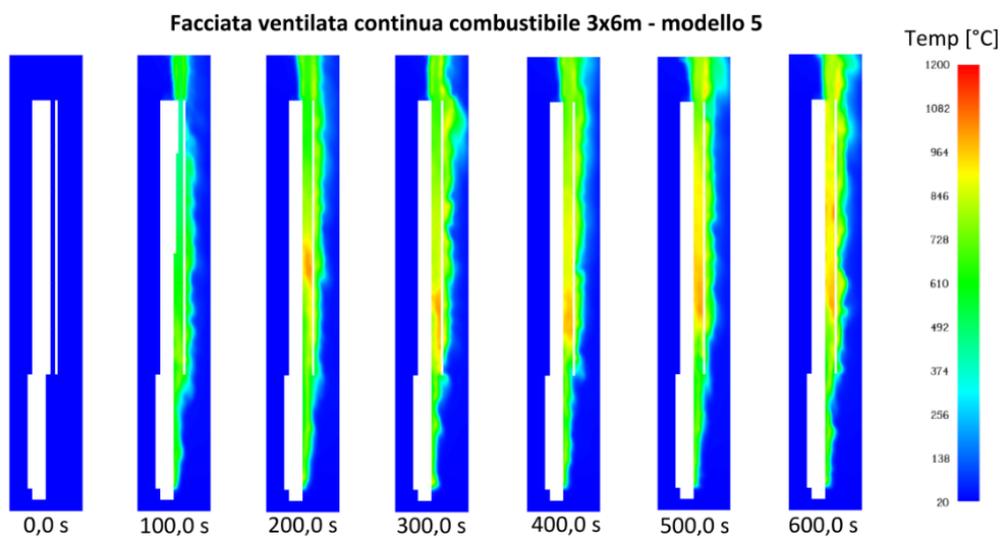


Figure 5.61: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m – modello 5

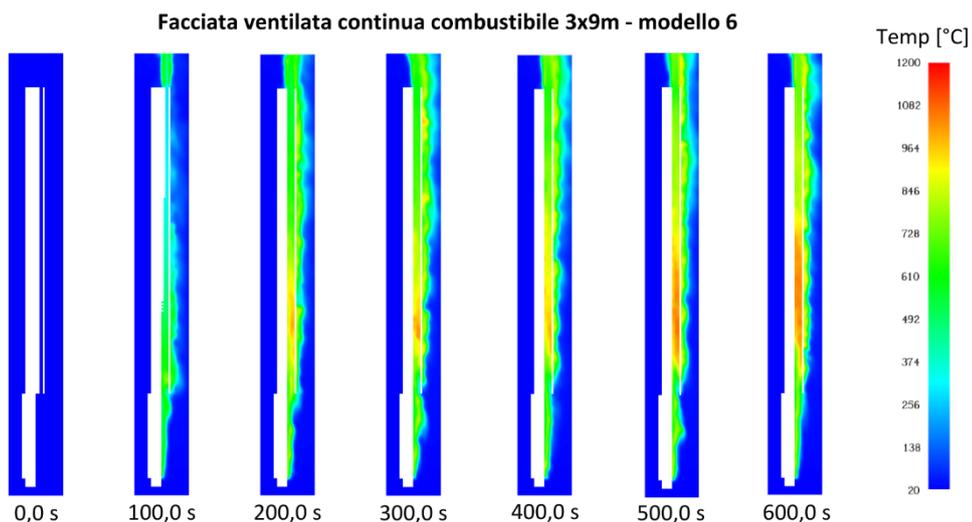


Figure 5.62: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua combustibile 3x9m – modello 6

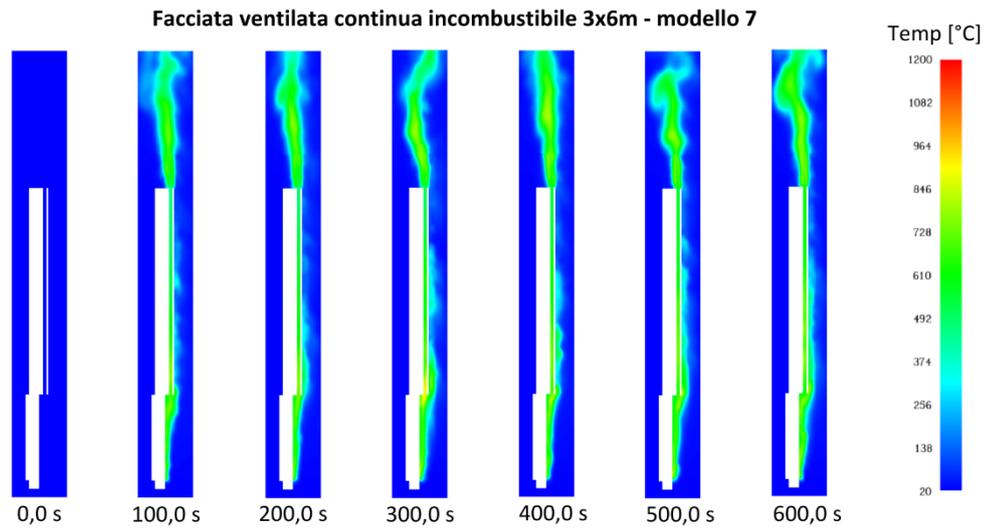


Figure 5.63: Slice\_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m – modello 7

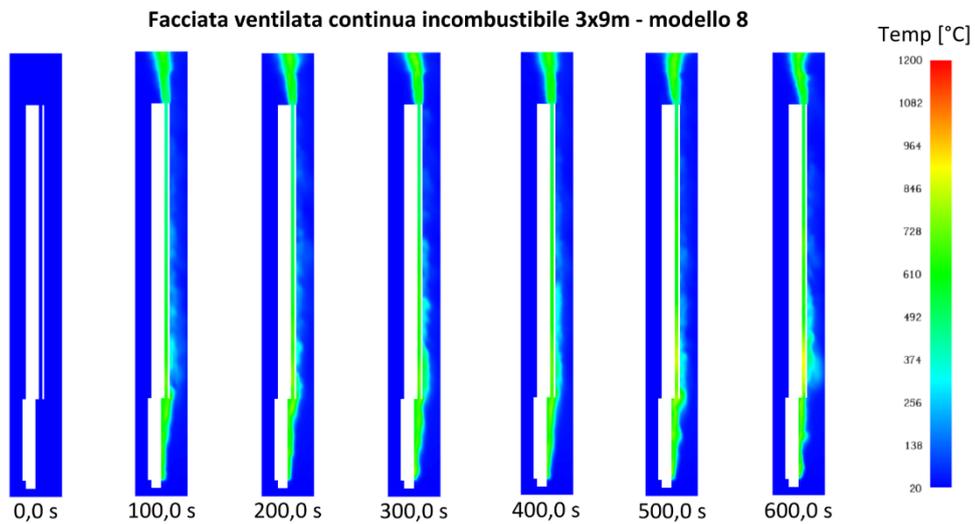


Figure 5.64: Slice\_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x9m – modello 8

Non si riportano tutti i risultati dei *devices*, ma verranno riportati i dati delle sonde e delle termocoppie poste rispettivamente alle quote 3,5 m, 5,5 m e 7,5 m rispetto al piano orizzontale di riferimento.

## Le sonde poste sullo strato di isolamento

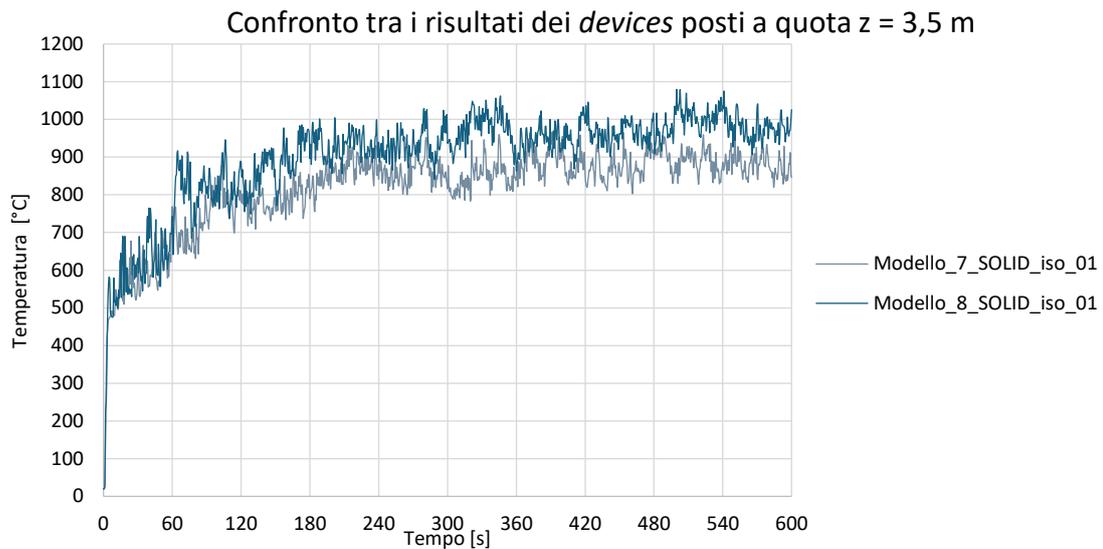


Figura 5.65: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

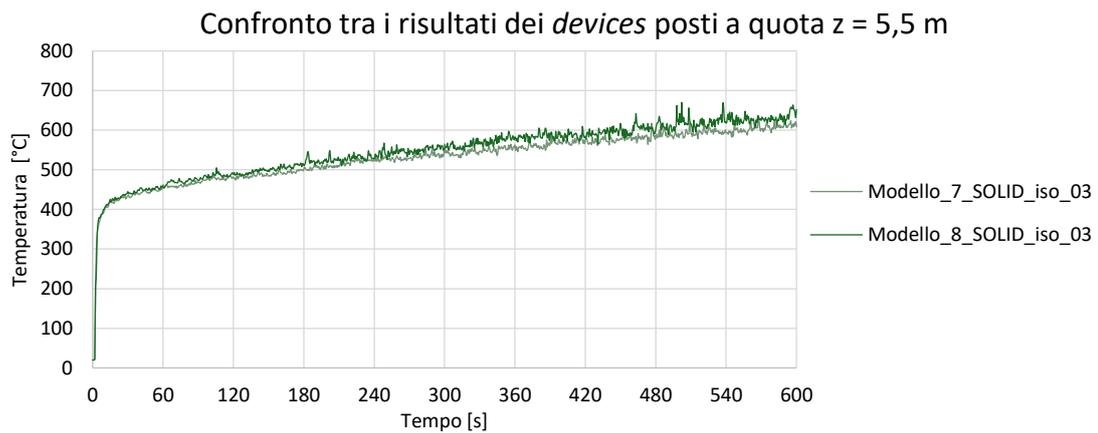


Figura 5.66: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

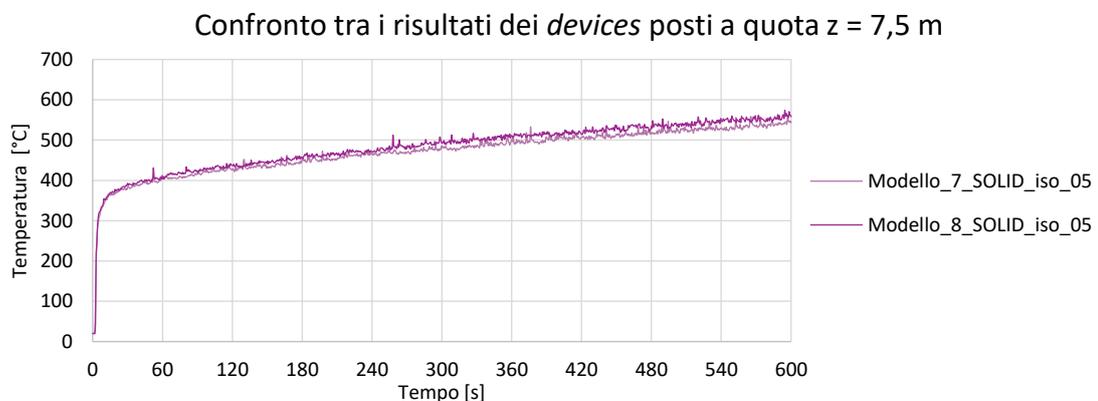


Figura 5.67: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

## Le termocoppie al centro dell'intercapedine

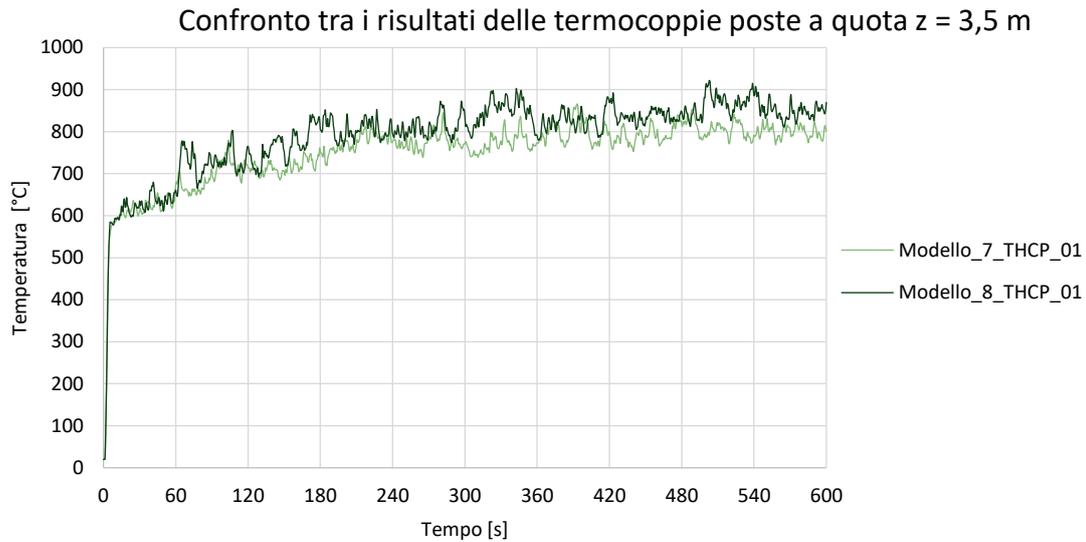


Figura 5.68: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

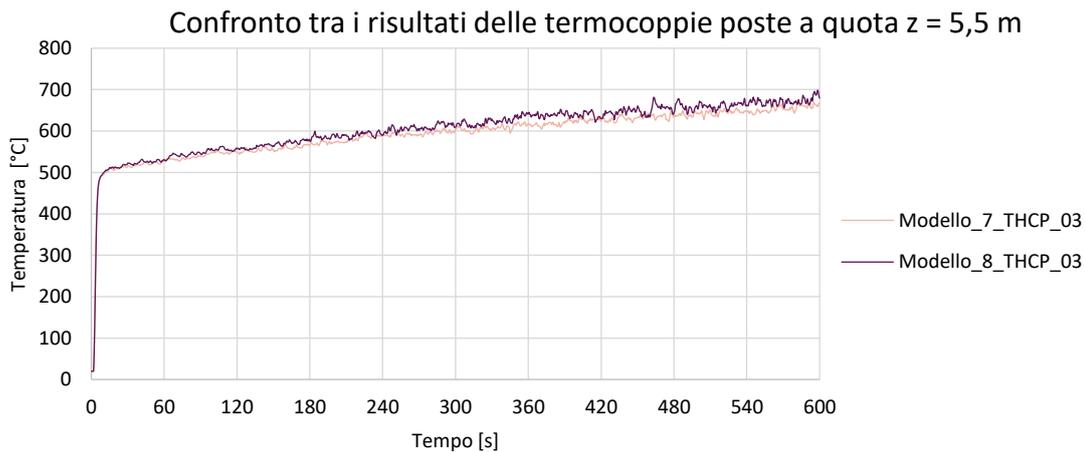


Figura 5.69: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

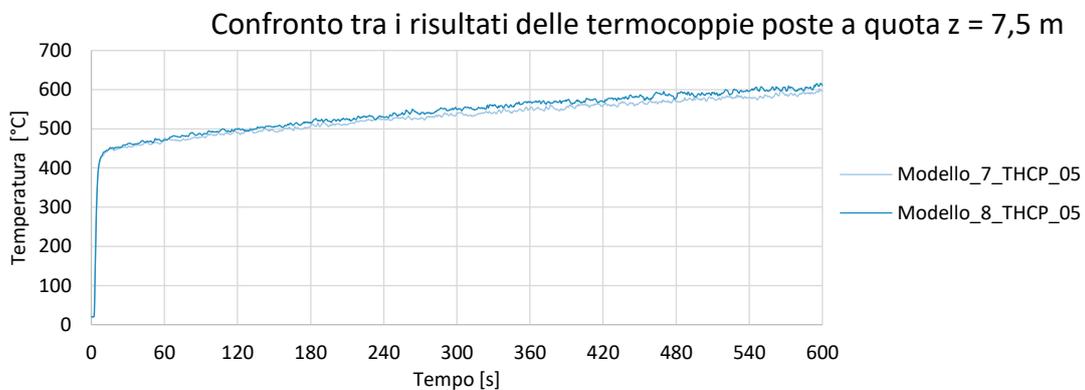


Figura 5.70: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8)

## Le sonde poste sul rivestimento, lato interno all'intercapedine

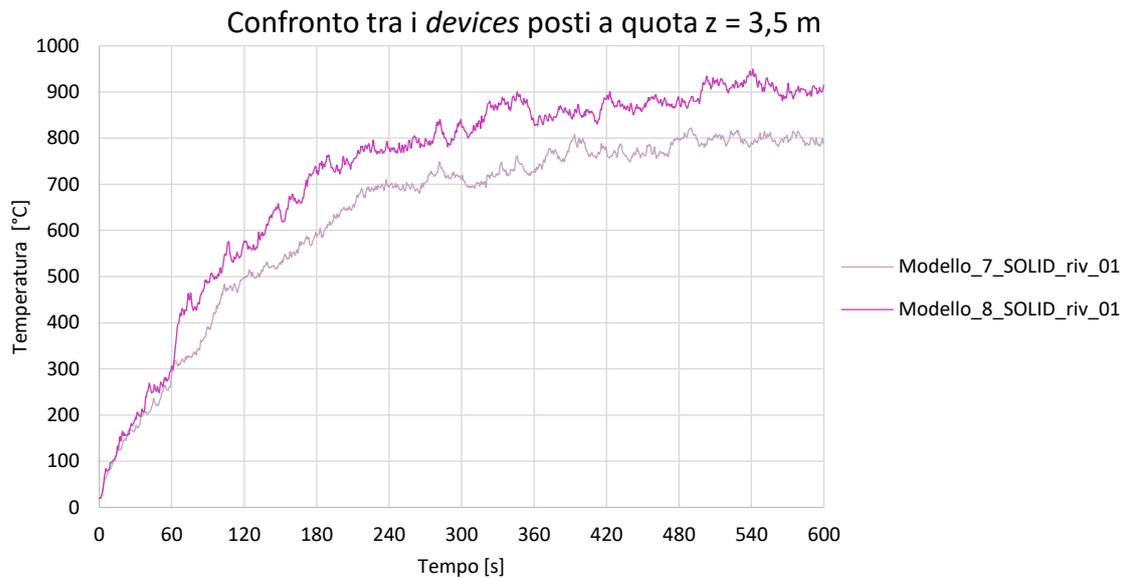


Figura 5.71: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

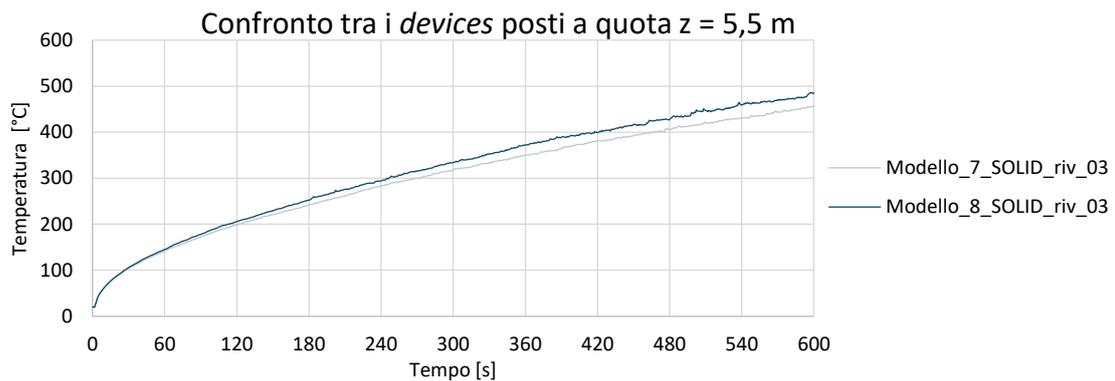


Figura 5.72: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

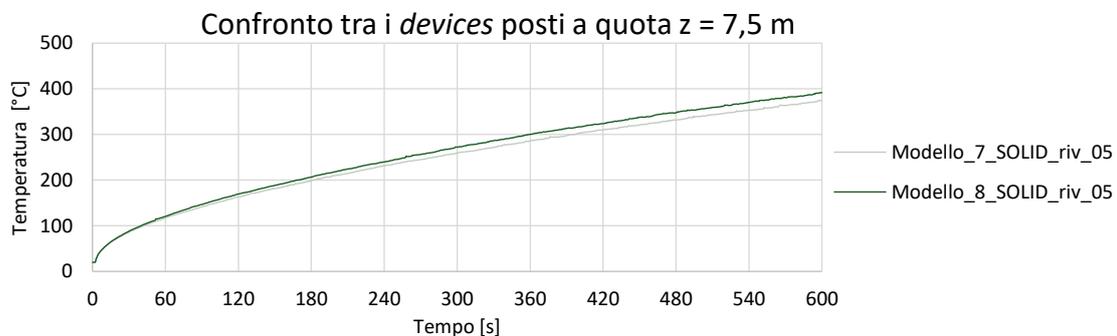


Figura 5.73: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7)

Le figure precedenti, da Figura 5.65 a Figura 5.73, mostrano una perfetta aderenza tra il comportamento del modello 7 e 8, entrambi incombustibili, a meno di piccoli scostamenti dell'ordine di decine di gradi celsius. Per quanto riguarda il confronto tra modello 5 e 6, non si riportano i risultati perché sono del tutto analoghi.

### 5.3.5. Il confronto tra differenti spessori dell'intercapedine (modelli 9-12 e modelli 13-16)

Si è voluto realizzare un confronto a parità di configurazione della facciata, partendo dai modelli di base 5 e 7, variandone semplicemente l'intercapedine. Si riportano in questa sezione i risultati ottenuti.

#### **La facciata ventilata continua combustibile (modelli 9-12)**

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

#### **Facciata ventilata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm - modello 9**

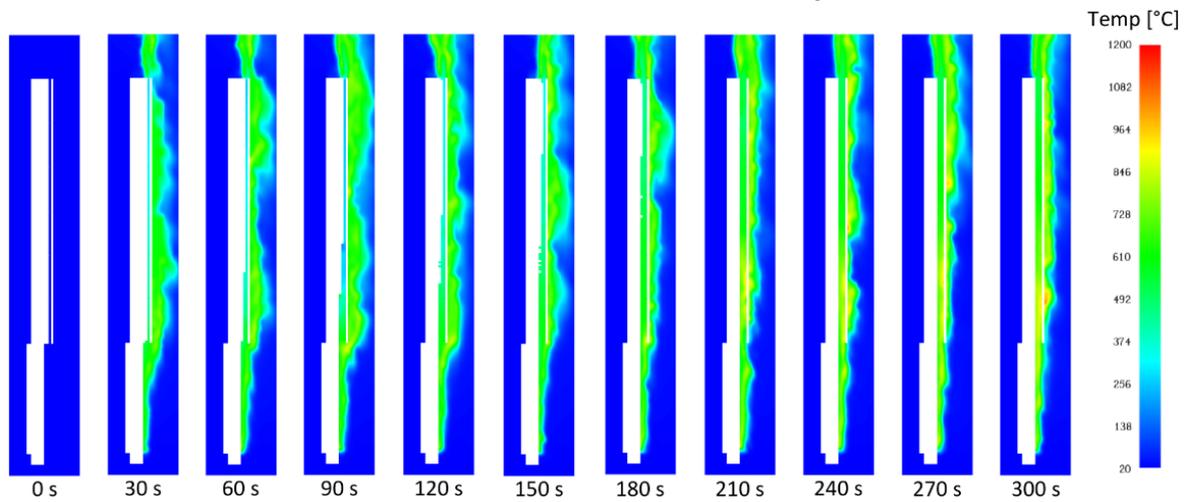


Figure 5.74: Slice\_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm – modello 9

#### **Facciata ventilata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm - modello 10**

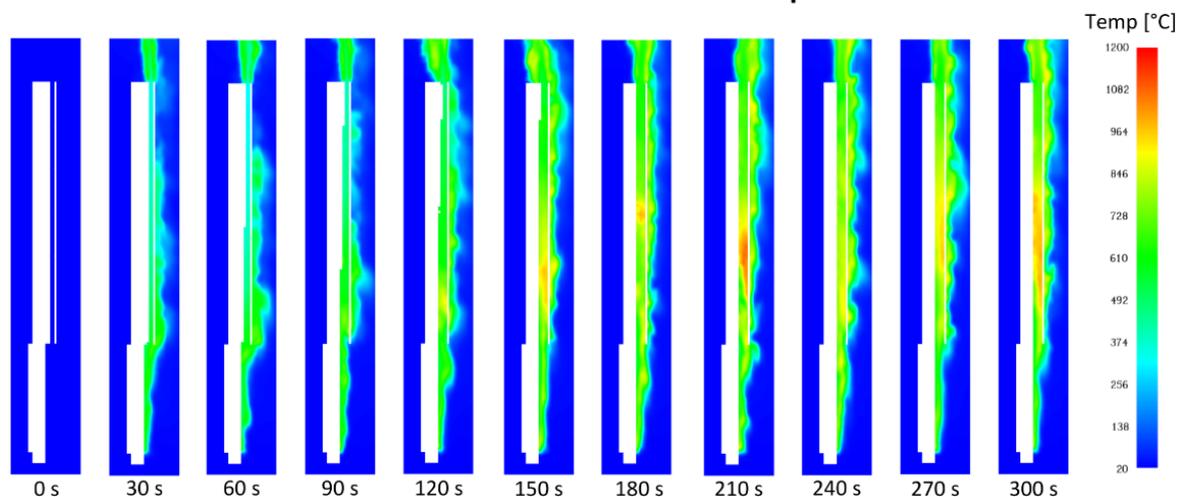


Figure 5.75: Slice\_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm – modello 10

**Facciata ventilata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm - modello 11**

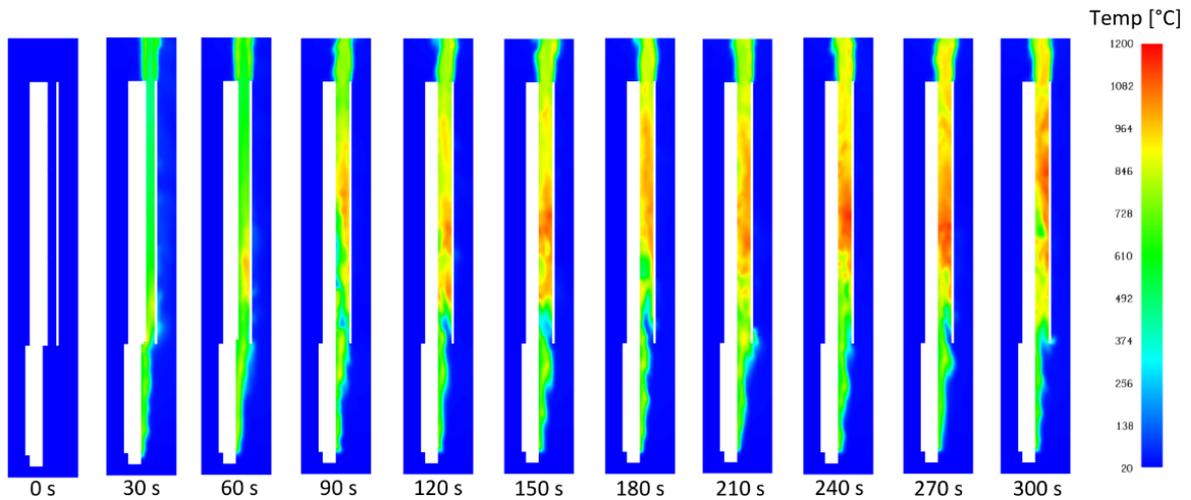


Figure 5.76: Slice\_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm – modello 11

**Facciata ventilata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm - modello 12**

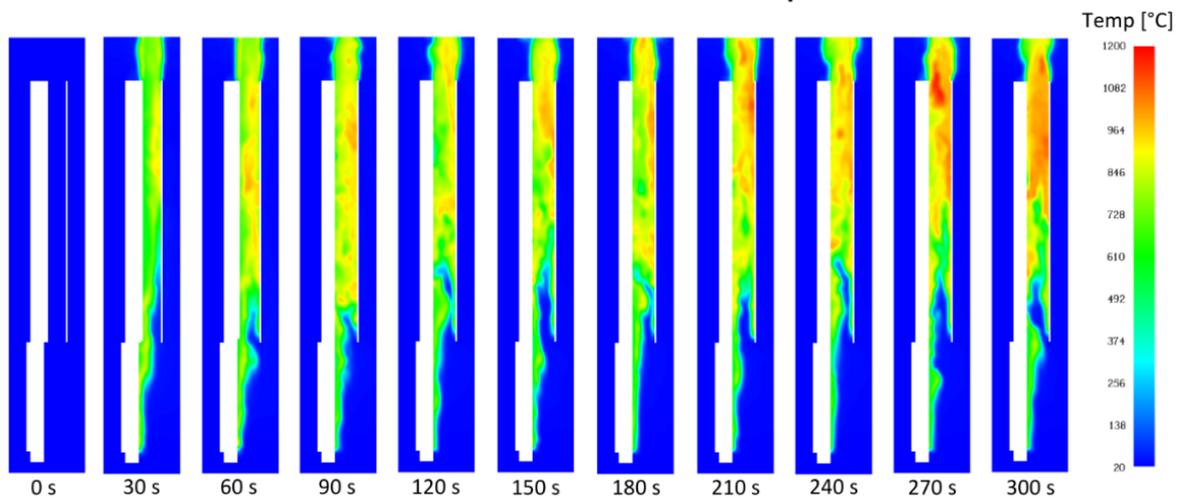


Figure 5.77: Slice\_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm – modello 12

In queste immagini si apprezza l'evoluzione e lo sviluppo dell'incendio nell'intercapedine, la forma e l'estensione del *plume* delle temperature. Dalle Figure 5.74, ovvero nel caso di intercapedine di spessore 5 cm, si noti che le temperature risultano più basse rispetto agli altri casi. Inoltre, si osserva che le situazioni più critiche risultano essere quelle in cui si hanno intercapedini di 20 e 40 cm (Figure 5.75 e Figure 5.77Figure 5.84), nelle quali si vede che l'incendio rimane confinato all'interno dell'intercapedine.

Si riportano i risultati delle termocoppie poste all'interno dell'intercapedine alle quote 3,5 m, 5,5 m e 7,5 m rispetto al piano orizzontale di riferimento.

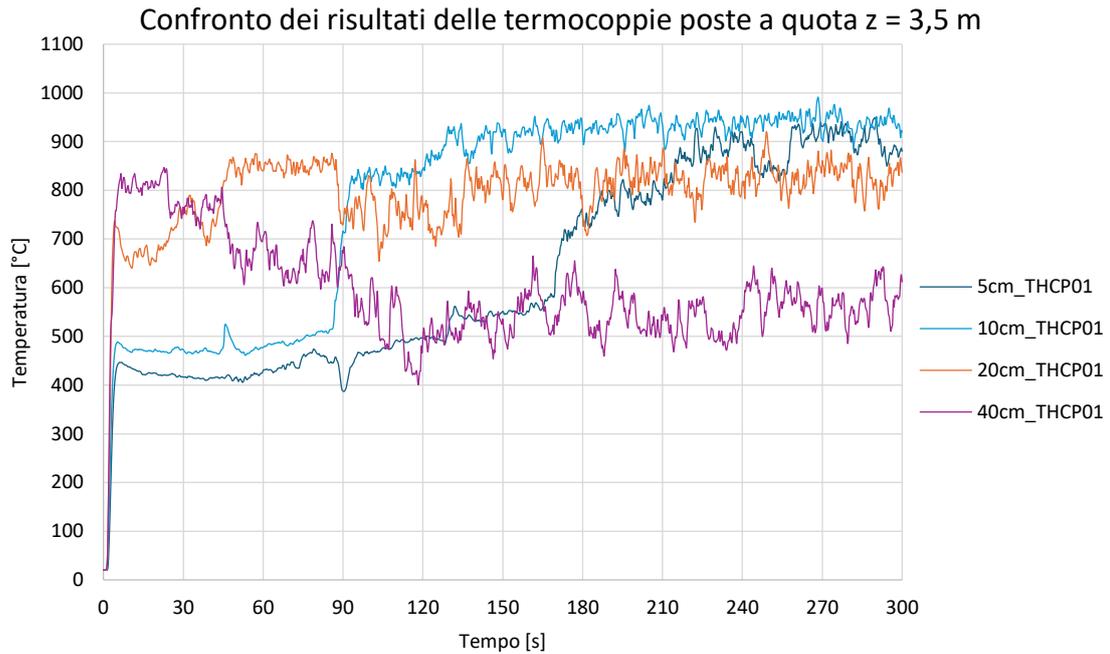


Figura 5.78: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12

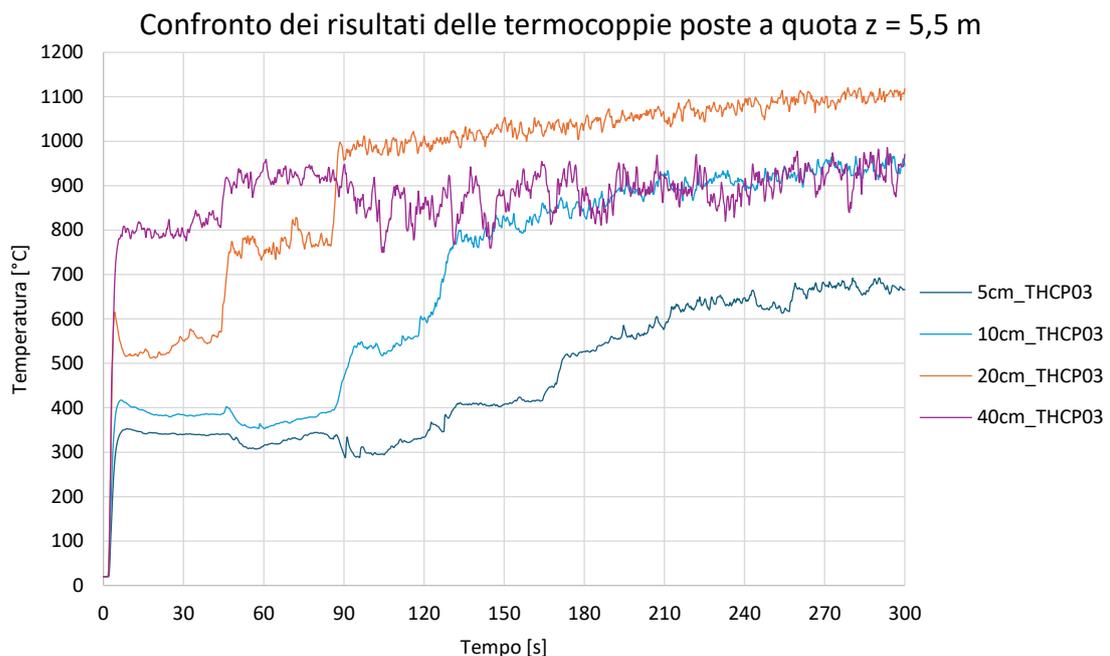


Figura 5.79: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12

Confronto dei risultati delle termocoppie poste a quota  $z = 7,5$  m

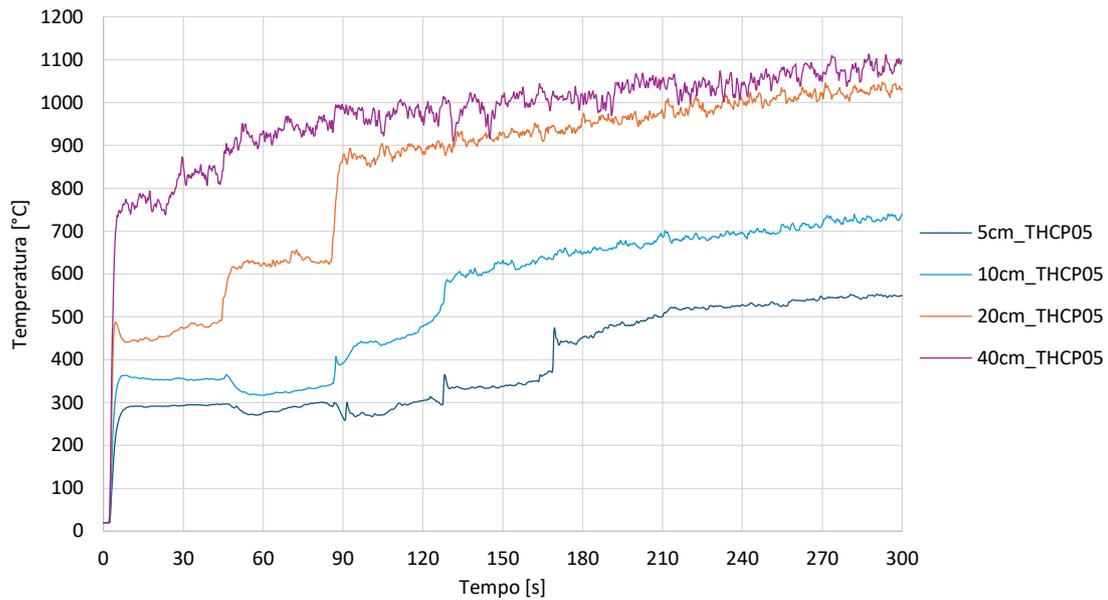


Figura 5.80: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12

Si noti che nei grafici di Figura 5.78 e Figura 5.79 gli andamenti delle temperature nel tempo delle termocoppie del modello con intercapedine 5 e 10 cm mostrano una sorta di comportamento inverso tra loro e rispetto agli altri trend. Ciò è dovuto alla vicinanza delle sonde con il *burner*. e in realtà riflette quello che si vede graficamente dalle *slices* precedenti.

Al contrario, la Figura 5.80 dimostra che si sviluppano temperature più alte nell'intercapedine di 5 cm e che, aumentando lo spessore della lama d'aria, diminuiscono le temperature. Guardando solamente questa figura, si potrebbe affermare che predisporre uno spessore della lama d'aria maggiore sia un vantaggio in termini di sicurezza antincendio, ma non è così: in realtà, come mostrano le precedenti *slices* di temperatura, la soluzione di facciata con intercapedine di 5 cm risulta la migliore per la sicurezza antincendio, in termini di entità delle temperature che si sviluppano nell'intercapedine. Per questo motivo è importante considerare e confrontare non solo i dati analitici ma anche i globali grafici, oppure predisporre più sonde per avere una mappatura delle temperature più estesa. Si tenga sempre conto che optare per un numero maggiore di *devices* aumenta l'onere computazionale e i tempi di simulazione. Per queste ragioni non sono stati disposti ulteriori *devices* nei modelli del presente lavoro di tesi, ma si è scelto di osservare e studiare le *color maps* e le *slices*.

### **La facciata ventilata continua incombustibile (modelli 13-16)**

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

#### **Facciata ventilata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm - modello 13**

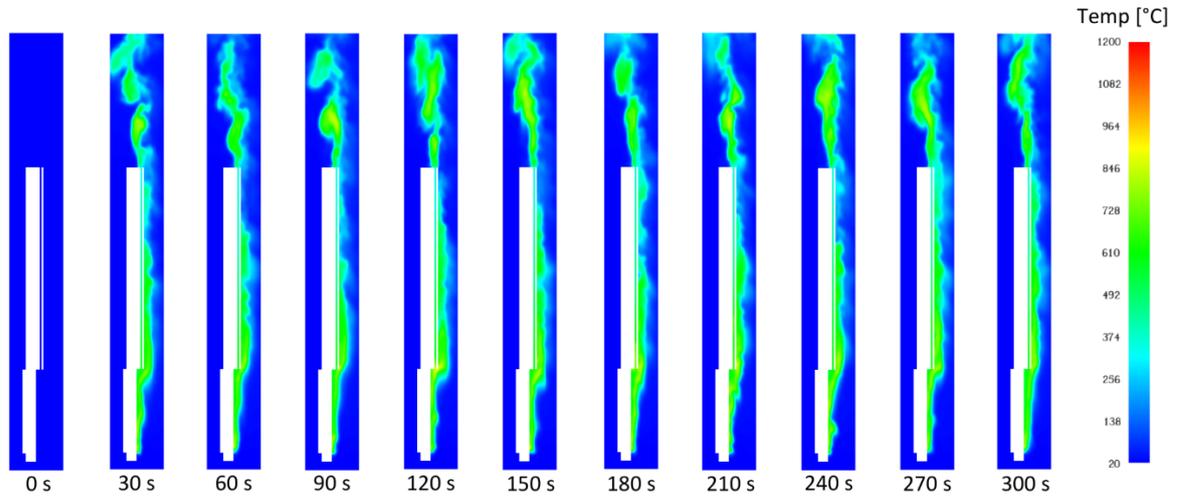


Figure 5.81: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm – modello 13

#### **Facciata ventilata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm - modello 14**

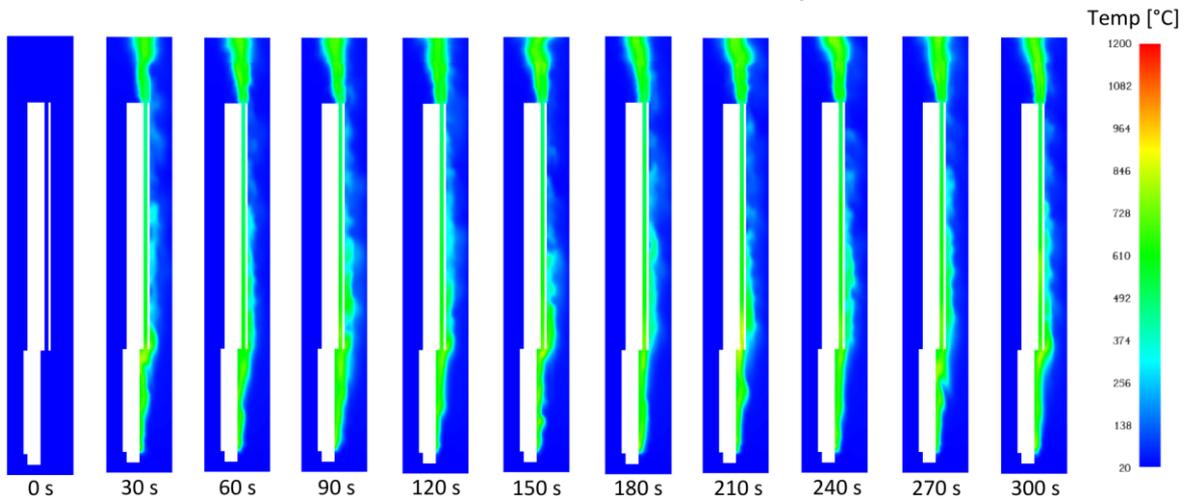


Figure 5.82: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm – modello 14

**Facciata ventilata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm - modello 15**

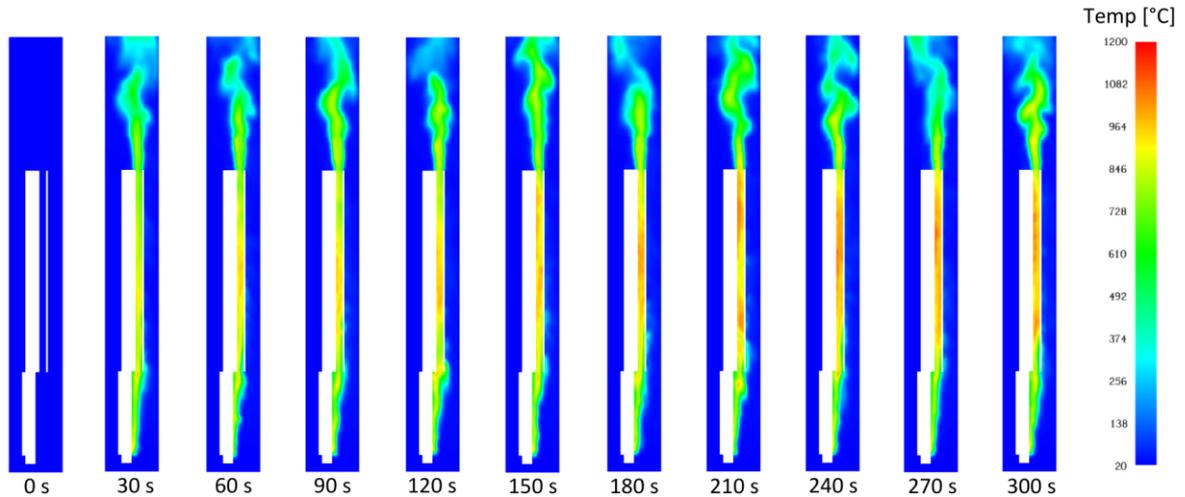


Figure 5.83: *Slice\_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm – modello 15*

**Facciata ventilata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm - modello 16**

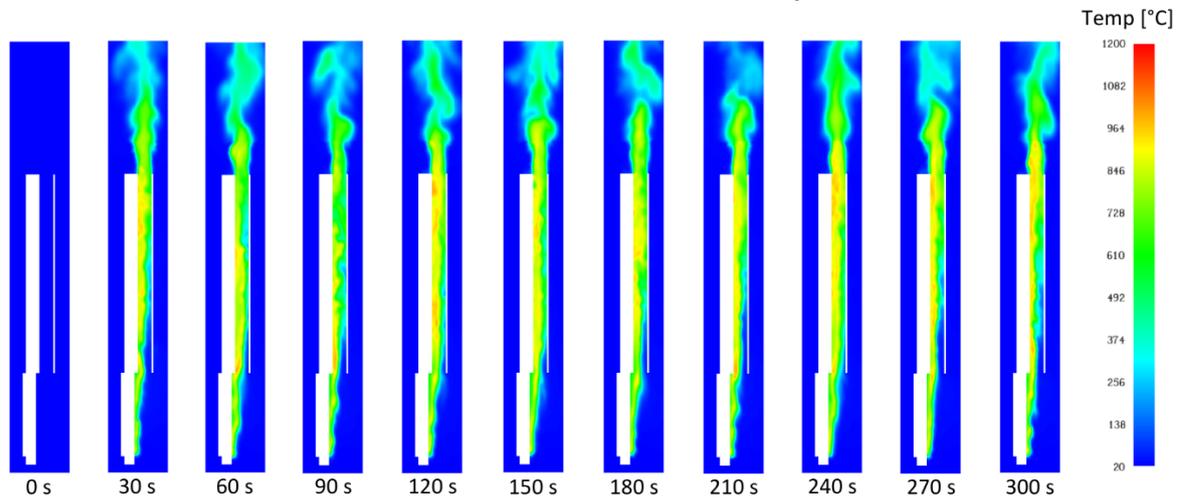


Figure 5.84: *Slice\_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm – modello 16*

In queste immagini si apprezza l'evoluzione e lo sviluppo dell'incendio nell'intercapedine, la forma e l'estensione del *plume* delle temperature.

Le intercapedini di 5 e 10 cm (Figure 5.81 e Figure 5.82) sono sicuramente le soluzioni migliori per la sicurezza antincendio poiché si hanno temperature più basse rispetto a quelle di 20 e 40 cm (Figure 5.83 e Figure 5.84).

Si osserva che, all'interno dell'intercapedine d'aria, si hanno temperature globalmente più basse rispetto a quelle sviluppate nel caso di facciata ventilata combustibile. Dalle Figure 5.81 e Figure 5.82 si vede che il *plume* fuoriesce dall'intercapedine, mentre dalle Figure 5.83 e Figure 5.84 emerge nuovamente un effetto trincea delle temperature entro i confini della lama d'aria. Perciò, è chiaro che con intercapedini di 20 o 40 cm si sviluppano temperature anche alte, sicuramente inferiori rispetto al caso di facciata combustibile, che rimangono confinate nello spessore dell'intercapedine.

Si riportano i risultati delle termocoppie poste all'interno dell'intercapedine alle quote 3,5 m, 5,5 m e 7,5 m rispetto al piano orizzontale di riferimento.

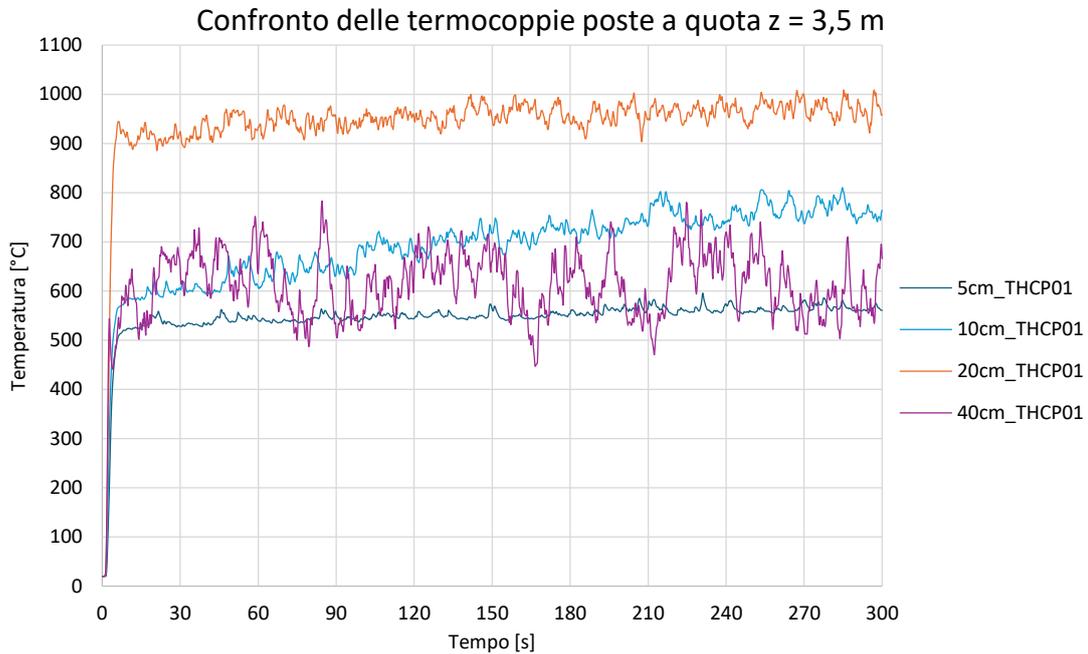


Figura 5.85: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16

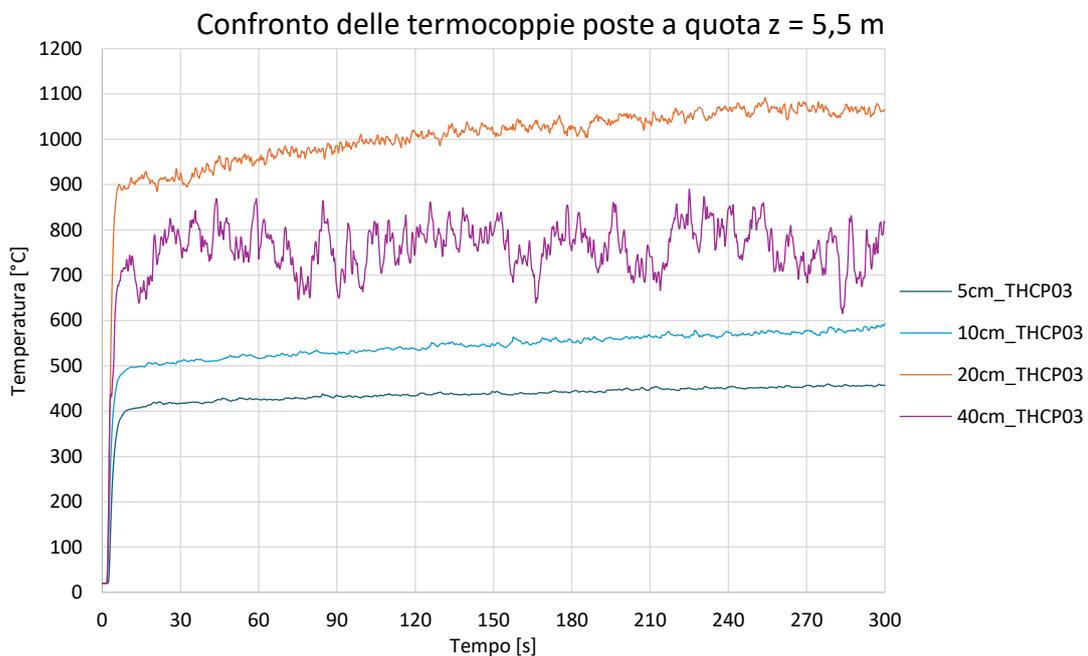


Figura 5.86: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16

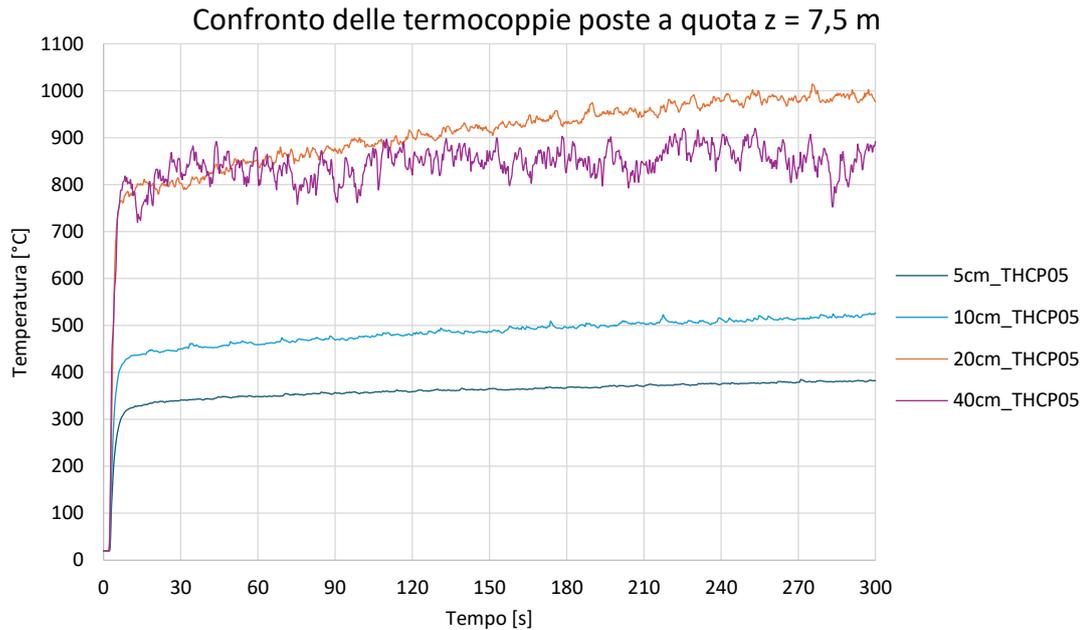


Figura 5.87: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16

Da questi grafici emerge chiaramente quanto già osservato dalle slices. In questo caso si percepisce immediatamente l'aderenza tra ciò che si è visto in maniera grafica e i dati analitici.

Dalla Figura 5.85 l'intercapedine di 20 cm risulta la soluzione peggiore, poiché mostra temperature nettamente più alte rispetto alle altre soluzioni. Invece, dalla Figura 5.86 e dalla Figura 5.87, si vede che sia l'intercapedine di spessore 20 cm sia quella di 40 cm risultino entrambe le peggiori. Mentre, in tutti i grafici, si vede che le soluzioni di intercapedine di spessore 5 e 10 cm siano le scelte migliori per quanto riguarda la sicurezza antincendio, poiché le temperature che si sviluppano sono decisamente inferiori.

### **5.3.6. La facciata ventilata incombustibile di 2 piani fuori terra con presenza di una finestra al piano primo e differente curva RHR (modelli 17 e 18)**

In questa sezione si trovano i modelli realizzati in PyroSim relativi a simulazioni di incendi più aderenti alla realtà: infatti, tali modelli hanno riguardato incendi di tipo indoor, in strutture costituite da 2 piani fuori terra, dotate di una finestra vetrata al piano primo che si rompe ad una determinata temperatura di *failure* del vetro. Inoltre, tali simulazioni sono state impostate con una curva RHR in input con andamento non più costante, ma con un primo tratto parabolico di crescita e poi un successivo plateau orizzontale alla potenza di picco di 5000 kW.

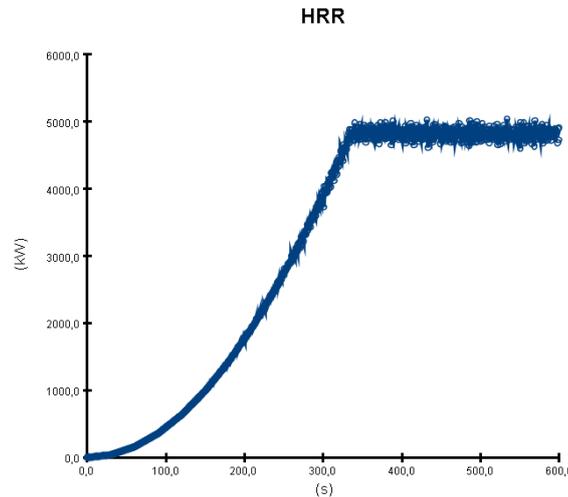


Figura 5.88: La curva RHR in input adottata nelle simulazioni d'incendio dal modello 17 al 22

Da questi modelli in avanti, è stata adottata sempre tale curva RHR in input nelle simulazioni.

### **La rottura delle finestre vetrate**

Per determinare i valori di temperatura da impostare nelle simulazioni di incendio, si è condotta un'approfondita ricerca sulla rottura delle finestre vetrate in condizioni di esposizione al fuoco.

L'analisi del fenomeno ha evidenziato che il cedimento del vetro è dovuto principalmente allo sviluppo di stress termici generati dal riscaldamento disomogeneo della lastra. In particolare, la porzione centrale del vetro, esposta direttamente alla sorgente di calore, raggiunge temperature significativamente superiori rispetto ai bordi, i quali restano relativamente più freddi grazie alla protezione del serramento. Questa differenza termica induce tensioni di trazione in un materiale fragile con scarsa conducibilità termica, determinando infine la rottura (Pagni & Joshi, 1991).

Durante un incendio, il vetro è soggetto a due tipologie principali di sforzo: sforzi membranali, dovuti alla differenza di temperatura lungo la superficie del pannello, e sforzi flessionali, causati dalla disomogeneità termica nello spessore della lastra (Kim, 1988). La disomogenea variazione di temperatura provoca una redistribuzione della rigidità flessionale della lastra (Kozłowski & Bedon, 2021).

Quando la porzione centrale si dilata a causa dell'aumento di temperatura, il telaio, rimanendo più freddo, limita tale espansione, generando uno stato di compressione nella zona centrale e di trazione ai bordi (Kim, 1988). Questo fenomeno è alla base dell'innesco delle cricche, che tendono a formarsi nei margini del pannello e a propagarsi verso l'interno fino al raggiungimento della soglia di rottura del vetro (Honfi et al., 2022).

Secondo il Vademecum del 2013 dell'Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro e "A study on the fire safety issues for large window openings in supertall residential buildings in Hong Kong" (Lau & Chow, 2014), le dilatazioni termiche localizzate nella parte centrale del

pannello vengono impediti dalle porzioni laterali più fredde, con la conseguente formazione di uno stato di compressione nella zona riscaldata e di trazione nelle aree più fredde.

Tale distribuzione degli sforzi si verifica indipendentemente dalla modalità di vincolo del vetro, sebbene la presenza di bordi bloccati comporti una maggiore concentrazione delle tensioni sia nelle estremità sia nel centro del pannello (Wang et al., 2011).

La relazione tra differenza di temperatura e deformazione del vetro è ben documentata nel Manuale del vetro – Catalogo delle soluzioni Saint-Gobain Italia (2022): un incremento termico di 100°C comporta un'espansione di circa 1 mm.

Secondo molti degli studi incontrati in questa fase di ricerca, se la dilatazione termica viene impedita dal serramento, si sviluppano tensioni che, superando il limite di resistenza del materiale, causano la frattura della lastra.

Per mitigare questo rischio è fondamentale prevedere uno spazio sufficiente tra il vetro e il telaio, ovvero un giunto, in modo da consentire l'espansione termica senza vincoli e ridurre le sollecitazioni che potrebbero favorire la formazione di cricche (Dembele et al., 2012).

Inoltre, la dinamica della rottura dipende dalla dimensione dei pannelli vetrati: pannelli più piccoli risultano generalmente più resistenti, mentre quelli di dimensioni maggiori presentano una differenza di temperatura più marcata tra il centro e i bordi, con conseguente incremento delle tensioni interne e maggiore probabilità di frattura (Chow et al., 2007).

Se i meccanismi di riscaldamento e la successiva rottura del vetro avvengono in maniera uniforme, le cricche partono dai bordi e si hanno biforcazioni multiple che convergono, portando al cedimento dell'intero pannello (Skelly, 1990).

Il comportamento del telaio influisce significativamente sulla rottura del vetro e sul collasso dell'intero sistema finestra (Heron et al., 2003). I telai possono essere costituiti da diversi materiali, i più ricorrenti sono: alluminio, legno e PVC (polivinilcloruro) rigido.

L'alluminio, pur essendo un materiale incombustibile che non partecipa alla combustione, subisce una significativa riduzione della resistenza meccanica già a partire da 150°C (Willis et al., 2021) e si deforma a circa 300°C, mentre la fusione avviene tra i 570 e i 660°C (Moss, 1990). Secondo Zhou (2014) l'alluminio rammollisce a temperature comprese tra 250 e 300°C. Queste caratteristiche lo rendono vulnerabile in condizioni di incendio, influenzando la tenuta complessiva della finestra.

Il legno, invece, dà segni di un'imminente ignizione iniziando a carbonizzare e a produrre fumo (Mowrer, 1998). Se non trattato, brucia rapidamente, riducendo drasticamente la stabilità della struttura (Zhou, 2014). Sebbene i telai in legno siano più rigidi rispetto a quelli in alluminio, offrono minor margine di espansione ai pannelli di vetro sottoposti ad incendio. Di conseguenza, le finestre con telaio in legno possono cedere più rapidamente a

causa delle elevate tensioni di trazione generate dalla differenza di temperatura tra il centro e i bordi del pannello (Heron et al., 2003). Dopo la rottura del vetro, il legno continua a bruciare, contribuendo alla propagazione dell'incendio (Fire properties, 2015).

Il PVC rigido, infine, presenta un comportamento differente: brucia solo in presenza di una fonte di combustione nelle vicinanze e richiede elevate concentrazioni di ossigeno per sostenere la fiamma; inoltre, è uno dei materiali con il minor tasso di propagazione del fuoco e di produzione di fumo (Fire Properties, 2015). La sua temperatura di ignizione è pari a 391°C e quella di auto-ignizione è 454°C. Dopo la rottura del vetro, il PVC si deforma ma non alimenta direttamente la combustione, riducendo la sua pericolosità in termini di propagazione delle fiamme. Tuttavia, il principale rischio associato al PVC riguarda la produzione di gas tossici, in particolare il monossido di carbonio, sebbene il legno ne generi quantità superiori (Fire Properties, 2015).

La cricatura del vetro si verifica quando la differenza di temperatura tra il telaio e il pannello supera gli 80-100°C (Giacalone, 2014).

Secondo il Manuale del vetro - Catalogo delle soluzioni Saint-Gobain Italia (2022), la resistenza del vetro alla sollecitazione termica varia in funzione della tipologia e dello spessore. Un vetro comune può sopportare una differenza di temperatura massima di 45°C, mentre un vetro di sicurezza temprato può resistere fino a 200°C.

In molti degli studi consultati, la rottura di una finestra non dipende esclusivamente dalla temperatura raggiunta dai gas caldi, ma anche dall'intensità del flusso termico che investe la lastra vetrata.

Secondo Babrauskas (2010), il comportamento del vetro è diverso a seconda che l'incendio sia interno o esterno. Nel caso di un incendio interno, le temperature critiche per la rottura dipendono dallo spessore della lastra:

- un vetro singolo di 4-6 mm può cedere attorno ai 450°C (Babrauskas, 2010; Pereira, 2020), mentre il distacco dal telaio può verificarsi tra i 400 e i 500°C (O'Connor, 2008);
- un vetro doppio di 6 mm resiste fino a 600°C (Babrauskas, 2010) - tuttavia non è corretto ipotizzare che un doppio vetro abbia una durata doppia rispetto a un vetro singolo in condizioni di incendio (Cuzzillo & Pagni, 2012);
- un vetro temprato presenta una maggiore resistenza poiché un pannello singolo di 10 mm può sopportare temperature fino a 600°C (Peng & Ni, 2016);
- un vetro doppio temprato di 6 mm cede quando si raggiungono 600-800°C (Peng & Ni, 2016).

Per quanto riguarda gli incendi esterni, il principale fattore da considerare è l'entità del flusso termico incidente sulla superficie vetrata (Babrauskas, 2010). Nelle finestre monocamera, la rottura avviene generalmente a temperature superiori ai 450°C, valori simili a quelli osservati per vetri temprati di spessori maggiori a 5 mm (Giacalone, 2014).

Tuttavia, nel caso di finestre con vetro temprato, il cedimento del sistema avviene più frequentemente per il fallimento del telaio piuttosto che per la rottura della lastra vetrata (Mowrer, 1998).

A valle di quanto detto finora sulle varie tipologie di vetri, vi sono infine i vetri antincendio, progettati per resistere alle elevate temperature e ridurre la trasmissione del calore. I vetri stratificati con intercalare intumescente rappresentano una soluzione efficace: in presenza di alte temperature, lo strato intumescente si espande e opacizza la lastra, limitando la rottura del vetro e la caduta di detriti (Perero, 2024). Come si evince dal depliant tecnico Pyrobel, il gel intumescente contenuto in questi vetri inizia a espandersi a circa 120°C, incrementando così la capacità di isolamento termico. Questa tipologia di vetro è resistente al fuoco per via della sensibilità del gel intumescente alle temperature (Setti, 2013).

Sulla base di queste considerazioni, la simulazione di incendio è stata inizialmente impostata assumendo una temperatura di rottura del vetro pari a 450°C, in accordo con le evidenze sperimentali emerse dalla letteratura. Tuttavia, per tenere conto degli effetti dello shock termico, si è ipotizzata una temperatura di *failure* inferiore che è quindi stata ridotta a 250°C.

### **La facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con finestra al piano primo, con temperatura di *failure* pari a 450°C – modello 17**

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

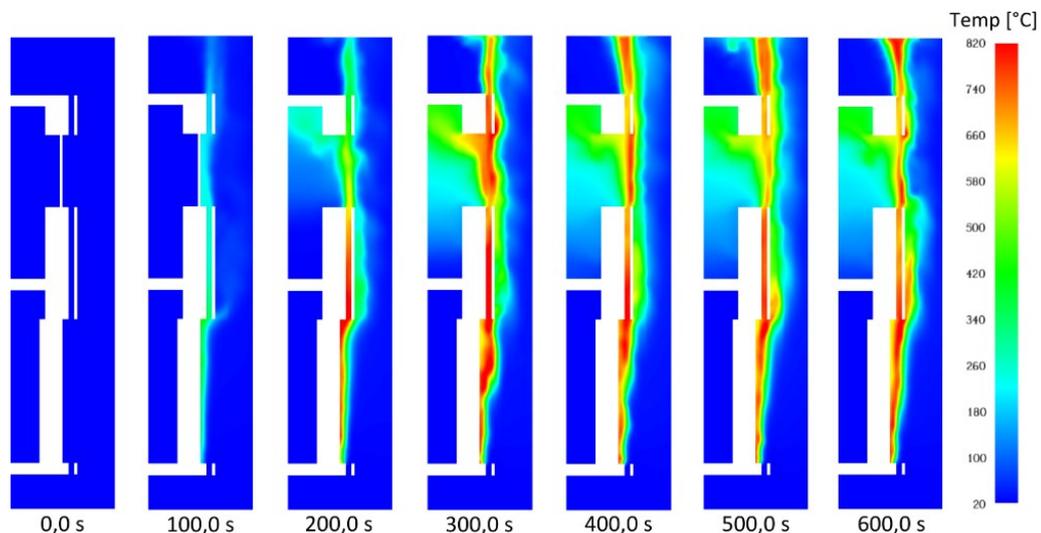


Figure 5.89: *Slice\_x* di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di *failure* 450°C) – modello 17

Nelle Figure 5.89 si osserva che la rottura del vetro avviene tra i 100 e i 200 secondi.

Si noti che le temperature sono prossime a quelle del modello iniziale di facciata ventilata continua incombustibile (modello 7, si veda par. 5.3.2).

Si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

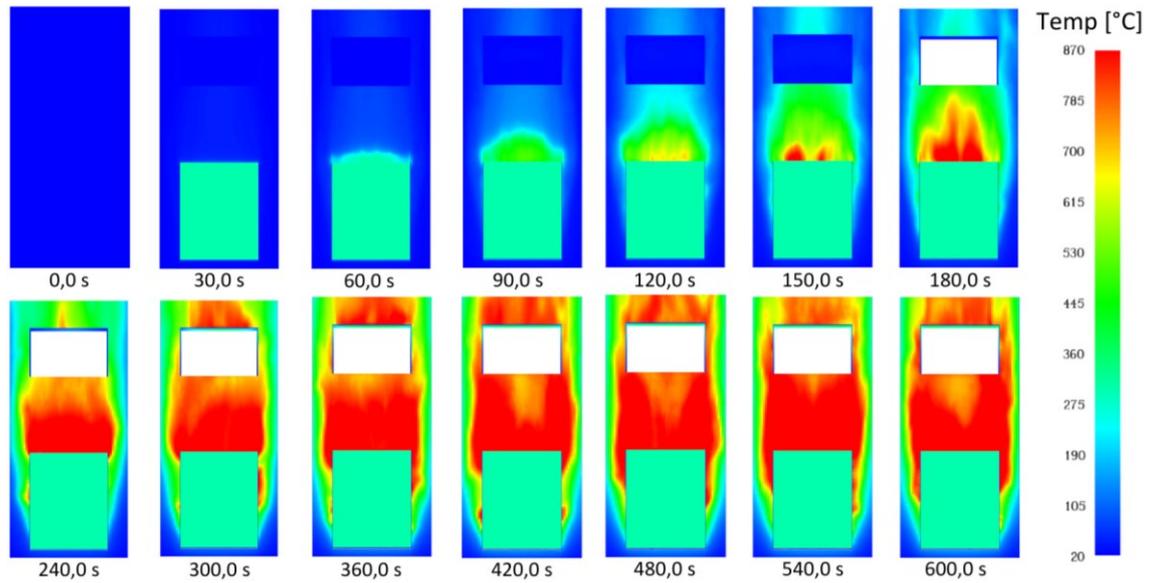


Figure 5.90: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17

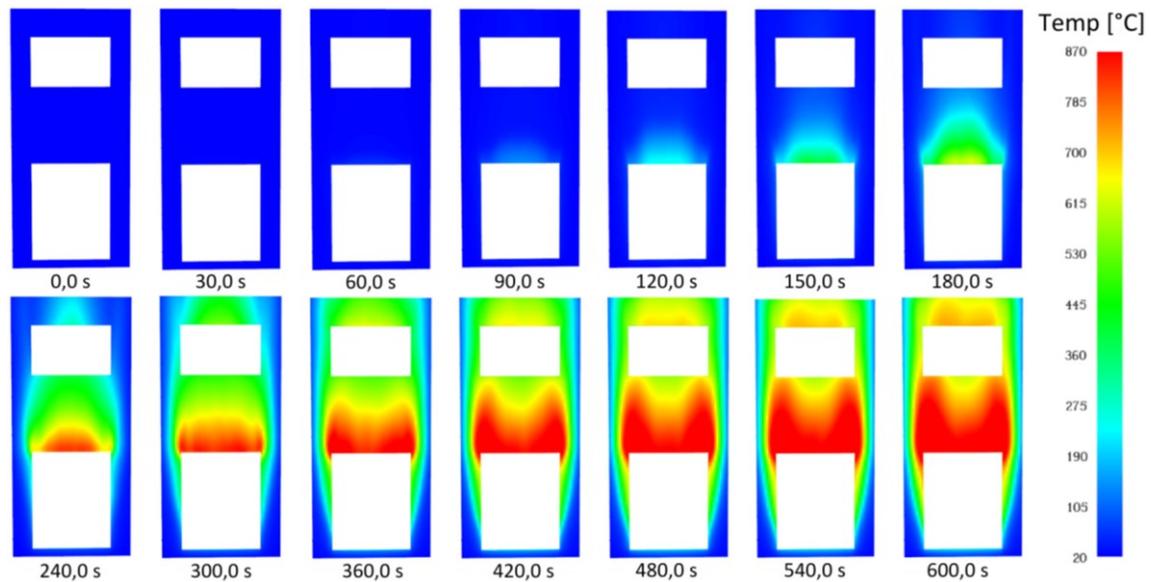


Figure 5.91: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17

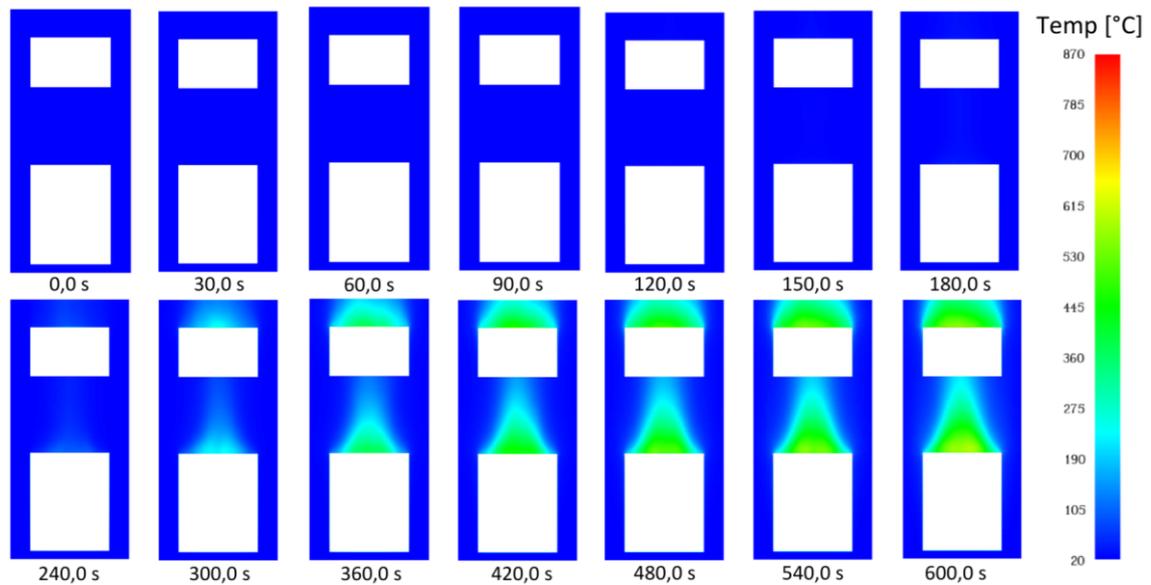


Figure 5.92: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17

Nelle Figure 5.90, Figure 5.91 e Figure 5.92 si può apprezzare la forma del *plume* in termini di temperature, coerente con quanto visto nel corso della trattazione e con quanto emerso dai modelli precedenti.

Le temperature raggiunte sono certamente inferiori rispetto ai casi precedenti poiché la curva RHR in input ha un andamento differente, ovvero è prima crescente e poi costante a 5000 kW, la stratigrafia è incombustibile e si ha un diverso apporto di comburente e ventilazione.

Di seguito si riporta il grafico della termocoppia posta sul vetro, la quale è stata associata ad un controllo per simularne la rottura alla temperatura di *failure* di 450°C.

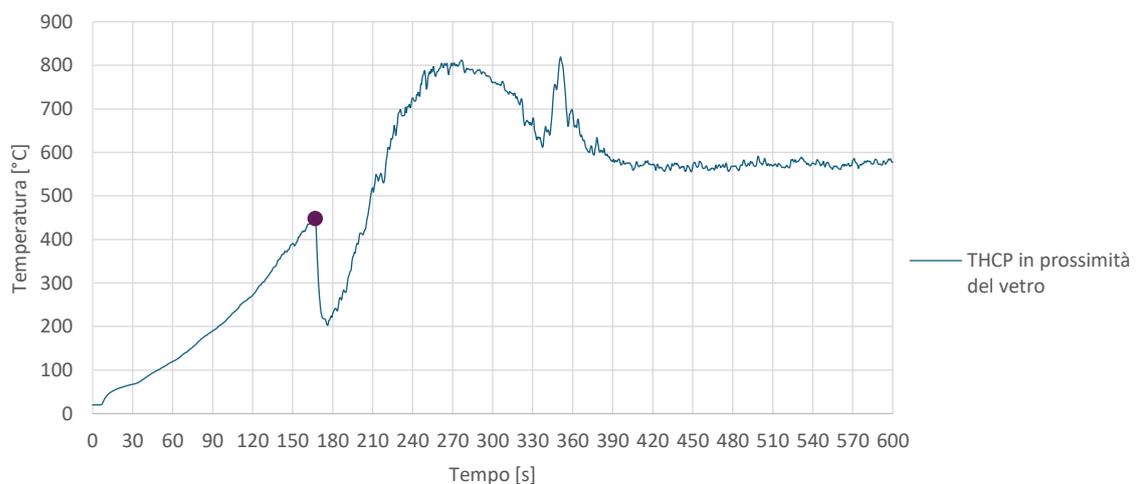


Figura 5.93: I risultati della termocoppia posta in prossimità del vetro – modello 21

Si noti che, in corrispondenza della rottura del vetro a 450°C a 166,8 secondi, si ha un calo delle temperature dovuto all'aumento dell'apporto di aria e della ventilazione, proprio a causa del cedimento della finestra.

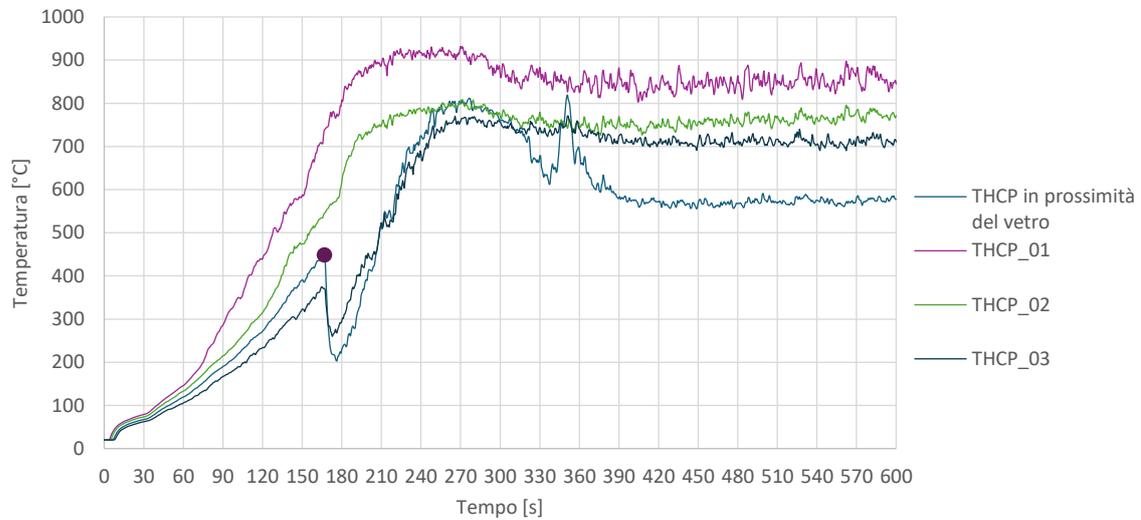


Figura 5.94: I risultati delle termocoppie impostate nella simulazione – modello 21

L'andamento della temperatura data dalla termocoppia 3 ha un trend molto prossimo a quella della termocoppia del vetro e ciò accade per via della loro vicinanza.

In ogni caso, tutti gli andamenti presentano una forma molto simile. Entro i primi 90 secondi i trend sono del tutto analoghi, mentre successivamente mostrano differenze dell'ordine dei 50-100°C. Tra i 180 e i 300 secondi si ha una fase di picco per tutti gli andamenti; dopo tale lasso di tempo, si vede che tutti i trend assumono un andamento più o meno costante, a meno di alcune oscillazioni, attorno a valori di 850°C per la termocoppia 1 (più prossima al *burner*), 750-770°C circa per la termocoppia 2 (distante 1 metro rispetto alla THCP\_01) e 570-580°C per la termocoppia 3 (posta sopra la finestra).

**La facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con finestra al piano primo, con temperatura di *failure* pari a 250°C – modello 18**

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

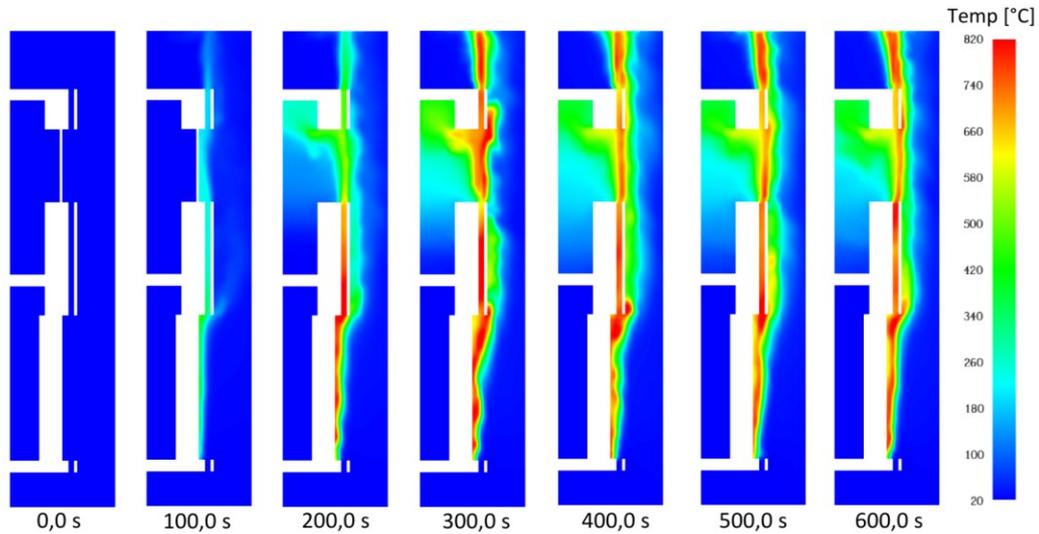


Figure 5.95: *Slice\_x* di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di *failure* 250°C) – modello 18

Se si confrontano le Figure 5.95 con le Figure 5.89, graficamente non si apprezzano differenze significative tra i due modelli. Pertanto, valgono le stesse considerazioni.

Si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

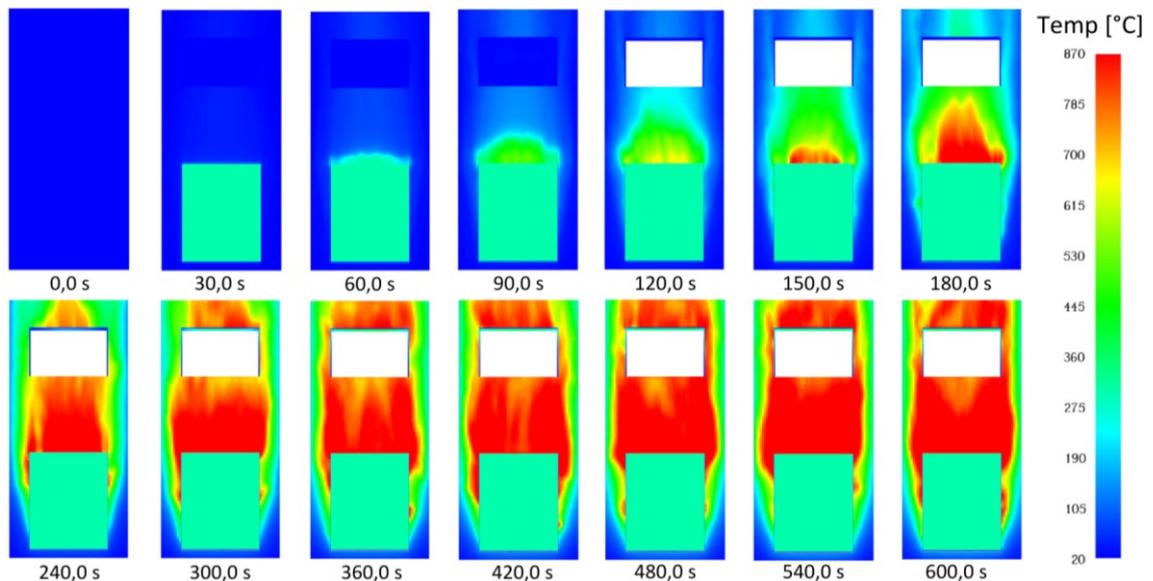


Figure 5.96: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di *failure* 250°C) – modello 18

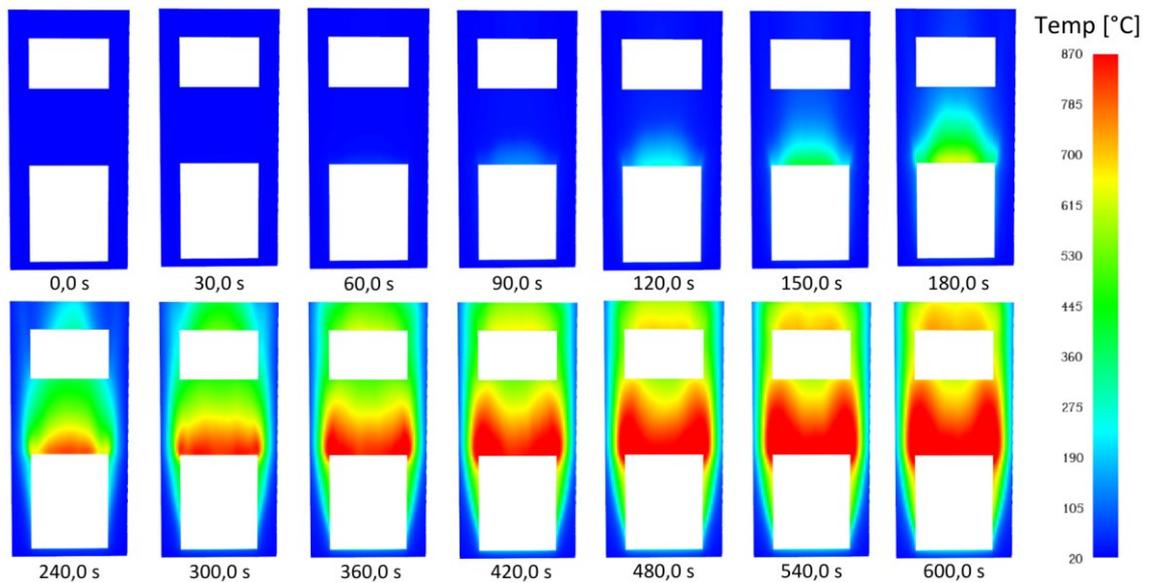


Figure 5.97: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18

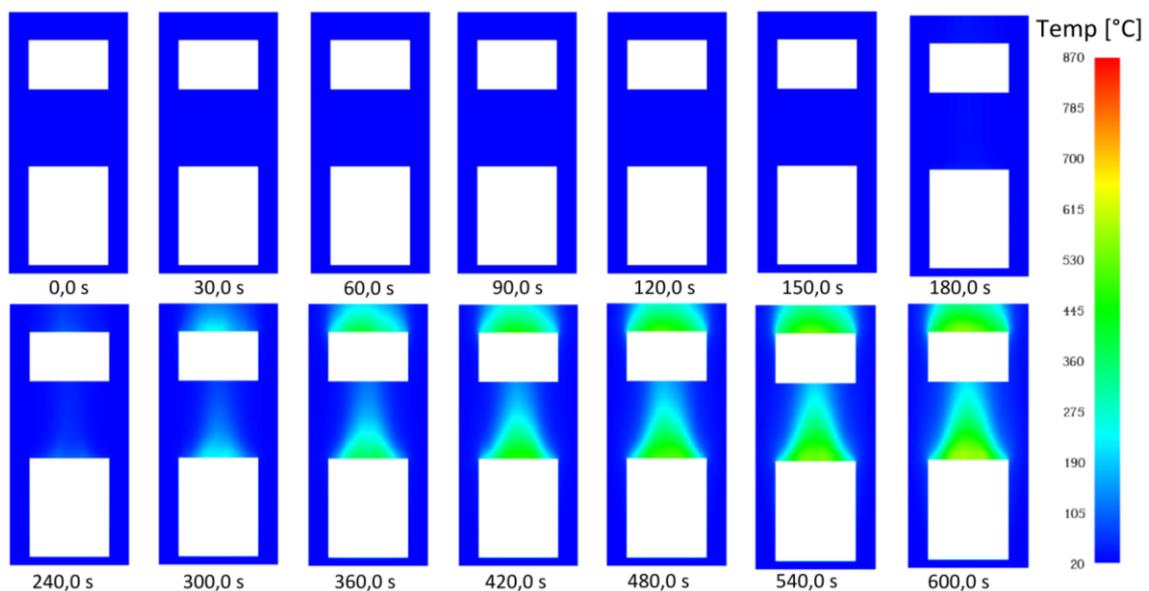


Figure 5.98: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18

Se si confrontano le Figure 5.96 con le Figure 5.90, le Figure 5.97 con le Figure 5.91 e le Figure 5.98 con le Figure 5.92, anche in questo caso graficamente non si apprezzano differenze significative tra i due modelli.

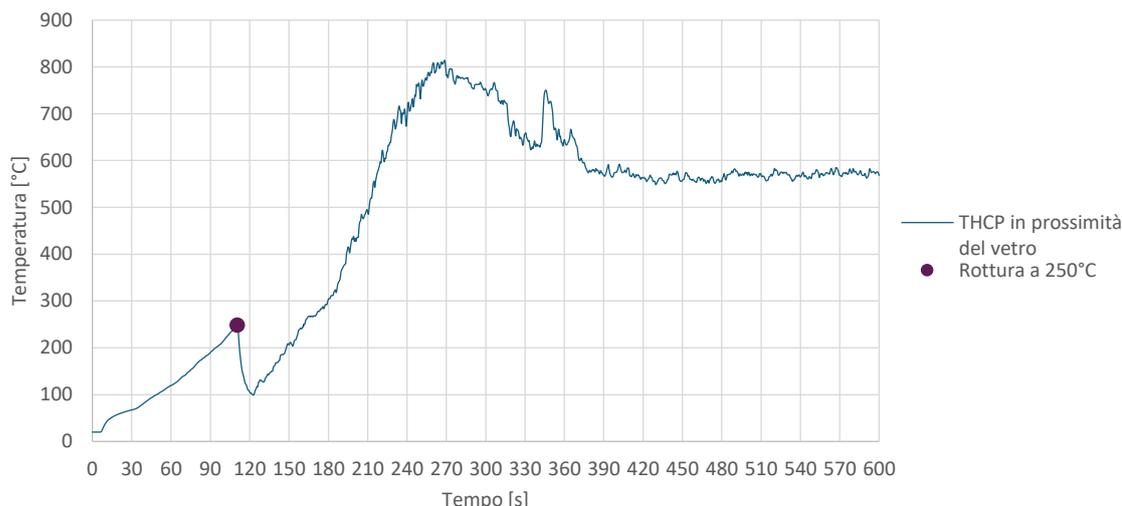


Figura 5.99: I risultati della termocoppia posta in prossimità del vetro – modello 18

Dal confronto tra la Figura 5.99 e la Figura 5.93 si osserva un andamento molto prossimo, dove si ha la stessa forma del trend ma la rottura, avvenendo a 250°C, si manifesta prima rispetto al caso precedente. In effetti, se precedentemente il vetro cede a 450°C a 166,8 secondi, in questo caso il fenomeno accade a 250°C a 110,4 secondi. Anche in questo caso, poco oltre il punto di rottura del vetro, si ha un calo delle temperature dovuto all'aumento dell'apporto di aria e della ventilazione, proprio a causa del cedimento della finestra.

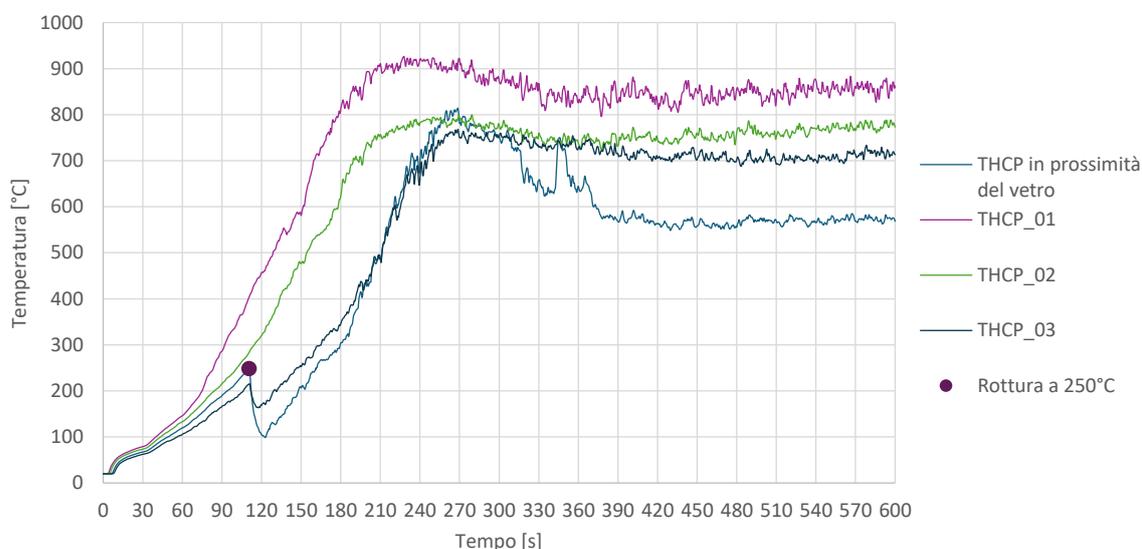


Figura 5.100: I risultati delle termocoppie impostate nella simulazione – modello 18

Per la Figura 5.100 valgono le medesime considerazioni della Figura 5.94.

Per quanto riguarda i dati analitici si guardano i risultati ottenuti dalle sonde, prima strato per strato e successivamente a parità di quota.

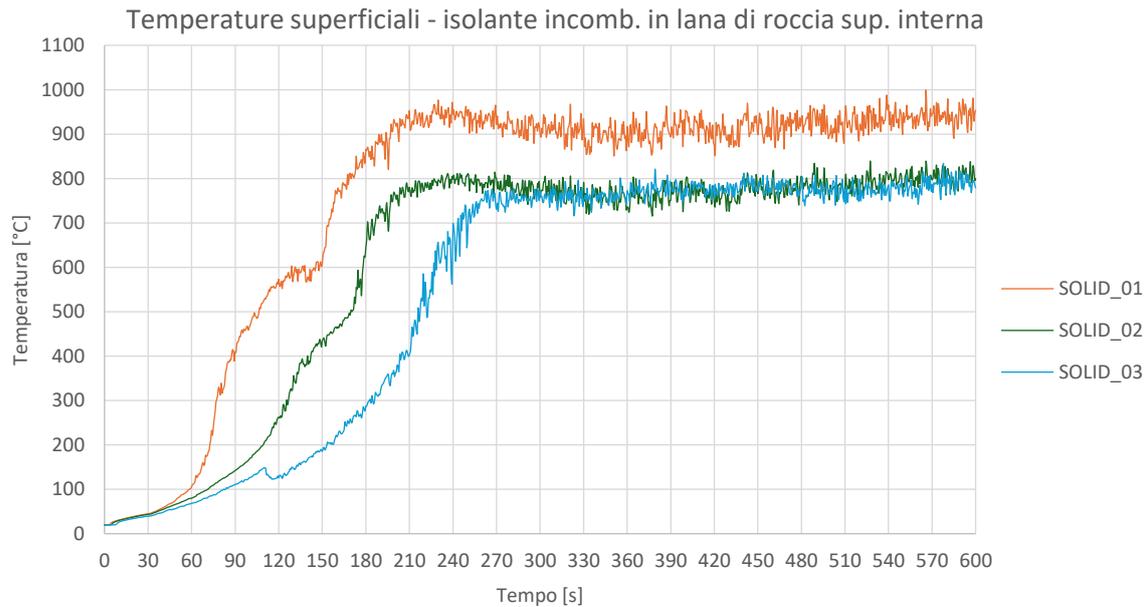


Figura 5.101: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento incombustibile – modello 18

In Figura 5.101 si nota che gli andamenti delle temperature nel tempo delle sonde 1,2 e 3 sono molto prossimi entro i primi 60 secondi; successivamente, i trend si distanziano e hanno forme un po' differenti.

La sonda 1, quella più vicina al *burner*, mostra delle temperature più alte data la sua vicinanza con la fonte dell'incendio.

Si noti che il trend della sonda 2, distante circa un metro dalla sonda 1, ad un primo sguardo, potrebbe dare l'impressione di essere un andamento a metà tra quelli delle sonde 1 e 3. La funzione dei dati provenienti dalla sonda 2 ha una forma molto simile e segue il trend precedente della sonda 1: tra i 60 e i 120 secondi si nota che i trend 1 e 2 sono molto divergenti, con una forma diversa e con distanze di qualche centinaio di gradi celsius; invece, tra i 120 e i 150 secondi, si nota una fase di "assestamento"; successivamente, i due trend seguono un andamento molto simile, con la stessa forma e distanziati di circa 200°C.

La sonda 3, più lontana dal *burner*, ha un'evoluzione differente: si ha una fase di crescita seguita da un crollo a 110-111 secondi circa, in corrispondenza della rottura del vetro a 110,4 secondi; successivamente, il trend riprende il suo andamento crescente con una pendenza maggiore – la velocità di crescita delle temperature aumenta poiché la curva RHR è anch'essa nella fase di crescita; fino a 210 secondi il suo andamento prosegue in maniera differente rispetto alle sonde 1 e 2, mostrando una forma diversa e una distanza di qualche centinaio di gradi celsius rispetto agli andamenti temperatura-tempo delle sonde 1 e 2; dopo 210 secondi il trend mostra delle similarità con i precedenti e dopo 270 secondi (3 minuti) le sonde 2 e 3 presentano le stesse temperature.

Le temperature superficiali finali dello strato di isolamento si attestano a 950°C per la sonda 1 e attorno agli 800°C per le sonde 2 e 3.

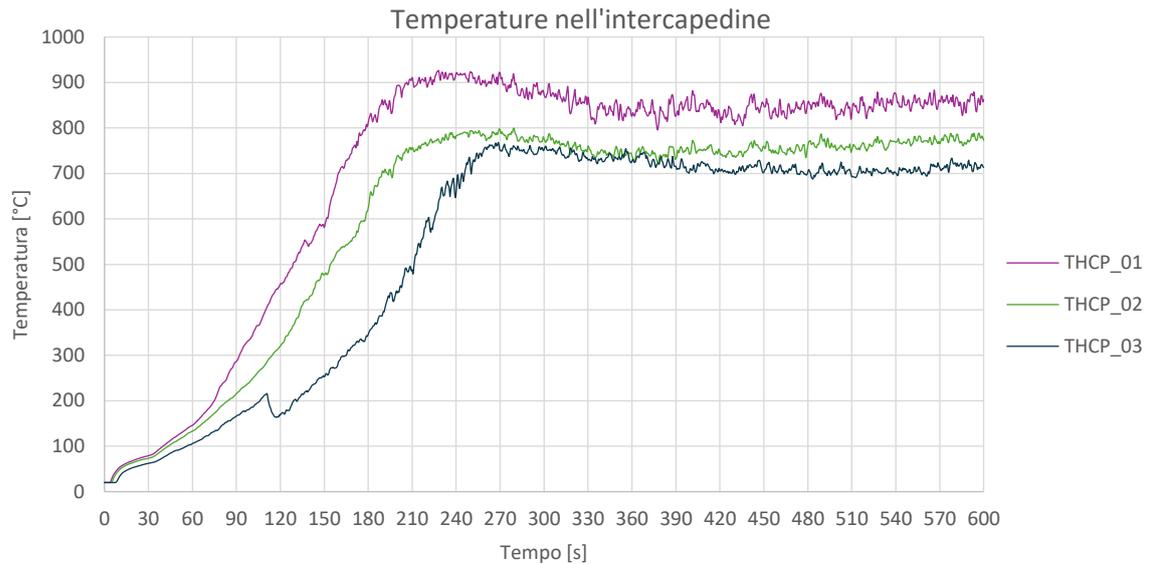


Figura 5.102: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 18

Per la Figura 5.102 valgono considerazioni analoghe al caso di Figura 5.101 e si faccia riferimento alle osservazioni precedenti riportate dopo la Figura 5.100. Si noti che le temperature sono più basse rispetto alla figura precedente, poiché è coinvolto il fluido aria (mentre, al caso precedente, era coinvolto un materiale solido). Si osservi anche che, dopo 270 secondi (3 minuti), la termocoppia 2 e la termocoppia 3 mostrano delle temperature prossime con una differenza di temperatura che può variare da pochi gradi celsius fino a circa 80°C.

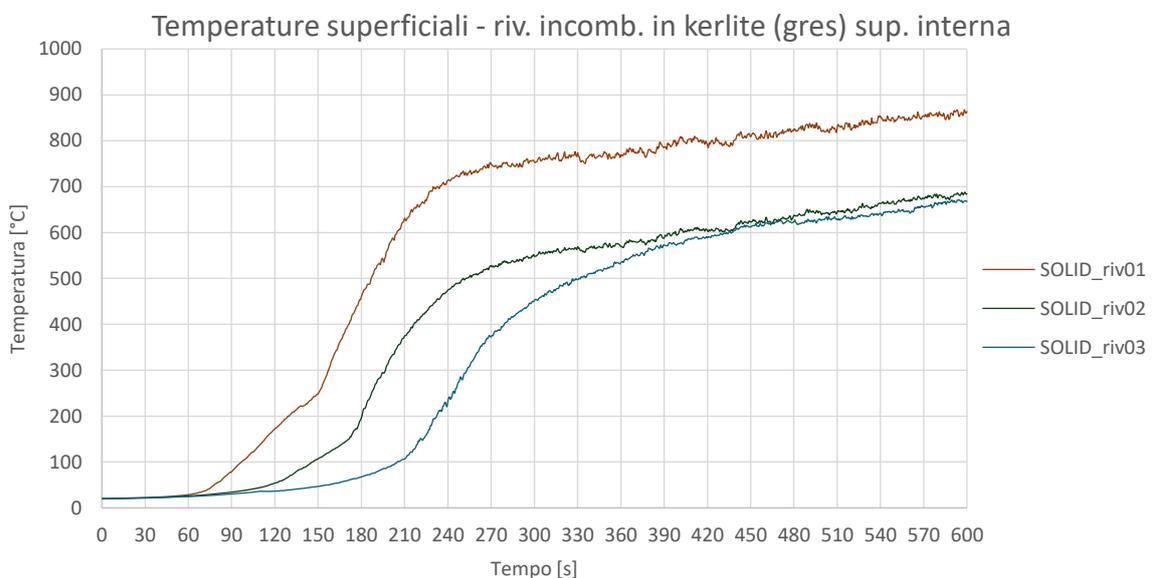


Figura 5.103: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 18

La Figura 5.103 mostra gli andamenti delle temperature superficiali del rivestimento. I trend hanno forme molto simili: da 0 a 60 secondi hanno gli stessi valori di temperatura; dopo i 60 secondi hanno lo stesso andamento a S e un distanziamento in termini di temperature

via via crescente, mostrando differenze dell'ordine di 50-100°C fino a 200-300°C; dopo 270 secondi (3 minuti) le sonde del rivestimento 2 e 3 hanno lo stesso andamento con una differenza di temperatura di 200°C circa; il trend della sonda 3 dopo i 360°C converge con quello della sonda 2, arrivando ad una temperatura finale di circa 670-680°C; mentre, le temperature finali raggiunte dalla sonda 1, la più vicina al *burner*, sono circa 860-870°C.

A questo punto, i dati dei *devices* sono stati analizzati a parità di posizionamento, ossia a parità di quota.

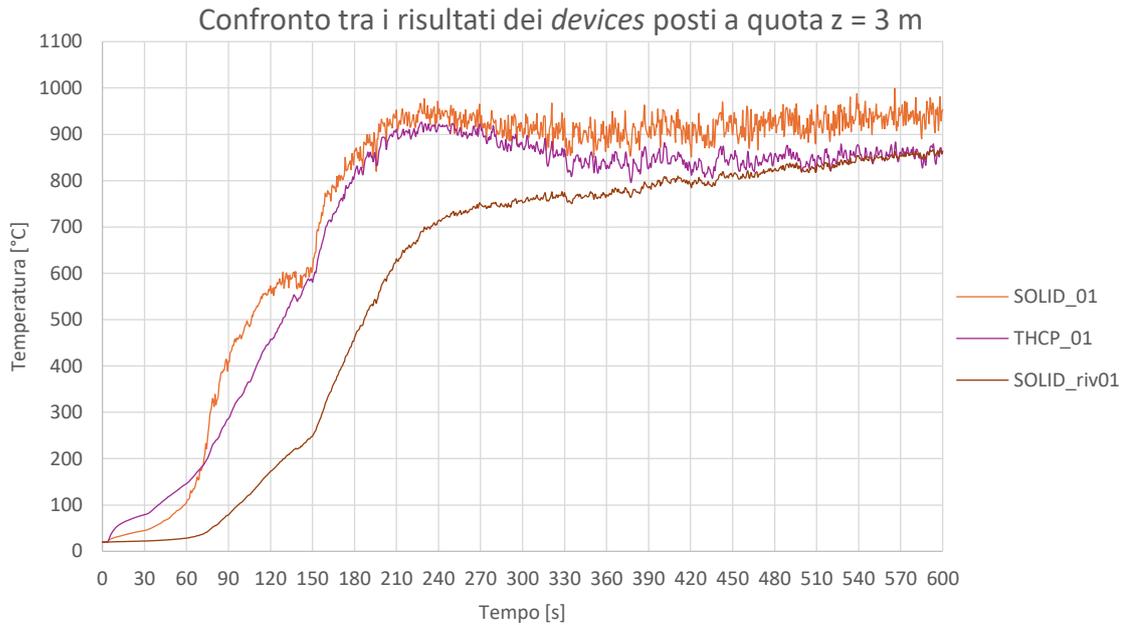


Figura 5.104: Le temperature dei *devices* a 0,5 m dal *burner* – modello 18

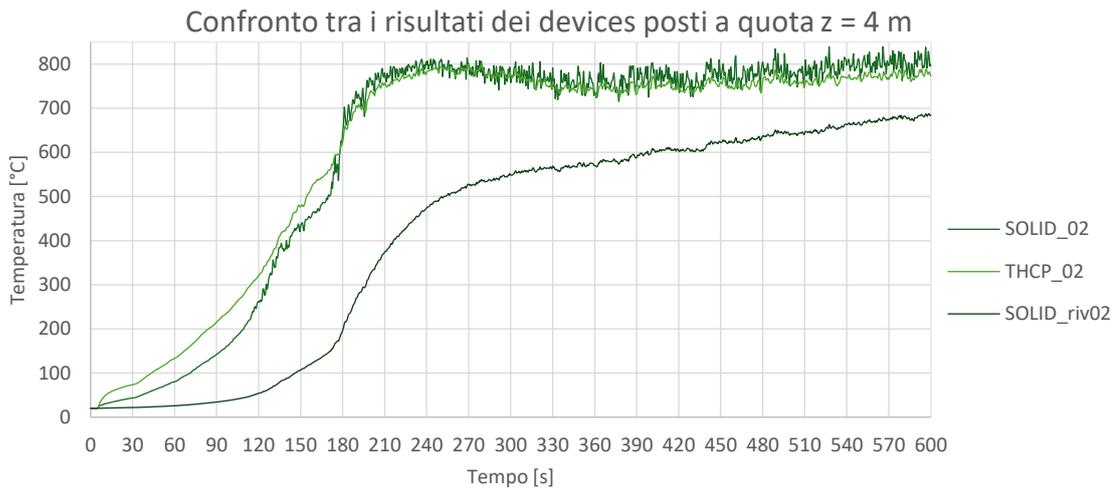


Figura 5.105: Le temperature dei *devices* a 1 m dal *burner* – modello 18

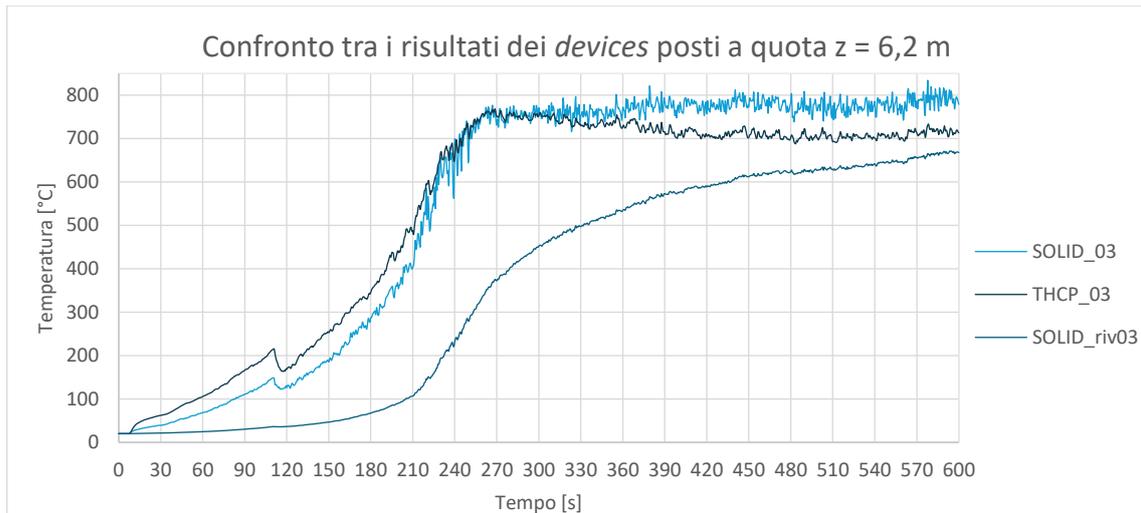


Figura 5.106: Le temperature dei *devices* a 3,7 m dal burner – modello 18

Dalle immagini di Figura 5.104, Figura 5.105 e Figura 5.106 si nota che: isolamento e intercapedine evidenziano andamenti delle temperature molto prossimi, in particolare in prossimità del *burner*; al contrario, il rivestimento ha un andamento differente e distanziato per via dell'effetto benefico della lama d'aria.

### 5.3.7. La facciata ventilata incombustibile con una fascia di separazione di 1 metro – modello 19

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

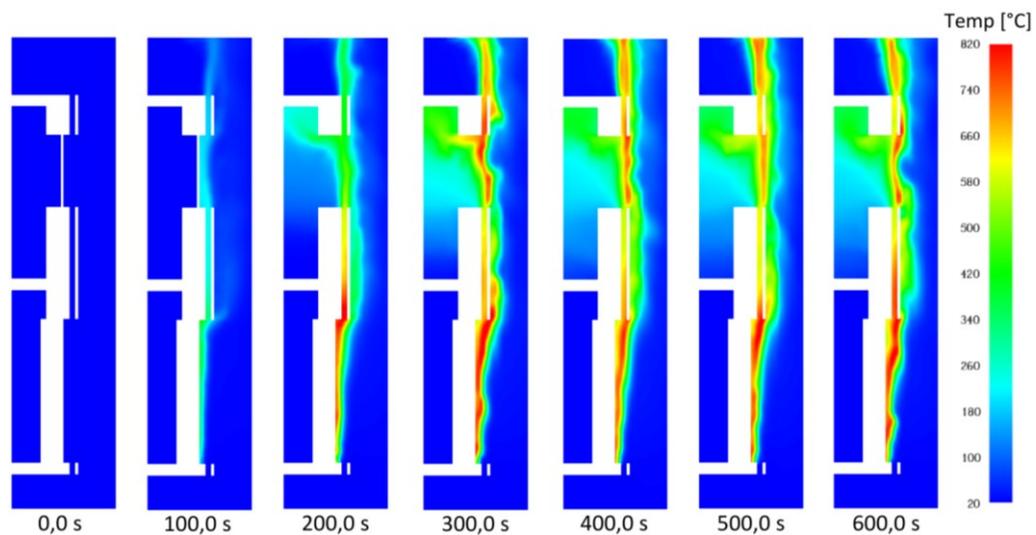


Figure 5.107: *Slice\_x* di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di *failure* 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19

Se si confrontano le Figure 5.107 con le precedenti Figure 5.95 non si apprezzano significative differenze grafiche.

Si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

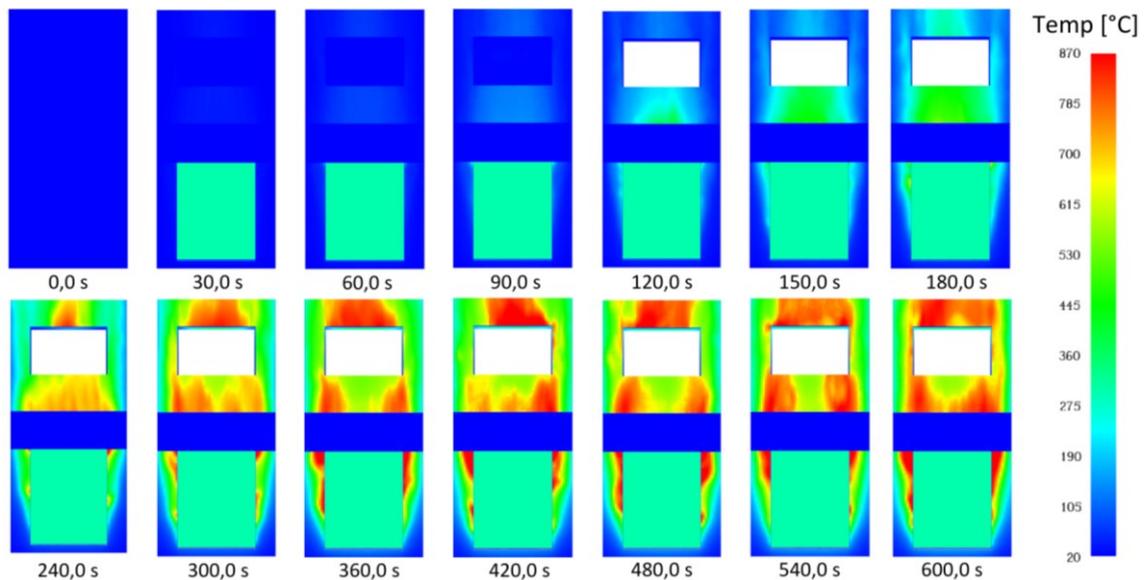


Figure 5.108: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19

Dalle Figure 5.108 si osserva in maniera evidente la presenza della fascia di separazione, la quale rimane a 20°C perché è stata realizzata con il materiale inerte. La scelta di un materiale inerte è stata fatta perché, in questo caso, non è necessario verificarne le caratteristiche di reazione e resistenza al fuoco che si assumono già adeguate. Si ipotizza che tale fascia non partecipi alla combustione e all'incendio, che sia incombustibile, che non reagisca al fuoco e che sia in grado di resistere per tutta la durata dell'incendio, assolvendo anche ai requisiti di resistenza al fuoco. Infatti, l'obiettivo non è testare il materiale, come avviene nelle prove sperimentali per la certificazione delle prestazioni, ma valutare esclusivamente l'efficacia della soluzione antincendio. Tuttavia, si consiglia al progettista che deve effettuare tale verifica di predisporre il materiale reale di cui sono costituite le fasce di separazione, guardando le proprietà che sono disponibili sulle schede tecniche del produttore.

Si noti che la presenza della fascia cambia il layout del *plume* delle temperature sulla superficie dell'isolante in facciata, sebbene esso mostri comunque temperature molto alte. Ciò implica che la fascia di separazione di un metro non è sufficiente ad abbattere la propagazione dell'incendio in facciata e a contenere lo sviluppo delle temperature.

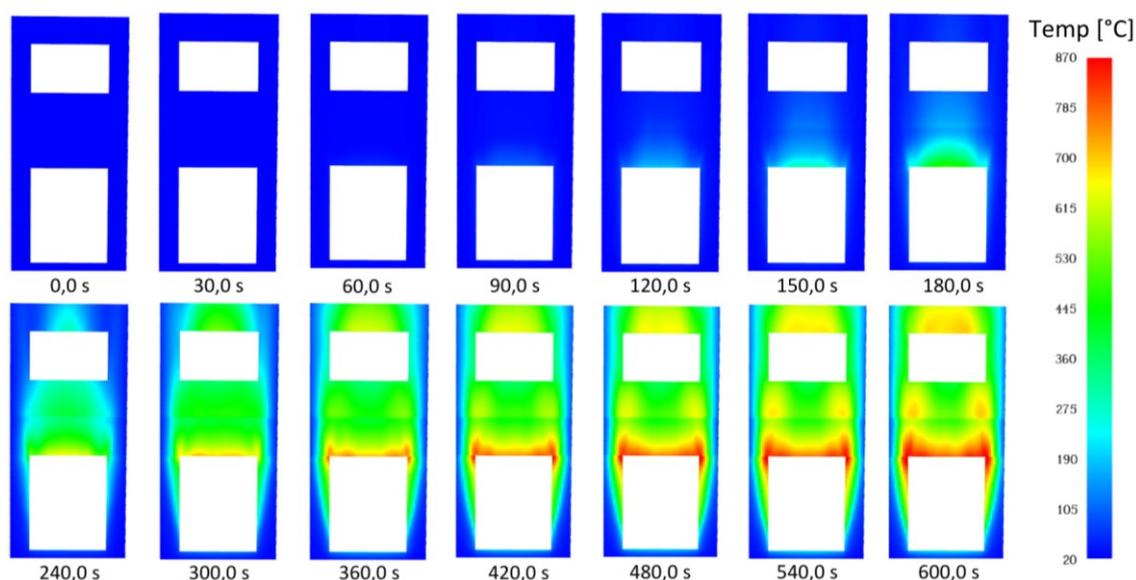


Figure 5.109: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19

Se si confrontano le Figure 5.109 con le Figure 5.97, si nota che il *plume* delle temperature superficiali del rivestimento è differente: infatti, si osservano temperature più basse in corrispondenza della fascia di separazione di 1 metro. Quindi, la presenza della fascia ha un effetto benefico per quanto riguarda la superficie interna del rivestimento.

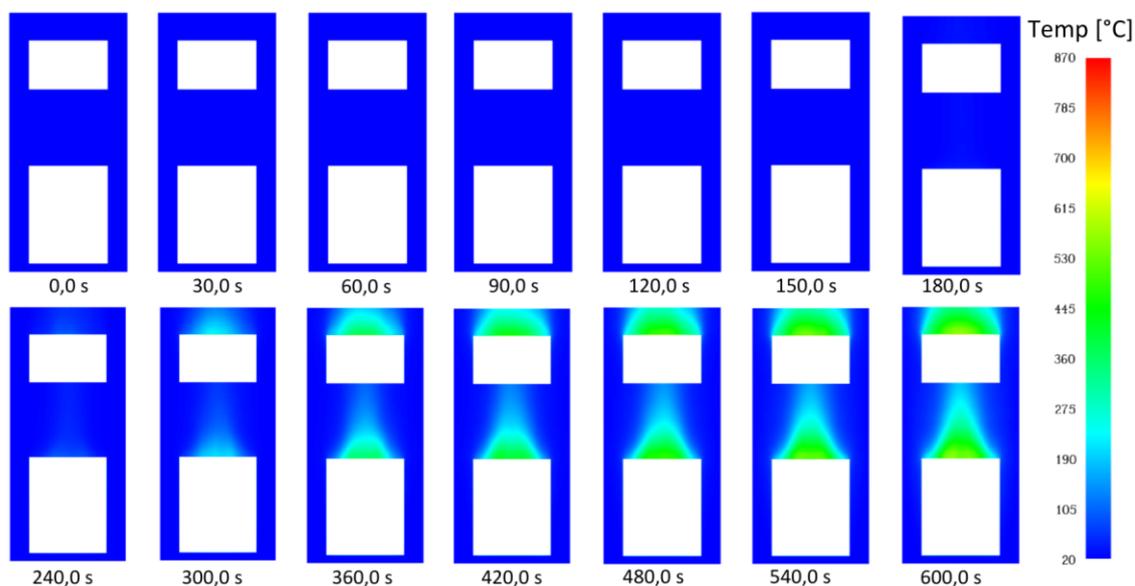


Figure 5.110: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19

Se si confrontano le Figure 5.110 con le Figure 5.98, non si riscontrano significative differenze grafiche.

Si noti che la fascia di separazione di 1 metro non garantisce un adeguato impedimento alla propagazione dell'incendio e all'evoluzione delle temperature. In effetti, nonostante la

presenza di tali fasce, si riscontrano temperature elevate e si osserva un *plume* con un'estensione considerevole.

### 5.3.8. La facciata ventilata incombustibile con un cavity barrier – modello 20

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura in direzione x, ossia in direzione trasversale.

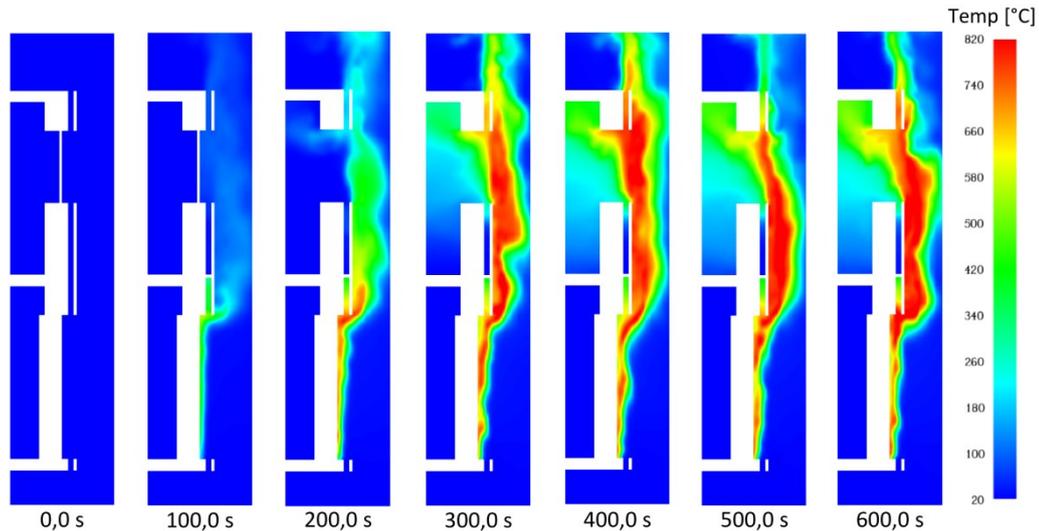


Figure 5.111: *Slice\_x* di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20

Se si confrontano le Figure 5.111 con le Figure 5.95, si nota che la forma e l'estensione del *plume* sono diverse: a causa della presenza della cavity barrier, che si attiva tra gli 0 e i 100 secondi, lo sviluppo del pennacchio delle temperature è orientato in orizzontale. Tale soluzione antincendio “piega” in orizzontale il *plume*, orientandolo verso l'esterno della facciata. La propagazione dell'incendio all'interno dell'intercapedine si verifica lo stesso al piano superiore, per via della rottura del vetro che avviene tra i 100 e i 200 secondi, per via dei fenomeni di adesione dei fumi e gas caldi e per via dei complessi fenomeni fluidodinamici che entrano in gioco. Pertanto, la cavity barrier è una buona soluzione antincendio perché contribuisce alla limitazione della propagazione dell'incendio, ma non riesce ad ostacolare completamente e ad arrestare l'avanzamento delle fiamme, dei gas e dei fumi che si sprigionano.

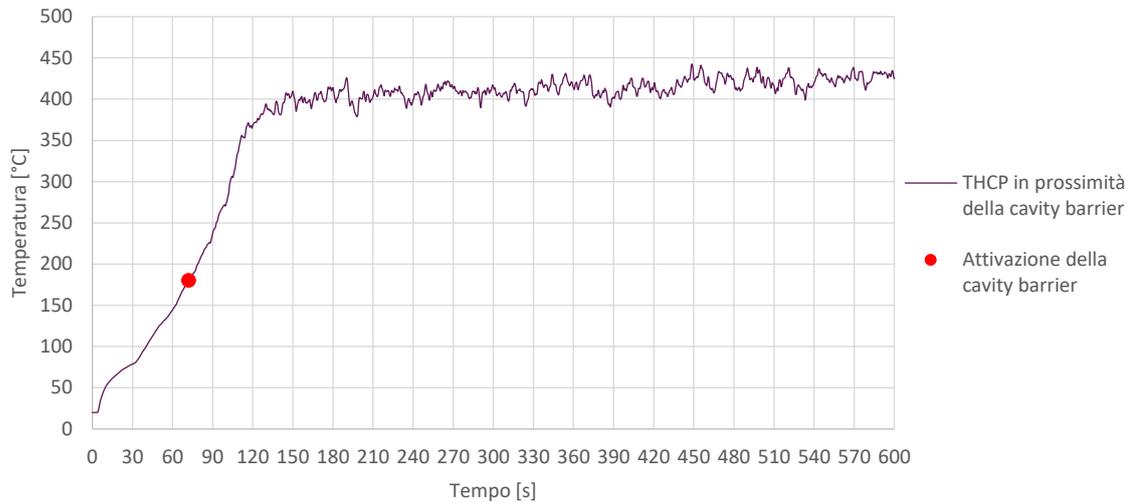


Figura 5.112: Attivazione della cavity barrier

Nel grafico di Figura 5.112 si vede che la cavity barrier si attiva a 72 secondi alla temperatura di 180°C.

Tale temperatura è stata impostata dopo la consultazione di alcune schede tecniche di AF Systems, azienda produttrice di tali sistemi e di molte altre soluzioni per le facciate<sup>46</sup>. Infatti, nella maggior parte dei casi, questi prodotti hanno una temperatura di attivazione pari a 180°C.

Inoltre, la rottura del vetro avviene tra i 100 e i 200 secondi. Si riporta il grafico della termocoppia posta in prossimità del vetro della finestra.

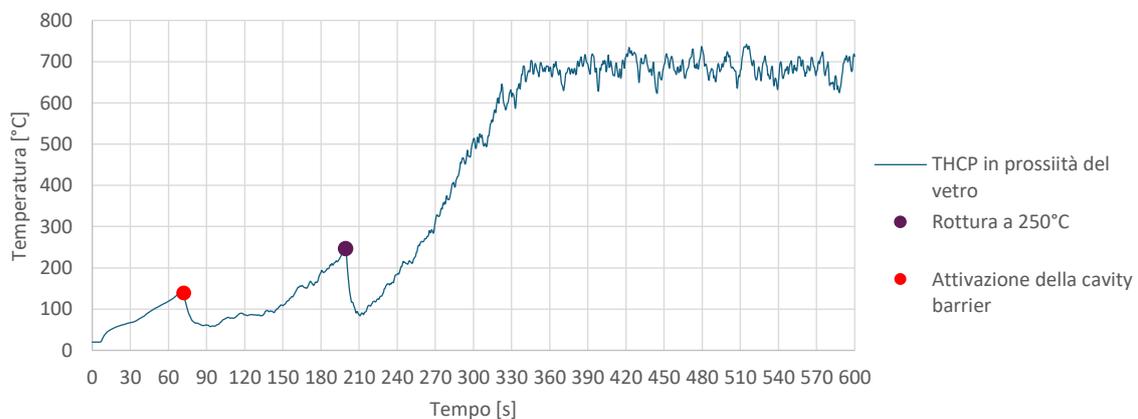


Figura 5.113: I dati della termocoppia posizionata in prossimità del vetro - modello 20

Come si nota dalla Figura 5.113 la rottura del vetro avviene a 199 secondi e in corrispondenza di tale fenomeno e dell'attivazione della cavity barrier si hanno due forti diminuzioni nell'andamento delle temperature nel tempo.

A questo punto, si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

<sup>46</sup> Le schede tecniche sono state consultate dal sito ufficiale di [AF Systems](#).

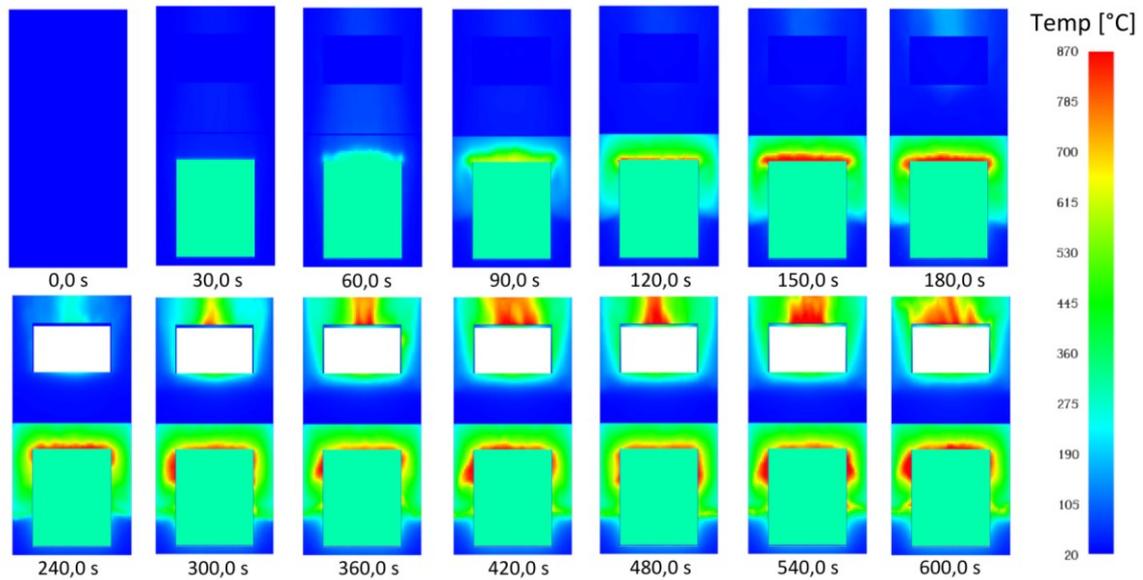


Figure 5.114: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20

Nella Figure 5.114 si può apprezzare la capacità della cavity barrier di ostacolare la propagazione dell'incendio. È da notare che comunque nella parte superiore delle aperture si sviluppano temperature molto alte.

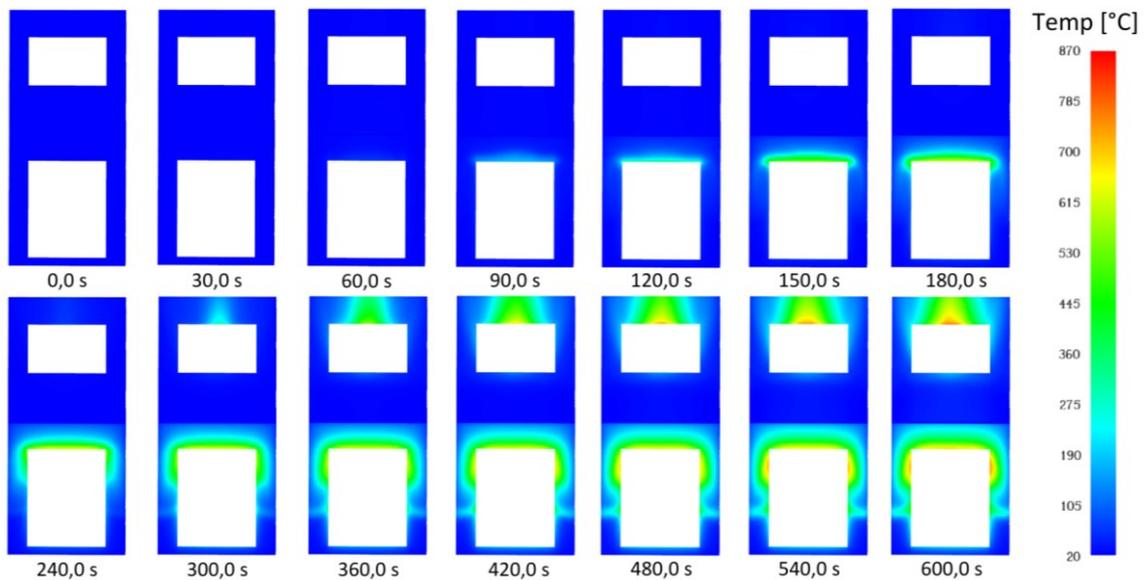


Figure 5.115: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20

Le Figure 5.115 mostrano una mappatura delle temperature della superficie interna del rivestimento che riflette quella delle *color maps* delle Figure 5.114.

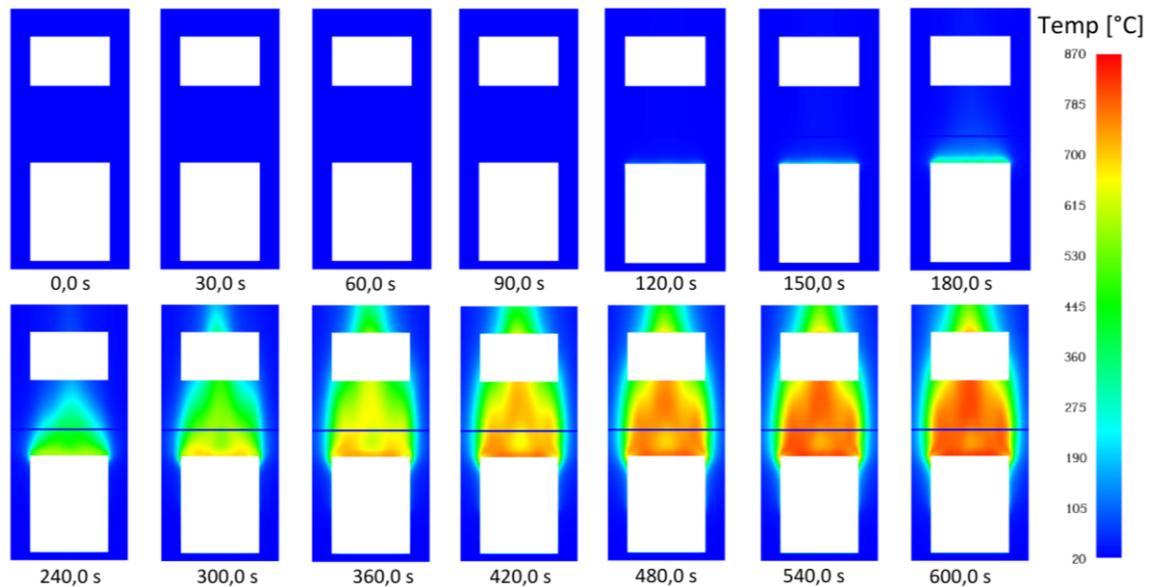


Figure 5.116: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20

Le Figure 5.116 palesano quanto già detto per le Figure 5.111: il *plume* delle temperature si manifesta sulla superficie esterna del rivestimento poiché, data la presenza della cavity barrier, l'incendio viene orientato verso l'esterno dell'edificio.

### 5.3.9. Il confronto tra le soluzioni antincendio (modelli 18-20)

Si riportano i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine alle quote 3 m, 4 m e 6,2 m rispetto al piano orizzontale di riferimento.

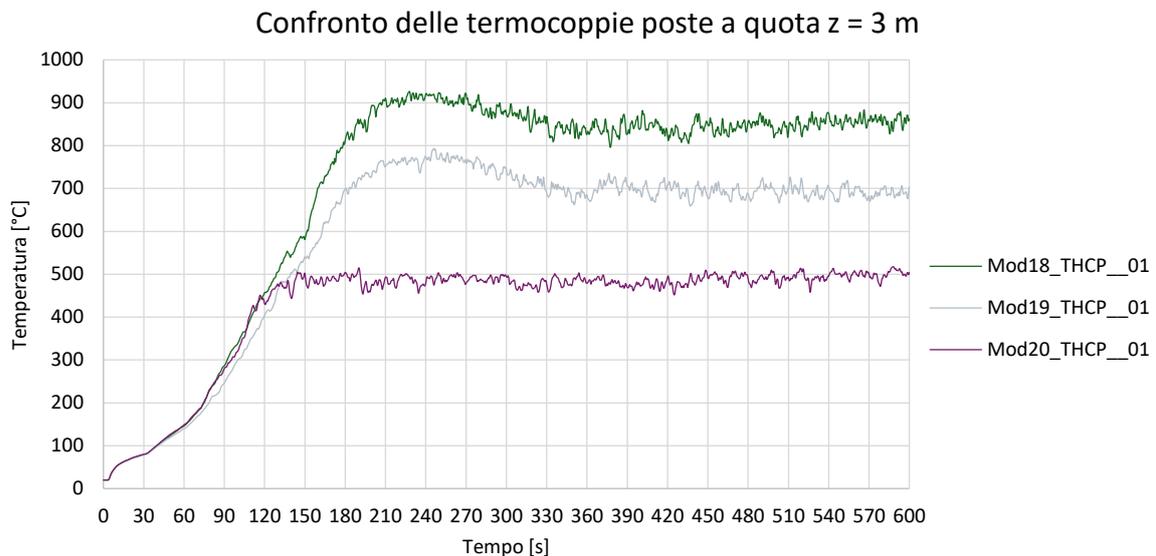
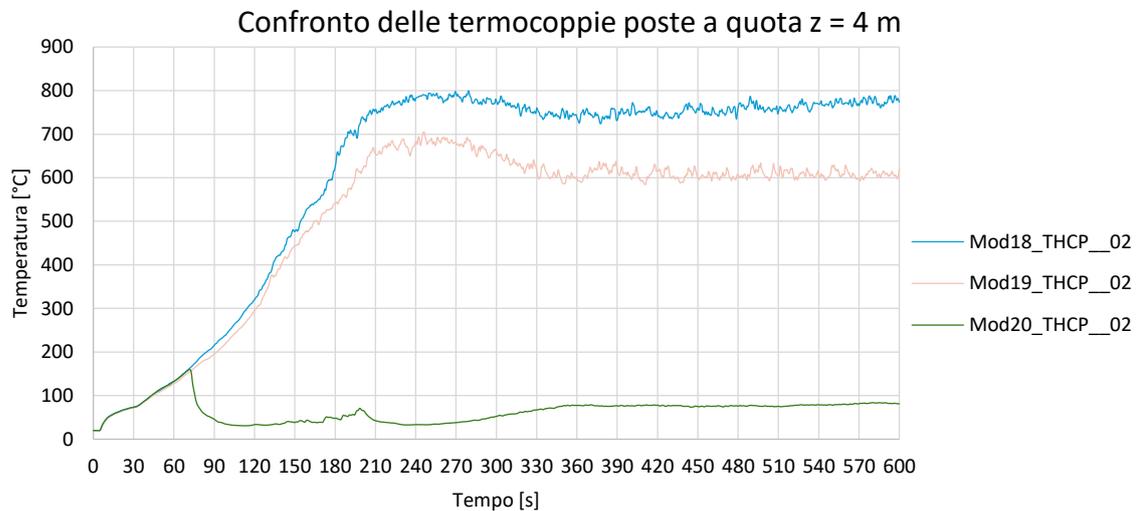


Figure 5.117: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 0,5 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20

In Figura 5.117 si osserva che i dati delle termocoppie mostrano lo stesso andamento fino a 120 secondi. Successivamente, i trend divergono tra loro: si noti che l'andamento della termocoppia 1 del modello 19 (con presenza della fascia di separazione di 1 m) segue quello

della termocoppia 1 del modello 18 (facciata incombustibile), con una differenza di temperature che varia da poche decine di gradi celsius iniziali a 150-180°C circa tra i 210 e i 600 secondi. Invece, il trend dei dati della termocoppia 1 del modello 20 (con cavity barrier) ha un percorso diverso rispetto ai precedenti: in effetti, la temperatura ha una fase di assestamento tra i 120 e i 150 secondi e poi, data la presenza del cavity barrier, ha una fase di stazionarietà in cui i dati di temperatura oscillano attorno a valori pari a 500°C.

Si desume che la fascia ha un effetto benefico perché abbatte le temperature con uno scarto pari a 150-200°C rispetto alla soluzione di facciata ventilata semplicemente incombustibile. Tuttavia, la soluzione cavity barrier risulta migliore e più efficiente poiché la figura mostra un abbattimento maggiore delle temperature: infatti, vi è una differenza di temperature che varia da valori di 200°C fino a 300°C talvolta (si veda tra i 180 e i 600 secondi) tra i dati del modello 19 e 20.



*Figura 5.118: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 1,5 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20*

Dal grafico di Figura 5.118 si evidenzia meglio l'abbattimento delle temperature applicando la fascia di separazione di 1 m (modello 19) rispetto alla sola facciata incombustibile (modello 18). Infatti, si hanno andamenti con differenze che variano da valori pari a 100-150°C fino a 180°C circa. Tuttavia, il trend dei dati del modello con la cavity barrier (modello 20) ha sicuramente un abbattimento molto più marcato. Quindi, sembrerebbe che tale soluzione sia sicuramente preferibile alla fascia di separazione.

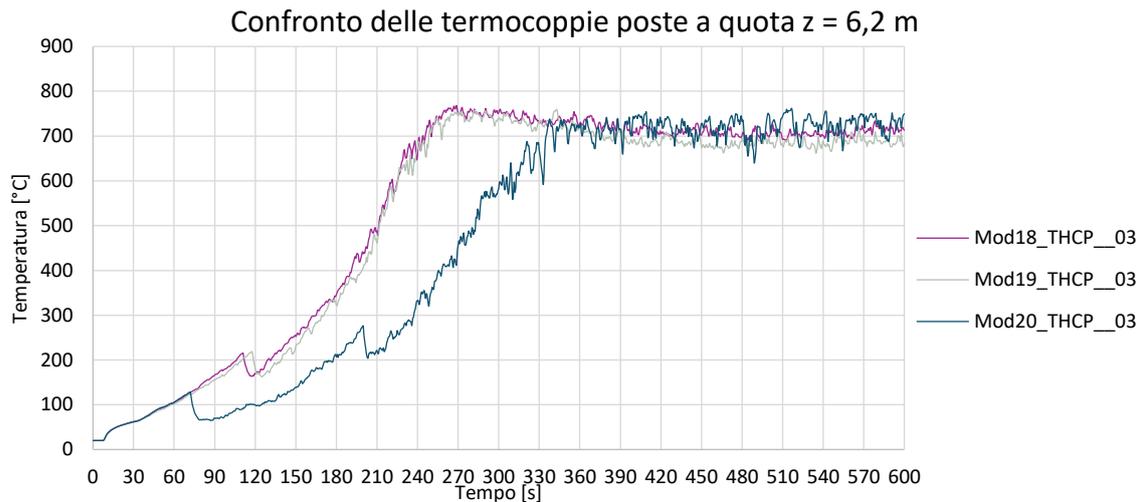


Figura 5.119: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3,7 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20

Dal grafico di Figura 5.119 si può notare che il modello con facciata incombustibile (modello 18) e quello con l'applicazione della fascia di separazione di 1 m (modello 19) hanno quasi lo stesso andamento, sia in termini di forma del trend sia in termini di valori dei dati. Si notino anche i punti di massimo locali in corrispondenza della rottura del vetro della finestra al piano primo. Invece, il trend della termocoppia 3 del modello con cavity barrier (modello 20) ha un andamento differente dai precedenti: esso segue i trend dei modelli 18 e 19 fino a 72 secondi, istante di tempo associato all'attivazione della cavity barrier; segue un calo dei valori di temperatura e a 82 secondi si ha una nuova fase di crescita; tale fase prosegue fino a 199 secondi, che corrisponde all'istante in cui si rompe la finestra vetrata; dopo i 199 secondi si ha nuovamente un calo seguito da una risalita dei dati di temperatura a 202-203 secondi; dopo di che, il trend segue un andamento simile ai precedenti del modello 19 e del modello 20; tra i 330 e i 360 secondi si ha una fase di assestamento del trend; dopo i 360 secondi (6 minuti) l'andamento della termocoppia 3 del modello 20 ha valori prossimi a quelli dei trend precedenti, a meno di alcune oscillazioni che sono del tutto normali tra i risultati delle analisi con FDS. I valori finali delle temperature di tutti gli andamenti dei tre modelli oscillano nell'intorno di 700°C (da 680°C a 750°C).

Quindi, allontanandosi dal burner, si percepiscono chiaramente due aspetti: dato che i trend di temperature del modello 18 e 19 hanno lo stesso andamento, applicare o non applicare la fascia di separazione risulta equivalente; vi è un innegabile effetto benefico dato dalla presenza della cavity barrier, ma questo effetto è solo "momentaneo" poiché dopo 360 secondi (6 minuti) le temperature raggiungono valori prossimi al caso in cui non si disponga tale soluzione in facciata. Per quanto riguarda il primo aspetto, si nota che disporre la fascia di separazione di 1 m non porta a sostanziali vantaggi, risultando piuttosto superflua. Per il secondo aspetto, invece, si vede che la cavity barrier risulta efficace e utile ai fini della sicurezza antincendio, ma da sola non può impedire e abbattere del tutto la propagazione di fiamme, gas e fumi.

### *5.3.10. Le modellazioni di facciate ventilate di edifici alti 8 piani fuori terra (modelli 21 e 22)*

Il quarto e ultimo gruppo di modelli è stato concepito per modellare strutture di facciata più grandi, sia per testare il software sia per verificare cosa accadesse con involucri più estesi.

In questi modelli si ripropone la stessa configurazione del modello 18 su una struttura di 8 piani fuori terra, anziché di 2 piani fuori terra; inoltre, si sono predisposte finestre vetrate ad ogni piano ed è stato impostato un incendio con curva RHR, costituita da un primo tratto di crescita parabolica seguito da un plateau con potenza di picco pari a 5000 kW.

A parità di spessori e partendo dalla stratigrafia di partenza del modello 18, si volevano alternare le seguenti soluzioni in facciata: combustibile, incombustibile, incombustibile con fascia di separazione e incombustibile con cavity barrier nell'intercapedine, tra un piano e l'altro come nei modelli precedenti.

Lo scopo di questo gruppo di modelli e simulazioni consisteva nel verificare e confrontare quali di queste soluzioni in facciata risultavano migliori o peggiori. Tuttavia, non è stato possibile realizzare tutti i modelli e non tutte le simulazioni sono state ultimate. Purtroppo, soltanto i primi due modelli sono stati effettivamente realizzati e una sola simulazione è arrivata al termine, mentre l'altra è arrivata poco oltre la metà. Non si è riusciti ad ultimare tali modelli e simulazioni a causa delle risorse hardware limitate, delle difficoltà incontrate nella modellazione e delle limitazioni del software, come già detto in precedenza. Per di più, le simulazioni dei modelli realizzati hanno richiesto tempi di attesa molto lunghi, ovvero 4-5 settimane (circa un mese) per il completamento. Non avendo a disposizione di ulteriori risorse strumentali e temporali, si è scelto di esaminare i risultati a cui si è giunti e di inserirli comunque in questa trattazione, poiché potrebbero essere utili al progettista che si appresta a fare tali analisi e verifiche.

## La facciata ventilata combustibile di un edificio alto 8 piani fuori terra – modello 21

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura.

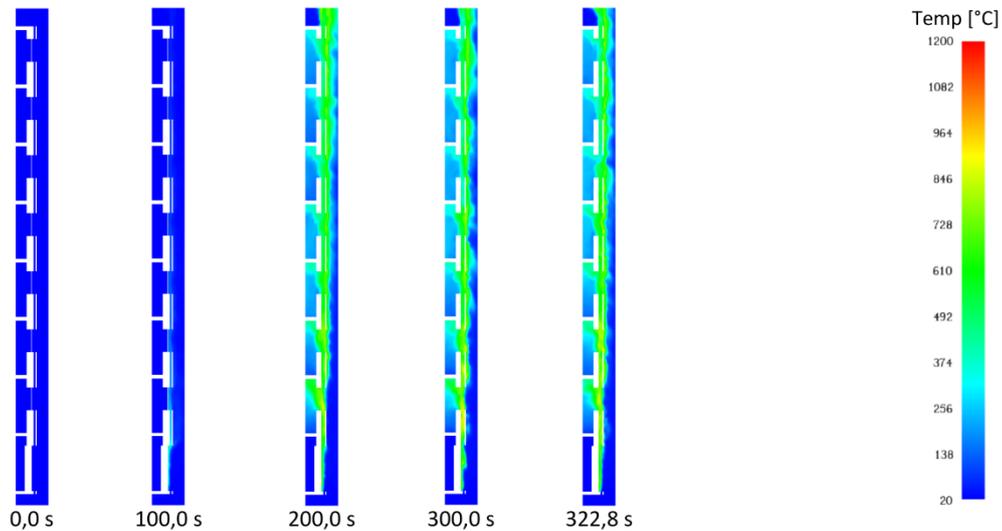


Figure 5.120: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21

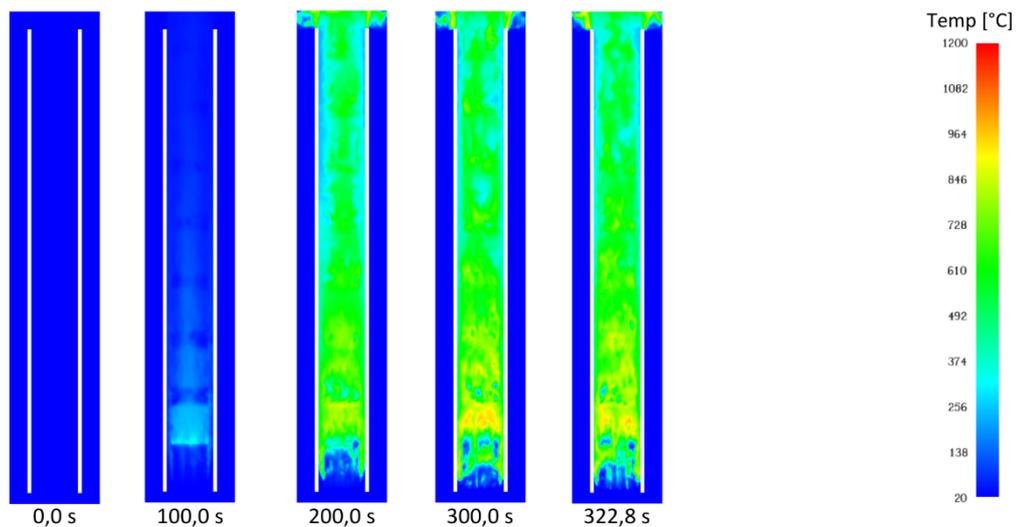


Figure 5.121: *Slice\_y* di temperatura, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21

Nonostante tale simulazione sia arrivata soltanto a 322,8 secondi su 600 secondi complessivi, si noti che si raggiungono temperature piuttosto elevate e che tra 100 e 200 secondi avviene la rottura dei vetri delle finestre.

Di seguito si riportano le *slices* di *w-velocity*.

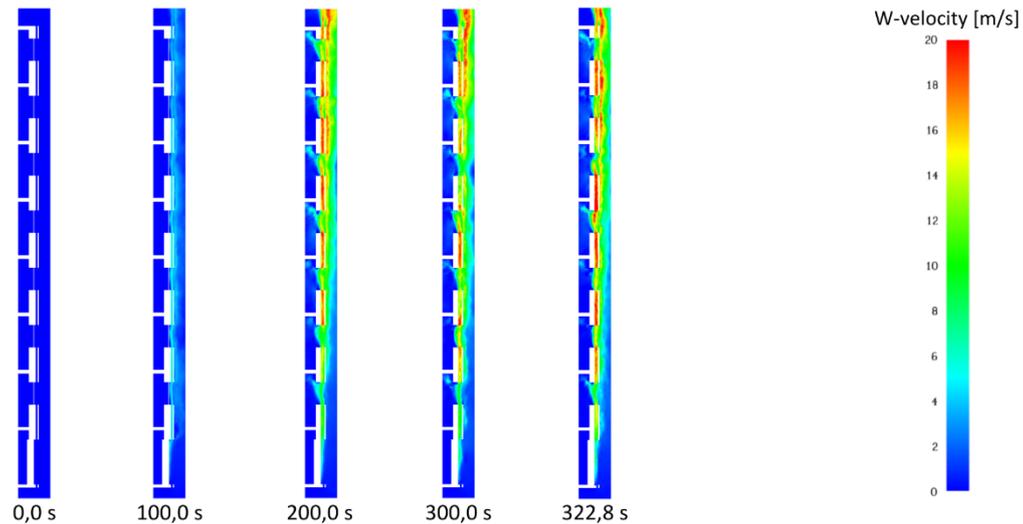


Figure 5.122: *Slice\_x di w-velocity, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21*

In Figure 5.122 si possono apprezzare le velocità del fluido aria in direzione verticale. Sono state riportate perché possono tornare utili se si vuole studiare l'effetto camino all'interno dell'intercapedine d'aria. Tale effetto non è stato né studiato né considerato in questa tesi, poiché si è scelto di studiare il fenomeno in termini di evoluzione delle temperature nel tempo. Tuttavia, si riportano questi risultati grafici poiché potrebbero essere utili per ricerche o studi futuri, in merito non solo all'effetto camino ma anche riguardo ai fenomeni fluidodinamici dell'incendio, come l'adesione dei fumi e gas caldi.

A questo punto, si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

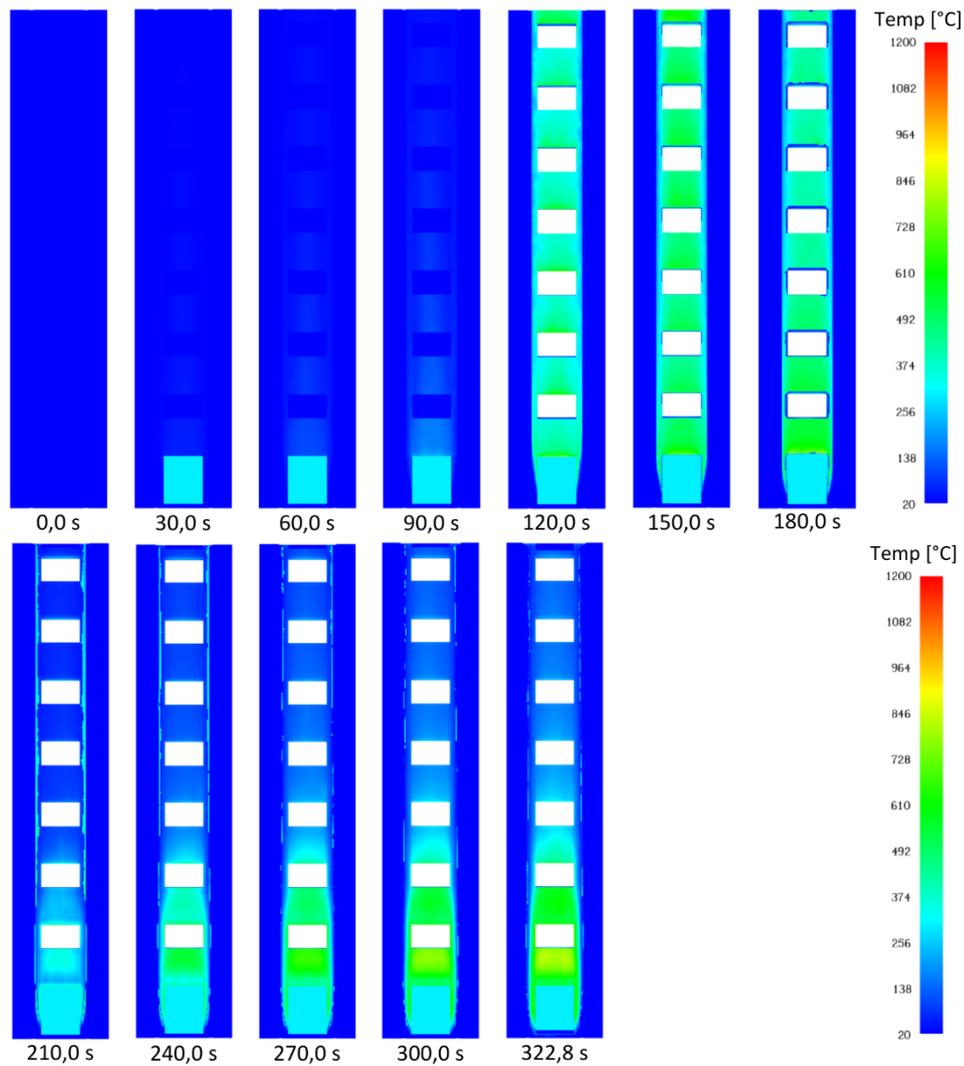


Figure 5.123: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21

Nelle Figure 5.123 si noti che prima dei 210 secondi lo strato isolante combustibile brucia e partecipa completamente alla combustione, in modo del tutto analogo al primo modello mostrato in questa sezione (modello 5). Si osservi che la forma del *plume* delle temperature, soprattutto dopo 210 secondi, risulta coerente con quanto si trova in letteratura e con i contenuti nel presente lavoro di tesi.

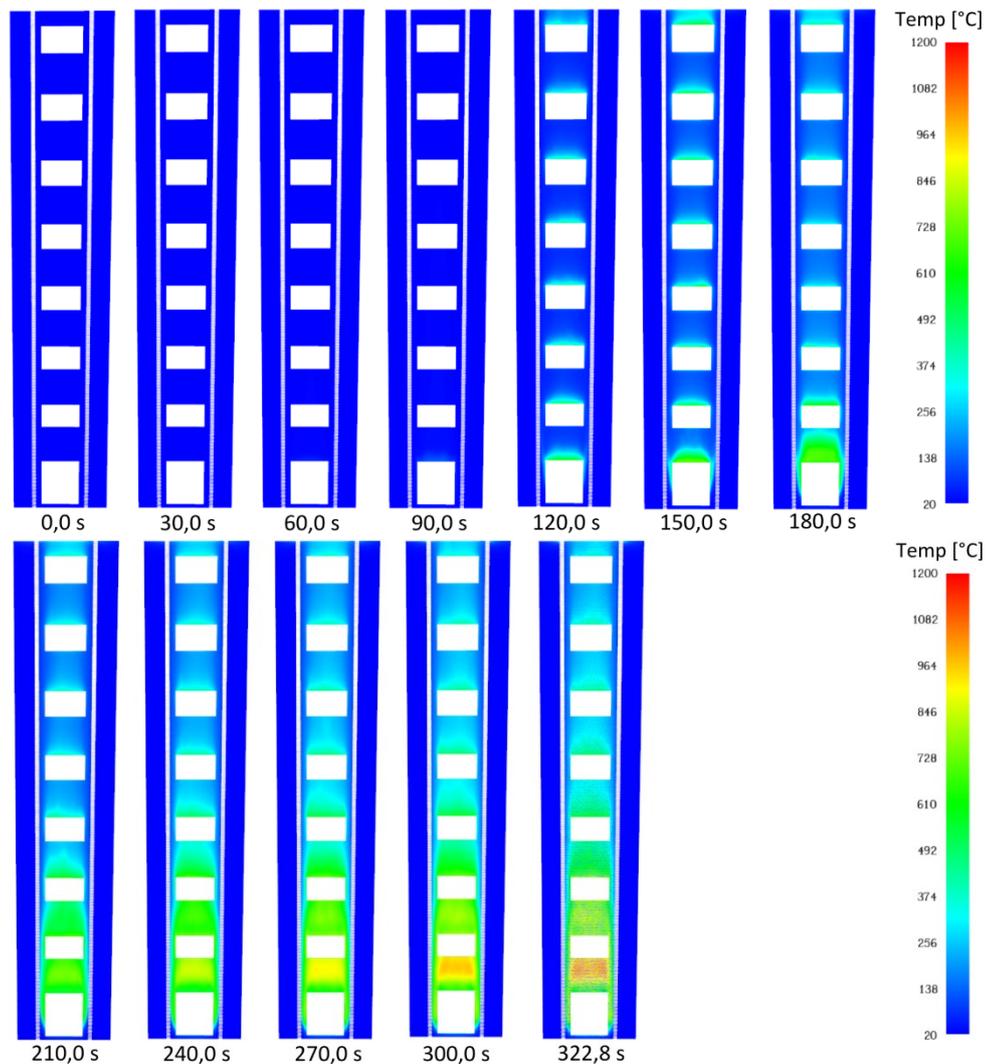


Figure 5.124: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21

Le Figure 5.124 mostrano la mappatura termica del lato interno del rivestimento combustibile. Fino a 90-120 secondi si vedono sia l'effetto benefico dato dal distanziamento tra rivestimento e parete interna, costituita da cemento e protetta da isolante combustibile in EPS, e quello dato dalla presenza della lama d'aria, i quali preservano il rivestimento esterno dagli effetti dell'incendio. Si noti che si sviluppano delle temperature anche piuttosto elevate attorno alle finestre, in particolare sulla parte superiore delle aperture: esse rappresentano delle zone di discontinuità nell'involucro, quindi sono delle aree da attenzionare.

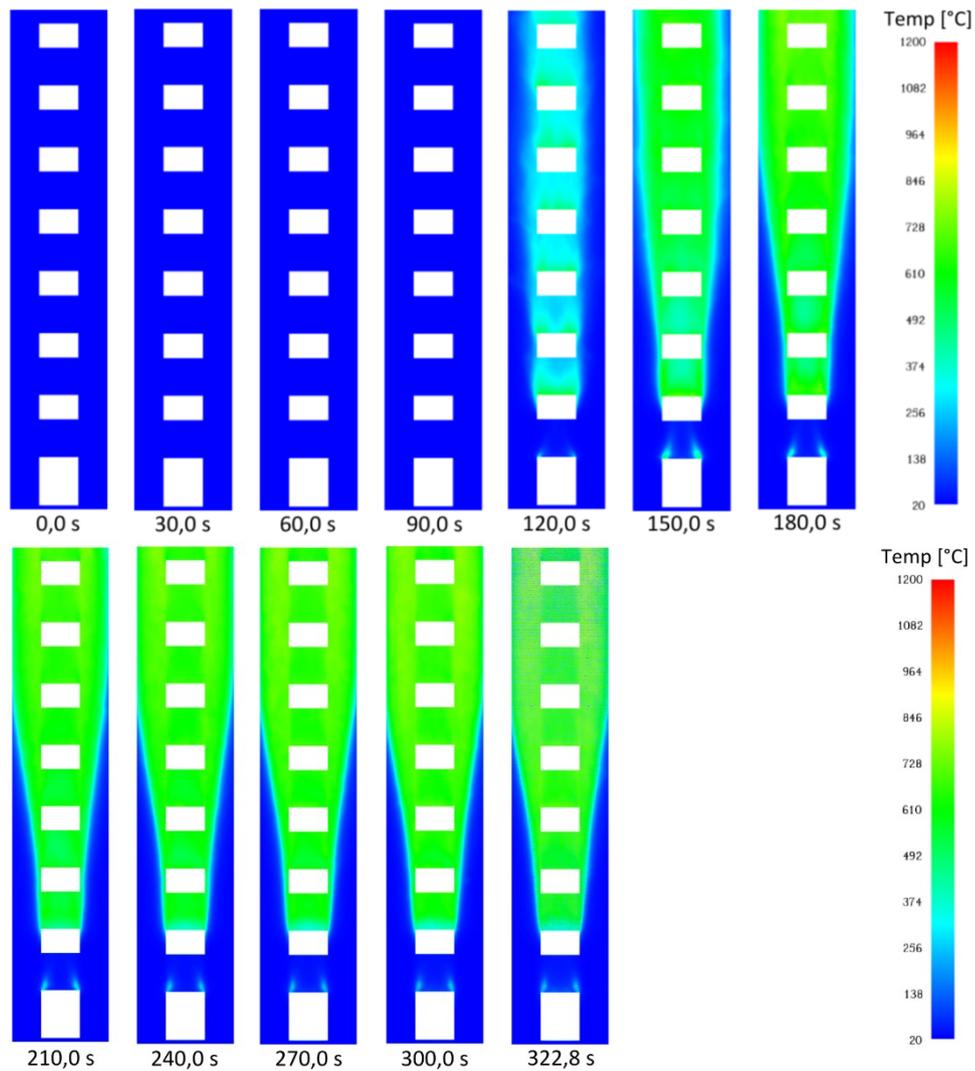
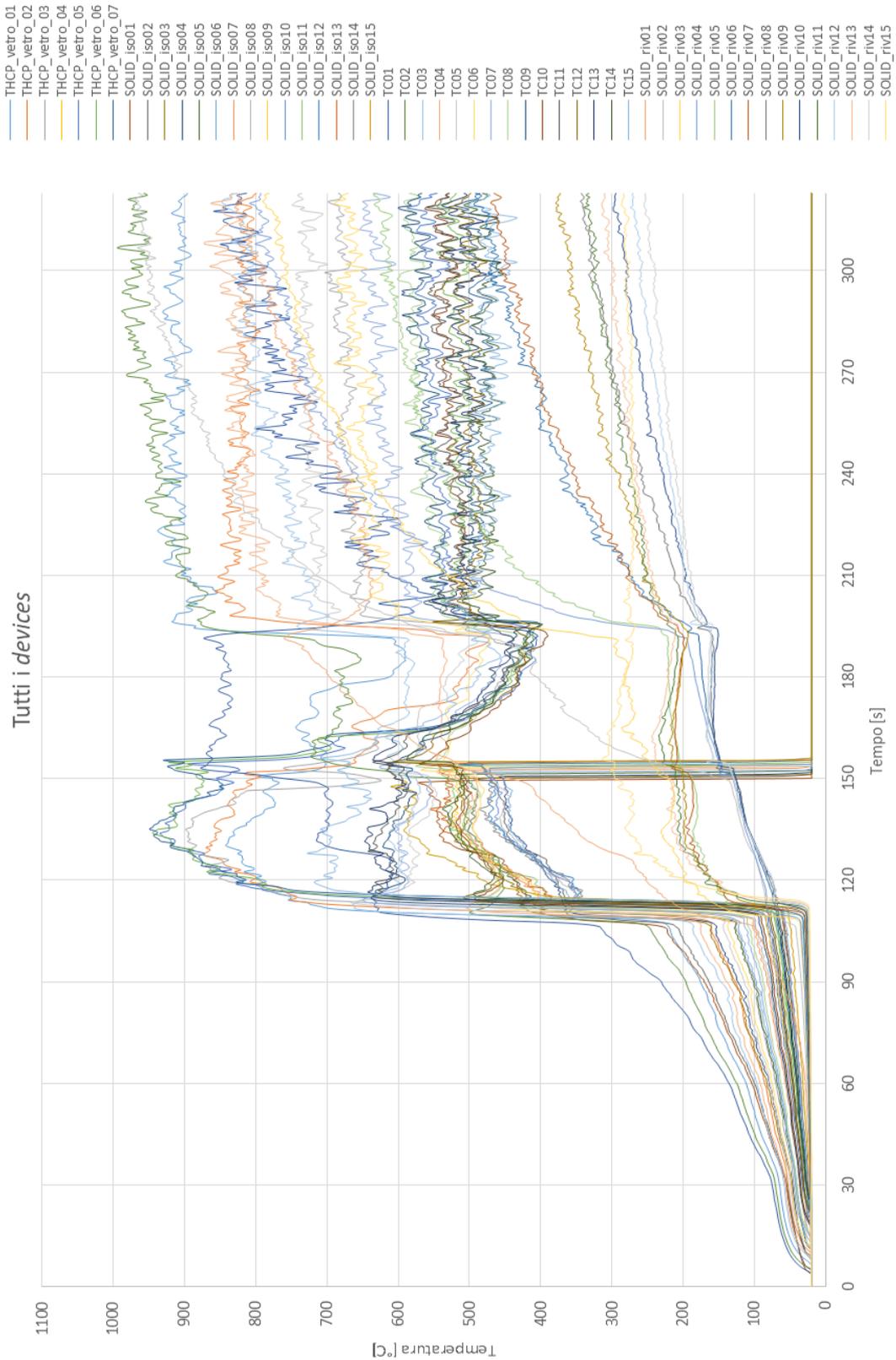


Figure 5.125: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno dell'intercapedine della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21

Le Figure 5.125 mostrano il *plume* delle temperature che si sviluppa sulla superficie esterna del rivestimento combustibile. Si noti la forma del pennacchio delle temperature: non si sprigiona dall'apertura in corrispondenza del *burner*, ma dalla parte superiore dell'apertura al piano primo. Da ciò si evince che lo sfogo delle fiamme in facciata non rimane confinato nell'intercapedine, bensì ha luogo esternamente. Inoltre, si nota che questo *plume* ha un'estensione notevole, soprattutto in corrispondenza degli ultimi piani superiori.

Di seguito si riportano i dati analitici ottenuti dalle sonde.

Figura 5.126: I risultati di tutti i devices dal modello 21



Data la complessità dei risultati in output, i dati delle sonde sono stati analizzati in base allo strato della stratigrafia.

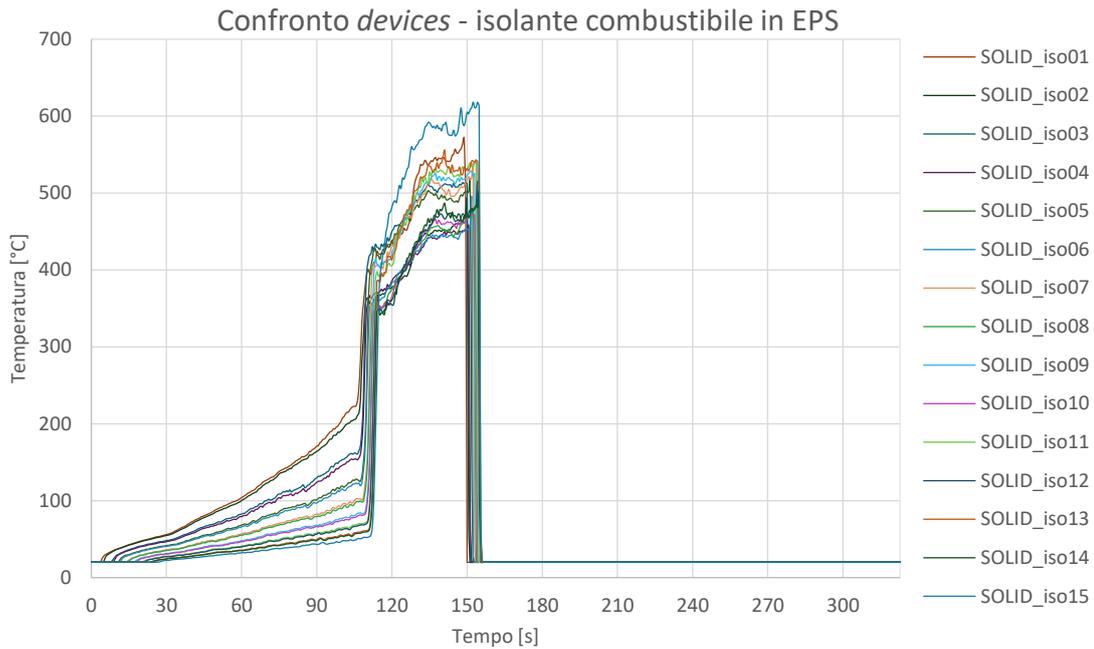


Figura 5.127: I risultati delle sonde poste sullo strato di isolamento combustibile – modello 21

Dalla Figura 5.127 si nota che i dati di temperatura delle sonde hanno tutti andamenti molto simili nella forma e prossimi tra loro, con qualche differenza dettata dal differente posizionamento.

Tra 0 e 110 secondi (circa) i trend sono simili, con pendenze leggermente diverse a causa della differente distanza rispetto al *burner*. Infatti, l'andamento della sonda 1 ha una pendenza maggiore perché più vicina al *burner*; man mano che le sonde sono posizionate più lontano dal *burner*, le pendenze dei trend diminuiscono.

Nell'intorno dei 110 secondi (tra i 111 e 114 secondi circa) i vetri delle finestre cedono e gli andamenti di Figura 5.127 hanno una brusca risalita.

Dopodiché gli andamenti proseguono con una crescita molto simile; si noti la sonda 15 che tra i 110 e i 150 secondi circa registra valori di temperatura più alti.

Tra i 150 e i 160 secondi tutto l'isolante "scompare", ovvero partecipa completamente alla combustione, venendo di fatto a mancare.

Tutto ciò rende i trend coerenti con quanto visto in precedenza.

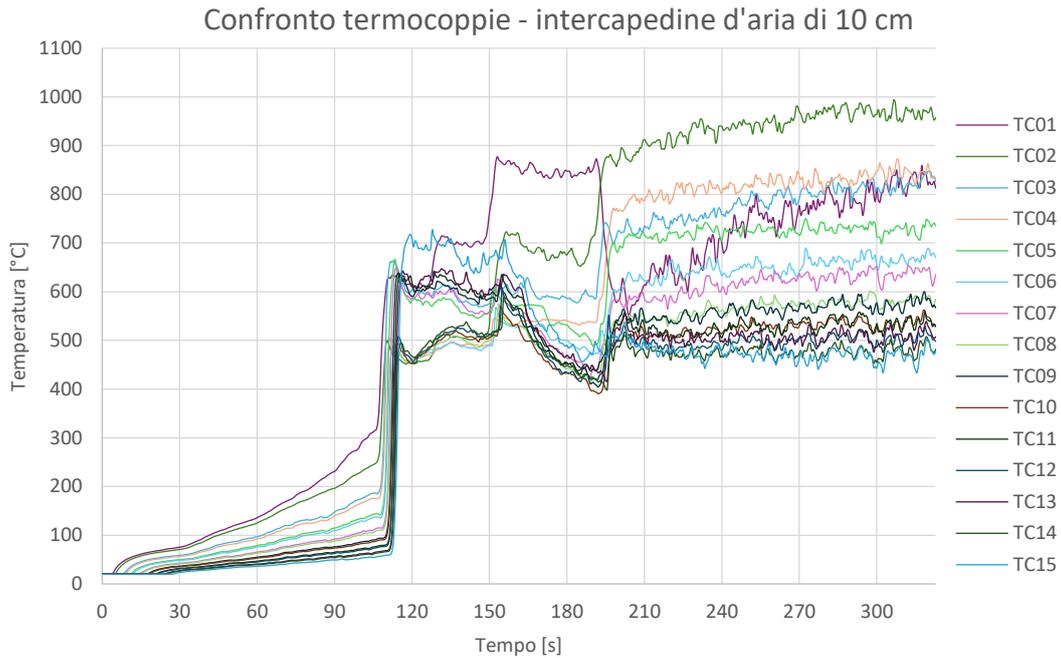


Figura 5.128: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 21

La Figura 5.128 mostra i dati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine d'aria di 10 cm.

Tra 0 e 110 secondi (circa) gli andamenti sono simili, con pendenze leggermente diverse a causa della differente distanza rispetto al *burner*. Infatti, l'andamento della sonda 1 ha una pendenza maggiore perché più prossima al *burner*; viceversa, man mano che le sonde sono posizionate lontano dal *burner*, le pendenze dei trend diminuiscono.

Nell'intorno dei 110 secondi (tra i 111 e 114 secondi circa) i vetri delle finestre cedono e anche gli andamenti di Figura 5.128 hanno una brusca risalita.

Dopodiché gli andamenti proseguono e hanno forme molto differenti tra di loro.

Ad eccezione delle prime 5 termocoppie, le restanti presentano andamenti simili tra i 110 e i 160 secondi circa: in particolare, i dati che provengono dalle quelle pari mostrano andamenti molto prossimi; lo stesso vale per i dati derivanti da quelle dispari. Inoltre, si noti che le termocoppie pari rilevano temperature più elevate rispetto a quelle dispari. Ciò accade poiché esse sono posizionate a distanza di 1 metro dal *burner*. Questo conferma che non bisogna aspettarsi temperature più elevate in corrispondenza del *fire*, ma a distanza di qualche metro da esso e in prossimità della parte superiore delle finestre.

Dopo i 160 secondi i risultati delle termocoppie mostrano andamenti simili nella forma, con differenze delle temperature finali dettate dalla vicinanza o lontananza dal *burner*.

Al contrario, le prime 5 termocoppie evidenziano trend di dati con andamenti molto diversi tra loro, nella forma e nell'entità delle temperature raggiunte. Ciò potrebbe essere dato dal loro posizionamento, dai fenomeni fluidodinamici dell'incendio e dal fatto che tutto il sistema di facciata è combustibile.

Si noti che la termocoppia 2 registra delle temperature finali superiori rispetto alla termocoppia 1. Questo conferma nuovamente quanto già visto in precedenza nelle simulazioni: le temperature più elevate non è detto che siano in prossimità del *burner*, ma potrebbero trovarsi a poca distanza, come ad un metro di differenza verso l'alto.

Bisogna tenere a mente che questi andamenti delle temperature riflettono anche la curva RHR in input. Inoltre, i picchi possono rappresentare sia l'apporto favorevole di comburente, dovuto ad esempio alla rottura del vetro delle finestre, sia l'innesco e l'incendio del materiale combustibile che prende parte alla combustione. Mentre, i cali possono rappresentare l'esaurimento di materiale combustibile o di parte di esso, oppure ancora comburente in eccesso che non porta ad un aumento delle temperature, ma ha un effetto negativo che soffoca momentaneamente l'incendio.

Infine, si noti che tra i 195 e i 200 secondi si individuano dei punti di flesso in tutti gli andamenti temperatura-tempo, i quali corrispondono al punto di flashover dell'incendio.

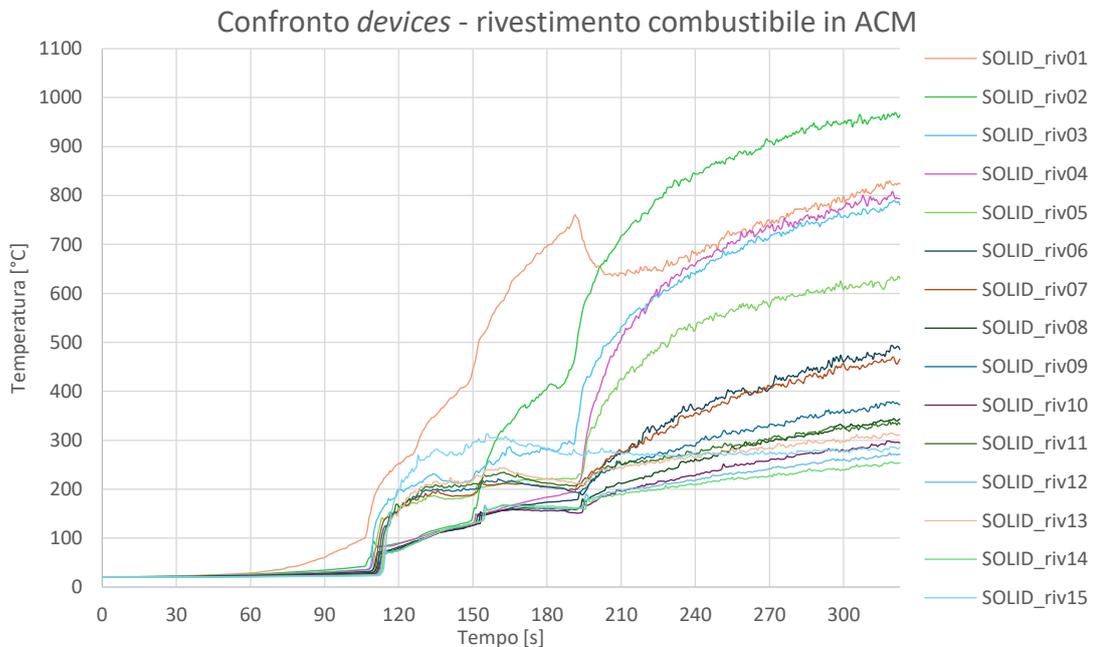


Figura 5.129: I risultati delle sonde poste sullo strato di rivestimento combustibile, lato interno dell'intercapedine – modello 21

Dalla Figura 5.129 emerge nuovamente questa differenza tra i trend delle temperature. Valgono considerazioni simili al caso precedente di Figura 5.128. In particolare, si noti che si evidenziano dei gradini nei trend che corrispondono alla rottura dei vetri a 110 secondi (nello specifico 111-114 secondi), alla completa partecipazione alla combustione dell'isolante che viene a mancare tra i 150 e i 160 secondi e al flashover tra i 195 e i 200 secondi.

## La facciata ventilata incombustibile di un edificio alto 8 piani fuori terra – modello 22

Si riportano nelle successive immagini le *slices* di temperatura.

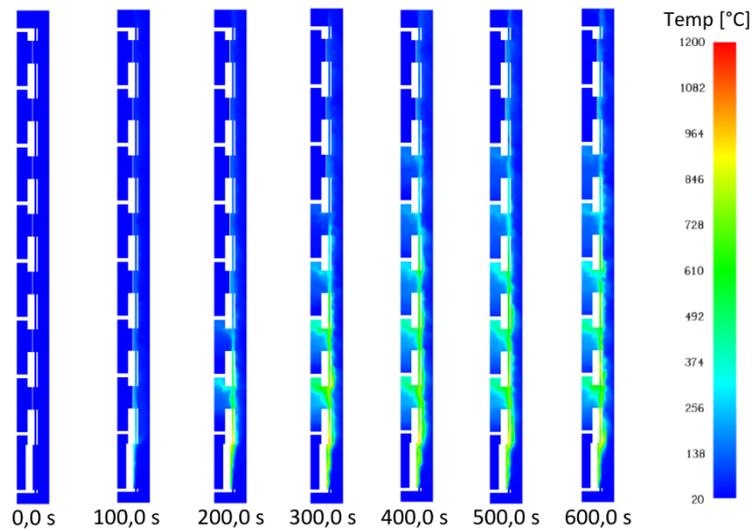


Figure 5.130: *Slice\_x* di temperatura, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Si noti che anche in questo caso si hanno temperature elevate, ma le altezze raggiunte dal *plume* sono molto diverse dal modello precedente e con estensione minore in direzione orizzontale. Pertanto, il rivestimento esterno è meno coinvolto rispetto al caso precedente. Ciò accade a causa dell'incombustibilità della facciata ventilata e, quindi, l'incendio si sviluppa meno sull'involucro esterno della struttura.

Si osservi che l'incendio ha un'evoluzione molto differente rispetto al caso precedente di facciata combustibile, infatti lo sviluppo delle temperature è molto più graduale.

Si noti anche la rottura delle finestre, la quale coinvolge le aperture dei primi 5 piani superiori e non di tutti i vetri come nel modello 21. Inoltre, il cedimento delle finestre avviene in maniera progressiva e non simultanea.

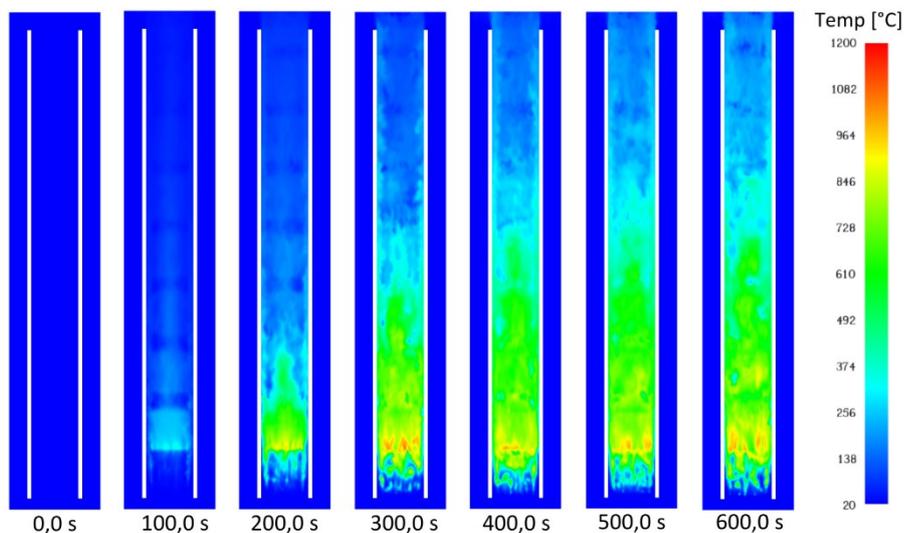


Figure 5.131: *Slice\_y* di temperatura, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Dalla Figure 5.131 si osserva nuovamente la progressione nello sviluppo dell'incendio.

Di seguito si riportano le *slices* di *w-velocity*.

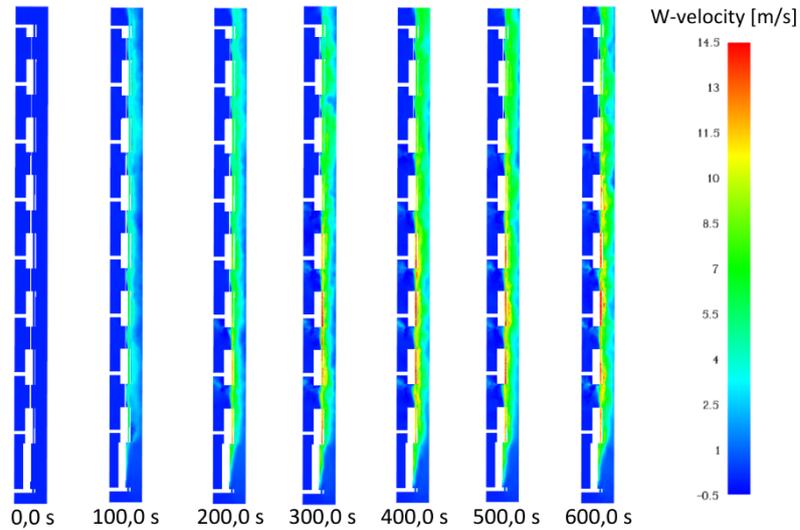


Figure 5.132: *Slice\_x* di *w-velocity*, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Anche in questo caso si riportano queste immagini, come quelle di Figure 5.122, perché si possono rivelare utili al progettista che vuole studiare l'effetto camino e altri aspetti legati al fenomeno fluidodinamico dell'incendio, come ad esempio l'adesione dei fumi e gas caldi.

A questo punto, si riportano nelle immagini successive le *color maps* di temperatura ottenute in output dalla simulazione.

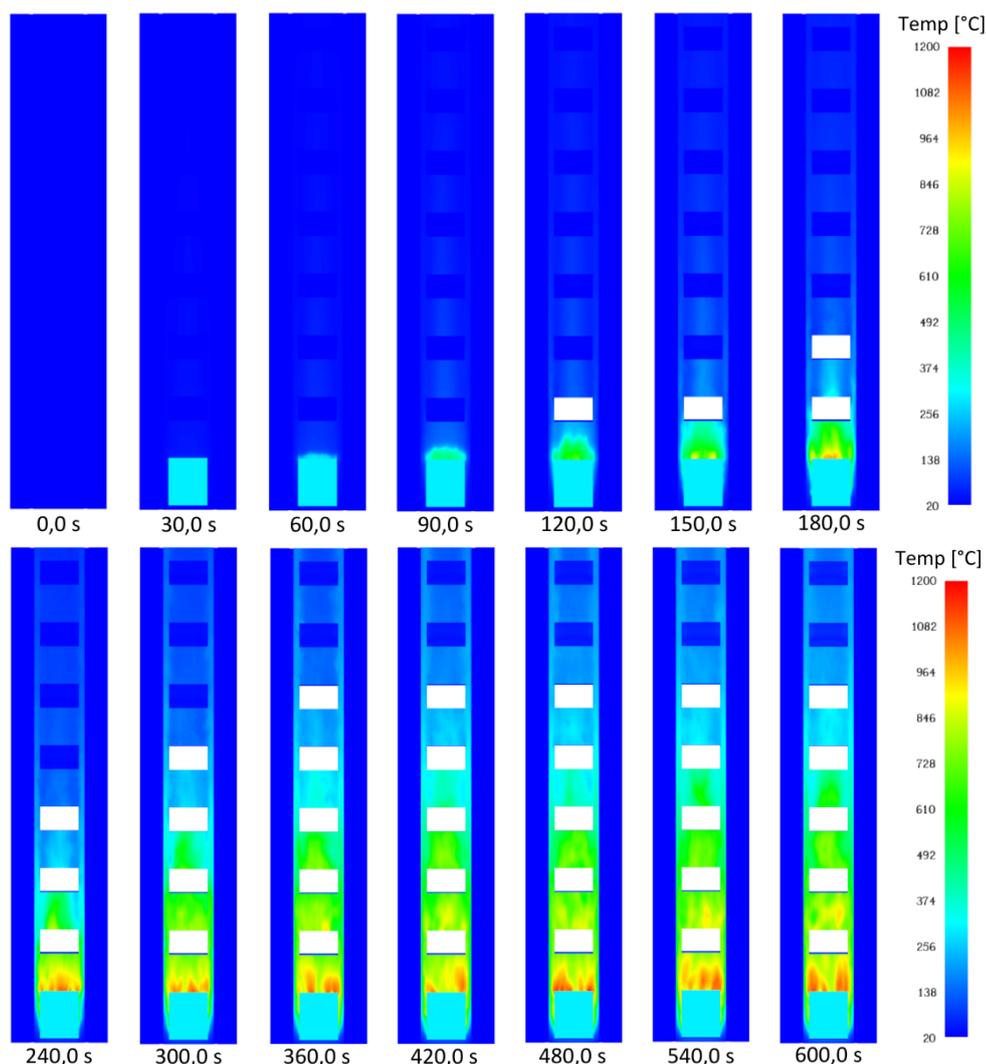


Figure 5.133: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Dalle Figure 5.133 si nota nuovamente l'evoluzione graduale dell'incendio.

In queste immagini si nota ancora meglio la rottura progressiva delle finestre vetrate. In effetti, tale rottura avveniva quasi simultaneamente nella simulazione del modello precedente (modello 21), come si vede nelle Figure 5.123 – si veda l'immagine che mostra l'istantanea a 120 secondi.

Il *plume* delle temperature è differente rispetto al caso combustibile, ma risulta coerente con i modelli incombustibili realizzati in precedenza.

In linea con quanto ci si aspetta, questa mappatura termica risulta molto simile al *plume* delle fiamme e le temperature più elevate si concentrano in prossimità del *burner* e al di sopra dell'apertura al piano primo.

Dalle Figure 5.133 si evince che, in caso di incendio su strutture di 8 piani fuori terra con facciata ventilata incombustibile, bisogna porre particolare attenzione almeno fino al quinto piano fuori terra data l'estensione in altezza del *plume* delle temperature.

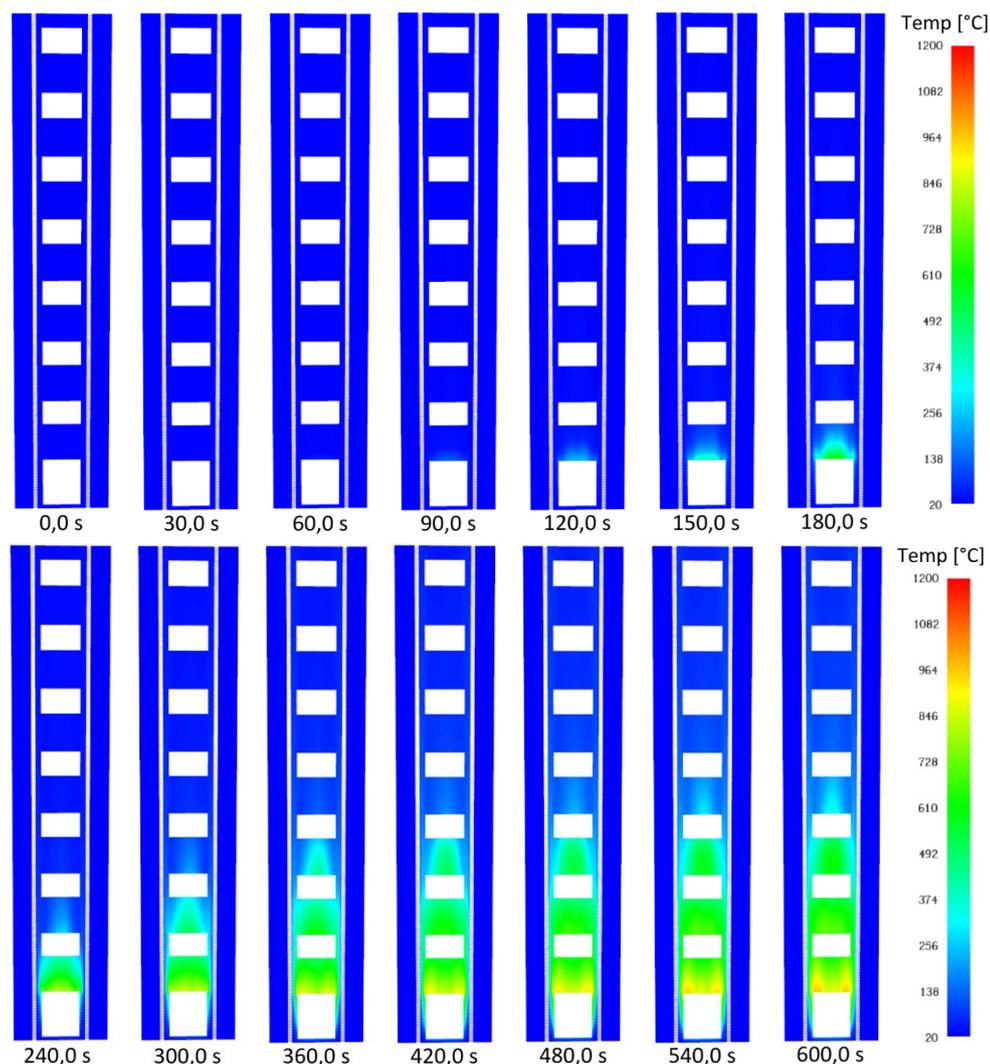


Figure 5.134: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Dalle Figure 5.134 si osserva che da 0 a 90-120 secondi il rivestimento risulta protetto. Ciò accade per via del distanziamento dalla parete interna e dalla presenza della lama d'aria, come al caso precedente mostrato nelle Figure 5.124.

Il *plume* delle temperature che si origina da 120 secondi in avanti, mostrando uno sviluppo graduale e la forma tipica di un pennacchio, coerente con quanto già visto nelle altre simulazioni, con quanto già trattato anche nei capitoli precedenti e con quanto si trova in letteratura.

Rispetto alle Figure 5.133, l'estensione del *plume* delle temperature risulta minore e raggiunge il terzo piano fuori terra, sempre a causa dell'effetto di protezione dato dal distanziamento e dalla presenza dell'intercapedine d'aria.

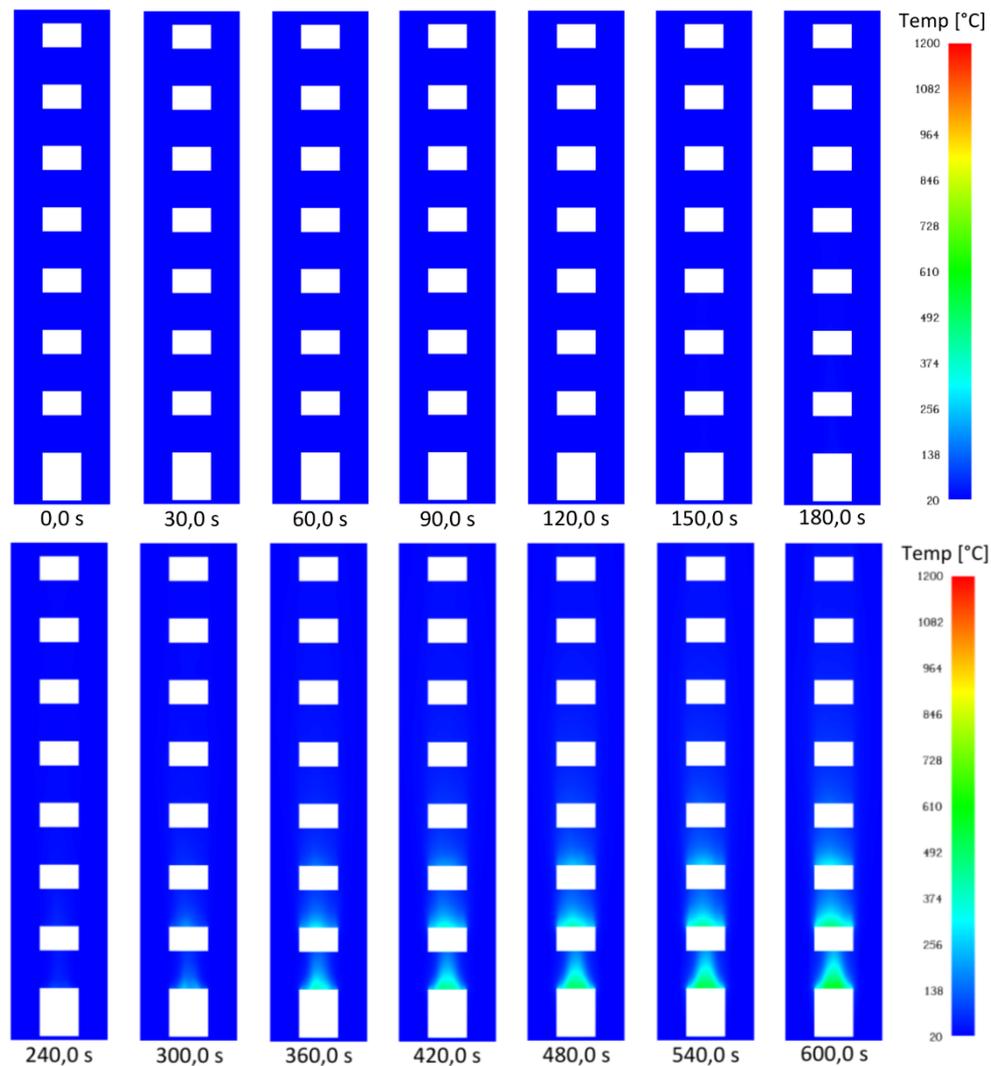
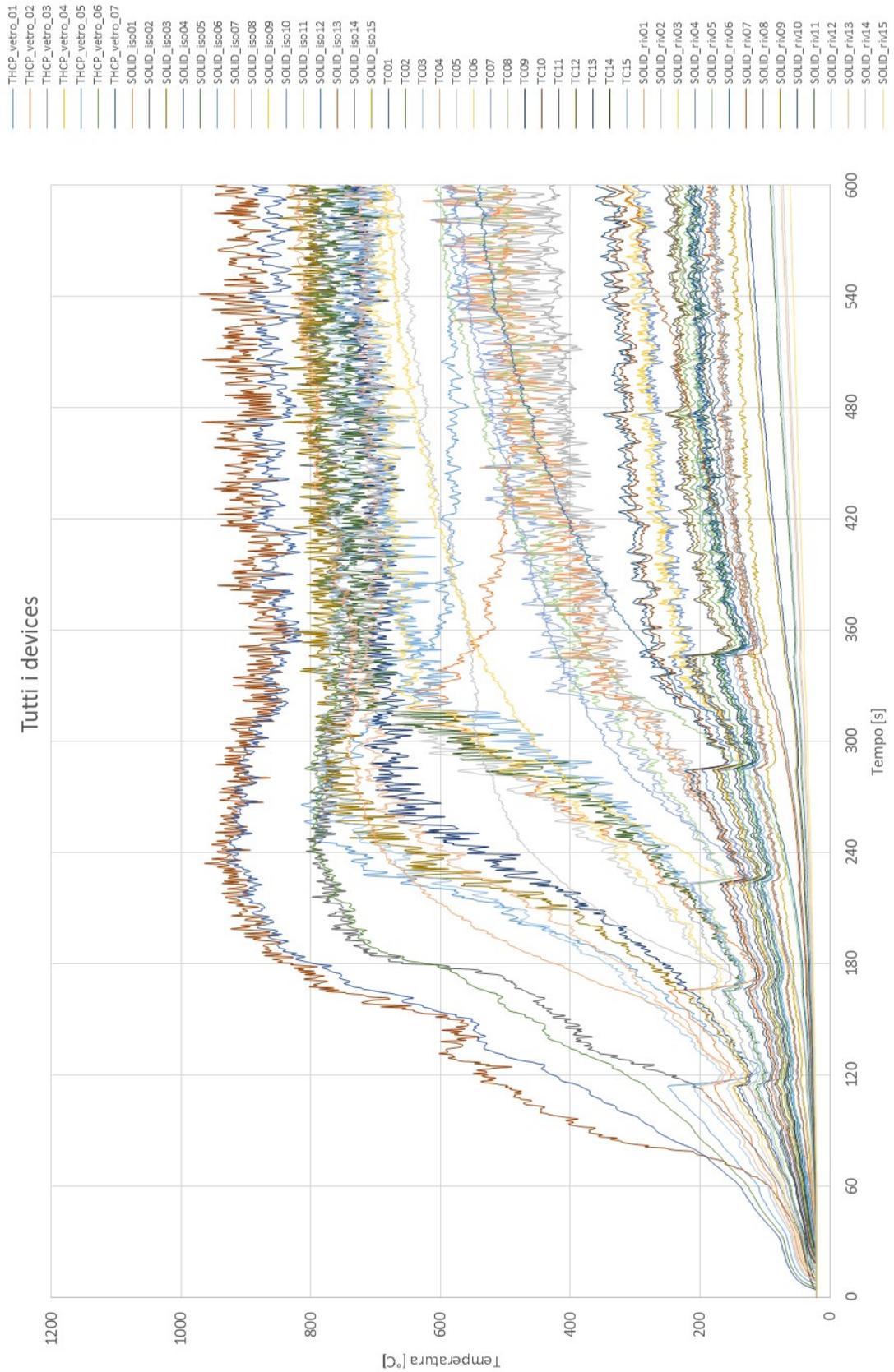


Figure 5.135: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno dell'intercapedine della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22

Nelle Figure 5.135 si può riscontrare quanto già detto in precedenza: l'incendio non ha una grossa estensione sul rivestimento esterno della facciata e rimane alquanto confinato nell'intercapedine. Tra i 420 e i 600 secondi l'incendio interessa il rivestimento per un'altezza pari ai primi tre piani fuori terra e la mappatura termica mostra temperature anche piuttosto alte. Da ciò si evince che, se si ha un edificio alto, il progettista deve realizzare un modello che coinvolga non solo i primi piani fuori terra ma tutta la struttura.

Di seguito si riportano i dati analitici ottenuti dalle sonde.

Figura 5.136: I risultati di tutti i devices dal modello 22



Data la complessità dei risultati in output, i dati delle sonde sono stati analizzati in base allo strato della stratigrafia.

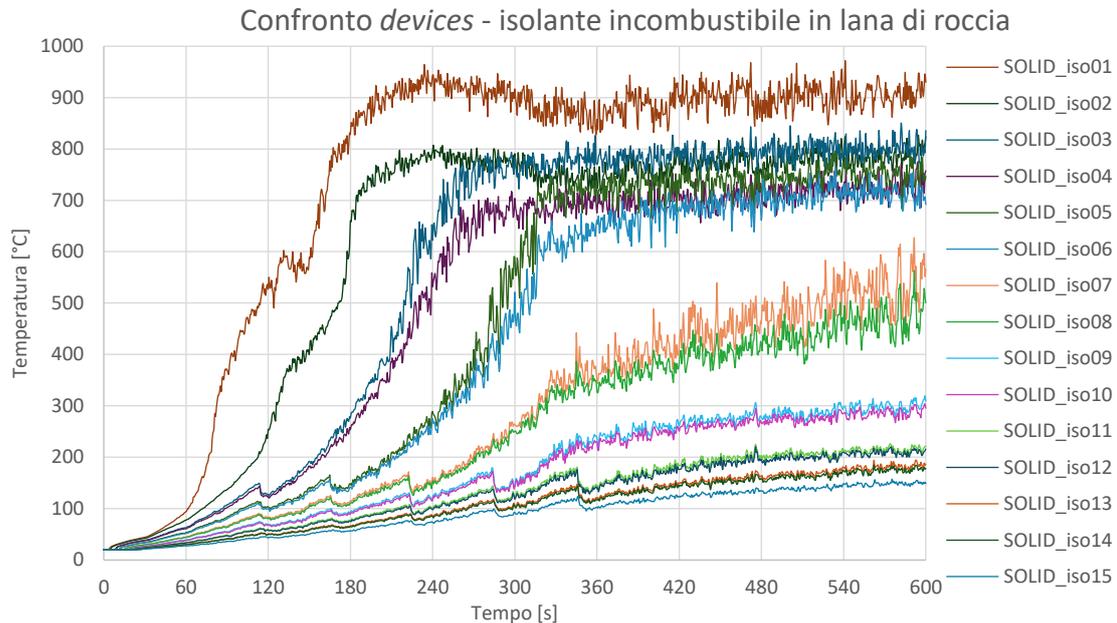


Figura 5.137: I risultati delle sonde poste sullo strato di isolamento incombustibile – modello 22

Nella Figura 5.137 si nota subito che i dati delle sonde poste sullo strato di isolamento, in particolare dalla sonda 3 alla 15, mostrano degli andamenti a dente di sega: in corrispondenza di questi 5 denti si verificano i cedimenti delle finestre vetrate dei primi 5 piani della struttura. Come si vede nel grafico, si ha un brusco calo e un'immediata risalita con pendenza maggiore. Ciò accade perché si ha un cambiamento nell'apporto di comburente e nel brusco cambio nella ventilazione.

Questi andamenti temperatura-tempo sono coerenti con quanto ci si aspetta, infatti si hanno temperature più elevate in prossimità del *burner*. Inoltre, tali trend sono molto simili alle curve naturali d'incendio. Tuttavia, si deve tenere a mente che gli andamenti riflettono la curva RHR impostata in input e che l'isolante è incombustibile poiché è realizzato con lana di roccia, materiale che non partecipa alla combustione.

Le prime 6 sonde sono quelle che mostrano le temperature più critiche con valori massimi pari a circa 900°C per la sonda 1 e temperature prossime a 700-800°C per i dati delle sonde 2, 3, 4 e 5. I trend dei dati delle sonde 7 e 8 seguono gli andamenti delle sonde precedenti, mostrando una forma molto simile ma, in questo caso, i valori massimi di temperatura sono prossimi a 500-600°C. Dopodiché seguono i dati delle sonde 9-15, i quali evidenziano andamenti molto simili tra di loro. In particolare, presi a due a due mostrano andamenti molto prossimi. Ciò accade perché le sonde sono distanti 1 metro tra di loro. Le temperature massime raggiunte dalle sonde 9-10 sono circa 300°C, mentre per le sonde 11-12 si raggiungono temperature massime di circa 200°C, invece per le sonde 13-14 si hanno valori massimi prossimi a 170-180°C e per la sonda 15 si raggiungono temperature massime di 150°C.

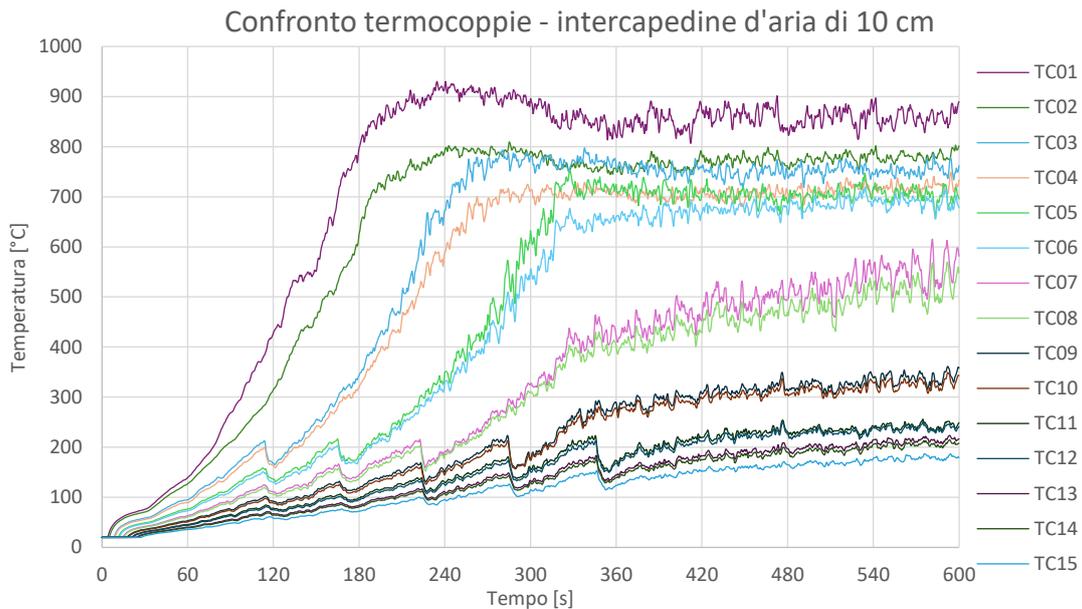


Figura 5.138: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 22

Per gli andamenti temperatura-tempo delle termocoppie di Figura 5.138 valgono considerazioni analoghe a quelle di Figura 5.137. In particolare, anche in questo caso si riscontrano i trend a dente di sega, che corrispondono ai cedimenti delle finestre vetrate, e le temperature finali prossime a quelle del grafico precedente.

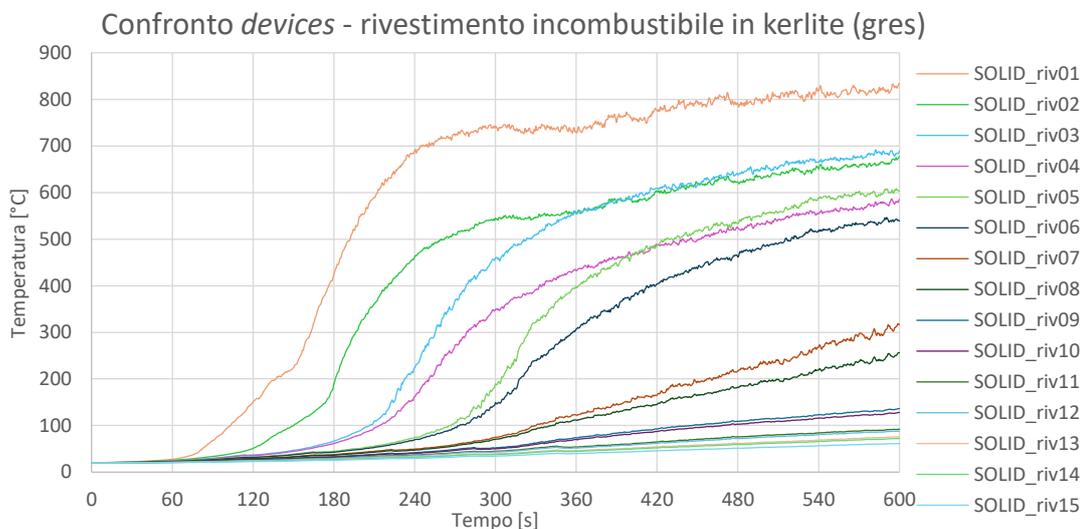


Figura 5.139: I risultati delle sonde poste sullo strato di rivestimento incombustibile, lato interno dell'intercapedine – modello 22

Si nota che i dati delle sonde 1-6 del rivestimento mostrano andamenti a S simili tra loro, mentre i restanti hanno lo stesso andamento fino a 240 secondi e poi un'evoluzione lineare molto simile con distanze che variano da poche decine di gradi celsius a 60-70°C (si vedano sonde 7-8). Questi scarti di temperatura tra i risultati delle sonde sono dettati dal loro posizionamento rispetto al *burner*. Gli andamenti mostrano un'evoluzione coerente con quanto già emerso dai modelli e dalle simulazioni precedenti (si vedano modelli 7, 17 e 18).

## 5.4. La verifica di resistenza al fuoco delle connessioni metalliche

L'analisi condotta si concentra sulla resistenza al fuoco delle connessioni metalliche impiegate nel supporto e nell'ancoraggio della sottostruttura delle facciate ventilate. Tale approfondimento si è reso necessario per completare lo studio dei sistemi di facciata ventilata e verificarne il comportamento in caso di incendio, nello specifico la resistenza al fuoco.

Nelle simulazioni di incendio eseguite con PyroSim basate su FDS, non è stato possibile modellare la sottostruttura metallica a causa delle limitazioni del software. In particolare, la discretizzazione mediante mesh con passo pari a 5 cm avrebbe comportato un'approssimazione eccessiva delle dimensioni reali degli elementi metallici, i quali presentano dimensioni millimetriche o centimetriche. Inoltre, una riduzione delle dimensioni della mesh avrebbe condotto a problemi di stabilità numerica, con il rischio di errori nel calcolo.

Di conseguenza, nelle simulazioni d'incendio si è ipotizzato che la sottostruttura metallica mantenesse la propria integrità strutturale, conformemente alle prescrizioni della RTV.13 in cui uno degli obiettivi è

*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 (par. V.13.1, RTV.13 – Codice, pag. V.13-1).*

Per verificare la validità di tale assunzione, si è proceduto con un'analisi di resistenza al fuoco delle connessioni metalliche.

L'analisi è stata condotta mediante il software CDM Dolmen, utilizzando il tool IS Fuoco, che consente di eseguire verifiche termo-strutturali attraverso un'analisi agli elementi finiti (FEM). L'obiettivo è stato quello di valutare il comportamento della sottostruttura rispetto al mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio.

Per il caso studio, la configurazione della sottostruttura e del sistema di ancoraggio è stata selezionata sulla base di un'indagine online delle soluzioni disponibili. Si è scelto di adottare il sistema [StoVentec S](#), proposto da [Sto Italia](#).

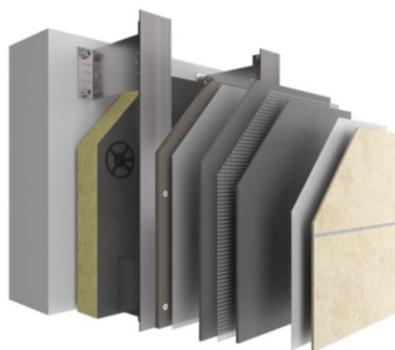


Figura 5.140: Sistema di facciata ventilata con elementi in pietra naturale – StoVentec S

Pertanto, è stata considerata la seguente configurazione:

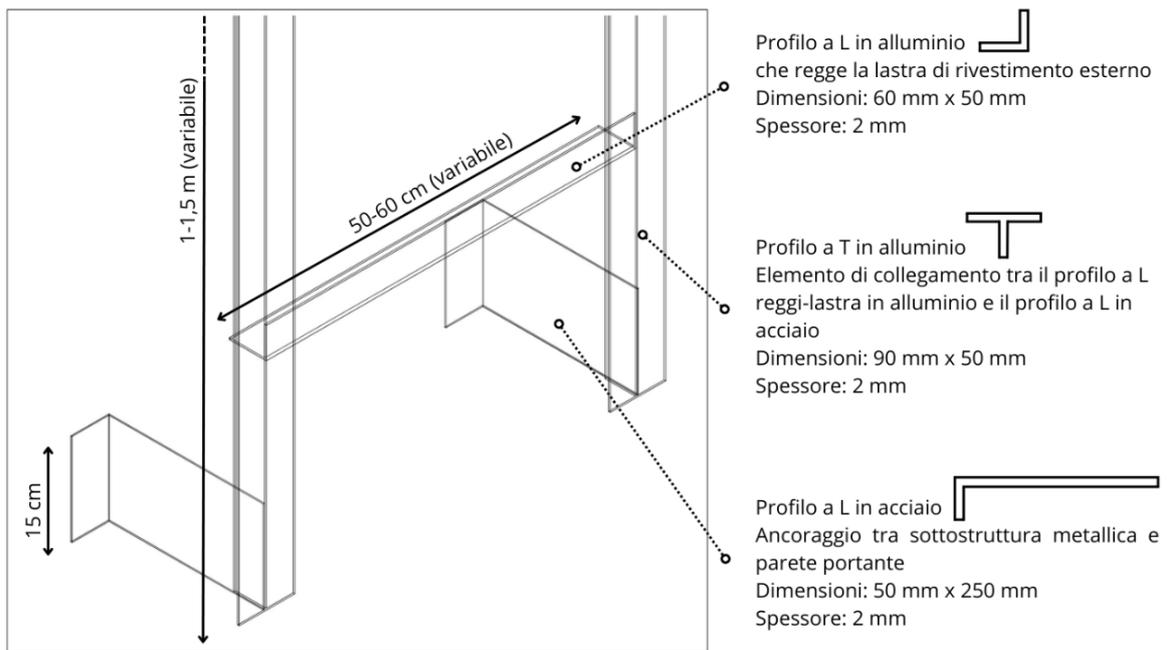


Figura 5.141: Layout della sottostruttura metallica della facciata ventilata

La metodologia seguita si basa sulle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) e sugli Eurocodici, in particolare:

- Eurocodice 3 (EN 1993), relativo alla progettazione delle strutture in acciaio;
- Eurocodice 9 (EN 1999), relativo alla progettazione delle strutture in alluminio.

Secondo il par. 3.6.1.5 delle NTC 2018 – *Procedura di analisi della resistenza al fuoco*:

*L'analisi della resistenza al fuoco può essere così articolata:*

- *individuazione dell'incendio di progetto appropriato alla costruzione in esame;*
- *analisi della evoluzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali;*
- *analisi del comportamento meccanico delle strutture esposte al fuoco;*
- *verifiche di sicurezza.*

Pertanto, in generale le fasi della metodologia generale si articolano seguendo schema di sintesi riportato nell'immagine successiva.

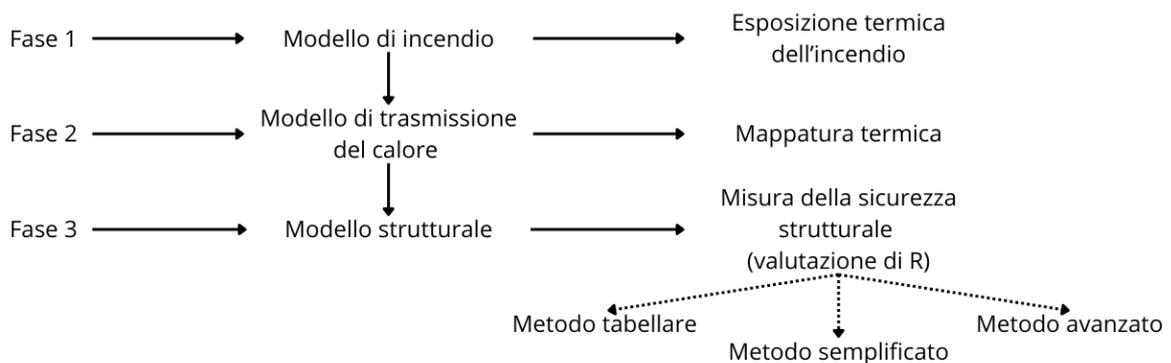


Figura 5.142: Procedura di analisi (Fantilli, 2024)

La fase preliminare prevede la definizione del modello di incendio, ovvero curva d'incendio<sup>47</sup>. Il progettista o il professionista può scegliere tra modellazione rigorosa o non-rigorosa. Per quanto riguarda la prima, si possono adottare curve di incendio naturali, derivate ad esempio da analisi FDS. Invece, nel caso in cui si adotta una modellazione non-rigorosa, si può optare per metodi semplificati o avanzati e per curve d'incendio nominali, le quali rappresentano condizioni standardizzate e convenzionalmente più gravose. Tali curve trascurano le fasi di innesco e propagazione, rappresentano unicamente il fenomeno del flashover e non includono la fase di raffreddamento, considerando una temperatura uniforme all'interno del compartimento. Tenzialmente, si adotta la modellazione non rigorosa perché risulta meno complessa da realizzare e si adottano le curve nominali (Fantilli, 2024).

A tal proposito, al par. 3.6.1.1, le NTC 2018 definiscono la curva di incendio nominale come:

*curva adottata per la classificazione delle costruzioni e per le verifiche di resistenza al fuoco di tipo convenzionale.*

Come già detto alla fine della sezione 1.4 della presente tesi, esistono vari tipologie di curve nominali. In questo caso, si è scelto di adottare la curva nominale di incendio esterno.

In effetti, questo tipo di curva viene impiegata per simulare l'azione dell'incendio sulla facciata (BibLus, 2024d). Per di più, al par. 3.6.1.5.1 delle NTC 2018, si evince che questa tipologia di curva si adotta

*nel caso di incendi sviluppatasi all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno.*

Pertanto, l'analisi con CDM Dolmen è stata condotta utilizzando la curva di incendio esterno, denominata "Fuoco esterno".

Per quanto riguarda la fase di trasmissione del calore, si tiene presente che l'incendio sviluppa calore nel compartimento, il quale viene diffuso alle strutture circostanti attraverso tre meccanismi principali, ovvero conduzione, convezione e irraggiamento. Nei materiali solidi opachi, come i metalli della sottostruttura, la trasmissione avviene prevalentemente per conduzione, regolata dalla legge di Fourier (Fantilli, 2024; Perero, 2024).

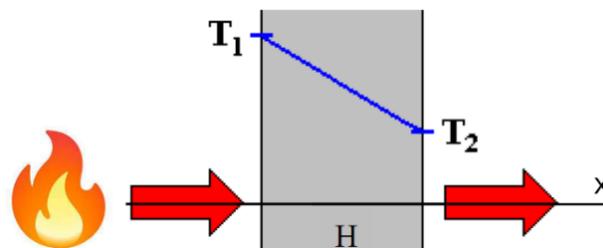


Figura 5.143: Legge di Fourier, caso monodimensionale (Fantilli, 2024)

<sup>47</sup> Si rimanda alla lettura della sezione 1.4.

Nel caso monodimensionale, la legge di Fourier si esprime attraverso la formula:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.1)$$

dove:

- $x$  è la direzione del flusso di calore;
- $H$  è lo spessore della parete;
- $T$  è la temperatura:
  - $T_1$ =temperatura della parte esposta all'incendio;
  - $T_2$ =temperatura della parete non esposta;
- $t$  è il tempo;
- $\alpha$  è la diffusività termica, la quale è una proprietà del materiale.

In generale, il problema si configura come un sistema di equazioni differenziali:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \text{ per } 0 < x < L \text{ e } 0 < t < t_{max} \\ T(x, 0) = 20^\circ C \text{ per } 0 < x < L \\ T(0, t) = \text{curva nominale di incendio per } 0 < t < t_{max} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Esso viene risolto mediante il metodo delle differenze finite, basato sulla discretizzazione di  $x$  e  $t$ .

La soluzione dipende dalla diffusività termica  $\alpha$ , la quale risulta funzione della conducibilità termica  $\lambda \left[ \frac{W}{m K} \right]$ , della densità  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  e del calore specifico  $c_p \left[ \frac{J}{kg K} \right]$ , tutte proprietà che sono funzione della temperatura. La diffusività termica si esprime secondo la seguente formula:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (5.3)$$

e la sua unità di misura è  $[m^2/s]$ .

Con il software CDM Dolmen è stata eseguita un'analisi termica a livello di sezione che ha previsto, in prima battuta, la definizione dei materiali, delle geometrie, della mesh e delle zone di esposizione.

Per quanto riguarda le geometrie si sono seguite quelle riportate nella Figura 5.141.

Mentre, per quanto concerne i materiali, sono stati impiegati acciaio per le connessioni di ancoraggio e alluminio per montanti e traversi di sostegno per le lastre di rivestimento.

È stato impiegato il materiale acciaio predefinito sul software CDM Dolmen, mentre l'alluminio è definito da utente.

Si riportano le proprietà dei materiali impiegati.

Acciaio per profili di classe S235 Spessore $\leq 40$ mm	
Caratteristiche meccaniche	$f_y = 235$ MPa
	$f_u = 360$ MPa
	$E = 210$ GPa
Proprietà meccaniche "a freddo"	$\gamma_{m0} = 1,05$
	$f_d = 223,81$ MPa
	$\varepsilon_y = 0,001066\%$
Proprietà meccaniche "a caldo"	$\gamma_{m0} = 1$
	$E_{fi}/E$ : Eurocodice 3
	$f_{y,fi}/f_y$ : Eurocodice 3
	$f_{d,\theta=20^\circ} = 235$ MPa

Tabella 5.11: Le caratteristiche e proprietà dell'acciaio in CDM Dolmen

Per quanto riguarda montanti e trasversi che sostengono il rivestimento, queste parti della sottostruttura sono realizzate in alluminio EN AW-6063 T66, le cui principali proprietà fisico-meccaniche sono:

- Modulo di elasticità:  $E = 70$  GPa (UNI EN 1999-1-1:2007+A1);
- Valore caratteristico della resistenza alla trazione allo 0,2%:  $f_0 = 180$  MPa (UNI EN 1999-1-1:2007+A1);
- Valore caratteristico della resistenza ultima:  $f_u = 225$  MPa (UNI EN 1999-1-1:2007+A1).

Per quanto riguarda le proprietà a freddo, è stata considerata la seguente legge costitutiva sforzi-deformazioni.

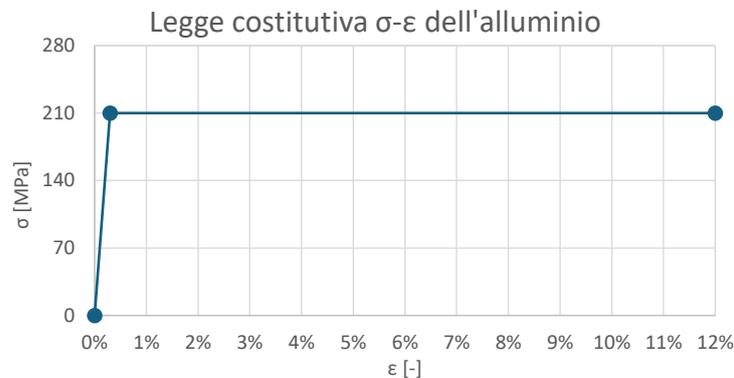


Figura 5.144: La legge costitutiva sforzi-deformazioni dell'alluminio (UNI EN 1999-1-1:2007+A1)

Le proprietà dipendenti dalla temperatura, ossia densità, calore specifico e conduttività termica, sono state ricercate in letteratura e si è preso come riferimento un articolo scientifico di Foteinopoulos et al. (2017).

Per quanto riguarda la densità, è stato considerato il grafico riportato di seguito.

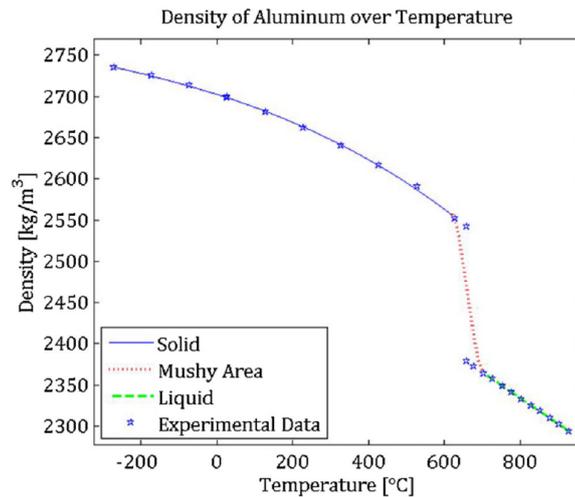


Figura 5.145: La densità dell'alluminio in funzione della temperatura (Foteinopoulos et al., 2017, pag. 74)

Risalendo alla fonte originale (Jensen et al., 1980), è stato ricostruito il grafico in Excel per poi impostare la densità in IS Fuoco di CDM Dolmen.

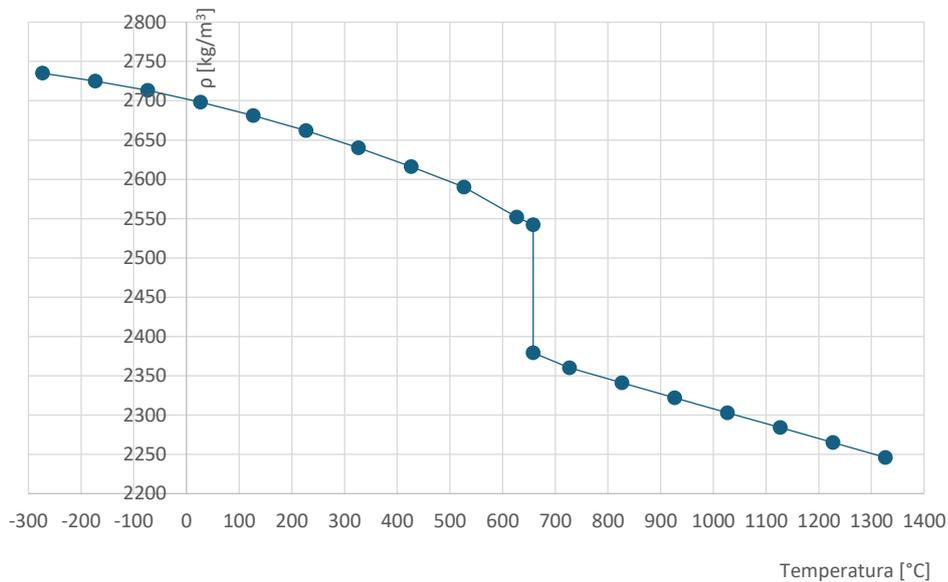


Figura 5.146: L'andamento della densità dell'alluminio in funzione della temperatura

Lo stesso vale per calore specifico e conducibilità termica, come riportato nelle immagini successive.

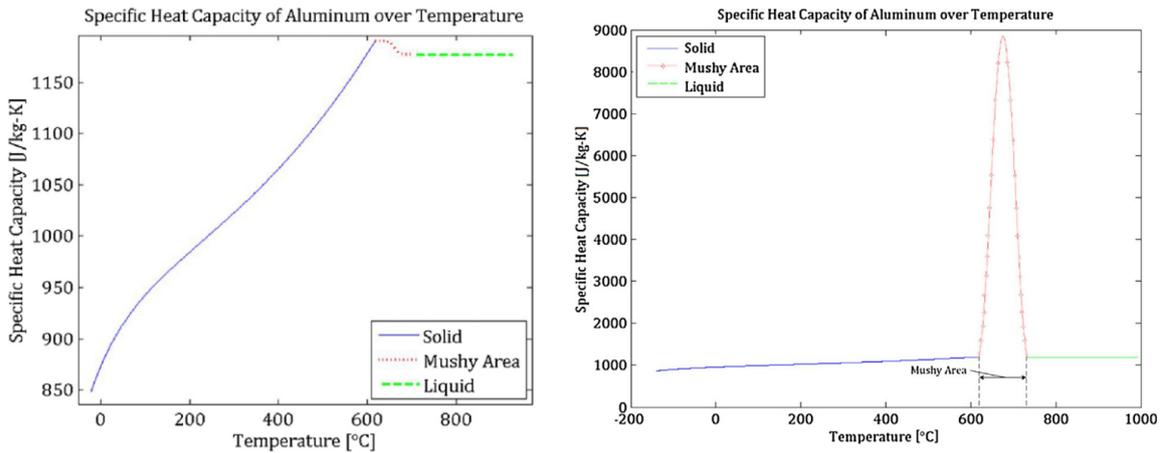


Figura 5.147: Il calore specifico dell'alluminio in funzione della temperatura (Foteinopoulos et al., 2017, pag. 75)

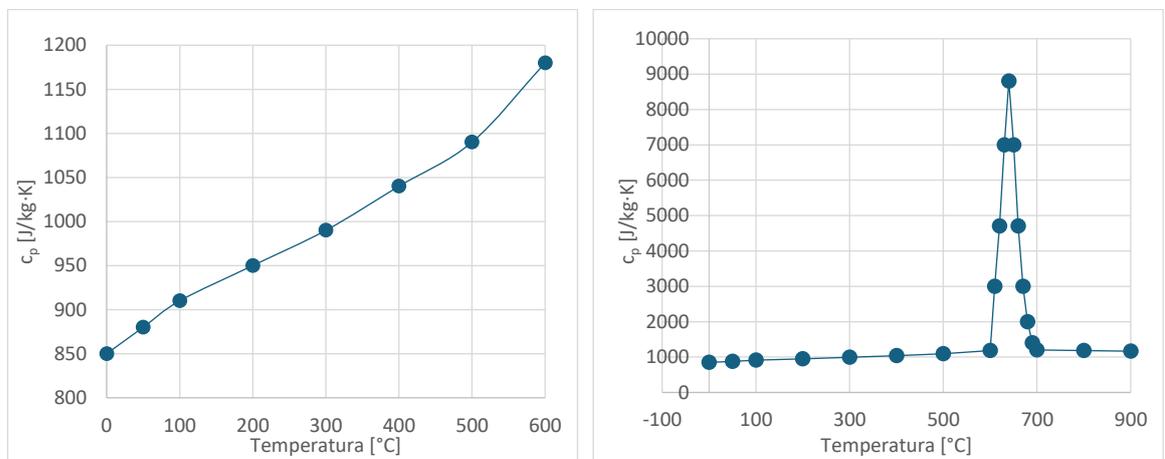


Figura 5.148: L'andamento del calore specifico dell'alluminio in funzione della temperatura

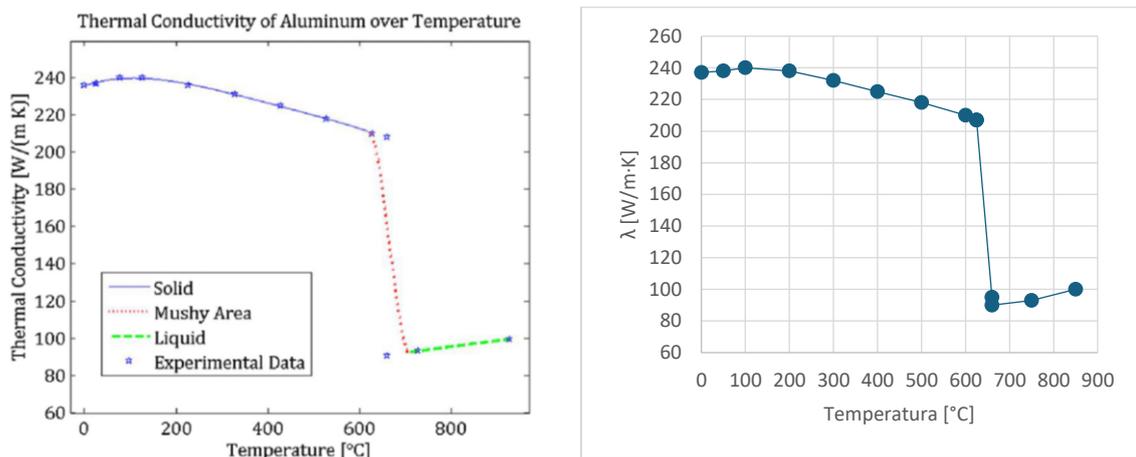


Figura 5.149: L'andamento della conduttività termica, a sinistra da Foteinopoulos et al. (2017, pag. 74) e a destra il grafico realizzato su Excel

Dalla norma UNI EN 1993-1-2:2005 (Eurocodice 3 – Acciaio), si desumono i coefficienti di riduzione:

- della tensione di snervamento<sup>48</sup>

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (5.4)$$

- limite di proporzionalità<sup>49</sup>

$$k_{y,p} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (5.5)$$

- del modulo elastico<sup>50</sup>

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (5.6)$$

I valori di questi fattori in funzione della temperatura sono stati riportati nella tabella successiva.

Temperatura °C	$k_{y,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

Tabella 5.12: I fattori di riduzione dell'acciaio in funzione della temperatura (UNI EN 1993-1-2:2005, Table 3, pag. 22)

Essi rappresentano la diminuzione di resistenza del materiale acciaio in funzione della temperatura.

Questi fattori di riduzione sono stati riportati in un grafico, come si vede nell'immagine successiva (Figura 5.150).

<sup>48</sup> È il rapporto tra limite di snervamento effettivo e limite di snervamento.

<sup>49</sup> È il rapporto tra limite proporzionale e limite di snervamento.

<sup>50</sup> È il rapporto tra pendenza del campo elastico lineare e limite di snervamento.

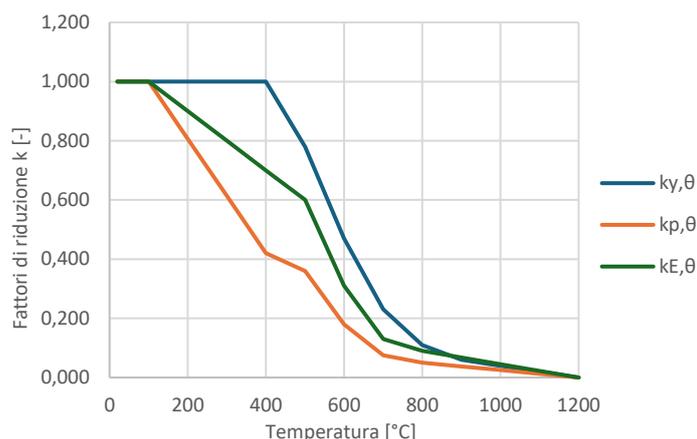


Figura 5.150: I fattori di riduzione in funzione della temperatura (UNI EN 1993-1-2:2005, Fig. 3.2, pag. 23)

L'acciaio comincia a degradare a 100°C, mentre presenta un marcato decadimento delle proprietà fisico-meccaniche intorno ai 400°C e un abbattimento della resistenza molto pronunciato. Infine, a 600°C la resistenza è pressoché dimezzata (Fantilli, 2024).

Per quanto riguarda l'alluminio, da uno dei quaderni Inail – il Focus sulla resistenza al fuoco (Sabatino et al., 2019), si desumono i valori del coefficiente di riduzione della tensione convenzionale di snervamento  $k_{0,2,T}$ .

Il riferimento normativo rimane la norma UNI EN 1999-1-2 (Eurocodice 9 – Alluminio).

Il parametro fondamentale utilizzato, in luogo della tensione di snervamento, è la tensione in corrispondenza di una deformazione residua dello 0,2% ( $f_y(20\text{ °C})$ )<sup>51</sup>.  $f_{0,2,T}$  è la tensione convenzionale di snervamento alla temperatura  $T$  ( $f_y(T)$ ).  $k_{0,2,T}$  è nuovamente un fattore di riduzione, quindi un rapporto tra questi due valori (Sabatino et al., 2019).

Alluminio	EN AW-6063 T66
Temperatura	$k_{0,2,T}$
°C	-
20	1,00
100	1,00
150	0,79
200	0,65
250	0,38
300	0,20
350	0,11
550	0,00

Tabella 5.13: La variazione del coefficiente di riduzione della tensione convenzionale di snervamento (Sabatino et al., 2019, pag. 132)

Si riportano tali valori in un grafico, come si vede nell'immagine successiva (Figura 5.151).

<sup>51</sup> Rappresenta la tensione convenzionale di snervamento a freddo (Sabatino et al., 2019).

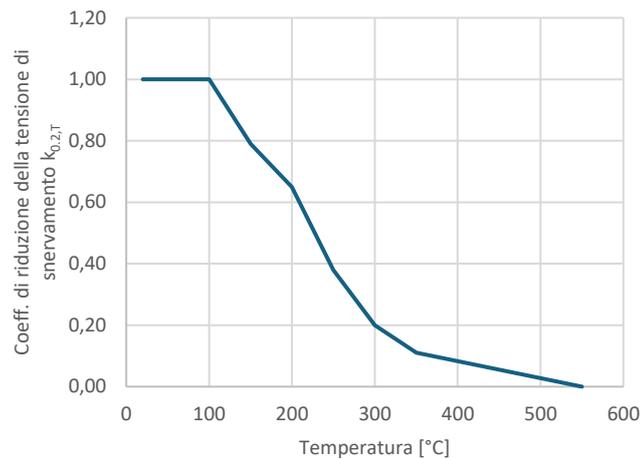


Figura 5.151: La variazione del rapporto di resistenza dell'alluminio in funzione della temperatura

Si riporta il legame tra modulo elastico dell'alluminio in funzione della temperatura.

Temperatura	$E_{al,T}$
°C	MPa
20	70000
50	69300
100	67900
150	65100
200	60200
250	54600
300	47600
350	37800
400	28000
550	0

Tabella 5.14: Variazione del modulo di elasticità dell'alluminio in funzione della temperatura (Sabatino et al., 2019, pag. 133)

Anche in questo caso, il legame E-T è stato riportato in un grafico.

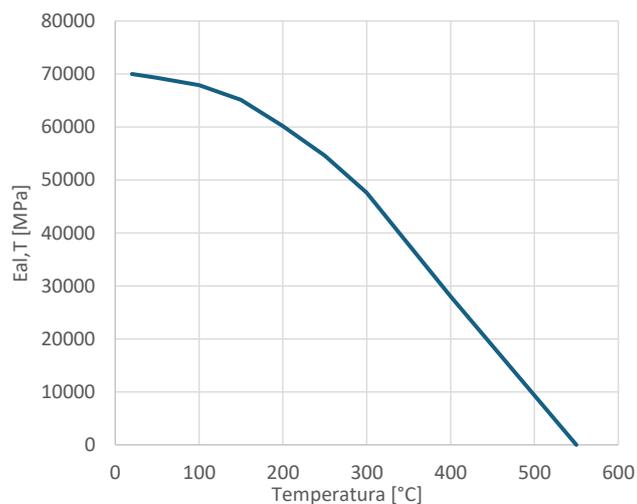


Figura 5.152: Modulo di elasticità dell'alluminio in funzione della temperatura

Per quanto riguarda il modulo elastico dell'alluminio, in Figura 5.152 si nota che a 350°C si dimezza ed a 550°C si annulla completamente. Si ricorda che la temperatura di fusione dell'alluminio si aggira attorno ai 600°C; quindi, quanto è stato osservato non solo è in linea con quanto visto nella Figura 5.151 ma è in linea con le proprietà dell'alluminio viste in precedenza (dalla Figura 5.145 alle Figura 5.149).

Su CDM Dolmen, utilizzando il tool IS Fuoco, sono state editate le sezioni dei profili metallici costituenti la sottostruttura metallica, come riportato nelle immagini successive.

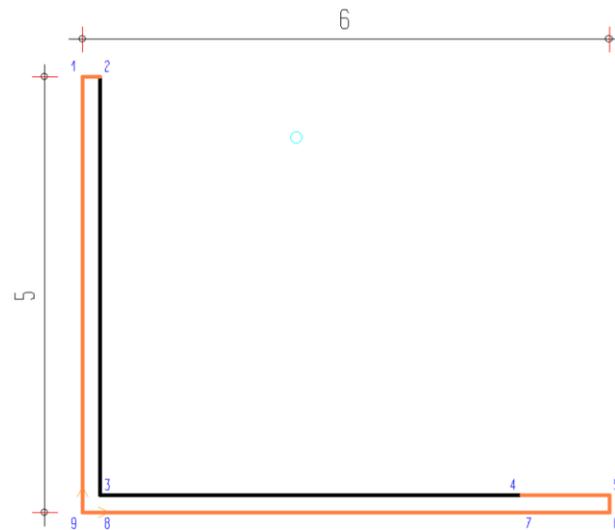


Figura 5.153: Sezione a L 6x5 cm, spessore 2 mm, in alluminio

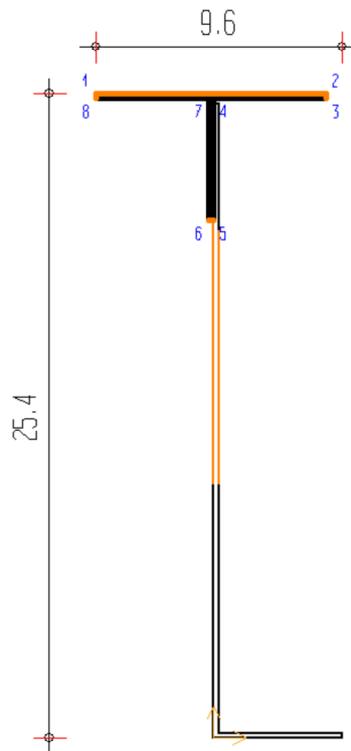


Figura 5.154: Sezioni a T, 9x5 cm in alluminio, e a L, 5x25 cm in acciaio

In queste immagini, si osservino le zone colorate in arancione che corrispondono alle zone di esposizione a cui è stata associata la curva nominale *Fuoco esterno*.

Si riportano i risultati dell'analisi realizzata impostando prima quattro mappe termiche ogni 15 minuti e poi otto mappe termiche ogni 2 minuti.

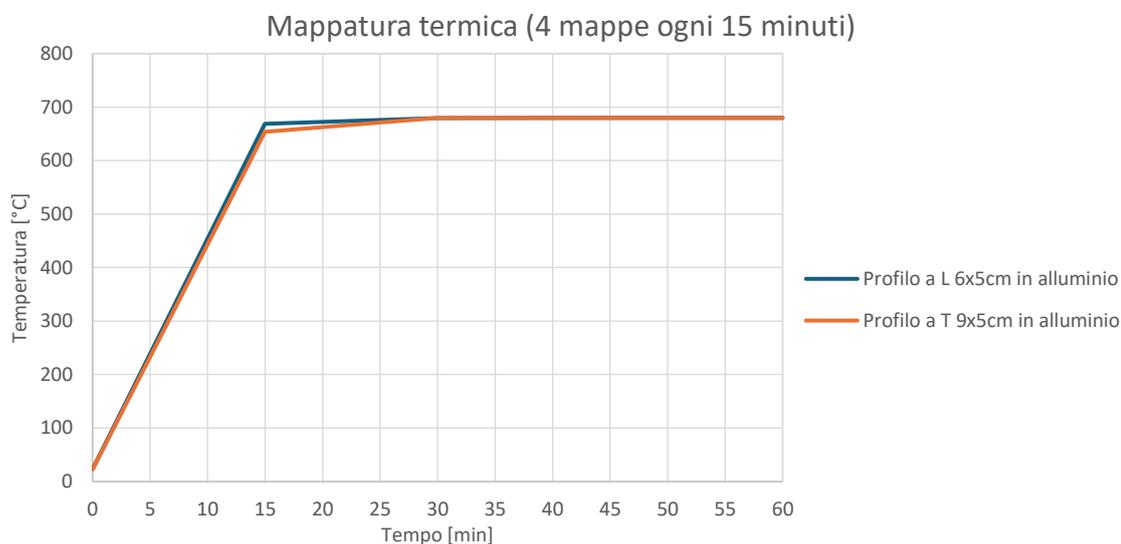


Figura 5.155: La mappatura termica delle sezioni in alluminio, 4 mappe ogni 15 minuti (60 minuti totali)

Dalla Figura 5.155 si evince che le sezioni in pochi minuti (circa 7 minuti e mezzo) raggiungono i 350°C, dove la resistenza è stata abbattuta del 50%. Dopo circa 13-14 minuti si raggiungono i 600°C, a cui corrispondono la fusione del materiale. Venendo a mancare questo elemento in alluminio di supporto, si ha sicuramente il cedimento della lastra del rivestimento.

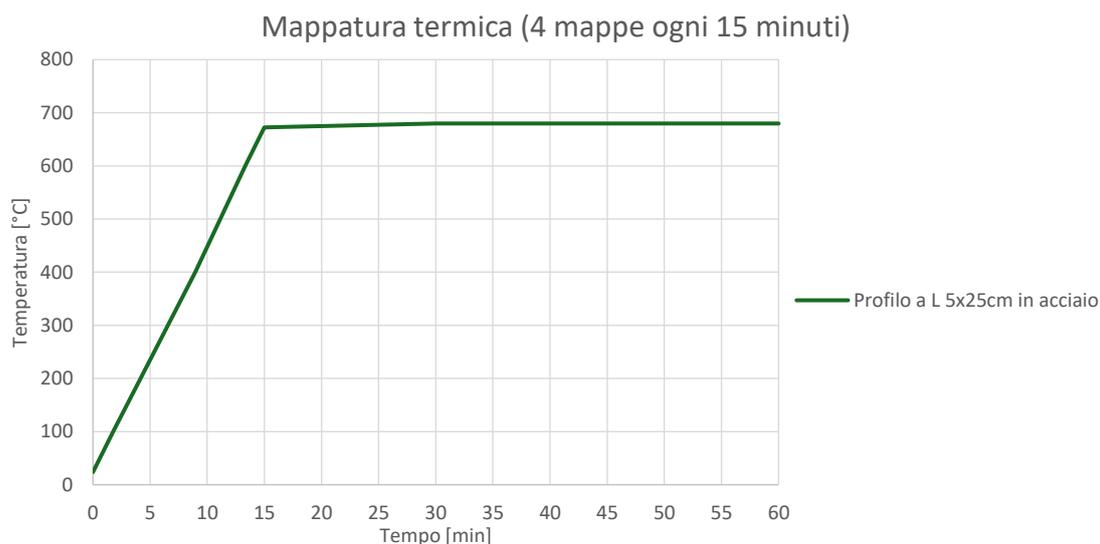


Figura 5.156: La mappatura termica della sezione in acciaio, 4 mappe ogni 15 minuti (60 minuti totali)

Per quanto riguarda la connessione in acciaio, dalla Figura 5.156 si nota che dopo meno di 2 minuti (1,76 min) si raggiungono i 100°C e l'acciaio comincia a degradare. Successivamente, si osserva che si arriva a 400°C dopo poco meno di 9 minuti (8,96 min),

punto in corrispondenza si ha un abbattimento rilevante della resistenza meccanica. Infine, si raggiungono i 600°C dopo circa 13 minuti (13,30 min), in corrispondenza dei quali una resistenza risulta dimezzata.

In questo caso, l'acciaio non rischia la fusione; tuttavia, dato che è sottoposto a carichi, questa marcata riduzione può inficiare la stabilità della struttura.

A questo punto, si è deciso di realizzare un'analisi su un intervallo di tempo minore, per verificare l'accuratezza dei risultati precedenti. Di seguito si riportano i risultati.

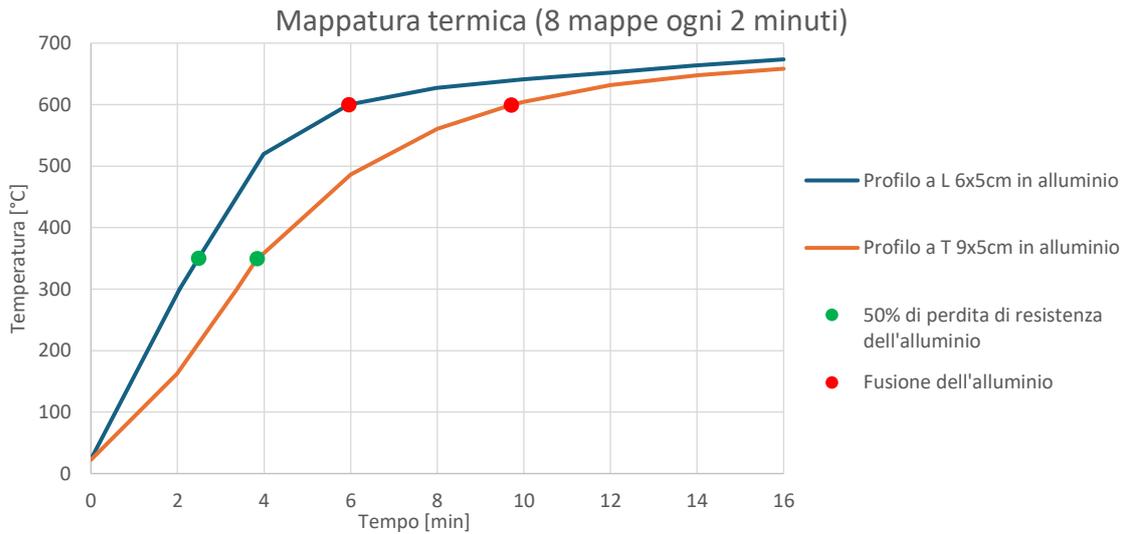


Figura 5.157: La mappatura termica delle sezioni in alluminio, 8 mappe ogni 2 minuti (16 minuti totali)

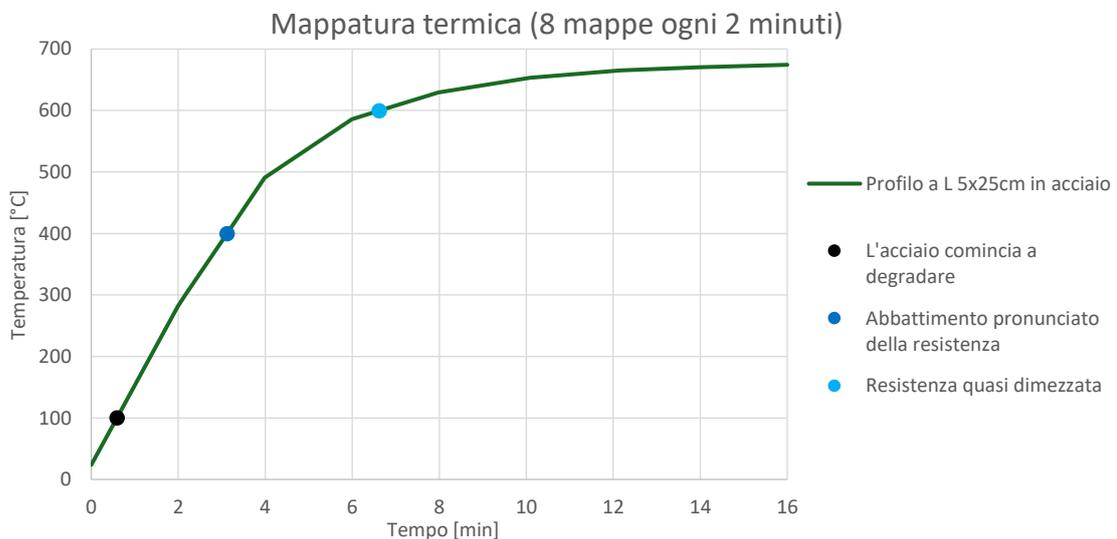


Figura 5.158: La mappatura termica della sezione in acciaio, 8 mappe ogni 2 minuti (16 minuti totali)

Riducendo la dimensione del dominio temporale e discretizzandola in maniera differente, si ottengono dei risultati differenti e più accurati. Questa scelta è stata fatta perché ci si è accorti dalle prime mappe di Figura 5.155 e di Figura 5.156 che le componenti della sottostruttura cedono entro i primi 15 minuti, quindi si è voluto approfondire il fenomeno in un arco di tempo assimilabile al quarto d'ora.

Si noti che il sistema di connessione e ancoraggio del rivestimento alla parete portante fallisce dopo poco tempo: si ipotizza che dopo 6, 7 o al più 8 minuti le componenti cedano e il sistema della sottostruttura fallisce entro 10 minuti.

Si tenga presente che la potenza termica può essere superiore a quella in input, soprattutto per le parti della facciata più vicine al *fire*. Pertanto è importante pensare ad alcune soluzioni.

Una di queste può essere impiegare profilati dotati di spessori maggiori, ovvero superiori a 2 mm. Questo potrebbe rappresentare un vantaggio, però si tengano presente due aspetti negativi: disporre di uno o due mm in più di spessore, non ha cambiamenti drastici e il comportamento rimane pressoché immutato, guadagnando al più un paio di minuti di resistenza in più; aumentare lo spessore vuol dire rendere più pesante il sistema, sebbene l'obiettivo sia disporre di una sottostruttura che sia quanto più leggera. Inoltre, bisogna tenere presente che questo implica anche aumentare i costi e, in verità, uno degli scopi sia l'economicità della sottostruttura metallica.

Si potrebbe realizzare tutta la struttura in acciaio, come altra soluzione alternativa. Tuttavia, anche questo potrebbe comportare un aumento del peso della sottostruttura e anche dei costi, andando contro agli obiettivi della progettazione.

Lo stesso discorso vale per l'utilizzo di materiali isolanti. In effetti, questa soluzione non è nemmeno attuabile in quanto bisogna disporre di sufficiente spazio per la messa in opera. Tale soluzione non risulta né praticabile né adatta.

Si potrebbe pensare all'applicazione di una vernice intumescente che, applicata sui profilati, soprattutto nei nodi, possa proteggerli ed espandere se la sottostruttura fosse sottoposta ad incendio. Purtroppo anche tale soluzione ha degli svantaggi: una volta realizzata, non sarebbe possibile fare manutenzione e riapplicarla, azioni necessarie dopo qualche anno dalla messa in opera, per via del degrado della vernice; anch'essa presenta i *malus* delle soluzioni precedenti, ovvero l'aumento di peso, la realizzazione più complessa della sottostruttura e l'aumento dei costi e, per di più, dei tempi.

Si ritiene che, in verità, sia impossibile impedire che la sottostruttura venga intaccata dall'incendio e, in centri casi, che venga anche compromessa. Soprattutto in prossimità del punto in cui inizia la propagazione dell'incendio, il sistema sarà esposto e vulnerabile. Pertanto, si pensa che sia opportuno spezzare la modularità della facciata, ammettendo che la parte più compromessa ceda, ma senza trascinare con sé tutto il sistema e senza compromettere del tutto l'esodo degli occupanti e l'intervento dei soccorritori.

## Conclusioni

Al termine di questo percorso di ricerca dedicato allo studio della propagazione degli incendi nelle facciate ventilate, è opportuno tracciare un bilancio del lavoro svolto e dei risultati conseguiti, ricollegandosi agli obiettivi delineati all'inizio. L'analisi condotta ha permesso di approfondire i meccanismi di propagazione dell'incendio in questa specifica tipologia costruttiva e di sviluppare un supporto metodologico per il progettista nell'ambito della Fire Safety Engineering.

Il duplice obiettivo prefissato in apertura è stato perseguito attraverso la stesura di una linea guida completa e attraverso un'indagine sistematica che ha integrato l'approfondimento teorico con la modellazione, consentendo di verificare l'ipotesi centrale secondo cui l'approccio prestazionale della FSE, supportato da strumenti avanzati di simulazione, permette una valutazione più accurata e specifica del rischio rispetto ai tradizionali metodi prescrittivi.

I risultati delle simulazioni condotte hanno evidenziato aspetti di fondamentale importanza per la progettazione delle facciate ventilate in relazione alla sicurezza antincendio. In primo luogo, è emerso con chiarezza come la natura dei materiali costituisca un fattore determinante: le configurazioni con materiali combustibili si sono rivelate particolarmente critiche, generando energie elevate e temperature che compromettono gravemente l'integrità dell'intero sistema di facciata. Per contro, l'utilizzo di materiali incombustibili rappresenta già di per sé un'efficace strategia di mitigazione del rischio, riducendo significativamente l'estensione del *plume* termico e, conseguentemente, la propagazione verticale dell'incendio.

L'analisi comparativa tra edifici di diverse altezze ha inoltre rivelato come la geometria complessiva della struttura influenzi in modo sostanziale i meccanismi di propagazione. Se per edifici di altezza limitata, di 2-3 piani, le differenze risultano contenute, nei modelli relativi a edifici di 8 piani è stata osservata una marcata variazione nella forma e nell'estensione del *plume*, con implicazioni rilevanti per la progettazione dei sistemi di protezione. In particolare, si è evidenziata la necessità di estendere l'attenzione progettuale fino a 3-5 piani al di sopra del punto di origine dell'incendio, quando questo si sviluppa in prossimità di un'apertura al piano terra.

Un risultato contro-intuitivo è emerso dall'analisi dell'influenza dello spessore dell'intercapedine: contrariamente alle aspettative, intercapedini di dimensioni ridotte (5 cm) si sono rivelate preferibili rispetto a quelle più ampie (20-40 cm) dal punto di vista della sicurezza antincendio. Sebbene nelle configurazioni con intercapedini maggiori l'incendio tenda a rimanere confinato all'interno della cavità, le temperature che si sviluppano risultano comunque elevate, con potenziali effetti critici sulla stabilità della struttura.

È stato inoltre osservato che i picchi di temperatura non si manifestano necessariamente in corrispondenza del punto di origine dell'incendio, ma tendono a svilupparsi a una distanza di un paio di metri da esso.

Queste evidenze sottolineano l'importanza di considerare il layout complessivo della facciata nella valutazione del rischio, analizzando non solo il modulo singolo ma l'intero contesto in cui è inserito.

Relativamente alle soluzioni di protezione passiva, le simulazioni hanno mostrato che, sebbene la realizzazione di facciate con materiali incombustibili costituisca il primo fondamentale passo verso la sicurezza antincendio, l'implementazione di specifiche misure aggiuntive può contribuire significativamente al contenimento della propagazione. In particolare, le fasce di separazione hanno mostrato un'efficacia limitata, risultando utili principalmente in corrispondenza di punti critici caratterizzati dalla presenza di materiali a rischio. Per contro, le cavity barriers si sono rivelate particolarmente efficaci nel rallentare la diffusione dell'incendio, pur non essendo in grado, da sole, di bloccarla completamente. Emerge quindi la necessità di un approccio integrato che combini diverse soluzioni, alternandole e variandone la disposizione in relazione alle specifiche caratteristiche geometriche e funzionali della facciata.

Un aspetto particolarmente critico è emerso dall'approfondimento dedicato all'analisi della resistenza al fuoco delle connessioni metalliche della sottostruttura. Le verifiche condotte mediante il software CDM Dolmen hanno evidenziato come i componenti in alluminio e acciaio possano cedere in tempi inferiori ai 10 minuti di esposizione alle temperature d'incendio. Questa evidenza impone al progettista di considerare attentamente la modularità della facciata, prevedendo interruzioni strategiche che impediscano al cedimento di una porzione di compromettere l'integrità dell'intera struttura, soddisfacendo gli obiettivi di salvaguardia della vita umana, sia per quanto riguarda l'esodo degli occupanti sia per l'intervento in sicurezza dei soccorritori, prevenendo la caduta di grandi porzioni di facciata ed evitando la compromissione totale dell'involucro.

I limiti riscontrati nel corso dell'indagine, principalmente legati alle caratteristiche del software di simulazione FDS e alle risorse computazionali disponibili, rappresentano al contempo spunti per futuri sviluppi della ricerca. Disponendo di risorse hardware più potenti e di maggior tempo per l'elaborazione, sarebbe possibile superare le principali limitazioni riscontrate, estendendo l'analisi a porzioni più ampie di facciata, fino a modellare intere strutture. Questo consentirebbe di esplorare un ventaglio più ampio di variabili progettuali, quali diverse configurazioni di materiali, geometrie, layout e spessori degli strati componenti.

Inoltre, si potrebbero dedicare approfondimenti specifici dedicati a fenomeni non trattati nella presente tesi, come l'effetto camino e le caratteristiche peculiari delle facciate

micro-ventilate, contribuendo così ad arricchire ulteriormente il quadro conoscitivo a disposizione dei progettisti.

In conclusione, il lavoro svolto ha permesso di evidenziare come l'approccio metodologico della Fire Safety Engineering (FSE), supportato da strumenti avanzati di modellazione computazionale, consenta una comprensione approfondita dei meccanismi di propagazione dell'incendio nelle facciate ventilate e una valutazione accurata dell'efficacia delle diverse soluzioni progettuali. I risultati ottenuti forniscono un supporto concreto per i progettisti che si trovano ad affrontare valutazioni di sicurezza antincendio in questo specifico ambito, contribuendo a promuovere un approccio prestazionale che superi i limiti dei tradizionali metodi prescrittivi, a favore di soluzioni più efficaci e meglio calibrate sulle specificità di ciascun progetto.

## Indice delle figure

Figura 1.1: Il triangolo della combustione (Triangolo del fuoco, 2024).....	10
Figura 1.2: I principali processi chimici e fisici che si verificano durante l'accensione (Atreya, 1998, pag. 2792) .....	11
Figura 1.3: Schema sui prodotti di combustione e sui loro effetti (Vancetti, 2022) .....	14
Figura 1.4: Curva temperatura-tempo (Vancetti, 2022) .....	15
Figura 1.5: Curva temperatura-tempo, sviluppo di un incendio (Ayr et al., 2015, pag. 2) ..	16
Figura 1.6: Andamento temperatura-tempo e flashover (Minoia, 2022, pag. 7).....	18
Figura 1.7: Curva di incendio naturale (Calabrese, 2018) .....	19
Figura 1.8: Potenza termica nel tempo (Calabrese, 2018) .....	19
Figura 1.9: Area sottesa dalla curva RHR (Vancetti, 2022) .....	20
Figura 1.10: Confronto tra le curve d'incendio naturali e nominali (Micunco, 2022, pag. 36) .....	23
Figura 1.11: Le differenti curve nominali (Vancetti, 2022) .....	24
Figura 1.12: Curva RHR o HRR (Vancetti, 2023) .....	24
Figura 1.13: Sviluppi distinti per differenti velocità di crescita (Vancetti, 2022) .....	26
Figura 1.14: Differenti velocità di crescita entro i 300 s (Vancetti, 2022).....	26
Figura 1.15: Bilancio termico all'interno di un locale sottoposto ad un incendio con aperture di ventilazione (Vancetti, 2023) .....	29
Figura 1.16: Incendio all'interno di un locale (Vancetti, 2023).....	31
Figura 2.1: Esempi di altezza antincendio (Illustrazione G.1-3, Codice).....	34
Figura 2.2: Altezza d'interpiano (Paduos et al., 2018).....	36
Figura 2.3: Esempi di facciata semplice (Giacalone, 2014).....	39
Figura 2.4: Facciata a doppia parete non ventilata (Giacalone, 2014) .....	40
Figura 2.5: Facciata a doppia parete ventilata non ispezionabile (Giacalone, 2014) .....	40
Figura 2.6: Facciata a doppia parete ventilata ispezionabile (Giacalone, 2014) .....	41
Figura 2.7: Facciata continua o curtain wall (Giacalone, 2014).....	42
Figura 2.8: Facciata a parete aperta e a parete chiusa (Giacalone, 2014).....	42
Figura 2.9: Esempi di facciate ventilate (Girardo et al., 2013) .....	43
Figura 2.10: Schema di una facciata ventilata (Putilov, 2011) .....	44
Figura 2.11: Ampiezza dell'area di ventilazione (Micunco, 2022, pag. 24) .....	48
Figura 2.12: Intercapedine non ventilata (a sinistra), intercapedine fortemente ventilata (al centro) e intercapedine debolmente ventilata (a destra) (Micunco, 2022, pag. 25) .....	48
Figura 2.13: Tipologie di sottostrutture - Fissaggio all'elemento portante (Micunco, 2022, pag. 27) .....	50
Figura 2.14: Schema di funzionamento di una parete a ventilazione naturale in regime estivo ed invernale (Micunco, 2022).....	52
Figure 2.15: Esempi di fascia di separazione orizzontale in facciata (Illustrazione V.13-2, pag. V.13-7, Codice).....	70
Figura 2.16: Esempi di fascia di separazione verticale in facciata o in copertura (Illustrazione V.13-3, pag. V.13-7, Codice) .....	71

Figure 3.1: Gli scenari tipici di propagazione dell'incendio sulla facciata degli edifici (Rukavina et al., 2017, pag. 12) .....	74
Figure 3.2: Altezze di fiamma con le relative temperature sulla facciata a seconda della velocità di circolazione dell'aria (Rukavina et al., 2017, pag. 13) .....	74
Figura 3.3: La propagazione dell'incendio e delle fiamme in facciata (Giacalone, 2014) ...	75
Figura 3.4: Incendio alla First Bank a Los Angeles il 4 maggio 1988 (Kelsey, 1988) .....	78
Figura 3.5: Incendio al Windsor Building a Madrid (Engelhardt & Morovat, 2021, pag. 22) .....	80
Figura 3.6: Il Mandarin Oriental Hotel (Pechino) dopo l'incendio del 9 febbraio 2009 (Pershakov et al., 2016, pag. 3).....	80
Figure 3.7: La Torre Olympus, Grozny City (Cecenia) prima, a sinistra, e durante l'incendio del 3 aprile 2013, a destra (Marotta, 2015).....	82
Figure 3.8: La Torre Olympus dopo l'incendio del 3 aprile 2013 (Marotta, 2015) .....	82
Figura 3.9: Incendio della Grenfell Tower (Londra) del 14 giugno 2017 (Selwyn, 2017).....	83
Figura 3.10: L'incendio della Torch Tower a Dubai il 21 febbraio del 2015 (Micunco, 2022, pag. 13) .....	84
Figure 3.11: Il grattacielo del complesso residenziale di 8 torri Boulevard Walk di Emaar (Dubai) prima, a sinistra, e durante l'incendio del 7 novembre 2022, a destra (Peacock, 2022b, pag. 1 e 12) .....	85
Figure 3.12: L'incendio alla Torre dei Moro (Milano) del 29 agosto 2021 a sinistra e la struttura post-incendio a destra (Commissione Tecnica ANPE, 2021, pag. 4).....	86
Figure 3.13: Il complesso residenziale di Valencia prima e durante l'incendio del 22 febbraio 2024 (Peacock, 2024, pag. 5 e 30) .....	88
Figure 3.14: Il complesso residenziale di Valencia dopo l'incendio del 22 febbraio 2024 (Peacock, 2024, pag. 52).....	89
Figura 3.15: Un esempio di geometria in cui si manifesta l'effetto trincea (Giacalone, 2024) .....	91
Figure 3.16: La rappresentazione grafica dello sviluppo dell'effetto trincea.....	92
Figure 3.17: L'influenza degli aggetti orizzontali (Giacalone, 2024) .....	93
Figura 3.18: L'evoluzione dell'incendio in una facciata ventilata (Giacalone, 2024) .....	97
Figure 3.19: Il confronto tra parete semplice, parete con oggetto orizzontale e facciata ventilata (Giacalone, 2024).....	98
Figure 3.20: Schematizzazione del plume (Giacalone, 2014) .....	98
Figure 3.21: Lo sviluppo di uno scenario d'incendio interno ad una facciata ventilata (riproduzione di immagini prese da Giacalone, 2014) .....	99
Figure 3.22: Altri scenari dello sviluppo di un incendio interno ad una facciata ventilata da tenere in considerazione (riproduzione di immagini prese da Giacalone, 2014).....	99
Figura 3.23: Percorsi di propagazione dell'incendio (Global Design Guide, 2022, pag. 338) .....	103
Figura 3.24: Il posizionamento e le funzioni differenti tra cavity barrier e fire stop (Wilkinson, 2021).....	104

Figure 3.25: Le diverse tipologie di barriera (Global Design Guide, 2022, pag. 340) .....	105
Figura 3.26: Il funzionamento del materiale intumescente (Global Design Guide, 2022, pag. 340).....	105
Figura 4.1: Schema riassuntivo di attività soggette e non soggette, normate e non normate, con specchietto del Codice di prevenzione incendi (Vancetti, 2022) .....	109
Figura 4.2: Confronto tra modello a zone e modello di campo (Vancetti, 2023) .....	118
Figura 4.3: Schema di un incendio in un ambiente confinato (Vancetti, 2023) .....	119
Figura 4.4: Schema di una mesh (Vancetti, 2023) .....	120
Figura 4.5: Le fasi di una simulazione numerica (Basile, 2024, pag. 6; De Trizio, 2024, pag. 5) .....	122
Figura 4.6: L'interfaccia grafica di PyroSim .....	123
Figura 4.7: Record View in PyroSim .....	123
Figura 4.8: L'albero del modello in PyroSim .....	124
Figure 4.9: Esempi di allineamento delle mesh.....	125
Figure 4.10: Ottimizzazione della mesh con superfici non aperte alla ventilazione per simulare un compartimento chiuso.....	128
Figure 4.11: Ottimizzazione della mesh con superfici non aperte alla ventilazione per simulare la modularità della facciata ventilata.....	129
Figure 4.12: Configurazione grafica di base dei primi quattro modelli per il confronto delle modalità di simulazione.....	132
Figure 4.13: I risultati della simulazione del modello 1 in modalità DNS.....	133
Figure 4.14: I risultati della simulazione del modello 2 in modalità LES .....	133
Figure 4.15: I risultati della simulazione del modello 3 in modalità VLES .....	133
Figure 4.16: I risultati della simulazione del modello 4 in modalità SVLES .....	134
Figura 5.1: Stratigrafia di base della facciata ventilata combustibile realizzata con Termus - ACCA Software .....	139
Figura 5.2: Stratigrafia di base della facciata ventilata incombustibile realizzata con Termus - ACCA Software.....	139
Figure 5.3: Setup del burner .....	143
Figure 5.4: Curve RHR impostate in input .....	143
Figura 5.5: Facciata ventilata continua combustibile e incombustibile nei modelli 5, 7, 9-16 .....	144
Figura 5.6: Facciata ventilata continua combustibile e incombustibile nei modelli 6 e 8. ....	144
Figura 5.7: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra in PyroSim – modelli 17 e 18 .....	145
Figura 5.8: Layout della facciata e posizionamento dei devices – modelli 17, 18, 19 e 20146	
Figura 5.9: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra e una fascia di separazione di 1 m in PyroSim – modello 19.....	146
Figura 5.10: Facciata ventilata incombustibile 2 piani fuori terra con presenza di una finestra e un cavity barrier nell'intercapedine in PyroSim – modello 20 .....	147
Figura 5.11: Il layout del quarto gruppo di simulazioni d'incendio - modelli 21 e 22 .....	148

Figura 5.12: Configurazione della facciata e posizionamento dei sensori dei modelli 21 e 22 .....	149
Figura 5.13: Posizionamento delle slices nei modelli in PyroSim .....	150
Figure 5.14: Slice_x di temperatura – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5) .....	151
Figure 5.15: Slice_y di temperatura – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5) .....	151
Figure 5.16: Slice_x di w-velocity – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5) .....	152
Figure 5.17: Wall temperature, vista frontale dell’isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5).....	152
Figure 5.18: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell’intercapedine – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5)	153
Figure 5.19: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata continua combustibile (modello 5) .....	154
Figura 5.20: I risultati di tutti i devices dal modello di facciata ventilata continua combustibile – modello 5 .....	155
Figura 5.21: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento combustibile – modello 5.....	155
Figura 5.22: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell’intercapedine di 10 cm – modello 5.....	156
Figura 5.23: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all’intercapedine – modello 5 .....	157
Figura 5.24: Le temperature dei devices ad 1 metro dal burner – modello 5.....	158
Figura 5.25: Le temperature dei devices a 2 metri dal burner – modello 5.....	159
Figura 5.26: Le temperature dei devices a 3 metri dal burner – modello 5.....	159
Figura 5.27: Le temperature dei devices a 4 metri dal burner – modello 5.....	160
Figura 5.28: Le temperature dei devices a 5 metri dal burner – modello 5.....	160
Figure 5.29: Slice_x di temperatura – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7).....	161
Figure 5.30: Slice_y di temperatura – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7).....	162
Figure 5.31: Slice_x di w-velocity – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7) .....	162
Figure 5.32: Wall temperature, vista frontale dell’isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7).....	163
Figure 5.33: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell’intercapedine – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7) .....	164
Figure 5.34: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata continua incombustibile (modello 7) .....	164

Figura 5.35: I risultati di tutti i devices dal modello di facciata ventilata continua incombustibile – modello 7 .....	165
Figura 5.36: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento incombustibile – modello 7.....	165
Figura 5.37: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 7.....	166
Figura 5.38: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 7.....	167
Figura 5.39: Le temperature dei devices ad 1 metro dal burner – modello 7.....	167
Figura 5.40: Le temperature dei devices a 2 metri dal burner – modello 7.....	168
Figura 5.41: Le temperature dei devices a 3 metri dal burner – modello 7.....	168
Figura 5.42: Le temperature dei devices a 4 metri dal burner – modello 7.....	168
Figura 5.43: Le temperature dei devices a 5 metri dal burner – modello 7.....	169
Figura 5.44: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	170
Figura 5.45: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 2 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	170
Figura 5.46: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	171
Figura 5.47: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 4 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	171
Figura 5.48: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	171
Figura 5.49: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	172
Figura 5.50: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 2 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	172
Figura 5.51: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	173
Figura 5.52: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 4 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	173

Figura 5.53: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7).....	174
Figura 5.54: La curva RHR in output nel caso di facciata ventilata combustibile (modello 5) .....	174
Figura 5.55: La curva RHR in output nel caso di facciata ventilata incombustibile (modello 7) .....	175
Figura 5.56: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	175
Figura 5.57: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 2 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	176
Figura 5.58: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	176
Figura 5.59: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 4 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	177
Figura 5.60: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	177
Figura 5.61: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m – modello 5..	178
Figure 5.62: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x9m – modello 6..	178
Figure 5.63: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m – modello 7 .....	179
Figure 5.64: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x9m – modello 8 .....	179
Figura 5.65: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8).....	180
Figura 5.66: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8).....	180
Figura 5.67: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sullo strato di isolamento dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8).....	180
Figura 5.68: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8) .....	181

Figura 5.69: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8) .....	181
Figura 5.70: Il confronto tra i risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile di estensione 6 m (modello 7) e di estensione 9 m (modello 8) .....	181
Figura 5.71: Il confronto tra i risultati delle sonde poste ad 1 metro dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	182
Figura 5.72: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 3 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	182
Figura 5.73: Il confronto tra i risultati delle sonde poste a 5 metri dal burner sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine, dei modelli di facciata ventilata continua combustibile (modello 5) e incombustibile (modello 7) .....	182
Figure 5.74: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm – modello 9 .....	183
Figure 5.75: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm – modello 10 .....	183
Figure 5.76: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm – modello 11 .....	184
Figure 5.77: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm – modello 12 .....	184
Figura 5.78: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12 .....	185
Figura 5.79: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12 .....	185
Figura 5.80: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua combustibile – modelli 9, 10, 11, 12 .....	186
Figure 5.81: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 5 cm – modello 13 .....	187
Figure 5.82: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 10 cm – modello 14 .....	187
Figure 5.83: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 20 cm – modello 15 .....	188
Figure 5.84: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile 3x6m con intercapedine di 40 cm – modello 16 .....	188

Figura 5.85: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria ad 1 metro dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16 .....	189
Figura 5.86: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16 .....	189
Figura 5.87: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 5 metri dal burner dei modelli di facciata ventilata continua incombustibile – modelli 13, 14, 15, 16 .....	190
Figura 5.88: La curva RHR in input adottata nelle simulazioni d'incendio dal modello 17 al 22 .....	191
Figure 5.89: Slice_x di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17	194
Figure 5.90: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17 .....	195
Figure 5.91: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17	195
Figure 5.92: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 450°C) – modello 17 .....	196
Figura 5.93: I risultati della termocoppia posta in prossimità del vetro – modello 21.....	196
Figura 5.94: I risultati delle termocoppie impostate nella simulazione – modello 21 .....	197
Figure 5.95: Slice_x di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18	198
Figure 5.96: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18.....	198
Figure 5.97: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18	199
Figure 5.98: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) – modello 18 .....	199
Figura 5.99: I risultati della termocoppia posta in prossimità del vetro – modello 18.....	200
Figura 5.100: I risultati delle termocoppie impostate nella simulazione – modello 18 ....	200
Figura 5.101: I risultati delle sonde posizionate sullo strato di isolamento incombustibile – modello 18.....	201
Figura 5.102: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell'intercapedine di 10 cm – modello 18.....	202

Figura 5.103: I risultati delle sonde posizionate sul rivestimento, lato interno rispetto all'intercapedine – modello 18.....	202
Figura 5.104: Le temperature dei devices a 0,5 m dal burner – modello 18 .....	203
Figura 5.105: Le temperature dei devices a 1 m dal burner – modello 18 .....	203
Figura 5.106: Le temperature dei devices a 3,7 m dal burner – modello 18 .....	204
Figure 5.107: Slice_x di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19.....	204
Figure 5.108: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19.....	205
Figure 5.109: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19.....	206
Figure 5.110: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e una fascia di separazione di 1 m – modello 19. ....	206
Figure 5.111: Slice_x di temperatura, facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20.....	207
Figura 5.112: Attivazione della cavity barrier .....	208
Figura 5.113: I dati della termocoppia posizionata in prossimità del vetro - modello 20. ....	208
Figure 5.114: Wall temperature, vista frontale dell'isolante e della parete portante – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20.....	209
Figure 5.115: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell'intercapedine – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20.....	209
Figure 5.116: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno – modello della facciata ventilata incombustibile di struttura a 2 piani fuori terra con presenza di finestra vetrata (temperatura di failure 250°C) e un cavity barrier – modello 20.....	210
Figura 5.117: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 0,5 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20 .....	210
Figura 5.118: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 1,5 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20 .....	211
Figura 5.119: Il confronto dei risultati delle termocoppie poste al centro dell'intercapedine d'aria a 3,7 m dal burner del terzo gruppo di modelli – modelli 18, 19 e 20 .....	212

Figure 5.120: Slice_x di temperatura, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	214
Figure 5.121: Slice_y di temperatura, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	214
Figure 5.122: Slice_x di w-velocity, facciata continua combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	215
Figure 5.123: Wall temperature, vista frontale dell’isolante e della parete portante della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	216
Figure 5.124: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell’intercapedine della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	217
Figure 5.125: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno dell’intercapedine della facciata combustibile di struttura di 8 piani – modello 21 .....	218
Figure 5.126: I risultati di tutti i devices dal modello 21 .....	219
Figura 5.127: I risultati delle sonde poste sullo strato di isolamento combustibile – modello 21 .....	220
Figura 5.128: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell’intercapedine di 10 cm – modello 21 .....	221
Figura 5.129: I risultati delle sonde poste sullo strato di rivestimento combustibile, lato interno dell’intercapedine – modello 21 .....	222
Figure 5.130: Slice_x di temperatura, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	223
Figure 5.131: Slice_y di temperatura, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	223
Figure 5.132: Slice_x di w-velocity, facciata continua incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	224
Figure 5.133: Wall temperature, vista frontale dell’isolante e della parete portante della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	225
Figure 5.134: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato interno dell’intercapedine della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	226
Figure 5.135: Wall temperature, vista frontale del rivestimento, lato esterno dell’intercapedine della facciata incombustibile di struttura di 8 piani – modello 22 .....	227
Figura 5.136: I risultati di tutti i devices dal modello 22 .....	228
Figura 5.137: I risultati delle sonde poste sullo strato di isolamento incombustibile – modello 22 .....	229
Figura 5.138: I risultati delle termocoppie posizionate al centro dell’intercapedine di 10 cm – modello 22 .....	230
Figura 5.139: I risultati delle sonde poste sullo strato di rivestimento incombustibile, lato interno dell’intercapedine – modello 22 .....	230
Figura 5.140: Sistema di facciata ventilata con elementi in pietra naturale – StoVentec S .....	231
Figura 5.141: Layout della sottostruttura metallica della facciata ventilata.....	232

Figura 5.142: Procedura di analisi (Fantilli, 2024) .....	232
Figura 5.143: Legge di Fourier, caso monodimensionale (Fantilli, 2024) .....	233
Figura 5.144: La legge costitutiva sforzi-deformazioni dell'alluminio (UNI EN 1999-1-1:2007+A1) .....	235
Figura 5.145: La densità dell'alluminio in funzione della temperatura (Foteinopoulos et al., 2017, pag. 74) .....	236
Figura 5.146: L'andamento della densità dell'alluminio in funzione della temperatura ...	236
Figura 5.147: Il calore specifico dell'alluminio in funzione della temperatura (Foteinopoulos et al., 2017, pag. 75) .....	237
Figura 5.148: L'andamento del calore specifico dell'alluminio in funzione della temperatura .....	237
Figura 5.149: L'andamento della conduttività termica, a sinistra da Foteinopoulos et al. (2017, pag. 74) e a destra il grafico realizzato su Excel .....	237
Figura 5.150: I fattori di riduzione in funzione della temperatura (UNI EN 1993-1-2:2005, Fig. 3.2, pag. 23).....	239
Figura 5.151: La variazione del rapporto di resistenza dell'alluminio in funzione della temperatura.....	240
Figura 5.152: Modulo di elasticità dell'alluminio in funzione della temperatura.....	240
Figura 5.153: Sezione a L 6x5 cm, spessore 2 mm, in alluminio.....	241
Figura 5.154: Sezioni a T, 9x5 cm in alluminio, e a L, 5x25 cm in acciaio .....	241
Figura 5.155: La mappatura termica delle sezioni in alluminio, 4 mappe ogni 15 minuti (60 minuti totali) .....	242
Figura 5.156: La mappatura termica della sezione in acciaio, 4 mappe ogni 15 minuti (60 minuti totali) .....	242
Figura 5.157: La mappatura termica delle sezioni in alluminio, 8 mappe ogni 2 minuti (16 minuti totali) .....	243
Figura 5.158: La mappatura termica della sezione in acciaio, 8 mappe ogni 2 minuti (16 minuti totali) .....	243

## Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Tabella E.4 (UNI EN 1991-1-2) .....	21
Tabella 1.2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio (Vancetti, 2022)....	25
Tabella 1.3: Tabella E.5 (UNI EN 1991-1-2) .....	27
Tabella 1.4: Focolari predefiniti (tabella M.2-2, Codice) .....	28
Tabella 2.1: Tabella A (D.M. 16 maggio 1987) .....	33
Tabella 2.2: Classificazione climatica (D.P.R. 412/1993) .....	57
Tabella 2.3: Classificazione generale degli edifici per categorie (D.P.R. 412/1993).....	58
Tabella 2.4: Valori limite della trasmittanza termica delle strutture opache verticali (Tabella 2.1, D. Lgs. 311/2006) .....	61
Tabella 2.5: Valori limite della trasmittanza termica delle coperture (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006) .....	61
Tabella 2.6: Valori limite della trasmittanza termica dei pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006).....	61
Tabella 2.7: Valori limite della trasmittanza termica delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006).....	61
Tabella 2.8: Valori limite della trasmittanza centrale termica dei vetri (Tabella 2.2, D. Lgs. 311/2006) .....	62
Tabella 2.9: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 1, Appendice A, D.M. 26/06/2015)...	62
Tabella 2.10: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati (Tabella 2, Appendice A, D.M. 26/06/2015).....	62
Tabella 2.11: Valori di trasmittanza termica delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 3, Appendice A, D.M. 26/06/2015).....	63
Tabella 2.12: Valori di trasmittanza termica delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati (Tabella 4, Appendice A, D.M. 26/06/2015) .....	63
Tabella 2.13: Valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti (Tabella 5, Appendice A, D.M. 26/06/2015).....	63
Tabella 2.14: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 1, Appendice B, D.M. 26/06/2015) .....	63
Tabella 2.15: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 2, Appendice B, D.M. 26/06/2015).....	64
Tabella 2.16: Valori di trasmittanza termica massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 3, Appendice B, D.M. 26/06/2015).....	64

Tabella 2.17: Valori di trasmittanza termica massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione (Tabella 4, Appendice B, D.M. 26/06/2015) .....	64
Tabella 2.18: Classi di reazione al fuoco dei materiali .....	67
Tabella 2.19: Classificazione in base alla produzione di fumo .....	67
Tabella 2.20: Classificazione in base al gocciolamento .....	67
Tabella 3.1: Sintesi degli scenari di propagazione di incendio in facciata .....	74
Tabella 4.1: Classificazione degli edifici in base all'altezza dei piani dalla RTV.13 (Codice di prevenzione incendi, pag. V.14-2) .....	110
Tabella 4.2: Classi di resistenza al fuoco dalla RTV.14 (tabella V.14-1, pag. V.14-3) .....	111
Tabella 4.3: Requisiti di compartimentazione dalla RTV.14 (tabella V.14-2, pag. V.14-4) .	111
Tabella 4.4: Gruppi di materiali per la reazione al fuoco degli elementi delle chiusure d'ambito dalla RTV.13 (tabella V.13-1, pag. V.13-3) .....	113
Tabella 4.5: Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento (tabella S.1-6) .....	114
Tabella 4.6: Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento (tabella S.1-7) .....	114
Tabella 4.7: Caratteristiche di resistenza al fuoco per facciate a doppia pelle ventilate (tabella V.13-2) .....	115
Tabella 5.1: Materiali e stratigrafie comuni adottate nei modelli .....	138
Tabella 5.2: Verifica dei valori limite della trasmittanza termica delle strutture opache verticali (Tabella 2.1, D. Lgs. 311/2006) .....	139
Tabella 5.3: Verifica dei valori di trasmittanza termica delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra (Tabella 1, Appendice A, D.M. 26/06/2015) .....	140
Tabella 5.4: Il primo gruppo di modelli realizzati con facciata ventilata continua .....	140
Tabella 5.5: Il secondo gruppo dedicato alla variazione dell'intercapedine d'aria .....	140
Tabella 5.6: Il terzo gruppo per simulare una situazione più aderente alla realtà e le diverse soluzioni suggerite dalla sicurezza antincendio .....	141
Tabella 5.7: Il quarto gruppo di modelli per simulare una porzione di facciata corrispondente ad una struttura di 8 piani .....	141
Tabella 5.8: Il setup delle proprietà dei materiali su PyroSim .....	142
Tabella 5.9: Le proprietà del materiale vetro per il terzo gruppo di modelli .....	142
Tabella 5.10: Il setup delle superfici su PyroSim .....	142
Tabella 5.11: Le caratteristiche e proprietà dell'acciaio in CDM Dolmen .....	235
Tabella 5.12: I fattori di riduzione dell'acciaio in funzione della temperatura (UNI EN 1993-1-2:2005, Table 3, pag. 22) .....	238
Tabella 5.13: La variazione del coefficiente di riduzione della tensione convenzionale di snervamento (Sabatino et al., 2019, pag. 132) .....	239
Tabella 5.14: Variazione del modulo di elasticità dell'alluminio in funzione della temperatura (Sabatino et al., 2019, pag. 133) .....	240

## Bibliografia

- Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro. (2013). *Vademecum: Sollecitazione di natura termica nel vetro – Indicazioni operative per le applicazioni in edilizia*. Ultimo accesso: 04 marzo 2025, <https://www.sav2000.it/public/pdf/VADEMECUM%20-%20Sollecitazione%20di%20natura%20termica%20nel%20vetro%20-%20Indicazioni%20operative%20per%20le%20applicazioni%20in%20edilizia.pdf>
- Atreya, A. (1998). Ignition of fires. *Philosophical Transactions of the Royal Society A - Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 356(1748), 2787–2813. <https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0298>
- Attentati dell'11 settembre 2001. (2024, 6 novembre). In Wikipedia. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://it.wikipedia.org/wiki/Attentati\\_dell%2711\\_settembre\\_2001#Vittime](https://it.wikipedia.org/wiki/Attentati_dell%2711_settembre_2001#Vittime)
- Ayr, U., Buffo, S., Cirillo, E., & Masini, P. (2015, 1 aprile). *Sperimentazione di eventi di incendio in un ambiente confinato*. ResearchGate. Ultimo accesso: 15 ottobre 2024, [https://www.researchgate.net/publication/268188832\\_SPERIMENTAZIONE\\_DI\\_EVENI\\_DI\\_INCENDIO\\_IN\\_UN\\_AMBIENTE\\_CONFINATO](https://www.researchgate.net/publication/268188832_SPERIMENTAZIONE_DI_EVENI_DI_INCENDIO_IN_UN_AMBIENTE_CONFINATO)
- Babrauskas, V. (2010). *Glass breakage in fires*. Fire Science and Technology Inc. <https://doctorfire.com/wp-content/uploads/2018/11/GlassBreak.pdf>
- Basile, G. (2024, 10 febbraio). *SIMULATORE FDS PER LA FIRE SAFETY ENGINEERING*. Pro Fire focus. Ultimo accesso: 9 febbraio 2025, [https://www.pro-fire.org/images/news/FDS-articolo\\_febbraio.pdf](https://www.pro-fire.org/images/news/FDS-articolo_febbraio.pdf)
- Basso, S. (2022). *Analisi e verifiche di Fire Safety Engineering sulla propagazione degli incendi in facciata in edifici a grande altezza* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. Webthesis. <https://webthesis.biblio.polito.it/22195/>
- BibLus, ACCA software. (2017, 4 maggio). *Certificazione energetica: quadro normativo e glossario - L'evoluzione della normativa di riferimento per la certificazione energetica, dalla legge 10/1991 alla legge 90/2013*. Ultimo accesso: 18 gennaio 2025, <https://biblus.acca.it/attestato-prestazione-energetica-ape/#direttiva-2002-91-ce-epbd-energy-performance-of-building-directive>
- BibLus, ACCA software. (2024a, 29 febbraio). *Parete ventilata: stratigrafia tipo, caratteristiche e spessori*. Ultimo accesso: 10 gennaio 2025, <https://biblus.acca.it/parete-ventilata-stratigrafia-tipo/>
- BibLus, ACCA software. (2024b, 28 marzo). *Classi di reazione al fuoco dei materiali*. Ultimo accesso: 21 gennaio 2025, <https://biblus.acca.it/classi-di-reazione-al-fuoco-dei-materiali/#euroclassi-cosa-sono>

- BibLus, ACCA software. (2024c, 15 maggio). *Resistenza al fuoco: cosa c'è da sapere*. Ultimo accesso: 22 gennaio 2025, <https://biblus.acca.it/guida-resistenza-al-fuoco-degli-elementi-strutturali/>
- BibLus, ACCA software. (2024d, 4 novembre). *Diagramma andamento incendio – Curve nominali di incendio*. Ultimo accesso: 07 marzo 2025, [https://biblus.acca.it/diagramma-andamento-incendio/#Curve nominali di incendio](https://biblus.acca.it/diagramma-andamento-incendio/#Curve%20nominali%20di%20incendio)
- Brasile, incendio in un grattacielo a Recife: le fiamme distruggono il palazzo di 28 piani. (2024, 29 marzo). Leggo. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.leggo.it/esteri/news/brasile\\_incendio\\_grattacielo\\_recife\\_oggi\\_29\\_3\\_2024-8025320.html](https://www.leggo.it/esteri/news/brasile_incendio_grattacielo_recife_oggi_29_3_2024-8025320.html)
- Brucia la “torcia” di Dubai. (2015, 21 febbraio). Rsi. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.rsi.ch/info/mondo/Brucia-la-torcia-di-Dubai--866401.html>
- Buchanan, A. & Östman, B. (2022, 29 luglio). *Fire Safe Use of Wood in Buildings - Global Design Guide*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003190318>
- Burricco, I. (2021, 26 novembre). *Torre dei Moro, nuova tesi emersa dalle indagini: l'incendio è stato causato da un mozzicone di sigaretta (ma non solo)*. Mi-Tomorrow. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.mitomorrow.it/cambiamilano/torre-dei-moro-incendio/>
- Calabrese, D. (2018, 19 giugno). *Stima analitica della curva RHR*. Edilizia Namirial. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.edilizianamirial.it/stima-analitica-curva-rhr/>
- Carlson, C. (2021, 31 agosto). *Milan apartment block fire “closely recalled Grenfell Tower” says mayor*. Dezeen. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.dezeen.com/2021/08/31/milan-apartment-block-fire-torre-del-moro-grenfell/>
- Cavity barriers and fire stops - Fire Safety Wood in Construction*. (2023, 10 marzo). Fire Safety Wood in Construction. Ultimo accesso: 8 febbraio 2025, <https://timberfiresafety.org/cavity-barriers-and-fire-stops/>
- Chow, W., Hung, W., Gao, Y., Zou, G., & Dong, H. (2005). *Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned façade*. *Construction and Building Materials*, 21(3), 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.005>
- Cina/Incendio grattacielo Shanghai, 53 morti, 4 arresti. (2010, 16 novembre). L'Eco di Bergamo. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024,

[https://www.ecodibergamo.it/stories/apcom/cina-incendio-grattacielo-shanghai-53-morti-4-arresti-o\\_167886\\_11/](https://www.ecodibergamo.it/stories/apcom/cina-incendio-grattacielo-shanghai-53-morti-4-arresti-o_167886_11/)

Cina: incendio in hotel, almeno 10 morti. (2017, 25 febbraio). Agenzia Nazionale Stampa Associata (ANSA). Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.ansa.it/sito/notizie/mondo/asia/2017/02/25/cina-incendio-in-hotel-intrappolati\\_5601f32c-528d-4630-b344-f616b62c00fe.html](https://www.ansa.it/sito/notizie/mondo/asia/2017/02/25/cina-incendio-in-hotel-intrappolati_5601f32c-528d-4630-b344-f616b62c00fe.html)

Commissione Tecnica ANPE. (2021, dicembre). *Incendio alla Torre dei Moro: un bel tacer non fu mai scritto... Prevenzione e sicurezza agli incendi*. ANPE - Associazione Nazionale Poliuretano Espanso rigido. Focus Tecnici, Poliuretano - n. 67 Dicembre 2021, pag. 4-7. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.poliuretano.it/FocusTecnici/Prevenzione%20e%20sicurezza%20agli%20incendi%20Incendio%20alla%20Torre%20dei%20Moro.pdf>

Cuzzillo, B. R., & Pagni, P. J. (1998). *Thermal breakage of double-pane glazing by fire*. Journal of Fire Protection Engineering, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1177/104239159800900101>

D'Apolito, M. (2020). *Analisi dell'incendio avvenuto alla Grenfell Tower di Londra: simulazioni e verifiche di soluzioni progettuali*. [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino. <https://webthesis.biblio.polito.it/15654/>

De Trizio, A. M. (2024, novembre). *Analisi incendi di facciata in edifici civili di grande altezza con strumenti della Fire Safety Engineering* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. Webthesis. <https://webthesis.biblio.polito.it/33392/>

Decreti Ministeriali 26 giugno 2015, “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici,” “Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell’applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi,” “Adeguamento del decreto 26 giugno 2009, Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.” (2015, 15 luglio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (162). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>

Decreto 10 marzo 2005, “Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio.” (2005, 30 marzo) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (73). [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2005-03-30&atto.codiceRedazionale=05A02842&elenco30giorni=false](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2005-03-30&atto.codiceRedazionale=05A02842&elenco30giorni=false)

Decreto 14 ottobre 2022, “Modifiche al decreto 26 giugno 1984, concernente «Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi», al decreto del 10 marzo 2005, concernente «Classi di

- reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio» e al decreto 3 agosto 2015 recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139»." (2022, 26 ottobre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (251).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/10/26/22A06030/SG>
- Decreto 16 febbraio 1982, "Modificazioni del decreto ministeriale 27 settembre 1965, concernente la determinazione delle attività soggette alle visite di prevenzione incendi." (1982, 9 aprile) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (98).  
[https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/rules-docs/dm\\_16\\_02\\_82.pdf](https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/rules-docs/dm_16_02_82.pdf)
- Decreto 16 febbraio 2007, "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione" (2007, 29 marzo) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (74).  
[https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2007-03-29&atto.codiceRedazionale=07A02567](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2007-03-29&atto.codiceRedazionale=07A02567)
- Decreto 16 maggio 1987, "Norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione, n. 246." (1987, 27 giugno) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (148).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1987/06/27/087U0246/sg>
- Decreto 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»." (2018, 20 febbraio). *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*. (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (42). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/2/20/18A00716/sg>
- Decreto 18 ottobre 2019, "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139." (2019, 31 ottobre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (256).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/10/31/19A06608/sg>
- Decreto 19 maggio 2022, "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per gli edifici di civile abitazione, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139." (2022, 30 maggio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (125).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/05/30/22A03207/sg>
- Decreto 26 giugno 1984, "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi." (1984, 25 agosto) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (234).  
[https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/2022-10/DM\\_26-06-1984\\_Articolato\\_Integrato.pdf](https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/2022-10/DM_26-06-1984_Articolato_Integrato.pdf)
- Decreto 3 agosto 2015, "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139." (2015, 20 agosto)

- (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (192).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/08/20/15A06189/sg>
- Decreto 3 settembre 2021, "Criteri generali di progettazione, realizzazione ed esercizio della sicurezza antincendio per luoghi di lavoro, ai sensi dell'articolo 46, comma 3, lettera a), punti 1 e 2, del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81." (2021, 29 ottobre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (259).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/10/29/21A06349/sg>
- Decreto 30 marzo 2022, "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per le chiusure d'ambito degli edifici civili, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139." (2022, 8 aprile) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (83).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/04/08/22A02207/SG>
- Decreto 30 novembre 1983, "Termini, definizioni, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi." (1983, 12 dicembre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (339).  
<https://www.indicenormativa.it/sites/default/files/1983.11.30.pdf>
- Decreto 9 marzo 2007, "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco." (2007, 29 marzo) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (74).  
[https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2007-03-29&atto.codiceRedazionale=07A02568&elenco30giorni=false](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2007-03-29&atto.codiceRedazionale=07A02568&elenco30giorni=false)
- Decreto del Presidente della Repubblica 1 agosto 2011, n. 151, "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122." (2011, 22 settembre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (221).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2011/09/22/011G0193/sg>
- Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del d.lgs. 192/2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE." (2009, 10 giugno) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (132).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2009/06/10/009G0068/sg>
- Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10." (1993, 14 ottobre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (242).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>

- Decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380, “Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia.” (2001, 20 ottobre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (245). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2001/10/20/001G0429/sg>
- Decreto Legge 4 giugno 2013, n. 63, “Disposizioni urgenti per il recepimento della direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell’edilizia.” (2013, 5 giugno) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (130). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/06/05/13G00107/sg>
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, “Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia.” (2005, 23 settembre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (222). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2005/09/23/005G0219/sg>
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311, “Disposizioni correttive ed integrative al d.lgs. 192/2005.” (2007, 1 febbraio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (26). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2007/02/01/007G0007/sg>
- Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28, “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.” (2011, 28 marzo) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (71). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2011/03/28/011G0067/sg>
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81, “Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.” (2008, 30 aprile) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (101). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/04/30/008G0104/s>
- Decreto Ministeriale 10 marzo 1998, “Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.” (1998, 7 aprile) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (81). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1998/04/07/098A2432/sg>
- Decreto Ministeriale 26 giugno 2009, “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.” (2009, 10 luglio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (158). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2009/07/10/09A07900/s>
- Dembele, S., Rosario, R. A., & Wen, J. X. (2012). *Thermal breakage of window glass in room fires conditions – Analysis of some important parameters*. *Building and Environment*, 54, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.009>
- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, sul rendimento energetico nell’edilizia. (2002, 16 dicembre). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, (L1), 65–71. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32002L0091>
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica degli edifici. (2010, 18 giugno). *Gazzetta ufficiale*

dell'Unione europea, (L153), 13–35. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031>

*Dubai's Torch Tower catches fire for second time in two years.* (2017, August 4). BBC News. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-40822269>

Engelhardt, M. D., & Morovat, M. A. (2021, 9 ottobre). Directions in structural-fire safety design for steel buildings. *Japan Architectural Review*, 5(1), 20–31. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12250>

Evangelista, C. (2024, 19 ottobre). *Torre dei Moro diventa Torre Seta, rinasce l'edificio dell'incendio del 2021: entro il 2026 la riapertura per 80 famiglie (con pannelli ignifughi).* Corriere Della Sera. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://milano.corriere.it/notizie/cronaca/24\\_ottobre\\_19/torre-dei-moro-diventa-torre-seta-rinasce-l-edificio-dell-incendio-del-2021-entro-il-2026-la-riapertura-per-80-famiglie-con-pannelli-ignifughi-4fb73497-efea-4cc5-b8f6-08f60edaexlk.shtml](https://milano.corriere.it/notizie/cronaca/24_ottobre_19/torre-dei-moro-diventa-torre-seta-rinasce-l-edificio-dell-incendio-del-2021-entro-il-2026-la-riapertura-per-80-famiglie-con-pannelli-ignifughi-4fb73497-efea-4cc5-b8f6-08f60edaexlk.shtml)

Fantilli, A. P. (2024). *Corso di Consolidamento strutturale (Marano, G. C.) – Modulo di resistenza al fuoco* (Dispense). Politecnico di Torino.

*Fire properties – Facts about rigid vinyl window frames.* (2015). Vinyl Window and Door Institute. <https://www.showcasewindows.com/wp-content/uploads/2015/03/Fire-Properties.pdf>

Foteinopoulos, P., Papacharalampopoulos, A., & Stavropoulos, P. (2017). *On thermal modeling of Additive Manufacturing processes.* *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, 66–83. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.09.007>

Garofalo, R. (2021, 5 ottobre). *La geometria propaga l'incendio.* CFBT – Progressi Rapidi del Fuoco. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://vfv-flashover-garofalo.blogspot.com/2021/10/la-geometria-propaga-lincendio.html>

Giacalone, C. (2014, 22 gennaio). *Sicurezza antincendio nelle facciate* (Dispense del 2°seminario di aggiornamento di prevenzione incendi). In C. Giacalone, S. Leotta & P. Valera (A cura di), *Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili.* Ordine degli Architetti P. P. e C. della Provincia di Monza e della Brianza. [https://www.ordinearchitetti.mb.it/files/Presentazione\\_-\\_Ing\\_Claudio\\_Giacalone.pdf](https://www.ordinearchitetti.mb.it/files/Presentazione_-_Ing_Claudio_Giacalone.pdf)

Giacalone, C. (2024, 7 marzo). *Sicurezza antincendio delle facciate* (Atti del seminario del 7 marzo 2024). ANCE Como. <https://ancecomo.it/download/490/atti-seminario-7-3-2024/16060/sicurezza-antincendio-delle-facciate-claudio-giacalone-parte-i.pdf>

- Giraldo, M. P., Lacasta, A., Avellaneda, J., & Burgos, C. (2013). Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated façade systems. *MATEC Web of Conferences*, 9, 03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130903002>
- Grozny-City. (2024, 11 novembre). In Wikipedia. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://en.wikipedia.org/wiki/Grozny-City>
- Grundy, T. (2023, 3 marzo). In *Pictures: Blaze engulfs high-rise construction site in Tsim Sha Tsui, nearby residents evacuated*. Hong Kong Free Press HKFP. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://hongkongfp.com/2023/03/03/blaze-engulfs-43-storey-construction-site-in-tsim-sha-tsui-as-nearby-residents-evacuated-and-roads-closed/>
- Guglielmini, F. (2023, 29 agosto). *La Torre dei Moro, bruciata due anni fa: via ai lavori di bonifica. Residenti preoccupati: «Nel 2024 si riattivano i mutui per le nostre case distrutte»*. Corriere Della Sera. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://milano.corriere.it/notizie/cronaca/23\\_agosto\\_29/la-torre-dei-moro-bruciata-due-anni-fa-via-ai-lavori-di-bonifica-residenti-preoccupati-nel-2024-si-riattivano-i-mutui-per-le-nostre-case-distrutte-f6da53d5-6cc0-4051-bb10-06500045bxlk.shtml](https://milano.corriere.it/notizie/cronaca/23_agosto_29/la-torre-dei-moro-bruciata-due-anni-fa-via-ai-lavori-di-bonifica-residenti-preoccupati-nel-2024-si-riattivano-i-mutui-per-le-nostre-case-distrutte-f6da53d5-6cc0-4051-bb10-06500045bxlk.shtml)
- Gulli, M., & Gemme, A. (2024, 20 febbraio). *Incendio a Milano, fiamme in una torre di 16 piani: alta colonna di fumo nero*. Milano Today. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.milanotoday.it/cronaca/incendio/palazzo-bruzzano-2024-.html>
- Hammer. (2006, 27 agosto). *Le Torri Gemelle di Caracas*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://undicisettembre.blogspot.com/2006/08/le-torri-gemelle-di-caracas.html>
- Heron, D., Cousins, J., Lukovic, B., Thomas, G., & Schmid, R. (2003, dicembre). *Modelling fire-spread in and around urban centres*. Institute of Geological & Nuclear Sciences, prepared for New Zealand Fire Service Commission. Fire Research Report Number 44. ISBN Number: 1-877349-07-0. <https://www.fireandemergency.nz/assets/Documents/Research-and-reports/Report-44-Modelling-Fire-Spread-in-and-around-Urban-Centres.pdf>
- Honfi, D., Sjöström, J., Bedon, C., & Kozłowski, M. (2022). *Experimental and numerical analysis of Thermo-Mechanical behaviour of glass panes exposed to radiant heating*. *Fire*, 5(4), 124. <https://doi.org/10.3390/fire5040124>
- Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall, J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Torero, J.L., Watts, J.M., & Wieczorek, C. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer Nature Link. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- In fiamme grattacielo a Shanghai 53 vittime e decine di feriti*. (2010, 15 novembre). Corriere della Sera. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024,

[https://www.corriere.it/esteri/10\\_novembre\\_15/incendio-shanghai\\_fbd8e5d0-f0d4-11df-9e3d-00144f02aabc.shtml](https://www.corriere.it/esteri/10_novembre_15/incendio-shanghai_fbd8e5d0-f0d4-11df-9e3d-00144f02aabc.shtml)

*In fiamme il grattacielo Windsor di Madrid.* (2016, 2 febbraio). La Gazzetta Del Mezzogiorno.

Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.lagazzettadelmezzogiorno.it/news/mondo/29168/in-fiamme-il-grattacielo-windsor-di-madrid.html>

*Inferno di cristallo in Cina, in fiamme un grattacielo.* (2022, 16 settembre). Agenzia

Nazionale Stampa Associata (ANSA). Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.ansa.it/sito/notizie/cronaca/2022/09/16/inferno-di-cristallo-in-cina-in-fiamme-un-grattacielo\\_94b350e7-47c8-4841-bd1f-785cf435f10f.html](https://www.ansa.it/sito/notizie/cronaca/2022/09/16/inferno-di-cristallo-in-cina-in-fiamme-un-grattacielo_94b350e7-47c8-4841-bd1f-785cf435f10f.html)

Jensen, J. E., Stewart, R. G., Tuttle, W. A., Brechna, H., & Prodell, A. G. (1980). *Brookhaven national laboratory selected cryogenic data notebook: sections I-IX* (Vol. 1).

Brookhaven National Laboratory. <https://books.google.it/books?id=61DLBfUPKX0C&ots=CNc9CGGdqf&dq=Brookhaven%20National%20Laboratory%20Selected%20Cryogenic%20Data%20Notebook%20section%20X&lr&hl=it&pg=PP1#v=onepage&q=Brookhaven%20National%20Laboratory%20Selected%20Cryogenic%20Data%20Notebook%20section%20X&f=false>

Jensen, J. E., Stewart, R. G., Tuttle, W. A., Brechna, H., & Prodell, A. G. (1980). *Brookhaven national laboratory selected cryogenic data notebook: sections X-XVIII* (Vol. 2).

Brookhaven National Laboratory. <https://books.google.it/books?id=l4j3F5zNCe0C&hl=it&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

Kelsey, T. (1988, 5 maggio). *Fire in 62-story First Interstate Bank building in Los Angeles, Calif., 1988.* UCLA Library Digital Collections. Ultimo accesso: 27 gennaio 2025,

<https://digital.library.ucla.edu/catalog/ark:/21198/zz0002q9g5>

Kim, A. K. (1988). *Fire exposure of glazing – NRC Publications Archive.* National Research Council of Canada, NRC Institute for Research in Construction.

<https://doi.org/10.4224/40001416>

Kozłowski, M., & Bedon, C. (2021). *Sensitivity to input parameters of failure detection methods for Out-of-Plane loaded glass panels in fire.* *Fire*, 4(1), 5.

<https://doi.org/10.3390/fire4010005>

*L'incendio di un grattacielo a Dubai.* (2016, 1 gennaio). Il Post. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.ilpost.it/2016/01/01/incendio-dubai/>

Lau, K., & Chow, W. (2014). *A study on the fire safety issues for large window openings in supertall residential buildings in Hong Kong.* Purdue e-Pubs.

<http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/104>

- Legge 26 luglio 1965, n. 966, "Disciplina delle tariffe, delle modalità di pagamento e dei compensi al personale del Corpo nazionale dei vigili del fuoco per i servizi a pagamento." (1965, 16 agosto) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (204).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1965/08/16/065U0966/sg>
- Legge 3 agosto 2013, n. 90, "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63." (2013, 3 agosto) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (181).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/08/03/13G00133/sg>
- Legge 30 marzo 1976, n. 373, "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici." (1976, 7 giugno) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (148).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1976/06/07/076U0373/sg>
- Legge 7 dicembre 1984, n. 818, "Nullaosta provvisorio per le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi, modifica degli articoli 2 e 3 della legge 4 marzo 1982, n. 66, e norme integrative dell'ordinamento del Corpo nazionale dei vigili del fuoco." (1984, 10 dicembre) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (338).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1984/12/10/084U0818/sg>
- Legge 9 gennaio 1991, n. 10, "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia." (1991, 16 gennaio) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (13).  
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1991/01/16/091G0015/sg>
- Lettera Circolare n. 5043, Guida tecnica su "Requisiti antincendio delle facciate di edifici civili" - Aggiornamento. (2013, 15 aprile) (Italia). *Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile*.  
[https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/rules-docs/2013-04-15\\_Circ\\_5043\\_Guida\\_facciate.pdf](https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/rules-docs/2013-04-15_Circ_5043_Guida_facciate.pdf)
- Lettera Circolare n. 5643, Guida tecnica su "Requisiti antincendio delle facciate di edifici civili." (2010, 31 marzo) (Italia). *Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile*.  
[https://www.tuttoprevenzioneincendi.it/images/Norme/LC\\_31\\_03\\_2010\\_n\\_DCP\\_S\\_A5\\_5643.pdf](https://www.tuttoprevenzioneincendi.it/images/Norme/LC_31_03_2010_n_DCP_S_A5_5643.pdf)
- Leung, H. (2023, 3 marzo). *Flames from Tsim Sha Tsui construction site fire spread to nearby buildings, as authorities investigate cause of blaze*. Hong Kong Free Press HKFP. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://hongkongfp.com/2023/03/03/flames-from-tsim-sha-tsui-construction-site-fire-spread-to-nearby-buildings-as-authorities-investigate-cause-of-blaze/>
- Madrid, spente fiamme nel grattacielo Windsor*. (2005, 2 febbraio). *Corriere della Sera*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.corriere.it/Primo\\_Piano/Esteri/2005/02\\_Febbraio/13/madrid.shtml](https://www.corriere.it/Primo_Piano/Esteri/2005/02_Febbraio/13/madrid.shtml)

- Mairs, J. (2015, 23 febbraio). *Fire devastates Dubai's 336-metre Torch skyscraper*. Dezeen. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.dezeen.com/2015/02/23/torch-tower-skyscraper-dubai-fire/>
- Mairs, J. (2017, 4 agosto). *Blaze tears through Dubai's Torch Tower skyscraper for second time*. Dezeen. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.dezeen.com/2017/08/04/fire-torch-tower-dubai-skyscraper-cladding/>
- Manieri, E. (2007). *Effetti dell'incendio sulle strutture in cemento armato: il caso della Torre Windsor di Madrid*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://11-settembre.blogspot.com/2007/08/effetti-dellincendio-nella-torre.html#google\\_vignette](https://11-settembre.blogspot.com/2007/08/effetti-dellincendio-nella-torre.html#google_vignette)
- Marotta, N. (2015). *Incendio della Torre Olympus - Cecenia (2013)* [Slide]. Università di Pisa. <http://docenti.ing.unipi.it/m.carcassi/materiale didattico/Corso%202015-16%20Prev.%20Inc./Marotta%20incendio%20torre%20Olympus%20.%2011.12.2015.pdf>
- Mazziotti, L. (2016, 24 maggio). Le facciate degli edifici come veicolo di propagazione dell'incendio. Progettare nel rispetto della circolare del Ministero dell'Interno DCPREV 5043 del 15 aprile 2013. In L. Mazziotti (A cura di), *L'impiego del poliuretano espanso nelle costruzioni. Opportunità e sicurezza antincendio*. ISA - Istituto Superiore Antincendi. Ultimo accesso: 10 dicembre 2024, <https://www.poliuretano.it/Convegno ISA/Impiego del poliuretano espanso nelle costruzioni.pdf>
- Mazziotti, L. (2017, ottobre). *Involucri edilizi: la progettazione antincendio e il rischio-caduta di parti di facciata*. Antincendio, pag. 60-74.
- Mazziotti, L. (2018, agosto). Incendi nelle facciate di edifici multipiano: il calcolo della distanza tra le aperture di piano. Antincendio, pag. 52-67.
- Micunco, M. (2022, giugno). *Comportamento al fuoco delle facciate ventilate: analisi CFD e problematiche inerenti alla Linea Guida Italiana* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano]. POLITesi - Archivio digitale delle tesi di laurea e di dottorato. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/187934>
- Minoia, M. (2022, ottobre). *Il progetto dei piani di evacuazione in emergenza per le attività scolastiche con l'utilizzo di simulazioni di esodo* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]. Webthesis. <https://webthesis.biblio.polito.it/24160/>
- Minutoli, F. (2017, febbraio). *Riflessioni sulla sicurezza antincendio dell'involucro edilizio*. Antincendio, pag. 44-51.

- Moss, A.G. (1990, ottobre). *Facade fire spread in multi-storey buildings*. Building Research Association of New Zealand, BRANZ Study Report, No. 32 Judgeford. [https://d39d3mj7qio96p.cloudfront.net/media/documents/SR32\\_Facade\\_fire\\_spread\\_in\\_multi-storey\\_buildings.pdf](https://d39d3mj7qio96p.cloudfront.net/media/documents/SR32_Facade_fire_spread_in_multi-storey_buildings.pdf)
- Mowrer, F. W. (1998, giugno). *Window breakage induced by exterior fires*. Technical Report. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB98148208.xhtml>
- NFPA 101: Life Safety Code. (2024). *NFPA - National Fire Protection Association*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-101-standard-development/101>
- Nuovo rogo alla Torch Tower di Dubai, nessun ferito*. (2017, 4 agosto). La Repubblica. [https://www.repubblica.it/esteri/2017/08/04/news/nuovo\\_rogo\\_alla\\_torch\\_tower\\_di\\_dubai-172310812/](https://www.repubblica.it/esteri/2017/08/04/news/nuovo_rogo_alla_torch_tower_di_dubai-172310812/)
- O'Connor, D. (2008). *Building façade or fire safety façade?*. CTBUH Journal, (2), 30-39. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/405-building-facade-or-fire-safety-facade.pdf>
- Olivetto, L. (2022). *Propagazione del fuoco sulle facciate di edifici di grande altezza*. [Tesi di Laurea Magistrale]. Politecnico di Torino. <https://webthesis.biblio.polito.it/24161/>
- Ottolenghi, M. (2023, 27 ottobre). *Guida alla facciata ventilata, quando l'aria rende gli edifici confortevoli ed efficienti*. Infobuild. Ultimo accesso: 10 gennaio 2025, [https://www.infobuild.it/approfondimenti/facciate-ventilate-soluzione-molti-vantaggi/#Cosa\\_e\\_una\\_facciata\\_ventilata](https://www.infobuild.it/approfondimenti/facciate-ventilate-soluzione-molti-vantaggi/#Cosa_e_una_facciata_ventilata)
- Paduos, S., Pastacaldi, C., Rollino, L., & Tulipano, L. (2018, 24 maggio). *La progettazione degli edifici a grande altezza*. Ingenio. Ultimo accesso: 29 novembre 2024, <https://www.ingenio-web.it/articoli/la-progettazione-degli-edifici-a-grande-altezza/>
- Pagni, P., & Joshi, A. (1991). *Glass breaking in fires*. Fire Safety Science, 3, 791–802. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-791>
- Peacock, F. M. (2022a, settembre). *Report on the fire which occurred at China Telecom Tower, Changsha, China on 16 september 2022*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7013131523960786944/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7013131523960786944%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=9tZC9cvLSsCnu%2Fej7PGPkQ%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7013131523960786944/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7013131523960786944%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=9tZC9cvLSsCnu%2Fej7PGPkQ%3D%3D)

- Peacock, F. M. (2022b, dicembre). *Report on the fire which occurred at 8 Boulevard Walk on 7 November 2022 in Dubai, United Arab Emirates (UAE)*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7013131523960786944/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7013131523960786944%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=9tZC9cvLSsCnu%2Fej7PGPkQ%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7013131523960786944/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7013131523960786944%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=9tZC9cvLSsCnu%2Fej7PGPkQ%3D%3D)
- Peacock, F. M. (2023a, luglio). *Report on the fire which occurred at a high-rise building in Rome, Italy on 2 June 2023*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7085312631829327872/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7085312631829327872%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=FH5fciaRQ8uRfq60LgYiyA%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7085312631829327872/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7085312631829327872%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=FH5fciaRQ8uRfq60LgYiyA%3D%3D)
- Peacock, F. M. (2023b, ottobre). *Report on the fire which occurred at a high-rise building in Tianjin, China, on 22 August 2023*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7118192877679034369/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7118192877679034369%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=%2Bc%2FaExpfSoC8I3QSQmy9XA%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7118192877679034369/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7118192877679034369%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=%2Bc%2FaExpfSoC8I3QSQmy9XA%3D%3D)
- Peacock, F. M. (2024, marzo). *Report on the fire which occurred at a high-rise building in Valencia, Spain, on 22 February 2024*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7173734587510992897/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7173734587510992897%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=7BucUj51SDqgvvC95mgMTA%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7173734587510992897/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7173734587510992897%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=7BucUj51SDqgvvC95mgMTA%3D%3D)
- Peacock, F. M. (2024, marzo). *Report on the fire which occurred at a high-rise building in Valencia, Spain, on 22 February 2024*. LinkedIn. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7173734587510992897/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs\\_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7173734587510992897%2CFEED\\_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=7BucUj51SDqgvvC95mgMTA%3D%3D](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7173734587510992897/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7173734587510992897%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29&originTrackingId=7BucUj51SDqgvvC95mgMTA%3D%3D)
- Pechino in fiamme, distrutta la sede della CCTV progettata da Rem Koolhaas*. (2009, 10 febbraio). Exibart. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.exibart.com/speednews/pechino-in-fiamme-distrutta-la-sede-della-cctv-progettata-da-rem-koolhaas/>
- Peng, L., & Ni, Z. (2016). *Experimental study of window-ejected flame and plume on glass curtain walls*. MATEC Web of Conferences, 46, 05009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164605009>

- Pereira, M. (2023, 19 ottobre). *Why do glass windows break during fires?* ScienceABC. <https://www.scienceabc.com/eyeopeners/why-do-glass-windows-break-during-fires.html>
- Perero, S. (2024). *Corso di Degradazione dei materiali e metodi di prevenzione (Maizza, G.) – Degradazione dei materiali non metallici (Dispense)*. Politecnico di Torino.
- Pershakov, V., Bieliatynskiy, A., Popovych, I., Lysnytska, K., & Krashenninikov, V. (2016, 11 agosto). Progressive Collapse of High-Rise Buildings from Fire. *MATEC Web of Conferences*, 73, 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301001>
- Prandina, M. (2024, 20 febbraio). *Incendio in un grattacielo Aler a Milano, fiamme a alta colonna di fumo*. Il Giorno. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.ilgiorno.it/milano/cronaca/incendio-in-un-grattacielo-aler-a-milano-fiamme-a-alta-colonna-di-fumo-hybyapp7>
- Putilov, A. (2011, 5 dicembre). *Ventilated wall scheme*. In Wikipedia. Ultimo accesso: 10 gennaio 2025, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ventilated\\_wall\\_scheme.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ventilated_wall_scheme.jpg)
- Regio Decreto 6 maggio 1940, n. 635, "Approvazione del regolamento per l'esecuzione del testo unico 18 giugno 1931-IX, n. 773, delle leggi di pubblica sicurezza." (1940, 26 giugno) (Italia). *Gazzetta Ufficiale*, (149). [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1940-06-26&atto.codiceRedazionale=040U0635&elenco30giorni=false](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1940-06-26&atto.codiceRedazionale=040U0635&elenco30giorni=false)
- Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio. (2011, 9 marzo). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, (L88), 5–43. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=celex:32011R0305>
- Rogo Mandarin Oriental Hotel: un morto*. (2009, 9 febbraio). *Corriere della Sera*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.corriere.it/esteri/09\\_febbraio\\_09/pechino\\_fiamme\\_mandarin\\_936\\_1325e-f6bd-11dd-9c7e-00144f02aabc.shtml](https://www.corriere.it/esteri/09_febbraio_09/pechino_fiamme_mandarin_936_1325e-f6bd-11dd-9c7e-00144f02aabc.shtml)
- Rukavina, M. J., Carević, M., & Pečur, I. B. (2017). *Sicurezza antincendio delle facciate negli edifici: Manuale per progettisti, architetti, ingegneri ed esperti di fuoco*. Università di Zagabria, Facoltà di Ingegneria Civile. <https://www.rockwool.com/siteassets/rw-it/brochuremanuali/protezione-dal-fuoco/sicurezza-antincendio-delle-facciate-negli-edifici.pdf>
- Sabatino, R., Lombardi, M., Sciarretta, N., Caciolai, M., Cancelliere, P., Ponticelli, L., Cascioli, V., & Cosi, F. (2019, 21 maggio). *La resistenza al fuoco degli elementi strutturali*,

- Focus sulla misura S.2 del Codice di prevenzione incendi. Inail – Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici. Ultimo accesso: 07 marzo 2025, <https://www.inail.it/portale/it/inail-comunica/pubblicazioni/catalogo-generale/catalogo-generale-dettaglio.2019.04.la-resistenza-al-fuoco-degli-elementi-strutturali.html>
- Saint-Gobain Italia. (2022) . *Manuale del vetro – Catalogo delle soluzioni*. Ultimo accesso: 04 marzo 2025, <https://www.saint-gobain.it/documents/sistemi-integrati-ledilizia/saint-gobain-glass-12-2022-web.pdf>
- Scuderi, D. R. (2017, 14 giugno). Da San Francisco 1906 a Londra 2017, l'incubo dell'inferno di cristallo. *La Repubblica*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.repubblica.it/esteri/2017/06/14/news/dalla\\_san\\_francisco\\_tower\\_del\\_1906\\_alla\\_grenfell\\_di\\_londra\\_l\\_incubo\\_dell\\_inferno\\_di\\_cristallo\\_nella\\_storia\\_a-168062699/](https://www.repubblica.it/esteri/2017/06/14/news/dalla_san_francisco_tower_del_1906_alla_grenfell_di_londra_l_incubo_dell_inferno_di_cristallo_nella_storia_a-168062699/)
- Selwyn, J. (2017). Immagine da articolo online: Mendick, R. (2024, 29 marzo). *Grenfell Tower victims receive less compensation than firefighters who tackled blaze*. *The Telegraph*. Ultimo accesso: 27 gennaio 2025, <https://www.telegraph.co.uk/news/2024/03/29/grenfell-tower-fire-compensation-insulting-to-relatives/>
- Setti, P. (2013, 26 giugno). *Incendio e vetro strutturale nelle facciate continue - Prospettive*. Politecnico di Milano [Presentazione]. Sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili, Roma (Italia).
- Shanghai fire*. (2024, 12 settembre). In Wikipedia. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://en.wikipedia.org/wiki/2010\\_Shanghai\\_fire#cite\\_note-Eastday\\_comp-14](https://en.wikipedia.org/wiki/2010_Shanghai_fire#cite_note-Eastday_comp-14)
- Shanghai, arrestate 4 persone per l'incendio nel grattacielo*. (2010, 16 novembre). SkyTG24. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://tg24.sky.it/mondo/2010/11/16/shanghai\\_incendio\\_grattacielo](https://tg24.sky.it/mondo/2010/11/16/shanghai_incendio_grattacielo)
- Shanghai, grattacielo in fiamme – Arrestati quattro operai*. (2010, 16 novembre). Avvenire. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.avvenire.it/mondo/pagine/shangai-incendio-morti\\_201011151816580400000](https://www.avvenire.it/mondo/pagine/shangai-incendio-morti_201011151816580400000)
- Skelly, M. J. (1990). *An experimental investigation of glass breakage in compartment fires*. Master Thesis in Mechanical Engineering. Virginia Tech. <http://hdl.handle.net/10919/42192>
- Testo coordinato dell'allegato I del D.M. 3 agosto 2015, "Codice di prevenzione incendi". (2023, 1 gennaio) (Italia). *Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile*.

[https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/2023-05/COORD\\_DM\\_03\\_08\\_2015\\_Codice\\_Prevenzione\\_Incendi.pdf](https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/2023-05/COORD_DM_03_08_2015_Codice_Prevenzione_Incendi.pdf)

Testo coordinato sulla Reazione al fuoco. (2022, ottobre) (Italia). *Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile.*

[https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/coordinated-text/COORD\\_DM\\_10\\_03\\_2005-DM\\_15\\_03\\_2005\\_REAZIONE\\_FUOCO.pdf](https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/coordinated-text/COORD_DM_10_03_2005-DM_15_03_2005_REAZIONE_FUOCO.pdf)

*The Marina Torch.* (2024, October 14). In Wikipedia. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Marina\\_Torch](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Marina_Torch)

*Torre Windsor.* (2020, 11 marzo). In Wikipedia. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://it.wikipedia.org/wiki/Torre\\_Windsor](https://it.wikipedia.org/wiki/Torre_Windsor)

Treccarichi, C. (2023, 14 ottobre). *La rabbia dopo l'incendio mortale: tutti i dubbi sui lavori del Superbonus.* Today. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, [https://www.today.it/cronaca/incendio-colli-aniene-cause-palazzo-lavori-superbonus-materiali.html#\\_ga=2.214970321.752096335.1716135658-1755351888.1716135658](https://www.today.it/cronaca/incendio-colli-aniene-cause-palazzo-lavori-superbonus-materiali.html#_ga=2.214970321.752096335.1716135658-1755351888.1716135658)

*Triangolo del fuoco.* (2024, 9 dicembre). In Wikipedia. [https://it.wikipedia.org/wiki/Triangolo\\_del\\_fuoco](https://it.wikipedia.org/wiki/Triangolo_del_fuoco)

UNI 10349:1994, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici". (1994, 30 aprile). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://store.uni.com/uni-10349-1994>

UNI 10349-1:2016, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata". (2016, 31 marzo). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://store.uni.com/uni-10349-1-2016>

UNI 10349-3:2016, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici". (2016, 31 marzo). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://store.uni.com/uni-10349-3-2016>

UNI 11018-1:2023, "Facciate ventilate - Parte 1: Caratteristiche prestazionali e terminologia". (2023, 14 dicembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://store.uni.com/uni-11018-1-2023>

UNI 11018-2:2024, "Facciate ventilate - Parte 2: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di rivestimenti lapidei e ceramici". (2024, 5 settembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://conto.uni.com/uni-11018-2-2024>

UNI EN 13119:2007, "Facciate continue – Terminologia". (2008, 26 novembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione.* <https://store.uni.com/uni-en-13119-2007>

- UNI EN 13501- 2:2023, “Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 2: Classificazione in base ai risultati delle prove di resistenza al fuoco e/o controllo dei fumi, esclusi i sistemi di ventilazione”. (2023, 22 giugno). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-13501-2-2023>
- UNI EN 13501-1:2009, “Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco”. (2012, 24 luglio). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-13501-1-2009>
- UNI EN 13830:2022, “Facciate continue - Norma di prodotto”. (2022, 19 luglio). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-13830-2022>
- UNI EN 1991-1-2:2024, “Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni sulle strutture esposte al fuoco”. (2024, 19 settembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-1991-1-2-2024>
- UNI EN 1993-1-1:2022, “Eurocodice 3: Progettazione delle Strutture di acciaio - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”. (2022, 15 dicembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-1993-1-1-2022>
- UNI EN 1993-1-2:2005, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules Structural fire design”. (2005). *CEN – Comitato Europeo di Normazione*. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.2.2005.pdf>
- UNI EN 1993-1-2:2024, “Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Progettazione strutturale contro l'incendio”. (2024, 19 settembre). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-1993-1-2-2024>
- UNI EN 1999-1-1:2007+A1, “Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-1: General structural rules”. (2009). *CEN – Comitato Europeo di Normazione*. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/11/en.1999.1.1.2007.pdf>
- UNI EN 1999-1-1:2023, “Eurocodice 9 - Progettazione di strutture in alluminio - Parte 1-1: Regole generali”. (2023, 21 aprile). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-1999-1-1-2023>
- UNI EN 1999-1-2:2023, “Eurocodice 9 - Progettazione di strutture in alluminio - Parte 1-2: Progettazione strutturale contro l'incendio”. (2023, 21 aprile). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-en-1999-1-2-2023>
- UNI ISO/TR 13387-1:2008, “Ingegneria della sicurezza antincendio - Parte 1: Applicazioni dei concetti prestazionali antincendio nella definizione degli obiettivi di progetto”. (2008, 22 maggio). *UNI – Ente Italiano di Normazione*. <https://store.uni.com/uni-iso-tr-13387-1-2008>

- UNI/TR 10349-2:2016, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto". (2016, 31 marzo). UNI – Ente Italiano di Normazione. <https://store.uni.com/uni-tr-10349-2-2016>
- UNI/TS 11300-1:2014, "Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale". (2014, 02 ottobre). UNI – Ente Italiano di Normazione. <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014>
- UNI/TS 11300-2:2019, "Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali". (2019, 07 febbraio). UNI – Ente Italiano di Normazione. <https://store.uni.com/uni-ts-11300-2-2019>
- Vancetti, R. (2022). *Corso di Prevenzione per la sicurezza antincendio* (Dispense). Politecnico di Torino.
- Vancetti, R. (2023). *Corso di Fire Safety Engineering* (Dispense). Politecnico di Torino.
- Wang, Q., Zhang, Y., Sun, J., Wen, J., & Dembele, S. (2011). *Temperature and thermal stress simulation of window glass exposed to fire*. *Procedia Engineering*, 11, 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.682>
- Webb, S., & Lockett, J. (2017, 10 agosto). *'I WOKE TO SCREAMS' Dubai's Torch Tower residents managed to flee 1,100 ft building inferno in just TEN minutes thanks to smoke-free fire exits unlike victims of the Grenfell tragedy*. *The Sun*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.thesun.co.uk/news/4166631/dubai-tower-fire-the-marina-torch-latest-updates/>
- Wilkinson, G. (2021, June 7). *The Regs: How to make buildings fire-safe with cavity barriers*. *The Architects' Journal*. Ultimo accesso: 8 febbraio 2025, <https://www.architectsjournal.co.uk/news/opinion/the-regs-how-to-make-buildings-fire-safe-with-cavity-barriers>
- Wills, A., Bodily, B., & Niedzinski, M. (2021). *Fire safety of aluminum and its alloys*. Aluminum Association. [https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-11/FireSafetyAluminumAlloys\\_9.8.20.pdf](https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-11/FireSafetyAluminumAlloys_9.8.20.pdf)
- Zhou, B. (2014). *Application and design requirements of fire windows in buildings*. *Procedia Engineering*, 71, 286–290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.041>
- Zhou, J., & Pang, J. (2023, 3 marzo). *Scores evacuated as fire erupts in Hong Kong skyscraper*. *Reuters*. Ultimo accesso: 18 dicembre 2024, <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/scores-evacuated-fire-erupts-hong-kong-skyscraper-2023-03-03/>