

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

PROPAGAZIONE DEL FUOCO SULLE FACCIATE DI
EDIFICI DI GRANDE ALTEZZA



Relatori:

Prof. Roberto Vancetti

Prof. Emanuele Morra

Candidato:

Ludovica Olivetto

Anno Accademico 2021/2022



Abstract

Come spesso accade si prende coscienza dell'esistenza di un problema troppo tardi in seguito ad eventi catastrofici e solo allora si ricercano soluzioni correttive per evitare a quel punto che si ripetano; questo è il caso dell'incendio della *Grenfell Tower* di Londra che ha avuto luogo nella notte del 14 giugno 2017 ed in cui persero la vita 71 persone.

L'edificio aveva da poco subito interventi di ristrutturazione che avevano interessato in particolar modo il rivestimento esterno con l'obiettivo di un miglioramento energetico, tema sempre più attuale negli ultimi decenni; l'inchiesta condotta su questo evento catastrofico ha reso lampante il ruolo cruciale che possono avere le facciate nella propagazione di un incendio in relazione ai materiali in esse impiegate ed alle tecniche costruttive attraverso cui vengono realizzate.

In risposta a questo evento il Regno Unito in primo luogo, ma anche diverse Nazioni tra cui l'Italia, hanno introdotto limiti più severi per l'utilizzo dei materiali combustibili nelle costruzioni con un elevato sviluppo verticale ed hanno effettuato una revisione generale delle normative vigenti.

Il tema della sicurezza delle facciate è tutt'oggi molto attuale ed oggetto di dibattiti legati in particolar modo all'incertezza dei risultati ottenuti attraverso i test di reazione al fuoco, che essendo condotti in scala ridotta non corrisponderebbero efficacemente alla propagazione dell'incendio in scala reale; per far fronte a questa problematica, attraverso un caso studio reale, ci si pone l'obiettivo di rendere evidente l'ausilio che può fornire, nella determinazione dell'evoluzione di un incendio, la modellazione FDS (Fire Dynamic Simulation) attraverso la quale è possibile ricreare le condizioni di uno o più scenari ritenuti plausibili e studiare il comportamento di un sistema di facciata durante l'incendio.



Abstract

As often happens, we become aware of a problem too late after a catastrophic event occurs and, only at that point, we seek corrective solutions to prevent them from happening again; this is the case of the fire of the Grenfell Tower in London which took place on the night of June 14th, 2017 and in which 71 people lost their lives.

The building had recently undergone renovations that had particularly affected the external cladding with the aim of energy improvement, an increasingly topical issue during the last decades; the investigation lead on this catastrophic event made clear the crucial role that facades can play in the spread of a fire in relation to their constituent materials and to the construction techniques used for their realization.

In response to this event, the United Kingdom in the first place, but also several Countries including Italy, have introduced stricter limits for the use of combustible materials in high rise buildings and have carried out a general revision of the current regulations.

The issue of facade safety is still very topical today and the subject of several debates, linked in particular to the uncertainty of the results obtained through fire reaction tests, which are conducted on a small scale and would not effectively correspond to the spread of fire in real scale; to deal with this problem, the aim is to make it clear, through a real case study, the help that FDS (Fire Dynamic Simulation) modeling can provide in foreseeing the evolution of a fire, through which it's possible to recreate the conditions of one or more scenarios considered plausible and to study the behavior of a facade system during a fire.

INDICE

1.	Introduzione	1
2.	La Grenfell Tower	3
2.1.	Descrizione dell'edificio	4
2.2.	La ristrutturazione.....	6
2.3.	L'inchiesta.....	14
2.4.	L'incendio	16
2.5.	La normativa britannica di riferimento	18
3.	Reazione al fuoco	28
4.	La normativa italiana di riferimento	33
4.1.	D.P.R. 151 01/08/2011	33
4.2.	D.M. 16 Maggio 1987	34
4.3.	Lettera circolare 15/04/2013 n° 5043.....	36
4.3.1.	Requisiti di resistenza al fuoco e compartimentazione	38
4.3.2.	Reazione al fuoco	40
4.4.	D.M. 25 Gennaio 2019	45
4.5.	D.M. 3 Agosto 2015.....	47
4.5.1.	Capitolo S.1	49
4.5.2.	Capitolo V.13	50
4.5.3.	Capitolo V.14	54
5.	Caso studio	55
5.1.	Restituzione tridimensionale	57
5.1.1.	La facciata.....	59
5.2.	Strategia antincendio	62
5.3.	Modellazione dell'incendio	64
5.3.1.	Codice di Prevenzione Incendi – Sezione M.....	64
5.3.2.	Dominio di calcolo.....	66
5.3.3.	Chimica e fisica dell'incendio	69
5.3.4.	Materiali e Heat Release Rate	75
5.3.5.	Condizioni al contorno	83

5.3.6. Risultati.....	84
6. Conclusioni e sviluppi futuri	90
7. Bibliografia e sitografia	92

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1: Ripresa satellitare del contesto.....	3
Figura 2- 2: Rivestimento esterno prima della ristrutturazione.....	4
Figura 2- 3: Piano tipo residenziale – appartamenti con doppia camera (azzurro), appartamenti con camera singola (viola), blocco centrale comprendente vano scala e due ascensori (arancione).....	5
Figura 2- 4: Serramenti e finiture.....	6
Figura 2-5: Dettaglio sezione orizzontale.....	7
Figura 2-6: Rivestimento esterno della facciata dopo la ristrutturazione.....	8
Figura 2-7: Dettaglio rivestimento facciata esterna.....	8
Figura 2-8: Schema del rivestimento della facciata.....	9
Figura 2-9: Confronto carico d'incendio di alcuni comuni materiali isolanti [MJ/m ²].....	10
Figura 2-10: Riposizionamento finestre.....	13
Figura 2-11: Dettaglio riposizionamento finestre.....	13
Figura 2-12: FTA Grenfell Tower fire.....	15
Figura 2-13: ore 0:54 inizio dell'incendio nell'appartamento 16.....	16
Figura 2-14: ore 1:29, l'incendio raggiunge la sommità dell'edificio.....	16
Figura 2- 15: Propagazione dell'incendio.....	17
Figura 2-16: Normativa di riferimento in Inghilterra.....	18
Figura 2-17: Determinazione dell'altezza nelle torri residenziali.....	18
Figura 2-18: Diagram 13.5 - The Building Regulations - Approved Document B - Volume 2.....	26
Figura 3-1: Tre tipici scenari di propagazione del fuoco sulle facciate.....	29
Figura 3-2: Classificazione europea dei materiali.....	30
Figura 3-3: Reazione al fuoco dei materiali - Corrispondenza Classi italiane ed Euroclassi.....	31
Figura 3-4: Reazione al fuoco dei materiali - Corrispondenza tra Classificazione britannica ed Euroclassi.....	32
Figura 4-1: Tabella A - Decreto Ministeriale 30 novembre 1987.....	35
Figura 4-2: Fascia di separazione orizzontale - Soluzione 1.....	42
Figura 4-3: Fascia di separazione orizzontale - Soluzione 2.....	42
Figura 4-4: Fascia di separazione verticale – Soluzioni possibili.....	43
Figura 4-5: Schema delle distanze da considerare nel caso di facciate formanti un diedro.....	43
Figura 4-6: Schematizzazione della metodologia generale.....	48
Figura 4-7: tabella S.1-6 "Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento".....	49
Figura 4-8: tabella S.1-7: "Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento".....	49
Figura 4-9: Fascia di separazione orizzontale, sezione verticale.....	52
Figura 4-10: Fascia di separazione verticale, sezione orizzontale.....	52
Figura 4-11: Fascia di separazione nel caso di superfici formanti un diedro, sezione orizzontale.....	52
Figura 4-12: Schema riepilogativo delle prescrizioni sulla reazione al fuoco delle chiusure d'ambito.....	53
Figura 4-13: Diversa definizione di altezza antincendi.....	54

Figura 5-1: Vista satellitare del sito e distinzione blocchi costitutivi: blocco Sud-Est (rosso), blocco Nord-Ovest (verde).....	55
Figura 5-2: Ripresa fotografica dello stabilimento – Vista Sud-Est.....	56
Figura 5-3: Ripresa fotografica dello stabilimento – Vista Nord-Ovest.....	56
Figura 5-4: Importazione delle planimetrie 2D.....	57
Figura 5-5: Prospetto Ovest- quote livelli pavimento finito [cm].....	58
Figura 5-6: Modello 3D.....	59
Figura 5-7: Sezione della facciata tipo.....	61
Figura 5-8: Fasi dell'incendio.....	65
Figura 5-9: Definizione dominio di calcolo inferiore.....	67
Figura 5-10: Definizione dominio di calcolo superiore.....	68
Figura 5-11: Distribuzione dell'energia cinetica delle particelle a diverse temperature.	69
Figura 5-12: Triangolo del fuoco.....	70
Figura 5-13: Parametri di input nella reazione - "Edit Reaction".....	71
Figura 5-14: Planimetria piano secondo, con indicazione della facciata analizzata (verde) e posizione della workstation (rosso).....	73
Figura 5-15: Sezione del fabbricato - posizione della workstation.....	73
Figura 5-16: Rappresentazione all'istante t=0 s.....	74
Figura 5-17: Prospetto della facciata analizzata con riferimento alla geometria delle aperture [cm].....	75
Figura 5-18: HRR per una postazione di lavoro - test NIST del 1988 e 1992.....	76
Figura 5-19: Curva HRR rielaborata relativa ad una postazione di lavoro.....	77
Figura 5-20: Curva HRRPUA rielaborata relativa al PIR.....	77
Figura 5-21: Proprietà materiali.....	78
Figura 5-22: Distinzione Surfaces nel modello FDS.....	79
Figura 5-23: Parametri che governano la reazione del pannello di innesco.....	81
Figura 5-24: Parametri che governano la reazione della facciata.....	81
Figura 5-25: Parametri che governano la reazione dei pannelli in alluminio.....	82
Figura 5-26: Parametri che governano la reazione dei vetri delle finestre.....	82
Figura 5-27: Parametri ambientali.....	83
Figura 5-28: Temperature registrate all'istante t=520 s.....	89
Figura 5-29: Curva HRR ricavata dall'analisi su Pyrosim.....	89

1. Introduzione

Il presente elaborato è stato realizzato in collaborazione con Gruppo Ingegneria Torino, che ha messo a disposizione il materiale di base ed ha fornito il supporto scientifico per lo svolgimento del progetto.

L'obiettivo finale di questo studio è quello di andare ad analizzare il comportamento nonché il ruolo cruciale che possono avere i rivestimenti delle facciate in caso di incendio. L'obiettivo verrà perseguito svolgendo inizialmente un'analisi della normativa vigente sul territorio italiano e dei documenti equivalenti vigenti in Europa, in particolare nel Regno Unito, utilizzando come punto di partenza l'incendio verificatosi alla Grenfell Tower di Londra nel 2017; successivamente verrà svolta un'analisi sperimentale riproducendo, attraverso la modellazione ad elementi finiti, uno scenario di incendio verosimile attraverso l'utilizzo del programma Pyrosim.

La materia della prevenzione incendi infatti negli ultimi anni, con l'introduzione del "Codice di Prevenzione Incendi" (D.M. 03/08/2015) e lo sviluppo di software FDS, ha subito alcuni cambiamenti dal punto di vista delle strategie di approccio. Un primo metodo consiste in un approccio di tipo per lo più prescrittivo, che permette di perseguire la sicurezza in materia antincendio grazie all'applicazione di norme specifiche differenti a seconda della destinazione d'uso dell'oggetto di studio, nonostante la semplicità di applicazione di questo metodo risultano lampanti i limiti imposti dalla sua rigidità di applicazione. Esiste un secondo metodo basato su un approccio di tipo prestazionale basato sulla Fire engineering che utilizza modelli di calcolo al fine di prevedere il più verosimilmente possibile la dinamica evolutiva dell'incendio; potendo in quest'ultimo caso controllare i dati di input, risulta evidente l'estrema flessibilità di applicazione rispetto all'approccio prescrittivo, anche se insorge il problema della validazione sperimentale dei suddetti modelli. Un incrocio dei due metodi, ovvero l'utilizzo di norme prescrittive laddove i software risultano carenti e viceversa l'utilizzo di quest'ultimi per sopperire alla rigidità della normativa tecnica, si ritiene possa portare a buoni risultati senza commettere errori di grande entità.

Fino a circa 30 anni fa la propagazione dell'incendio sulle facciate era un problema che veniva affrontato in maniera soltanto marginale in quanto esse venivano realizzate principalmente in materiali minerali come mattoni o calcestruzzo che possiedono caratteristiche di reazione al

fuoco poco significative; negli ultimi 10-15 anni invece, con il sempre crescente interesse sul tema della salvaguardia ambientale e grazie alla varietà di prodotti disponibili sul mercato, sono cambiate le direttive relative alla prestazione e rendimento energetici nell'edilizia e le tecnologie costruttive; al fine di limitare il fabbisogno energetico degli edifici, in particolare per quanto riguarda il riscaldamento e l'utilizzo di materie prime ad esso connesso, la dispersione di energia attraverso il rivestimento esterno degli edifici deve essere ridotta notevolmente attraverso l'installazione di materiali isolanti che però possiedono generalmente caratteristiche di reazione al fuoco non ideali. Inoltre sempre negli ultimi decenni si stanno diffondendo sempre più materiali per il rivestimento delle facciate con uno scopo principalmente estetico, anche in questo caso con caratteristiche di reazione al fuoco peggiorative. L'aumento dell'impiego di materiali infiammabili nelle facciate comporta la necessità di valutare il comportamento che possono avere durante un incendio; la prevenzione incendi riveste quindi un ruolo cruciale nella fase progettuale in quanto permette di individuare i requisiti prestazionali che devono soddisfare i materiali e le strutture al fine di garantire la sicurezza degli occupanti. Nei capitoli successivi verrà affrontato nello specifico l'argomento dei rivestimenti di facciata e dell'interazione tra esse ed il fenomeno fisico dell'incendio.

2. La Grenfell Tower

La Grenfell Tower si tratta di un edificio residenziale di 24 piani, situato in West London nel quartiere di North Kensington.

Venne progettato nel 1967 e successivamente realizzato tra il 1972 ed il 1974 in pieno stile brutalista. Il tratto distintivo di questo stile architettonico è quello di esaltare maggiormente la funzionalità dell'edificio piuttosto che l'estetica dello stesso, prediligendo per questo l'utilizzo di materiali industriali e grezzi, specialmente il cemento a vista; nonostante nell'epoca del secondo dopoguerra questo stile fosse simbolo di rinascita, nel periodo successivo è stato fortemente criticato fino a diventare simbolo di ciò che nella città non funzionava. In seguito ad una progressiva valorizzazione del quartiere, situato tra l'altro nelle vicinanze del rinomato quartiere di Notting Hill, al fine di riqualificare ulteriormente la zona vennero realizzati interventi di ristrutturazione sulla Grenfell Tower tra il 2012 e 2016 e da quanto emerso dall'inchiesta condotta sull'incendio verificatosi nella notte del 14 giugno 2017 furono proprio quest'ultimi a giocare un ruolo cruciale nella propagazione delle fiamme.

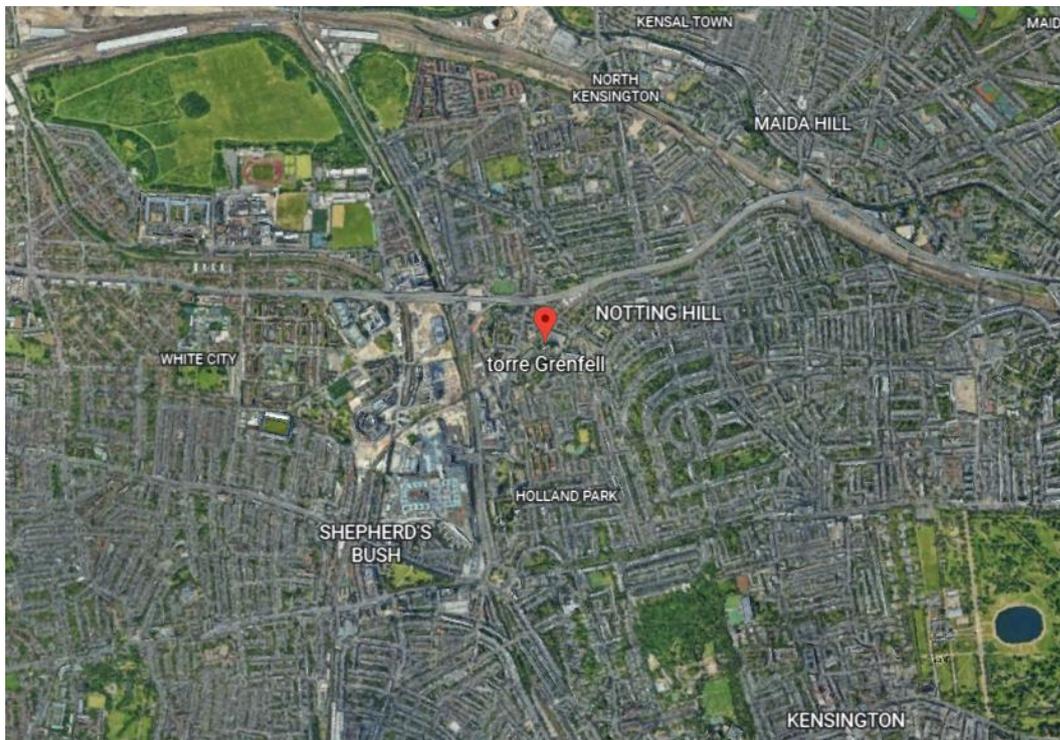


Figura 2-1: Ripresa satellitare del contesto

2.1. Descrizione dell'edificio

L'edificio, di altezza pari a 67,3 metri ed un'impronta in pianta di circa 22 metri per lato, ha un nucleo centrale in cemento armato, pavimenti in cemento armato e perimetro rinforzato da colonne di cemento. Queste ultime presentano un rivestimento in pannelli cementizi prefabbricati connessi alle colonne stesse attraverso una serie di cavi metallici affondati nel cemento delle colonne. Inizialmente la facciata dell'edificio era realizzata attraverso orditure orizzontali di pannelli strutturali spandrel di cemento posti tra le colonne, finestre scorrevoli con telaio in alluminio e una serie di finestre su cui erano installati pannelli di colore bianco in materiale cementizio. Nell'immagine seguente si può vedere il design della facciata fino al 2012:



Figura 2- 2: Rivestimento esterno prima della ristrutturazione

Per quanto riguarda l'organizzazione degli spazi all'interno dell'edificio, i piani primo e terzo erano destinati ad ospitare spazi comuni ed uffici, il secondo doveva essere una continuazione della passerella pedonale di collegamento con gli edifici adiacenti, ma non sono rilevanti ai fini dell'incendio. I piani dal quarto al ventitreesimo presentavano sostanzialmente il medesimo layout architettonico ed erano progettati per ospitare ciascuno sei appartamenti residenziali, per un totale quindi di 120, disposti intorno ad un corpo centrale in cui erano allocati due

ascensori ed un unico vano scala centrale di tipo aperto, non protetto né tantomeno filtrato.
Si riporta di seguito il piano tipo residenziale.

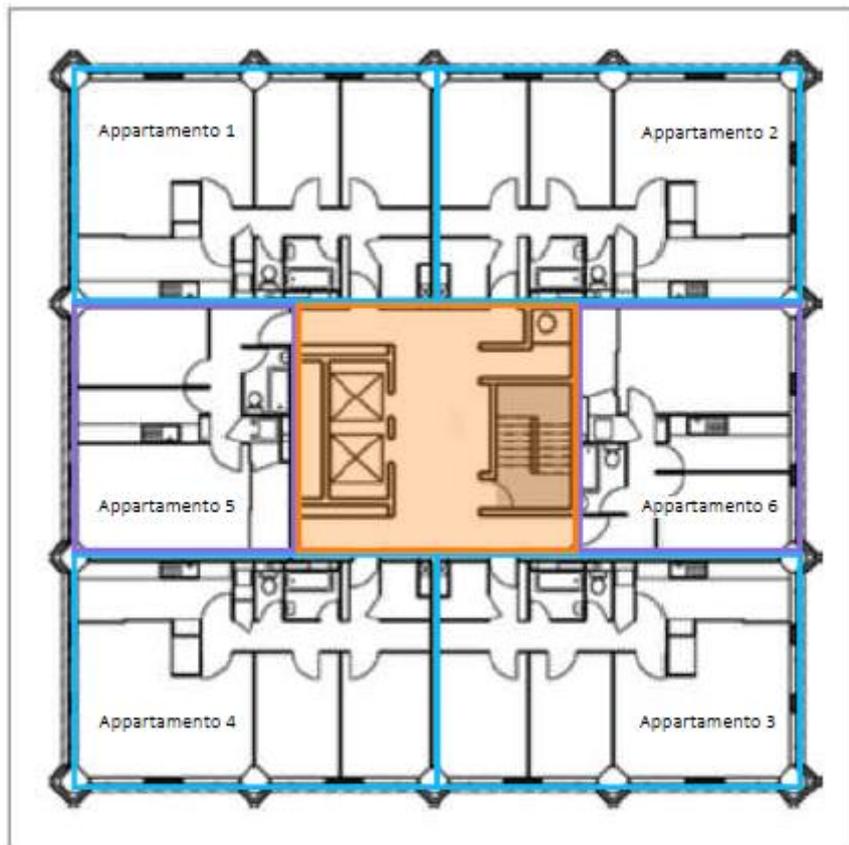


Figura 2- 3: Piano tipo residenziale – appartamenti con doppia camera (azzurro), appartamenti con camera singola (viola), blocco centrale comprendente vano scala e due ascensori (arancione)

Bisogna sottolineare, ai fini dell'analisi dell'incendio, che nell'edificio non erano stati installati né l'impianto di rivelazione ed allarme incendio, né un impianto di spegnimento automatico o rete di idranti. Inoltre negli appartamenti non erano presenti estintori portatili e pare che comunque quelli presenti nell'edificio non fossero in regola con i controlli periodici previsti.

Un ulteriore aspetto da analizzare sono i serramenti esterni dell'edificio: le finestre originali avevano un telaio in alluminio e a vetro singolo, i davanzali e gli stipiti erano invece rivestiti in legno. Inoltre sopra alle finestre vi erano i cosiddetti pannelli "Purlboard" che comprendevano uno strato di cartongesso e uno strato di schiuma di poliuretano incollato alla parte posteriore. La striscia "Purlboard" sopra le finestre si estendeva l'intero perimetro della parete esterna in ogni appartamento.

Nella foto riportata qui di seguito si possono osservare le finiture interne originali e finestre:

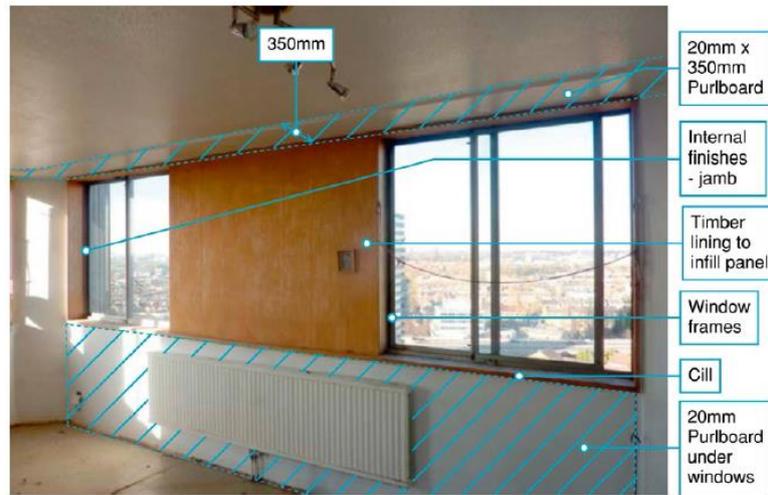


Figura 2- 4: Serramenti e finiture

2.2. La ristrutturazione

Il quartiere in cui sorgeva la Grenfell Tower durante il 2015-2016 conobbe una progressiva valorizzazione, pertanto l'allora proprietario dell'immobile, la KCTMO (Kensington and Chelsea Tenant Management Organization) decise di effettuare dei lavori anche sull'edificio al fine di implementare le prestazioni energetiche dello stesso nonché attribuire alle facciate un effetto estetico più gradevole e moderno.

Avendo valutato che le porte dei singoli appartamenti sarebbero state in grado di garantire la tenuta ai fumi e al calore per 30 minuti in caso di incendio, i lavori di ristrutturazione che interessavano i piani ad uso residenziale, quindi dal 4° al 23°, non prevedevano interventi strutturali pertanto il vano scala non venne racchiuso in un compartimento antincendio, questa decisione risulta coerente con la strategia "Stay-put" che era stata prescelta come metodologia operativa da mettere in atto in caso di incendio e che prevedeva appunto che in caso di incendio gli occupanti rimanessero all'interno dei propri appartamenti fatta eccezione nel caso in cui fossero direttamente interessati da fuoco o fumo; gli interventi previsti interessavano principalmente il rivestimento in facciata e gli infissi in tutti i piani dell'edificio e dai piani interrati al terzo vi fu anche una completa ristrutturazione interna che portò alla

riorganizzazione degli ambienti interni esistenti ed alla realizzazione di nove nuovi appartamenti.

Sulla facciata vennero quindi installati pannelli in materiale isolante allo scopo di migliorare l'isolamento termico e limitare le dispersioni di calore; la particolare configurazione prevedeva in realtà l'utilizzo di due strati di rivestimento: uno applicato in aderenza alla muratura preesistente che doveva migliorare le prestazioni energetiche ed uno installato ad una distanza di 50 mm da esso in modo da creare una camera d'aria ventilata che contrastasse i problemi legati all'umidità e permettesse un facile allontanamento delle acque meteoriche; questo strato più esterno, anche chiamato "rainscreen" era dotato di un rivestimento in lastre di alluminio, fissate all'anima in polietilene, al fine di proteggere lo strato isolante e l'involucro dell'edificio dall'acqua meteorica nonché da eventuali danni meccanici ed attribuire all'edificio una finitura della facciata piacevole alla vista, nella sezione orizzontale qui di seguito riportata si può vedere nel dettaglio la giunzione tra la trave e la colonna in calcestruzzo.

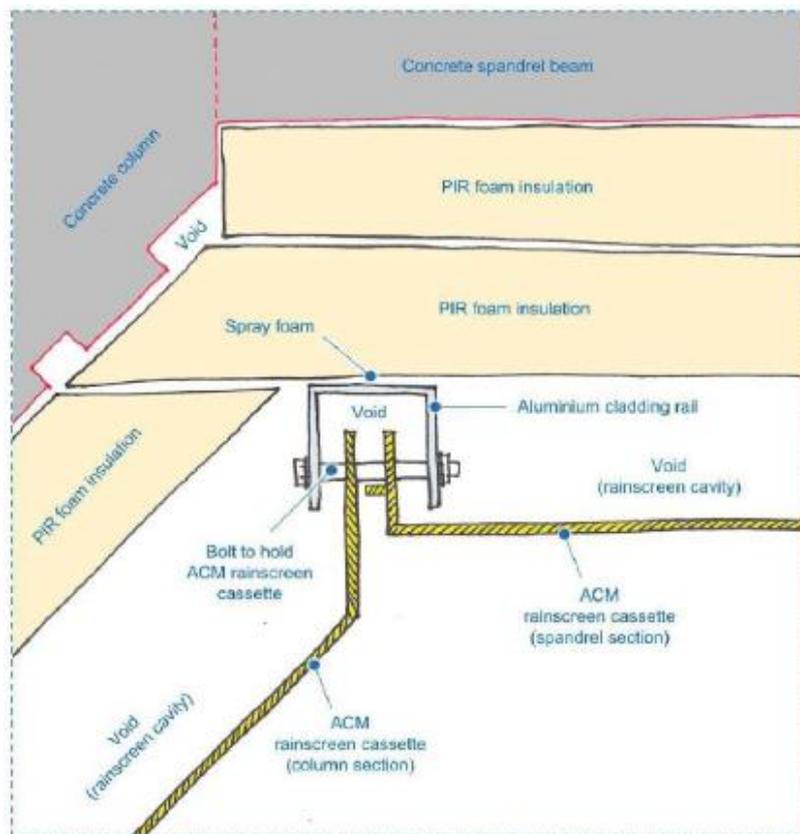


Figura 2-5: Dettaglio sezione orizzontale



Figura 2-6: Rivestimento esterno della facciata dopo la ristrutturazione

Il rivestimento in facciata, a seguito della ristrutturazione risultava quindi essere composto da:

1. Pannelli sandwich in polietilene di tipo “Reynobond 55 PE” rivestito da una doppia lastra in alluminio ciascuna di spessore 3mm;
2. Intercapedine ventilata da 50 mm;
3. Pannello isolante Celotex RS5000, di spessore 150 mm, costituito da poliisocianurato (PIR) rigido espanso;
4. Muratura preesistente, in cemento e quindi incombustibile;

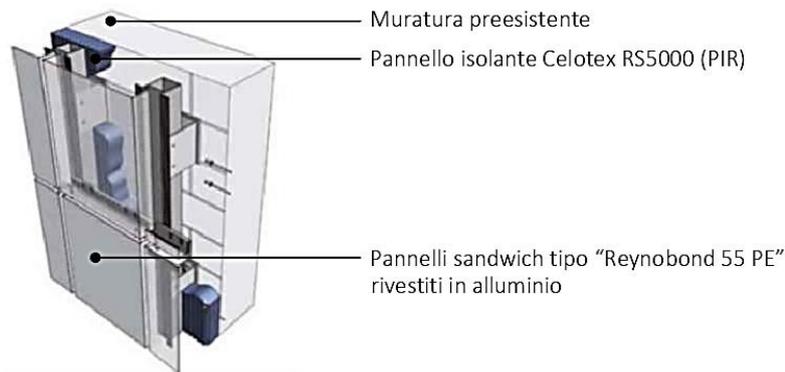


Figura 2-7: Dettaglio rivestimento facciata esterna

Il polietilene è un polimero termoplastico particolarmente combustibile, inizia a sciogliersi già intorno alla temperatura di 130°C, ma ha una temperatura di ignizione di 370°C.

Anche il PIR è un polimero termoplastico sintetico, la sua temperatura di ignizione varia tra i 306 e 377°C e la sua temperatura superficiale aumenta rapidamente quando esposto a fonti di calore, di conseguenza ha tempi di ignizione ridotti e promuove una rapida propagazione

delle fiamme, non solo in esso ma anche sui materiali adiacenti nel caso di facciate ventilate in quanto, isolando la cavità, riduce le dispersioni di energia del sistema.

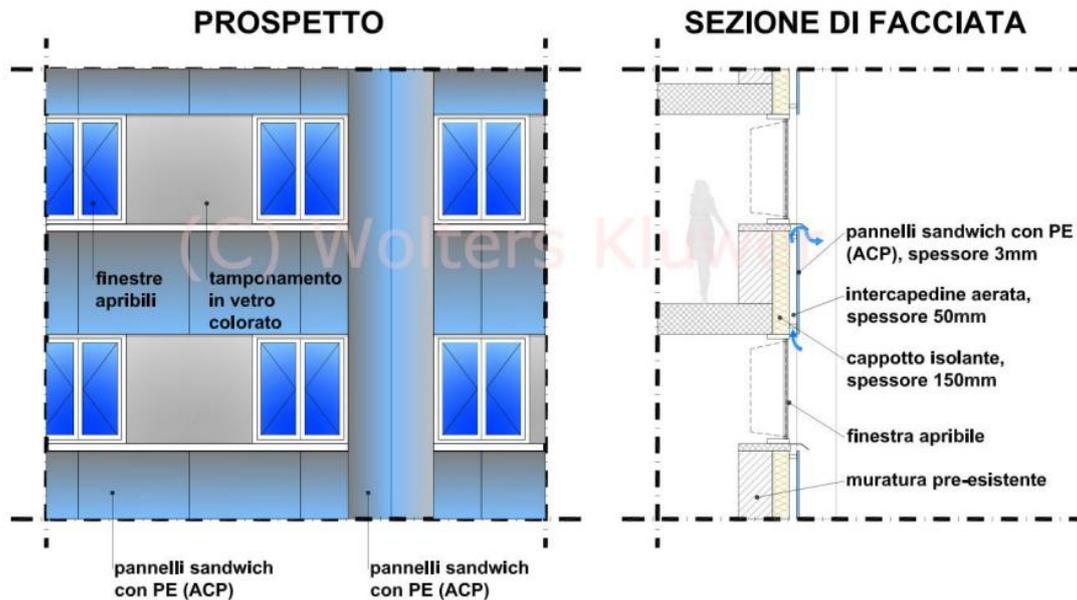


Figura 2-8: Schema del rivestimento della facciata

L'efficienza energetica dell'involucro edilizio è un argomento che ha assunto sempre più importanza recentemente, l'efficienza energetica è infatti oggi in Europa una delle principali priorità alla base dello sviluppo sostenibile in quanto incide sull'indipendenza energetica nonché sulla riduzione delle emissioni di gas serra; i requisiti per l'efficienza energetica influenzano però le proprietà di reazione al fuoco degli edifici: l'impiego di materiali isolanti combustibili è più che raddoppiato negli ultimi anni al fine di soddisfare i requisiti energetici e questo porta necessariamente ad un aumento del carico totale d'incendio, di conseguenza vengono estese la durata dell'incendio e la sua estinzione, il che comporta a sua volta un maggiore rischio di propagazione dell'incendio attraverso le facciate ed ulteriore diffusione all'interno degli edifici stessi e quelli circostanti.

Possiamo quindi dire che con la crescita dell'importanza dell'efficienza energetica dell'involucro edilizio sono cambiate le tecniche di realizzazione delle facciate e fino a pochi anni fa le normative di prevenzione incendi si basavano sul presupposto che tutti, o quasi, i materiali da costruzione fossero di natura minerale e quindi incombustibili, come mattoni e cemento, e perciò scarsa attenzione era dedicata ai materiali isolanti e più in generale alle

facciate degli edifici ad uso civile; solo da pochi anni l'attenzione su tali argomenti ha iniziato ad accendersi, e la tragedia avvenuta alla Grenfell Tower è stato un punto cruciale di questa svolta.

Esiste una grande varietà di materiali che permettono di ottenere una bassa conduttività termica ma quelli che conciliano questa esigenza con un costo contenuto sono i materiali plastici espansi come il poliisocianurato, anche noto come PIR, ed il polistirene espanso (EPS). Molti sono i vantaggi che offrono quest'ultimi oltre alle prestazioni energetiche ed economicità, infatti, risultano anche di facile installazione, ma andando a considerare il fronte della sicurezza antincendio le loro prestazioni risultano pessime ed è quindi necessario valutare la possibilità di un loro utilizzo in un edificio in relazione a diversi fattori, l'altezza antincendio è uno degli aspetti fondamentali di cui tenere conto.

In alternativa in commercio esistono altri materiali isolanti con buone ed ottime prestazioni di reazione al fuoco, anche del tutto incombustibili, come ad esempio la lana di roccia, ma la scelta di questi materiali viene spesso scartata poiché oltre al costo di partenza più elevato richiedono anche spessori maggiori per ottenere le stesse prestazioni di materiali plastici e risultano meno facili da installare.

Il carico d'incendio specifico, ovvero il potenziale termico dei materiali infiammabili, corretto in base alla loro partecipazione e riferito alla singola unità di superficie, varia notevolmente da un materiale all'altro: è 7.3 volte più alto per l'EPS, 4.35 volte maggiore per il PIR e 4.5 volte più alto per il PIR rispetto ad isolanti di origine minerale come la lana di roccia a parità di resistenza termica:

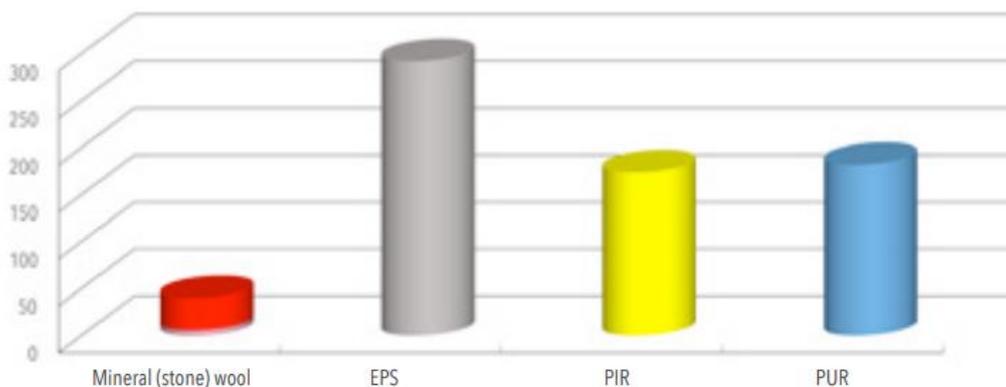


Figura 2-9: Confronto carico d'incendio di alcuni comuni materiali isolanti [MJ/m²]

Nella tabella seguente vengono riportati i materiali isolanti più diffusi e il loro comportamento al fuoco secondo la classificazione europea.

Insulation	Density range kg m ⁻³	Thermal Conductivity range W m ⁻¹ K ⁻¹	Reaction to Fire Euroclass range
Glass wool (GW)	10 - 100	0.030 - 0.045	A1 – A2
Stone wool (SW)	22 - 180	0.033 - 0.045	A1 – A2
Extruded polystyrene (XPS)	20 - 80	0.025 - 0.035	E – F
Expanded polystyrene (EPS)	10 - 50	0.029 - 0.041	E – F
Phenolic (PhF)	30 - 40	0.029 - 0.041	B – C
Polyurethane (PUR)	30 - 80	0.029 - 0.041	D – E
Polyisocyanurate (PIR)	30 - 80	0.023 - 0.041	C – D

Risulta evidente come il polistirene (EPS o XPS) sia in generale il prodotto peggiore tra quelli riportati per quanto riguarda la propagazione del fuoco.

Altro aspetto da non trascurare, oltre alla velocità di propagazione dell'incendio, è la produzione di gas tossici:

Material	Smouldering Yields mg/g					
	CO ₂	CO	HCN	NO ₂	HCl	HBr
GW	7.594	1.753	0.392	0.885	0.471	ND
SW	5.687	0.573	0.067	0.429	0.635	ND
PhF	35.743	11.063	0.232	0.685	ND	ND
EPS	ND	ND	0.003	ND	1.078	ND
PUR	19.324	1.672	0.056	0.673	2.368	ND
PIR	25.390	2.171	0.083	0.328	2.277	ND
ND – below the limit of detection						

Questi dati mettono in evidenza come il PIR (utilizzato per l'isolamento termico), pur non avendo proprietà pessime dal punto di reazione al fuoco, in quanto ricade in Classe C o D, risulti comunque il peggiore tra quelli testati in termini di produzione di gas tossici, con particolare riferimento alla produzione di HCN, ovvero cianuro di idrogeno.

Da questa prima analisi si può dedurre quindi che una delle criticità che ha portato al noto decorso degli eventi è stata sicuramente la scelta dei pannelli sandwich "Reynobond PE" per la realizzazione del sistema di rivestimento esterno; la stessa ditta produttrice, Rydon, in realtà

produceva anche un'altra tipologia di pannelli molto simile denominato "Reynobond FR(Fire Retardancy)" sempre in polietilene racchiuso tra due lastre di alluminio ma trattato con un sistema ritardante alla propagazione della fiamma e quindi con un comportamento al fuoco molto buono; il costo di tale materiale era però maggiore di circa 2 £/m² rispetto ai pannelli Reynobond PE ed avrebbero portato ad un aumento dei costi di circa 5000£ su totale, per questo sono stati scartati.

La ristrutturazione principale ha anche portato cambiamenti significativi alle finestre degli appartamenti; ad ogni piano vennero installate nuove finestre, queste non furono però posizionate a filo con il cemento come prima, ma furono spostate verso l'esterno in modo da garantire la continuità del sistema di rivestimento. Un risultato di questo riposizionamento delle finestre è stato quello di includere all'interno, dietro i nuovi telai, l'intercapedine; in alcuni punti venne riempita con una schiuma di poliuretano espanso, in altri venne lasciata aperta, in adiacenza alle colonne la cavità venne invece coperta con una membrana sintetica in EPDM (particolarmente combustibile); in ogni caso il problema è che non furono installate barriere non combustibili tra l'interno dell'edificio e la cavità all'interno del sistema di rivestimento. I telai delle nuove finestre, per altro semplicemente incollati e privi di fissaggi meccanici, erano principalmente in uPVC, un polimero particolarmente combustibile, e quindi molto rilevanti ai fini della partecipazione all'incendio, che inizia a perdere la sua rigidità già a 60°C ed ha temperatura di ignizione compresa tra 318 e 374°C.

Nuovi pannelli di tamponamento bianchi furono installati a chiusura degli spazi tra le finestre a filo con la faccia esterna del nuovo sistema di rivestimento. I pannelli di riempimento delle finestre originali furono lasciati sul posto, creando così una cavità tra i pannelli vecchi e quelli nuovi; quest'ultimi consistevano in un'anima isolante di polistirolo (anche noto come polistirene estruso, XPS) di 25 mm tra due fogli di alluminio di spessore 1,5 mm rifiniti con uno strato di rivestimento in polvere di poliestere su entrambe le superfici. Il problema è rappresentato dal fatto che il polistirene estruso è una schiuma rigida a celle chiuse a bassa inerzia termica, pertanto si scioglie rapidamente quando esposto al fuoco ed è quindi probabile che si formino goccioline in fiamme che possono innescare incendi ai piani inferiori (si noti che la sua temperatura di ignizione di 356°C).



Figura 2-10: Riposizionamento finestre

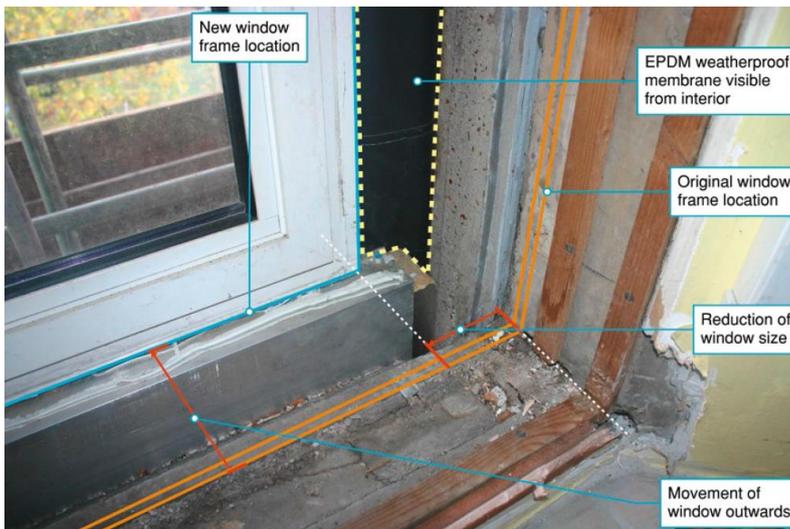


Figura 2-11: Dettaglio riposizionamento finestre

Relativamente al caso analizzato è plausibile considerare curve di rilascio termico (HRR) con valori di picco compresi tra i 60 e 300 kW per i fuochi originatesi; questi comportano però la generazione di fumi a temperature comprese tra i 110 e 220°C circa, non sufficienti ad innescare l'ignizione dei materiali costitutivi di serramenti e rivestimento esterno, le cui temperature di ignizione, come accennato in precedenza e da come riportato nelle indagini sull'evento, variano tra i 306 e 415°C; l'ignizione dei materiali della facciata esterna deve quindi essere il risultato dell'esposizione diretta alle fiamme.

2.3. L'inchiesta

Subito dopo la tragedia ci si è chiesti cosa fosse andato storto quella notte; infatti, nonostante sia stata garantita la tenuta strutturale dell'edificio che non è crollato, molteplici sono stati i fattori che hanno contribuito a generare un disastro di tali dimensioni.

La perdita di vite umane a causa di un incendio in primis è l'emblema del fallimento di tutte le misure di prevenzione e protezione e delle procedure di emergenza, il pubblico ha quindi accusato il Governo Britannico di una scarsa attenzione sul tema della sicurezza degli edifici e della mancanza di un quadro normativo adeguato nel campo dell'edilizia in genere, altre accuse sono state poi mosse contro il Comune di Kensington e Chelsea per la non efficace gestione dei soccorsi alle vittime. Il mattino seguente l'incidente il Primo Ministro ha dichiarato che sarebbe stata aperta un'inchiesta con l'obiettivo di indagare sull'incendio e le sue cause ad individuare responsabilità e provvedimenti da prendere.

L'inchiesta, coordinata da Dame Judith Hackitt a capo della Commissione indipendente per la revisione delle norme e regolamenti antincendio, si è sviluppata in due fasi distinte:

- Fase 1, un'analisi preliminare, in cui si stabilisce come l'incendio sia iniziato, come sia fuggito dall'appartamento di origine e come il fuoco e il fumo siano stati in grado di diffondersi in tutto l'edificio ad una velocità tale da impedire agli occupanti dei piani più alti di fuggire, nonostante la pronta partecipazione dei servizi di emergenza; vengono anche esaminate la risposta di quest'ultimi e le decisioni intraprese nella notte dell'incendio;
- Fase 2, focalizzata sulla determinazione delle cause alla base del disastro, comprese le decisioni adottate in relazione agli aspetti critici della progettazione e della costruzione del sistema di rivestimento.

Per meglio comprendere la compartecipazione di tutte le cause che hanno portato a alla ormai nota evoluzione degli eventi è possibile far riferimento alla FTA – Fault Tree Analysis; questo strumento consiste in un approccio graduale “top down” che, semplificando il sistema reale, permette di valutare le cause del fallimento e la loro correlazione: considerando un evento indesiderato (top event), seguendo un processo deduttivo e gerarchico viene suddiviso nei suoi fattori causali (intermediate events) a loro volta suddivisi nelle loro cause elementari (base events) e collegati mediante porte logiche AND o OR.

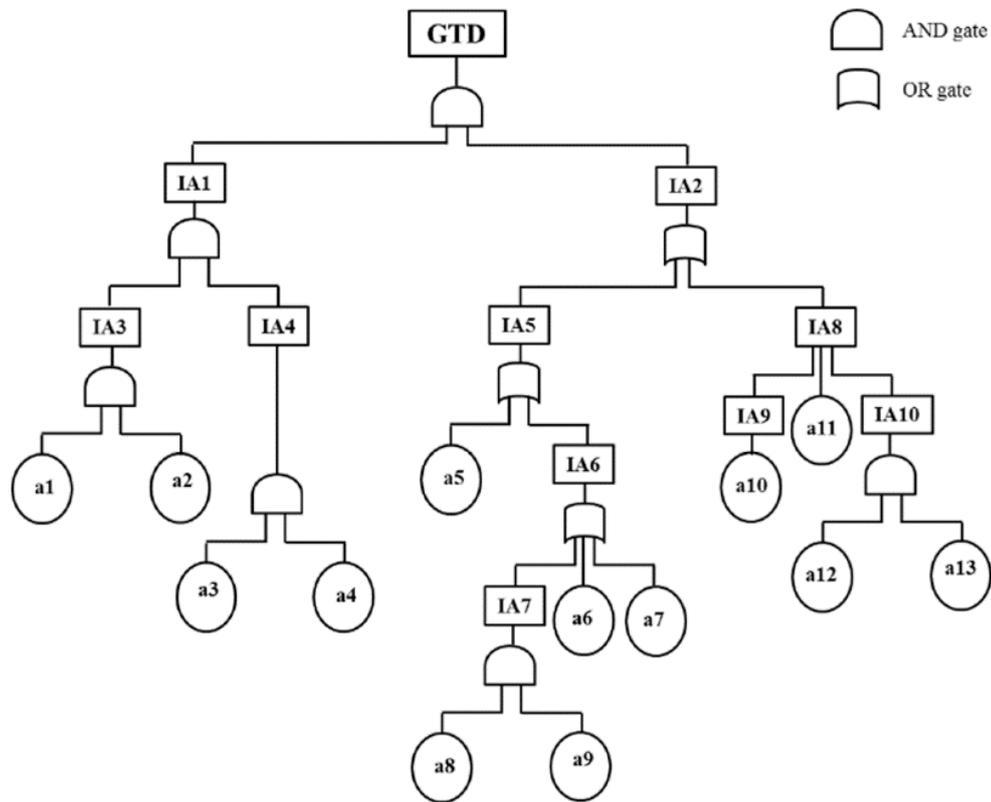


Figura 2-12: FTA Grenfell Tower fire

Top event

- GTD: Grenfell Tower Disaster

Intermediate events

- IA1: Direct causes
- IA2: Contributing factors
- IA3: Poor tower design
- IA4: Installation of inappropriate external insulation flammable material after refurbishment
- IA5: Lack of preparedness for fires in high towers with flammable insulation material
- IA6: Lack of preparedness of fire brigade
- IA7: Inadequate knowledge of rapidly spreading fires
- IA8: Inadequate emergency response
- IA9: No evacuation plan
- IA10: Poor management decision

Basic events

- a1: Only one stairwell to get out
- a2: No sprinkler system
- a3: Lack of quality control
- a4: No adequate material testing
- a5: Lack of adequate legislation
- a6: Lack of adequate training
- a7: Lack of adequate equipment
- a8: Inadequate actions taken
- a9: Delayed actions
- a10: Lack of adequate training
- a11: No fire alarm to alert residents
- a12: Lack of risk assessment after modification
- a13: No emergency planning procedures

Risulta quindi evidente la complessità del disastro, nonostante le numerose testimonianze e prove è pertanto impossibile ricostruire con assoluta certezza gli eventi avvenuti presso la Grenfell Tower nelle prime ore del 14 giugno 2017.

2.4. L'incendio

Le prove e le testimonianze degli abitanti stessi confermano che l'incendio ha avuto origine al quarto piano della torre all'interno dell'appartamento 16 a causa del malfunzionamento del frigorifero; le apparecchiature elettriche sono notoriamente una possibile causa di innesco ed i frigoriferi specialmente in quanto producono calore e sono rivestiti da materiali isolanti facilmente combustibili.

L'incendio è scoppiato poco prima dell'una di notte e la prima chiamata ai Vigili del Fuoco è stata effettuata alle 00:54, l'intervento della prima squadra è stato tempestivo tant'è che è sopraggiunta nel giro di pochi minuti e sono state spente completamente le fiamme all'interno dell'appartamento, ma questo non è bastato; dato il periodo particolarmente caldo infatti molti appartamenti avevano le finestre aperte, compreso quello in cui ha avuto origine l'incendio, e le fiamme si sono propagate all'esterno coinvolgendo i pannelli isolanti in facciata e tramite questi si è propagato verso l'alto e lateralmente raggiungendo nel giro di circa 20 minuti la sommità dell'edificio. Il fatto che l'innesco si sia trovato ad un piano così basso è stato sicuramente un fattore sfavorevole, come si può vedere dalle numerose fotografie scattate infatti i piani inferiori risultano poco danneggiati.

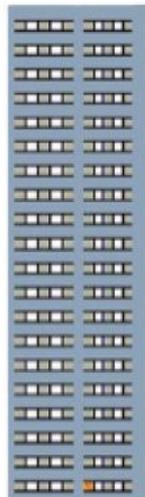


Figura 2-13: ore 0:54 inizio dell'incendio nell'appartamento 16



Figura 2-14: ore 1:29, l'incendio raggiunge la sommità dell'edificio

Il calore ha inizialmente provocato la deformazione delle lastre di alluminio che rivestivano i pannelli impermeabili della facciata e la delaminazione rispetto al nucleo in PE, il quale a sua volta ha agito come fonte di combustibile.

La presenza di pannelli isolanti in poliisocianurato (PIR) dietro ai pannelli del rainscreen e l'intercapedine ventilata, che ha creato il cosiddetto effetto camino, hanno contribuito alla velocità e all'estensione della diffusione della fiamma

verticale data anche l'assenza di fasce tagliafuoco di compartimentazione in facciata o barriere antincendio.

Alle colonne è invece imputata la responsabilità di aver contribuito alla propagazione delle fiamme verso il basso a causa della fusione e gocciolamento del polietilene verso i piani inferiori.

Infine il fatto che i nuovi infissi fossero stati installati a filo della facciata esterna incorporando così l'intercapedine all'interno dell'edificio ed il fatto che gli stipiti delle finestre in uPVC fossero stati fissati solamente tramite incollaggio ha fatto sì che i serramenti fossero particolarmente vulnerabili e comportassero la caduta di materiale incendiato.

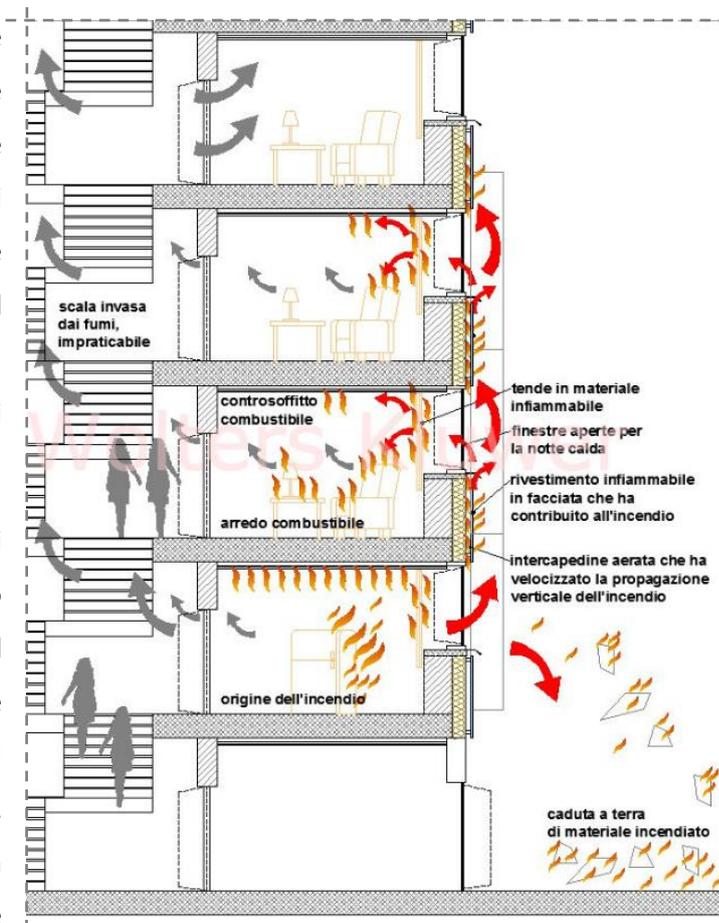


Figura 2- 15: Propagazione dell'incendio

2.5. La normativa britannica di riferimento

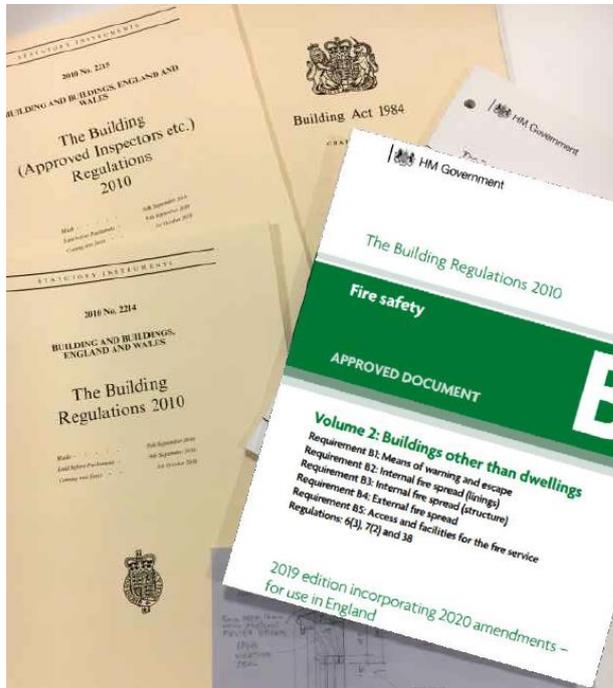


Figura 2-16: Normativa di riferimento in Inghilterra

requisiti tecnici, ognuno corrispondente ad una lettera, nello specifico la parte B è quella relativa alla Fire Safety, per ciascuna parte il governo inglese ha emanato/redatto un relativo "Approved document" che contiene delle soluzioni pratiche che possono essere attuate nei casi più comuni per soddisfare i requisiti richiesti. Il problema della sicurezza antincendio viene affrontato in due modalità diverse distinguendo le abitazioni dagli altri edifici (tra cui le torri residenziali), le prime trattate nel Volume 1 mentre gli altri edifici nel Volume 2.

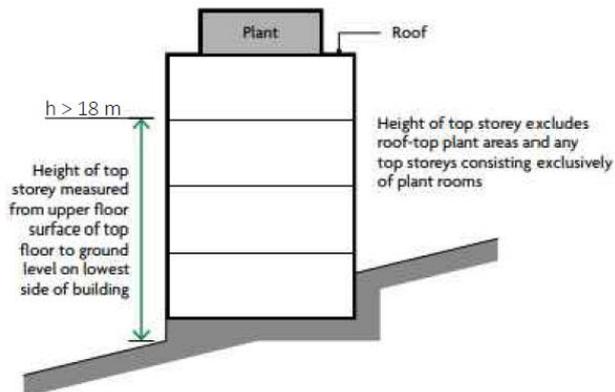


Figura 2-17: Determinazione dell'altezza nelle torri residenziali

In Inghilterra la normativa più generale relativa agli edifici è il cosiddetto *Building Act* del 1984, esso è stato integrato con le *Building Regulations* del 2010 che approfondiscono l'argomento della costruzione degli stessi nonché degli interventi di ristrutturazione e/o modifiche dei locali esistenti. Queste norme definiscono però gli standard che devono essere perseguiti senza dare indicazioni sulle modalità attraverso cui materialmente farlo.

All'interno delle *Building Regulations 2010* vengono definiti 15 classi di

La Grenfell tower ricade tra quelli trattati nel Volume 2 in quanto si tratta di una torre residenziale, definita come un edificio residenziale avente appartamenti ad un livello superiore a 18 metri.

Nel 2018, in seguito all'incendio avvenuto presso la Grenfell Tower, l'allora segretario di Stato ha annunciato una revisione indipendente delle norme di costruzione e di sicurezza antincendio. L'ultima versione dell'*Approved document B* è stata pubblicata nel 2019 ("*HM Government. The Building Regulations 2010. Approved Document B, fire safety, volume 2: Buildings other than dwellings, 2019 edition incorporating 2020 amendments*"); questa non comporta modifiche sostanziali dal punto di vista delle soluzioni pratiche riportate nella versione precedente del 2013 ma il documento risulta completamente ristrutturato al fine di renderlo più facilmente comprensibile.

Il documento in questione definisce cinque requisiti generali da perseguire:

- B1: mezzi di avvertimento e di fuga;

Requirement	
<i>Requirement</i>	<i>Limits on application</i>
Means of warning and escape	
B1. The building shall be designed and constructed so that there are appropriate provisions for the early warning of fire, and appropriate means of escape in case of fire from the building to a place of safety outside the building capable of being safely and effectively used at all material times.	Requirement B1 does not apply to any prison provided under section 33 of the Prison Act 1952 ^(a) (power to provide prisons, etc.). (a) 1952 c. 52; section 33 was amended by section 100 of the Criminal Justice and Public Order Act 1994 (c. 33) and by S.I. 1963/597.

Nel caso di torri residenziali, così come poteva essere classificata la Grenfell Tower deve essere installato un sistema di rivelazione automatica di incendio, sia esso di fumo, calore, a camera di ionizzazione o di radiazione luminosa. Inoltre deve essere presente un sistema di allarme incendio, il quale deve tenere presente l'eventuale presenza di persone con disabilità uditiva, che diffonda tempestivamente il segnale di pericolo agli occupanti.

Deve essere garantito un numero sufficiente di uscite tale da garantire agli occupanti di raggiungere in sicurezza, in caso di incendio, un luogo sicuro. Tali uscite, così come i percorsi di esodo in generale devono essere dimensionati in relazione al numero di occupanti presenti.

Tutte le vie di esodo verticale devono essere di tipo protetto, aspetto che non era previsto nella Grenfell Tower; in particolare le rampe e i pianerottoli costituenti le scale di emergenza devono essere realizzati con materiali di classe almeno A2-s3,d2 se la

scala in questione è l'unica a servizio dell'edificio o se serve piani situati ad un livello superiore di 10 metri dal piano di riferimento (livello strada); inoltre deve essere prevista una via di fuga alternativa oppure un impianto di spegnimento automatico (tipo sprinkler).

- B2: propagazione interna del fuoco (in riferimento ai materiali di rivestimento);

Requirement	
Requirement	Limits on application
Internal fire spread (linings)	
B2. (1) To inhibit the spread of fire within the building, the internal linings shall—	
(a) adequately resist the spread of flame over their surfaces; and	
(b) have, if ignited, either a rate of heat release or a rate of fire growth, which is reasonable in the circumstances.	

Si noti che nella presenta sezione viene trattato il tema dei materiali di rivestimento di pareti e soffitti senza però prendere in considerazione quello dei pavimenti e gli arredi. Le classi minime di reazione al fuoco che devono avere i materiali impiegati nella realizzazione dei rivestimenti interni sono riportate nella tabella sottostante, differenziate a seconda della destinazione d'uso dei locali e/o della loro dimensione:

Table 6.1 Classification of linings

Location	Classification
Small rooms of maximum internal floor area:	D-s3, d2
a. 4m ² in residential accommodation	
b. 30m ² in non-residential accommodation	
Other rooms (including garages)	C-s3, d2
Other circulation spaces	B-s3, d2 ⁽¹⁾

NOTE:

1. Wallcoverings which conform to **BS EN 15102**, achieving at least class C-s3, d2 and bonded to a class A2-s3, d2 substrate, will also be acceptable.

- B3: propagazione interna del fuoco (in riferimento agli elementi strutturali);

Requirement	
Requirement	Limits on application
Internal fire spread (structure)	
<p>B3. (1) The building shall be designed and constructed so that, in the event of fire, its stability will be maintained for a reasonable period</p> <p>(2) A wall common to two or more buildings shall be designed and constructed so that it adequately resists the spread of fire between those buildings. For the purposes of this sub-paragraph a house in a terrace and a semi-detached house are each to be treated as a separate building.</p> <p>(3) Where reasonably necessary to inhibit the spread of fire within the building, measures shall be taken, to an extent appropriate to the size and intended use of the building, comprising either or both of the following—</p> <p>(a) sub-division of the building with fire-resisting construction;</p> <p>(b) installation of suitable automatic fire suppression systems.</p> <p>(4) The building shall be designed and constructed so that the unseen spread of fire and smoke within concealed spaces in its structure and fabric is inhibited.</p>	<p>Requirement B3(3) does not apply to material alterations to any prison provided under section 33 of the Prison Act 1952.</p>

Gli elementi strutturali devono garantire la stabilità dell'edificio per un certo periodo di tempo coerente con il tempo necessario alle persone per lasciare i locali in sicurezza, nella tabella sottostante vengono riportati i requisiti minimi di resistenza al fuoco sia in termini europei sia nazionali:

Table B4 Minimum periods of fire resistance

Purpose group of building	Minimum periods of fire resistance ⁽¹⁾ (minutes) in a:						
	Basement storey* including floor over		Ground or upper storey				
	Depth (m) of the lowest basement		Height (m) of top floor above ground, in a building or separated part of a building				
	More than 10	Up to 10	Up to 5	Up to 11	Up to 18	Up to 30	More than 30
1. Residential:							
a. Block of flats							
– without sprinkler system	90 min	60 min	30 min ⁽²⁾	60 min ⁽³⁾	Not permitted ⁽²⁾	Not permitted ⁽²⁾	Not permitted ⁽²⁾
– with sprinkler system ⁽⁴⁾	90 min	60 min	30 min ⁽²⁾	60 min ⁽³⁾	60 min ⁽³⁾	90 min ⁽³⁾	120 min ⁽³⁾
b. and c. Dwellinghouse	Not applicable ⁽⁴⁾	30 min ⁽²⁾	30 min ⁽²⁾	60 min ⁽³⁾	60 min ⁽³⁾	Not applicable ⁽⁴⁾	Not applicable ⁽⁴⁾

Nel caso di una torre residenziale quale la Grenfell tower, l'assenza di un sistema di spegnimento automatico dovrebbe essere permessa solo ai piani con piano di

calpestio al di sotto della quota di 11 m; per tutti i piani superiori ne è richiesta la presenza in accordo con l'appendice E della presente norma, devono comunque essere previste strutture REI 90 e REI120 rispettivamente per i piani fino a 30 m e oltre 30m. In assenza di impianto sprinkler le conseguenze del fuoco ai piani inferiori devono essere limitate in maniera passiva per i piani fino a 5 m dal livello del piano di riferimento garantendo strutture REI30, mentre per i piani fino ad 11 m REI60.

Section 9: le cavità, intese come qualunque spazio vuoto nascosto, costituiscono un facile percorso di diffusione di fumo e fiamme. Per ridurre il potenziale di propagazione del fuoco si dovrebbero prevedere delle barriere tagliafuoco in corrispondenza:

- o dei bordi delle cavità, comprese le aperture perimetrali (quali ad esempio finestre e porte)
- o della giunzione tra una parete esterna ventilata e ogni pavimento o parete di un compartimento interno

Le barriere tagliafuoco dovrebbero essere utilizzate anche per suddividere le cavità di dimensioni maggiore in modo che la loro dimensione, in qualunque direzione, sia di:

- o 20 metri nel caso di cavità tra tetto e soffitto, a prescindere dalla classe di reazione dei materiali esposti all'interno della cavità;
- o 20 o 10 metri, per tutte le altre cavità, rispettivamente nel caso in cui i materiali esposti all'interno siano di classe migliore e peggiore di C-s3,d2.

Le barriere tagliafuoco devono essere del tipo E30 e I15, ovvero impedire il passaggio o la produzione di fuoco o fumo al lato opposto a quello di sviluppo dell'incendio per 30 minuti e limitare la trasmissione di calore da un lato all'altro per 15 minuti.

Sono esclusi dalla definizione stessa di "elementi strutturali" i rivestimenti di facciata esterni che sopportano esclusivamente il peso proprio ed il carico del vento, ma non trasmettono il carico dei pavimenti, questi vengono trattati nelle sezioni 12 e 13 affrontate nel capitolo B4.

- B4: Propagazione del fuoco all'esterno;

Requirement	
<i>Requirement</i>	<i>Limits on application</i>
External fire spread	
<p>B4. (1) The external walls of the building shall adequately resist the spread of fire over the walls and from one building to another, having regard to the height, use and position of the building.</p> <p>(2) The roof of the building shall adequately resist the spread of fire over the roof and from one building to another, having regard to the use and position of the building.</p>	
Regulation	
Regulation 7 – Materials and workmanship	
<p>(1) Building work shall be carried out—</p> <p>(a) with adequate and proper materials which—</p> <p>(i) are appropriate for the circumstances in which they are used,</p> <p>(ii) are adequately mixed or prepared, and</p> <p>(iii) are applied, used or fixed so as adequately to perform the functions for which they are designed; and</p> <p>(b) in a workmanlike manner.</p> <p>(2) Subject to paragraph (3), building work shall be carried out so that materials which become part of an external wall, or specified attachment, of a relevant building are of European Classification A2-s1, d0 or Class A1, classified in accordance with BS EN 13501-1:2007+A1:2009 entitled "Fire classification of construction products and building elements. Classification using test data from reaction to fire tests" (ISBN 978 0 580 59861 6) published by the British Standards Institution on 30th March 2007 and amended in November 2009.</p>	

L'involucro esterno dell'edificio non dovrebbe contribuire alla propagazione del fuoco da una parte all'altra dell'edificio. Le pareti esterne devono quindi essere progettate in modo da limitare il rischio di innesco sulla superficie ed in modo che la geometria del sistema di rivestimento ed il suo metodo di installazione limitino la propagazione dell'incendio. Tali scelte tecniche e gli obiettivi da perseguire devono essere effettuate tenendo conto dell'altezza dell'edificio e della sua destinazione d'uso.

L'involucro deve essere progettato considerando anche la possibilità che l'incendio possa propagarsi ad un edificio adiacente: la radiazione termica che passa attraverso le aperture ed aree non protette dell'edificio ed incide sull'altro edificio non deve essere sufficiente per innescare un incendio in quest'ultimo. Anche in questo caso le scelte devono essere effettuate tenendo conto dell'uso e della posizione dell'edificio.

Nell'ambito di questa tesi risultano rilevanti in particolar modo le sezioni 12 e 13 che affrontano il tema della propagazione del fuoco attraverso i rivestimenti esterni e da un edificio all'altro.

Section 12: i materiali combustibili e le cavità nelle pareti esterne possono presentare un rischio in particolare negli edifici alti, la guida contenuta nella presenza sezione si pone come obiettivo quello di ridurre il rischio di propagazione verticale dell'incendio nonché di innesco da parte di fiamme sviluppatesi in un edificio adiacente.

I rivestimenti devono soddisfare i requisiti riportati qui di seguito:

Table 12.1 Reaction to fire performance of external surface of walls			
Building type	Building height	Less than 1000mm from the relevant boundary	1000mm or more from the relevant boundary
'Relevant buildings' as defined in regulation 7(4) (see paragraph 12.11)		Class A2-s1, d0 ⁽¹⁾ or better	Class A2-s1, d0 ⁽¹⁾ or better
Assembly and recreation	More than 18m	Class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better	From ground level to 18m: class C-s3, d2 ⁽²⁾ or better From 18m in height and above: class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better
	18m or less	Class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better	Up to 10m above ground level: class C-s3, d2 ⁽²⁾ or better Up to 10m above a roof or any part of the building to which the public have access: class C-s3, d2 ⁽²⁾ or better ⁽⁴⁾ From 10m in height and above: no minimum performance
Any other building	More than 18m	Class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better	From ground level to 18m: class C-s3, d2 ⁽²⁾ or better From 18m in height and above: class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better
	18m or less	Class B-s3, d2 ⁽²⁾ or better	No provisions

Negli edifici aventi piani ad un livello pari o superiore a 18 m vi è un'ulteriore restrizione: qualsiasi prodotto isolante, materiale di riempimento (come i materiali di base di pannelli compositi metallici, pannelli sandwich e pannelli spandrel, escluse eventualmente le guarnizioni, sigillanti e simili) utilizzati nella costruzione di una parete esterna devono essere di Classe A2-s3, d2 o migliore. Se risulta applicabile la "Regulation 7(2)" le disposizioni di quest'ultima prevalgono.

La "Regulation 7(2)" si applica a qualsiasi edificio con un piano di almeno 18 m dal livello del piano di riferimento (livello strada) e che contiene una o più abitazioni, oppure un'attività istituzionale. In questo caso è richiesto che tutti i materiali fanno parte della parete esterna raggiungano le Classi A2-s1, d0 o A1.

Nel caso quindi della Grenfell Tower nonostante dalla “tabella 12.1” si evinca a prima vista che sarebbe sufficiente impiegare in facciata materiali di classe B-s3,d2 in realtà risulta applicabile la Regulation 7(2) che definisce per i materiali delle facciate una classe minima A2-s1, d0 o A1.

In aggiunta a queste prescrizioni le membrane impiegate nella realizzazione delle facciate esterne, a qualunque livello fuoriterra, dovrebbero essere almeno di classe B-s3,d0, aspetto non soddisfatto nel caso della Grenfell Tower in cui in occasione della ristrutturazione vennero impiegate membrane EPDM che ricadono nella classe di reazione al fuoco peggiore, ovvero la F.

Section 13: le prescrizioni contenute all’interno della sezione 13 si pongono come obiettivo quello di definire le distanze di separazione tra gli edifici al fine di limitare il rischio di propagazione di un incendio da un edificio ad un altro attiguo.

Per prima cosa vengono definite i principi secondo cui individuare i cosiddetti “relevant boundary” che possono coincidere con una facciata dell’edificio o essere ad essa paralleli o al più formare con esse un angolo inferiore o uguale a 80°.

Tutti gli elementi della facciata che non soddisfano i requisiti di resistenza al fuoco definiti nella tabella B4 dell’appendice B vengono considerate come aree non protette, così come tutte le parti di facciata realizzate con materiali di classe di reazione al fuoco inferiore a B-s3,d2 e spessore superiore a 1 mm, ma in questo secondo caso l’area non protetta considerata sarà pari alla metà dell’area effettiva.

La normativa prevede:

- o per facciate a distanza fino ad 1 m dal “relevant boundary”: la facciata deve avere classe di resistenza al fuoco almeno B-s3,d2 ed esternamente soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco.
- o per facciate a distanza superiore di 1 m dal “relevant boundary”: le pareti perimetrali devono soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco ma solo dal lato interno dell’edificio.

Per edifici di altezza superiore a 30 m le aree non protette possono essere trascurate.

Inoltre le aree non protette possono essere ignorate nelle seguenti condizioni:

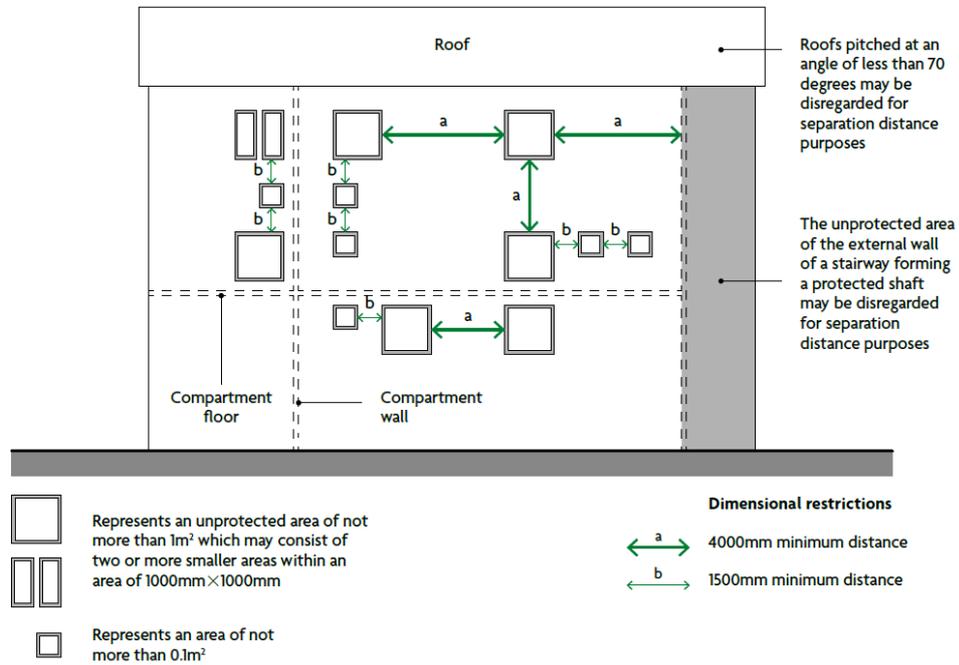


Figura 2-18: Diagram 13.5 - The Building Regulations - Approved Document B - Volume 2

- B5: accessibilità e strumenti per i Vigili del Fuoco.

Requirement	
Requirement	Limits on application
Access and facilities for the fire service	
B5. (1) The building shall be designed and constructed so as to provide reasonable facilities to assist fire fighters in the protection of life.	
(2) Reasonable provision shall be made within the site of the building to enable fire appliances to gain access to the building.	

Al fine di permettere le operazioni di soccorso ed agevolare le operazioni di estinzione deve essere garantito l'accesso lungo una specifica percentuale del perimetro variabile in relazione alla superficie totale dell'edificio, ad esclusione delle aree dei locali nel seminterrato.

Nello specifico le prescrizioni normative prevedono che sia garantito l'accesso da parte dei veicoli dei servizi di soccorso secondo quanto riportato nella tabella seguente:

Table 15.1 Fire and rescue service vehicle access to buildings not fitted with fire mains

Total floor area ⁽¹⁾ of building (m ²)	Height of floor of top storey above ground (m) ⁽²⁾	Provide vehicle access to:	Type of appliance
Up to 2000	Up to 11 Over 11	See paragraph 15.1 15% of perimeter	Pump High reach
2000–8000	Up to 11 Over 11	15% of perimeter 50% of perimeter	Pump High reach
8000–16,000	Up to 11 Over 11	50% of perimeter 50% of perimeter	Pump High reach
16,000–24,000	Up to 11 Over 11	75% of perimeter 75% of perimeter	Pump High reach
Over 24,000	Up to 11 Over 11	100% of perimeter 100% of perimeter	Pump High reach

NOTES:

1. The sum of the area of all storeys in the building (excluding basements).

Ogni livello a cui è garantito l'accostamento di veicoli dovrebbe essere dotato di almeno una porta di larghezza maggiore o uguale a 750 mm; la distanza massima tra le porte, o tra una porta e la fine della elevazione, è di 60m.

3. Reazione al fuoco

Tutti i prodotti da costruzione sono caratterizzati da molteplici parametri che ne definiscono le prestazioni; in particolare il comportamento al fuoco viene specificato facendo riferimento alla reazione al fuoco, la quale esprime il grado di partecipazione di un materiale al fuoco a cui è sottoposto.

Fino a qualche decennio fa la diffusione del fuoco attraverso le facciate giocava solo un ruolo marginale; la propagazione del fuoco sulla superficie esterna delle pareti esterne in seguito all'accensione di componenti della facciata poteva essere esclusa in quanto le pareti esterne erano costituite principalmente da materiali minerali come mattoni in muratura o cemento rivestito i quali si possono considerare con una resa non combustibile; la propagazione di un incendio ad un altro piano poteva quindi verificarsi solo se le fiamme di un incendio completamente sviluppato fuoriuscivano attraverso un'apertura di una stanza e si infrangevano sulla finestra del piano soprastante.

La sempre crescente necessità di una riqualificazione energetica degli edifici al fine di limitare l'utilizzo di materie prime e le emissioni atmosferiche ha portato ad un aumento delle esigenze di isolamento termico degli edifici e questo ha influito notevolmente sulle caratteristiche che deve possedere l'involucro edilizio: ai fini dell'isolamento termico i prodotti maggiormente utilizzati sono di natura plastica (altamente combustibili) e considerando già solamente il carico d'incendio ad essi correlato si raggiungono valori estremamente alti.

La diffusione del fuoco attraverso una facciata può verificarsi seguendo tre scenari principali:

1. incendio di un edificio limitrofo e quindi diffusione del fuoco dall'esterno per effetto radiativo;
2. incendio all'esterno di un edificio, o altra sorgente, adiacente al rivestimento esterno del muro e che quindi comporta una diffusione per effetto diretto;
3. incendio all'interno dell'edificio in una stanza avente un'apertura sul muro esterno.

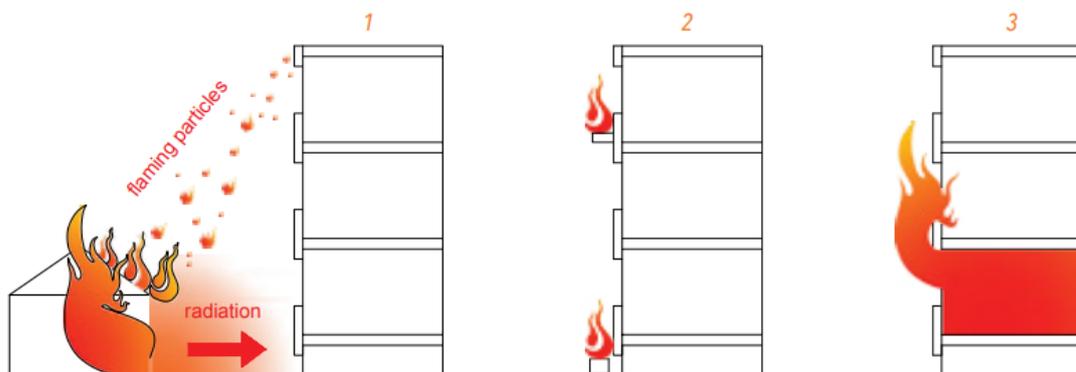


Figura 3-1: Tre tipici scenari di propagazione del fuoco sulle facciate

L'ultimo caso risulta essere il più critico ed è quello che verrà analizzato nello specifico nel proseguo della tesi; in ogni caso comunque, una volta che le fiamme raggiungono lo strato più esterno della facciata, l'ulteriore propagazione del fuoco è influenzata dalle caratteristiche dell'involucro stesso e dipende dai seguenti fattori:

1. reazione al fuoco dei materiali con cui è realizzato la facciata, che influenzano la velocità di propagazione dell'incendio sull'involucro edilizio;
2. esistenza di cavità all'interno della facciata (siano esse intercapedini ventilate o cavità che si formano conseguentemente all'incendio a causa della delaminazione di parti della facciata), questo fattore controlla in particolare l'altezza che possono raggiungere le fiamme durante l'incendio;
3. presenza di aperture sulla facciata (siano esse porte o finestre) che permettono in ritorno delle fiamme all'interno dell'edificio, fattore che unito al punto 2) porta alla propagazione dell'incendio da un piano all'altro.

Non esiste però un modo univoco per determinare ed esprimere il comportamento al fuoco di una facciata; due sono gli approcci principali: uno che considera autonomamente i singoli materiali costituenti il pacchetto di involucro ed attribuisce a ciascuno di essi una classe che esprime sinteticamente il suo comportamento al fuoco, l'altro che invece valuta il comportamento al fuoco del sistema di facciata nel suo complesso attraverso la realizzazione di test pratici in scala.

Il metodo più diffuso tra i Paesi europei è il primo. I parametri che determinano la classe di reazione al fuoco sono valutati mediante prove di laboratorio eseguite in conformità a norme che ne devono garantire la ripetibilità e riproducibilità; la norma di classificazione definisce inoltre i criteri per l'attribuzione della classe sulla base dei risultati delle prove. La norma di riferimento a livello europeo è la UNI EN 13501-1 che appunto descrive il procedimento di classificazione di reazione al fuoco di tutti i prodotti da costruzione. Essa differenzia il grado di partecipazione alla combustione dei materiali in 7 Euroclassi che variano dalla A1 alla F:

- A1 e A2 per i materiali incombustibili;
- B per materiali combustibili non infiammabili
- C, D, E per materiali combustibili non facilmente infiammabili;
- F per materiali facilmente infiammabili.

Il sistema europeo prevede anche la valutazione della produzione di fumi (smoke) che viene espressa con un valore variabile tra "s1" (assente/debole) e "s3" (elevato), e del gocciolamento di particelle ardenti (dropping) espresso invece con un valore variabile tra "d0" (assente) e "d2" (elevato).

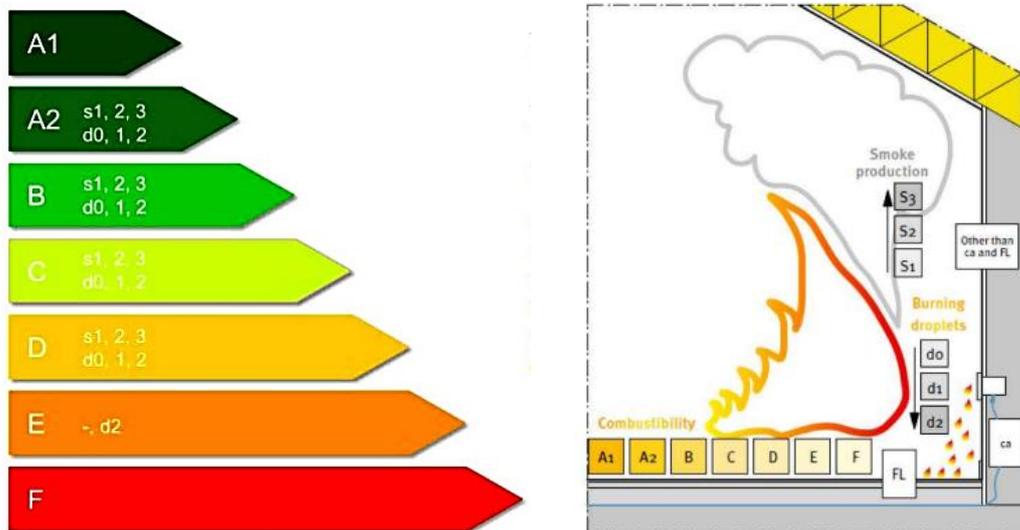


Figura 3-2: Classificazione europea dei materiali

Anche in Italia i vari materiali vengono classificati in relazione alla loro partecipazione alla combustione; la norma di riferimento è in questo caso la UNI 9177, che distingue solo 6 classi che vanno dalla 0 alla 5, dove i materiali di classe 0 sono quelli incombustibili, mentre le classi da 1 a 5 vengono attribuite ai materiali combustibili, tanto più un materiale è combustibile (quindi peggiore) tanto più è alta la classe:

Classe italiana	Definizione
0	materiali incombustibili
1	materiali combustibili non infiammabili
2	materiali combustibili difficilmente infiammabili
3	materiali combustibili infiammabili
4	materiali combustibili facilmente infiammabili
5	materiali combustibili estremamente infiammabili

Essendo diversi i metodi di prova e valutazione non è possibile definire l'equivalenza esatta tra classi italiane ed europee, il D.M. 15/03/2005 riporta una tabella che ne permette comunque un confronto, distinguendo inoltre l'impiego del materiale, infatti, la classe di reazione al fuoco non è una proprietà che dipende esclusivamente dal materiale ma è legata anche al suo impiego. Di seguito viene riportata la tabella di confronto tra Euroclassi e Classi Italiane:

Definizione	Classe italiana	Classe europea		
		impiego a parete	impiego a soffitto	impiego a pavimento
materiali incombustibili	Classe 0	A1	A1	A1 _n
materiali combustibili non infiammabili	Classe 1	A2 - s1 d0 A2 - s1 d1 A2 - s2 d0 A2 - s2 d1 A2 - s3 d0 A2 - s3 d1 B - s1 d0 B - s1 d1 B - s2 d0 B - s2 d1	A2 - s1 d0 A2 - s1 d1 A2 - s2 d0 A2 - s2 d1 A2 - s3 d0 A2 - s3 d1 B - s1 d0 B - s2 d0	A2 _n - s1 A2 _n - s2 B _n - s1 B _n - s2
materiali combustibili difficilmente infiammabili	Classe 2	A2 - s1 d2 A2 - s2 d2 A2 - s3 d2 B - s1 d2 B - s2 d2 B - s3 d0 B - s3 d1 B - s3 d2 C - s1 d0 C - s1 d1 C - s2 d0 C - s2 d1	B - s1 d1 B - s2 d1 B - s3 d0 B - s3 d1 C - s1 d0 C - s2 d0	C _n - s1 C _n - s2
materiali combustibili infiammabili	Classe 3	C - s1 d2 C - s2 d2 C - s3 d0 C - s3 d1 C - s3 d2 D - s1 d0 D - s1 d1 D - s2 d0 D - s2 d1	C - s1 d1 C - s2 d1 C - s3 d0 C - s3 d1 D - s1 d0 D - s2 d0	D _n - s1 D _n - s2
materiali combustibili facilmente infiammabili	Classe 4	non rilevante ai fini dei prodotti per scenografia		
materiali combustibili estremamente infiammabili	Classe 5	non rilevante ai fini dei prodotti per scenografia		

Figura 3-3: Reazione al fuoco dei materiali - Corrispondenza Classi italiane ed Euroclassi

Nel Regno Unito la classificazione dei prodotti, per quanto riguarda la reazione al fuoco, è definita sulla base della norma nazionale BS 476-7, nella quale viene specificato un metodo di prova per misurare la propagazione laterale della fiamma lungo la superficie di un campione di prodotto orientato in posizione verticale, nonché un sistema di classificazione basato sulla velocità e sull'estensione della propagazione della fiamma.

Anche in questo caso è che non è possibile un confronto diretto con le classi italiane ed europee; la "Class 0" inglese secondo la BS 476 non corrisponde alla "Classe 0" italiana, prima della "Class 0" infatti vi sono due classi di materiali aventi migliori prestazioni, "non-combustible" e "limited combustibility", le quali possono essere assimilate rispettivamente alla "Classe 0" e "Classe 1" italiane. Per quanto riguarda invece la corrispondenza con le Euroclassi viene riportata qui di seguito una tabella esplicativa:

British Standard	Transposition to Euroclass
Non-Combustible	A1, or considered as A1 without the need for further testing,
Limited Combustibility	A2 - s3, d2. or better
Class 0	B -s3, d2 or better
Class 1	C - s3, d2 or better
Class 3	D - s3, d2 or better

Figura 3-4: Reazione al fuoco dei materiali - Corrispondenza tra Classificazione britannica ed Euroclassi

4. La normativa italiana di riferimento

Le norme tecniche antincendio che regolano la progettazione degli edifici edificio devono tener conto dei possibili rischi legati all'insorgere di incendi e specificano le misure, i provvedimenti e gli accorgimenti operativi intesi a ridurre le probabilità dell'insorgere degli incendi (misure di prevenzione), nonché a limitare le conseguenze dell'incendio (misure di protezione) attraverso sistemi, dispositivi e caratteristiche costruttive, distanziamenti e compartimentazioni.

Le regole tecniche antincendio vigenti a livello nazionale si basano su un complesso sistema di regole, norme, indirizzi e circolari che si è stratificato nel corso degli anni ed in continuo aggiornamento per la necessità di doversi adeguare al continuo progresso tecnologico: gli edifici sono infatti diventati più alti per limitare lo sfruttamento di suolo ed al fine di assolvere i requisiti energetici richiesti largo impiego hanno trovato materiali isolanti molto spesso aventi pessime proprietà di reazione al fuoco.

4.1. D.P.R. 151 01/08/2011

Uno dei decreti fondamentali per la prevenzione incendi è il D.P.R. 151 "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi", che individua le attività soggette ai controlli di Prevenzione Incendi da parte del Corpo nazionale dei vigili del fuoco e le suddivide in tre categorie relativamente al rischio ad esse connesso:

- Categoria A: ricadono in questa categoria attività con un limitato livello di complessità, in cui ad esempio l'affollamento è ridotto o vi sono limitati quantitativi di materiale combustibile, e dotate di una normativa di riferimento.
- Categoria B: attività caratterizzate da un rischio associato medio prive di una normativa tecnica di riferimento.
- Categoria C: comprende tutte le attività caratterizzate da un alto livello di complessità tecnico-gestionale.

La definizione della categoria di appartenenza è significativa per la regolamentazione delle procedure da seguire al fine di certificare la soddisfazione dei requisiti antincendio.

Il presente D.P.R. individua tra le attività soggette gli edifici di grande altezza:

N.	ATTIVITÀ (DPR 151/2011)	CATEGORIA		
		A	B	C
77	Edifici destinati ad uso civile con altezza antincendio superiore a 24 m ^{1,2,3,4,5}	Fino a 32 m	Oltre 32 m e fino a 54 m	Oltre 54 m
Equiparazione con le attività di cui all'allegato ex DM 16/02/82				
94	Edifici destinati a civile abitazione con altezza in gronda superiore a 24 metri			

Il parametro di assoggettabilità era stato fino ad allora l'altezza in gronda (così come riportato nel D.M. 16 febbraio 1982), nel presente decreto l'altezza a cui si fa riferimento è invece l'altezza antincendi che corrisponde alla quota del livello inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitabile e/o agibile, escluse quelle dei vani tecnici, rispetto al livello del piano esterno più basso (definizione secondo D.M. 30 novembre 1983 recante "Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi").

Un'ulteriore differenza rispetto quanto definito nel vecchio elenco del D.M. 16/2/1982 è la sostituzione della definizione "edifici di civile abitazione" con quella più generica "edifici ad uso civile"; questa modifica ha però comportato delle incertezze di interpretazione su quali edifici ad uso civile fossero da considerare tra le attività soggette oltre agli edifici di civile abitazione di cui al D.M. 16 maggio 1987 n. 246, come ad esempio quelli adibiti a uffici. La definizione "edifici destinati ad uso civile" di cui all'attività n. 77 del D.P.R. 151/2011 dovrebbe riferirsi esclusivamente gli edifici di civile abitazione, regolamentati dal D.M. 16 maggio 1987 n. 246 o dalla RTV di cui al capitolo V.14 del Codice di prevenzione incendi e quindi non dovrebbero essere considerate come attività soggette quelle attività come gli uffici pur se esercite in edifici di altezza antincendi superiore a 24 metri.

4.2. D.M. 16 Maggio 1987

Il D.M. 16 maggio 1987, n. 246 detta le norme prescrittive da applicare agli edifici destinati a civile abitazione di nuova costruzione, o agli edifici esistenti alla data di entrata in vigore del decreto, in caso di ristrutturazione che comportino modifiche sostanziali, che abbiano altezza antincendi uguale o superiore a 12 m (secondo la definizione del D.M. 30/11/1983), pertanto anche agli edifici che si trovano al di sotto della soglia di assoggettabilità.

Si intendono per modifiche sostanziali lavori che comportino il rifacimento di oltre il 50% dei solai, il rifacimento strutturale delle scale o l'aumento di altezza. Per tali edifici le prescrizioni richieste sono riportate nella tabella A del presente decreto.

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

Figura 4-1: Tabella A - Decreto Ministeriale 30 novembre 1987

Per la reazione al fuoco dei materiali, si fa riferimento al decreto ministeriale 26 giugno 1984 – “Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi”.

Gli edifici devono essere suddivisi in compartimenti anche costituiti da più piani, di superficie non eccedente quella indicata nella tabella A.

Gli elementi costruttivi di suddivisione tra i compartimenti devono soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco indicati in tabella A.

4.3. Lettera circolare 15/04/2013 n° 5043

La Lettera Circolare n°5043 del 15/04/2013 è andata a sostituire la precedente Guida Tecnica allegata alla Lettera Circolare n° 5643 del 31/03/2010 che per prima ha posto l'attenzione sul tema connesso alla sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili fornendo indicazioni in merito ai requisiti che avrebbero dovuto avere le facciate per minimizzare il rischio di propagazione del fuoco tra i compartimenti nonché garantire la sicurezza degli occupanti e delle squadre di soccorso.

Dopo due anni di sperimentazione di quest'ultima e grazie a contributi pervenuti dai Comandi dei VVF, dall'industria delle facciate e da professionisti che si occupano specificatamente della materia, la Lettera Circolare n°5643 è stata aggiornata introducendo sia una più appropriata caratterizzazione tipologica delle facciate in relazione agli aspetti di sicurezza antincendio da garantire, sia una più deduttiva impostazione formale del documento nella definizione delle specifiche caratteristiche prestazionali richieste.

L'utilizzo della suddetta Guida Tecnica seppur raccomandato è solamente un documento volontario di applicazione e, come la versione precedente, per evitare eventuali discordanze con le vigenti norme verticali di prevenzione incendi (come ad esempio con il D.M. 16/02/1987 - "Norme di sicurezza antincendio per gli edifici di civile abitazione" sopra riportato) è da intendersi riferita ad edifici aventi un'altezza antincendio superiore a 12 m.

Gli obiettivi individuati dalla Guida Tecnica sono:

- limitare il rischio di propagazione di un incendio originatosi all'interno dell'edificio a causa di fiamme o fumi caldi che fuoriescono da vani, aperture, cavità verticali della facciata verso aree inizialmente non interessate dall'incendio;
- limitare la probabilità di incendio di una facciata e la successiva propagazione dello stesso a causa di un fuoco di origine esterna;
- minimizzare la caduta di parti di facciata disgregate ed eventualmente anche incendiate che possono compromettere l'esodo in sicurezza degli occupanti e l'efficacia dell'intervento dei soccorritori.

Il documento distingue diverse tipologie di facciate in relazione alla tecnologia costruttiva impiegata:

- 1) Facciata semplice: facciata anche di tipo multistrato, in cui gli strati e gli elementi funzionali sono assemblati con continuità senza intercapedini d'aria; non sono da considerarsi come intercapedini l'aria presente all'interno di elementi forati come laterizi forati o blocchetti in vetro-camera.
- 2) Curtain wall (o facciata continua): facciata esterna non portante, indipendente dall'ossatura strutturale dell'edificio e generalmente fissata davanti alla testa dei solai e dei muri trasversali. Un sistema di facciata continua è realizzato tramite l'assemblaggio di diversi elementi quali telai, pannelli, superfici vetrate, sigillature, sistemi di fissaggio, eccetera.
- 3) Facciata a doppia parete, ventilata, ispezionabile o meno: facciata di tipo multistrato, in cui gli strati sono separati da una cavità o intercapedine d'aria.

Se non è ispezionabile l'intercapedine può arrivare fino ad un massimo di 60 cm anche se i valori più comuni si aggirano tra i 5/10 cm, si noti che dal punto di vista della sicurezza antincendio la facciata a doppia parete non ventilata è assimilabile ad una facciata semplice.

Se invece la parete è ispezionabile l'intercapedine d'aria può assumere spessori anche superiori a 60 cm e nel caso di intercapedini superiori a 120 cm le due pareti costituiscono, dal punto di vista della sicurezza antincendio, due sistemi facciata indipendenti. (Quest'ultimo caso è generalmente quello di una facciata composta da una parete esterna vetrata e una parete interna che può essere semplice con o senza infissi, di tipo curtain wall opaca o vetrata. L'intercapedine interna tra le due pareti è attrezzata per consentire il passaggio di addetti alle operazioni di manutenzione.

4.3.1. Requisiti di resistenza al fuoco e compartimentazione

In generale la norma prescrive dei requisiti di resistenza al fuoco solo per gli elementi di facciate che appartengono a compartimenti aventi carico d'incendio specifico, al netto del contributo rappresentato dagli isolanti eventualmente presenti nella facciata stessa, superiore a 200 MJ/m², fatta eccezione per il caso in cui i suddetti compartimenti siano provvisti di un sistema di spegnimento automatico; in tal caso la prescrizione viene meno.

I requisiti richiesti variano in relazione alla tecnologia costruttiva della facciata:

1) *Facciate semplici e curtain walls*

La facciata deve presentare in corrispondenza di ogni solaio e/o muro trasversale, con funzione di compartimentazione, una fascia realizzata secondo le modalità descritte al paragrafo "4.3.2. Reazione al fuoco" di cui sotto ed avente classe di resistenza al fuoco EI60. Inoltre nel caso di facciate tipo curtain walls ovvero nelle quali gli elementi di facciata che costituiscono un rivestimento esterno continuo non poggiano direttamente sul solaio viene richiesto che l'elemento di giunzione della facciata ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti sia di classe di resistenza al fuoco almeno EI60. Sono ammesse aperture a condizione che, in corrispondenza delle stesse, sia previsto in caso di incendio, l'intervento automatico di apposita serranda tagliafuoco, o sistema equivalente, avente il medesimo requisito di resistenza al fuoco previsto per le parti di facciata.

2) *Facciate a doppia parete ventilate non ispezionabili*

La norma distingue ulteriormente i due casi: parete esterna chiusa e parete esterna aperta.

Si noti che sono classificate come aperte quelle pareti esterne costituite per almeno il 50% della loro superficie da giunti, griglie fisse o mobili che si aprono automaticamente in caso di incendio, distribuiti in modo uniforme, o realizzate con pannelli in materiali tali da rompersi e cadere se esposti a temperature inferiori a 200 °C; in tutti gli altri casi la facciata sarà classificata come chiusa.

"Nel primo caso, se l'intercapedine è dotato in corrispondenza di ogni vano per finestra e/o porta-finestra e in corrispondenza di ogni solaio di elementi di interruzione non

combustibili e che si mantengono integri durante l'esposizione al fuoco, la parete interna deve obbedire alle stesse regole delle facciate semplici. Non sono richiesti gli elementi orizzontali di interruzione in corrispondenza dei solai se nell'intercapedine è presente esclusivamente materiale isolante classificato almeno Bs3d0 ovvero se la parete interna ha, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EI30. Nel secondo caso invece la parete interna dovrà presentare analoghi requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici, se nell'intercapedine è presente esclusivamente materiale isolante classificato almeno Bs3d0 ovvero dovrà avere, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EI30 se nell'intercapedine è presente materiale isolante con classificazione di reazione al fuoco inferiore.”¹

3) *Facciate a doppia parete ventilate ispezionabili*

Se di tipo aperto, la parete interna dovrà presentare analoghi requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici.

“Se di tipo chiuso bisogna distinguere tra: intercapedine interrotta da elementi di interpiano resistenti al fuoco e non interrotta.

Nel primo caso, cioè se l'intercapedine è interrotta da solai o setti di compartimentazione E60 per ciascun piano, la parete esterna ovvero la parete interna devono obbedire alle stesse regole delle facciate semplici.

Nei solai e setti resistenti al fuoco che interrompono l'intercapedine, possono essere praticate aperture allo scopo di consentire la circolazione di aria all'interno dell'intera intercapedine, a condizione che sia mantenuta salva la continuità della compartimentazione di interpiano attraverso l'intervento, in caso d'incendio, di dispositivi automatici di chiusura aventi requisito di resistenza al fuoco E60.

Nel secondo caso ovvero se l'intercapedine è priva di interruzioni orizzontali, la parete interna dovrà avere, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EW30 (i↔o). Nel caso in cui la parete interna sia di tipo Curtain Walls è inoltre richiesto che

¹ Guida Tecnica per la determinazione dei “Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” allegata alla Lettera Circolare prot. n. 5043 del 15 marzo 2013, paragrafo 3.3

l'elemento di giunzione della facciata ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti sia di classe di resistenza al fuoco EI60.”²

Nel caso di questa terza tipologia di facciata sono ammesse soluzioni alternative come l'installazione di un impianto di spegnimento automatico interno alla camera d'aria realizzato in modo da intervenire in seguito alla segnalazione di incendio da parte di rivelatori automatici adeguatamente posizionati a ciascun piano all'interno dei locali. L'impianto di erogazione deve essere tale da garantire il **funzionamento** contemporaneo degli ugelli del piano immediatamente superiore a quello interessato dall'incendio. L'intercapedine deve essere inoltre provvista di sistema di evacuazione dei fumi (prevalentemente tramite ventilazione naturale) realizzata sia nella parte bassa che nella parte alta della facciata, di area pari al 10% della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.

Verifica dei requisiti di resistenza al fuoco: la conformità di un sistema di facciata, o di porzioni di essa, ai criteri stabiliti deve essere accertata mediante:

- prove sperimentali con procedure elaborate dal Comitato Europeo di Normazione (CEN);
- mediante tabelle riportate nel D.M. 16/02/2007 “Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione”. Per gli elementi di facciata realizzati con elementi di tipo leggero sono al momento indisponibili soluzioni basate su calcoli o riferimento a tabelle.

4.3.2. Reazione al fuoco

“I prodotti isolanti presenti in una facciata, comunque realizzata secondo quanto indicato nelle definizioni di cui al punto 2, devono essere almeno di classe 1 di reazione al fuoco ovvero classe B-s3,d0. [...]

I prodotti isolanti, con esclusione di quelli posti a ridosso dei vani finestra e porta-finestra per una fascia di larghezza 0,60 m e di quelli posti alla base della facciata fino a 3 m fuori terra,

² Guida Tecnica per la determinazione dei “Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” allegata alla Lettera Circolare prot. n. 5043 del 15 marzo 2013, paragrafi 3.4.1 e 3.4.2

possono non rispettare i requisiti di reazione al fuoco richiesti al primo capoverso purché siano installati protetti, anche all'interno di intercapedini o cavità, secondo le indicazioni seguenti:

- *prodotto isolante C-s3,d2 se protetto con materiali almeno di classe A2;*
- *prodotto isolante di classe non inferiore ad E se protetto con materiali almeno di classe A1 aventi uno spessore non inferiore a 15 mm.*
- *soluzioni protettive ulteriori possono essere adottate purché supportate da specifiche prove di reazione al fuoco su combinazione di prodotti (supporti, isolanti, protettivi) rappresentativi della situazione in pratica che garantiscano una classe di reazione al fuoco non inferiore ad 1 ovvero B-s3,d0.*

Le guarnizioni, i sigillanti e i materiali di tenuta, qualora occupino complessivamente una superficie maggiore del 10% dell'intera superficie della facciata, dovranno garantire gli stessi requisiti di reazione al fuoco indicati per gli isolanti.

Tutti gli altri componenti della facciata, qualora occupino complessivamente una superficie maggiore del 40% dell'intera superficie della facciata, dovranno garantire gli stessi requisiti di reazione al fuoco indicati per gli isolanti.

Per gli elementi in vetro non viene richiesta alcuna prestazione di reazione al fuoco.”³

Nell'allegato del presente documento vengono riportati i requisiti di sicurezza antincendio delle fasce di separazione relativamente alla loro conformazione geometrica; due sono le metodologie impiegate al fine di contenere la propagazione dell'incendio:

1. fasce di separazione orizzontali, con l'obiettivo di limitare la propagazione verticale.
2. Fasce di separazione verticale, con l'obiettivo di limitare la propagazione orizzontale.

³ Guida Tecnica per la determinazione dei “Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili” allegata alla Lettera Circolare prot. n. 5043 del 15 marzo 2013, paragrafo 4.

Nel primo caso la fascia di separazione può essere costituita da:

- a) una sporgenza orizzontale continua a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio, di larghezza «a» uguale o superiore a 0,60 m;

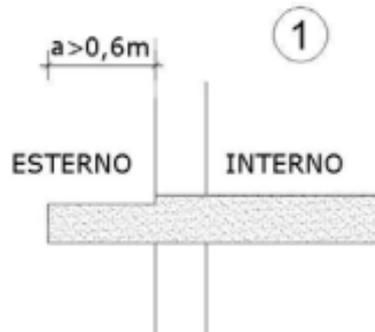


Figura 4-2: Fascia di separazione orizzontale - Soluzione 1

- b) un insieme di elementi come di seguito descritti, in modo che la somma delle dimensioni «a», «b», «c» e «d» sia maggiore o uguale a 1 m, si noti che ciascuno dei valori «a», «b» o «c» può eventualmente essere nullo:

- o una sporgenza orizzontale continua a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio di larghezza «a», raccordata al solaio;
- o un parapetto continuo di altezza «b» al piano superiore, raccordato al solaio;
- o un architrave continuo di altezza «c», raccordato al solaio.

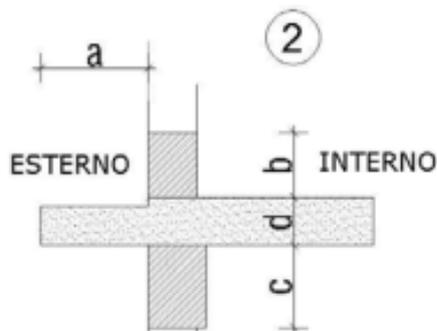


Figura 4-3: Fascia di separazione orizzontale - Soluzione 2

Nel secondo caso la fascia di separazione resistente al fuoco deve essere costituita da una sporgenza di profondità «b» rispetto alla superficie esterna della facciata e larghezza «a», quest'ultima uguale, inferiore o superiore alla larghezza del muro di separazione tra i compartimenti, ma comunque in modo che la somma «2b + a» sia maggiore o al più uguale ad 1 m.

La normativa propone una serie di possibili soluzioni geometriche adottabili al fine di soddisfare i requisiti richiesti:

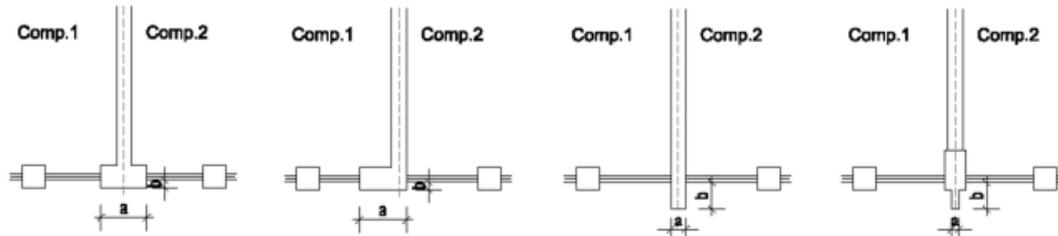


Figura 4-4: Fascia di separazione verticale – Soluzioni possibili

Un caso che merita particolare attenzione è quello di facciate o porzioni di esse che, in corrispondenza della giunzione delle rispettive superfici esterne, formano un angolo α compreso tra 0° (nel caso di facciate una di fronte all'altra) e 180° (nel caso di facciate allineate).

Di seguito viene riportato uno schema esemplificativo delle modalità con cui vengono considerati gli angoli tra porzioni di facciate:

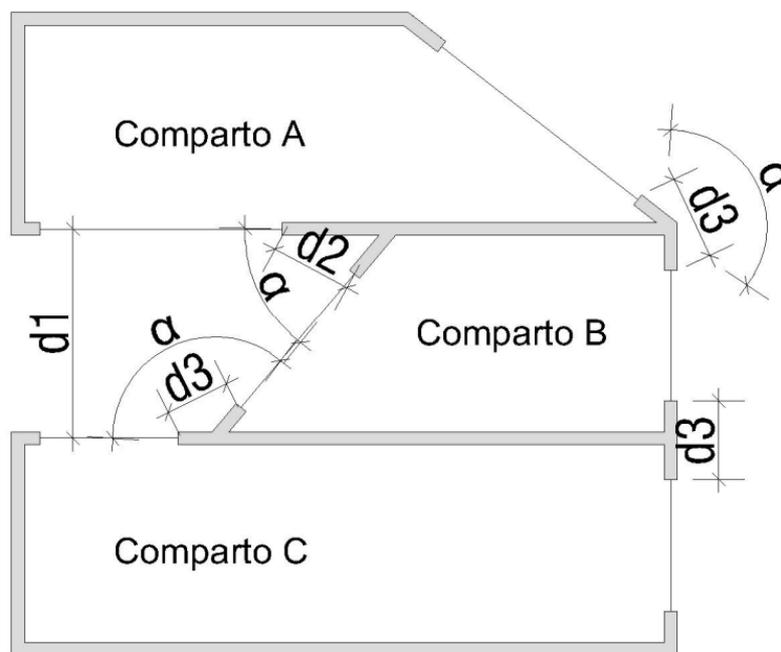


Figura 4-5: Schema delle distanze da considerare nel caso di facciate formanti un diedro

In questi casi la minima distanza, misurata tra le porzioni che non presentano requisiti di resistenza al fuoco almeno pari a EI60, in conformità alle specifiche modalità di valutazione previste, deve essere pari a quella indicata nella seguente tabella:

α	Distanza minima
0°	d_1
0° ÷ 90°	$d_2 = 1 + (d_1 - 1) \cdot \cos \alpha$
90° ÷ 180°	$d_3 = 1 \text{ m}$
> 180°	$d_3 = 1 \text{ m}$ (applicato alla sviluppo)

Dove d_2 indica la distanza tra due superfici formanti un angolo acuto, d_3 è la distanza tra due superfici formanti un angolo ottuso e d_1 assume valori differenti a seconda dell'altezza antincendio h dell'edificio, in particolare varrà:

Altezza antincendio [m]	d_1 [m]
$h \leq 24$	3,5
$24 < h \leq 54$	8
$h > 54$	12

4.4. D.M. 25 Gennaio 2019

Il D.M. 16 maggio 1987, n. 246 dopo circa trent'anni dalla sua emanazione ha richiesto un aggiornamento che tenesse conto delle mutate tecniche di realizzazione degli edifici e delle osservazioni scaturite dall'analisi dei casi di incendio più eclatanti verificatosi. Tale aggiornamento è avvenuto appunto con il D.M. 25 gennaio 2019 recante "Modifiche ed integrazioni all'allegato del decreto 16 maggio 1987, n. 246 concernente norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione".

Il presente Decreto Ministeriale rappresenta un primo passo verso un cambiamento epocale delle norme di prevenzione incendi che prevede il passaggio da un metodo prescrittivo ad uno di tipo prestazionale; non segna ancora un passaggio netto ma si presenta piuttosto come un ibrido introducendo concetti prestazionali all'interno di un impianto normativo ancora di tipo prescrittivo, in particolare definendo nuovi obiettivi riferiti alle facciate degli edifici civili.

L'applicazione del presente D.M. è obbligatoria per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici esistenti nel caso di ristrutturazioni che comportino la realizzazione o il rifacimento delle facciate per una superficie superiore al 50% della superficie complessiva delle stesse.

Ai fini del presente decreto, si definisce:

- Misure antincendio preventive: misure tecnico - gestionali, integrative di quelle già previste nelle norme di sicurezza allegate al D.M. 16 maggio 1987, n. 246, che completano la strategia antincendio da adottare per l'attività, al fine di diminuire il rischio incendio;
- L.P.: Livello di prestazione;

Il nuovo decreto integra la precedente norma con l'articolo 9-bis "Gestione della sicurezza antincendio" che viene richiesta ora anche per gli edifici civili e non solo più per i luoghi di lavoro; il sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio deve essere predisposto in base ai livelli di prestazione attribuiti in relazione all'altezza antincendi:

- L.P. 0 → per edifici di tipo a) (altezza antincendi da 12 m a 24 m);
- L.P. 1 → per edifici di tipo b) e c) (altezza antincendi oltre 24 m a 54 m);
- L.P. 2 → per edifici di tipo d) (altezza antincendi oltre 54 m fino a 80);
- L.P. 3 → per edifici di tipo e) (altezza antincendi oltre 80 m);

Si noti che per gli edifici di altezza antincendi superiore a 24 m, qualora siano presenti attività ricomprese in allegato I al D.P.R. 151/2011, e comunicanti con l'edificio stesso ma ad esso non pertinenti e funzionali si deve considerare il livello di prestazione maggiore.

Nel caso specifico di edifici di altezza antincendi compresa tra 24 e 54 metri (L.P.1), le misure antincendio preventive consistono in:

- corretto deposito ed impiego dei materiali combustibili, delle sostanze infiammabili liquide e gassose;
- mantenimento della disponibilità di vie d'esodo sgombre e sicuramente fruibili;
- corretta chiusura delle porte tagliafuoco nei varchi tra compartimenti;
- riduzione delle sorgenti di innesco (es. limitazioni nell'uso di fiamme libere senza le opportune precauzioni, divieto di fumo in aree ove sia vietato, divieto di impiego di apparecchiature elettriche malfunzionanti o impropriamente impiegate, ...);
- gestione dei lavori di manutenzione, e valutazione delle sorgenti di rischio aggiuntive, in particolare: operazioni pericolose (es. lavori a caldo, ...), temporanea disattivazione impianti di sicurezza, temporanea sospensione della continuità di compartimentazione, impiego delle sostanze o miscele pericolose (es. solventi, colle, infiammabili);
- valutazione dei rischi di incendio in caso di modifiche alle strutture, alle finiture, al rivestimento delle facciate, all'isolamento termico e acustico e agli impianti;

Le modifiche introdotte dal D.M. 25/01/2019 riprendono l'impronta metodologica del D.M. 3 agosto 2015 (Codice di Prevenzione Incendi), aggiornando le prescrizioni del D.M. 16 maggio 1987, seppur lasciando invariata gran parte del vecchio allegato. La transizione vera e propria verso un impianto prestazionale che tenga conto anche delle nuove esigenze del costruire si concretizza solo con le Regole Tecniche Verticali di recente emanazione riferite nello specifico alle facciate ed agli edifici civili di altezza rilevante, rispettivamente RVT V.13 e RVT V.14 che verranno descritte nel capitolo seguente.

4.5. D.M. 3 Agosto 2015

Più comunemente noto come Codice di prevenzione incendi ad oggi è la normativa di riferimento più diffusa in materia antincendio; segna il passaggio da un panorama normativo di tipo prescrittivo ad un approccio prestazionale.

Bisogna sottolineare che l'approccio prescrittivo è di più semplice applicazione ma nel caso di edifici particolarmente complessi o innovativi può risultare poco flessibile; al contrario utilizzando un approccio prestazionale ci si può basare sulla valutazione scientifica del fenomeno dell'incendio, ed eventualmente del comportamento umano, con riferimento agli obiettivi individuati.

Si compone di 4 sezioni:

- Sezione G – Generalità: contiene i principi fondamentali per la progettazione della sicurezza antincendio applicabili indistintamente a tutte le attività.
- Sezione S – Strategia antincendio: fornisce misure antincendio di prevenzione, protezione e relative alla gestione applicabili a tutte le attività al fine di comporre una strategia antincendio in grado di minimizzare il rischio di incendio.
- Sezione V - Regole tecniche verticali.
- Sezione M – Metodi.

Le prime due sono applicabili a tutte le attività soggette e possono essere intese come Regole Tecniche Orizzontali (RTO), la terza fornisce indicazioni specifiche per alcune attività affrontate singolarmente integrando o sostituendo quelle riportate nelle due sezioni precedenti (quelle presenti in questa sezione sono quindi da intendersi come Regole Tecniche Verticali, RTV). La sezione M è la più innovativa e riporta metodologie di progettazione antincendio alternative a quelle riportate nelle sezioni precedenti volte alla risoluzione di specifiche problematiche tecniche della progettazione antincendio (FSE).

Nell'ambito di questa tesi ci soffermeremo su:

- Capitolo S.1 "Reazione al fuoco"
- Capitolo V.13 "Chiusure d'ambito"
- Capitolo V.14 "Edifici di civile abitazione"
- Sezione M (M.1. "Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio" e M.2. "Scenari di incendio per la progettazione prestazionale")

In generale per ogni sezione il codice prevede l'assegnazione alle attività in esame di un livello di prestazione da garantire definito sulla base del rischio incendio correlato. Vengono poi proposte delle soluzioni conformi che garantiscono la soddisfazione dei requisiti richiesti da ciascun livello di prestazione; in ogni caso il progettista è libero di adottare soluzioni alternative, a patto che le scelte vengano adeguatamente argomentate e sia dimostrato il raggiungimento del livello di prestazione, anche attraverso i metodi della FSE.

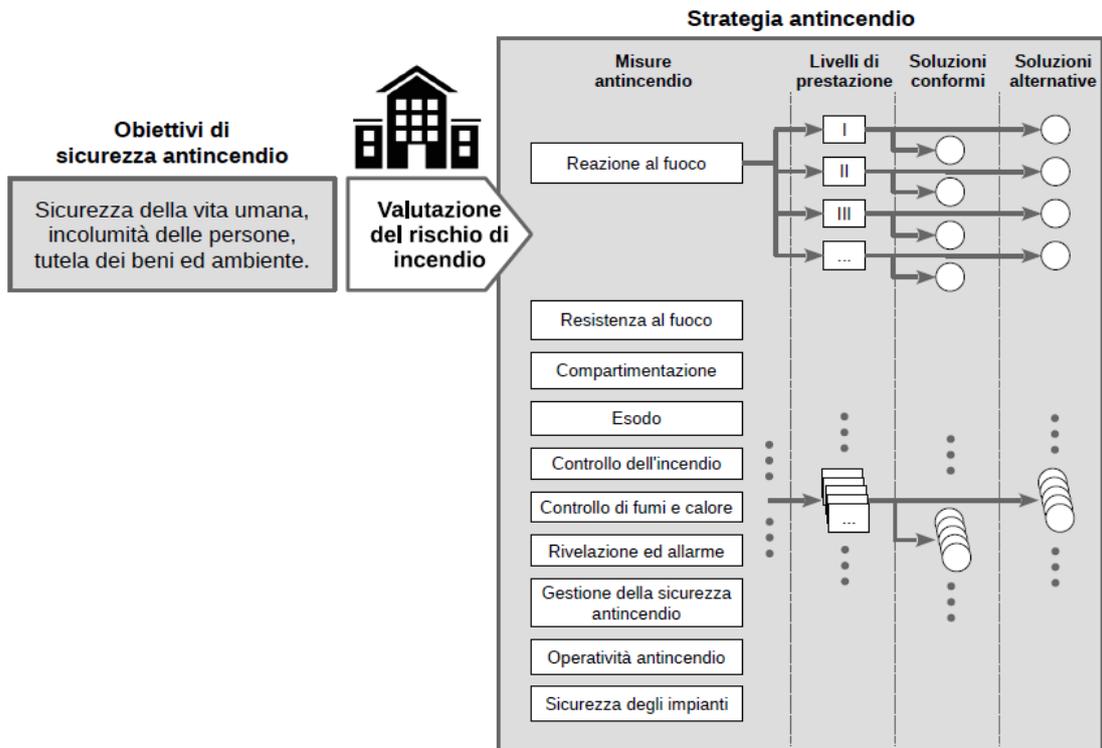


Figura 4-6: Schematizzazione della metodologia generale

4.5.1. Capitolo S.1

Affronta il tema della reazione al fuoco dei materiali, che come definito già al capitolo 3, ha come obiettivo quello di limitare l'innesco dei materiali e la propagazione dell'incendio ponendo particolare riguardo al grado di partecipazione all'incendio che essi manifestano in condizioni standardizzate di prova.

I materiali sono classificati in gruppi:

- GM0: a cui appartengono materiali incombustibili (Classe 0 italiana o A1 europea)
- GM1, GM2, GM3 a cui appartengono:

nel caso di materiali per rivestimento e completamento

Descrizione materiali	GM1		GM2		GM3	
	Ita	EU	Ita	EU	Ita	EU
Rivestimenti a soffitto [1]	0	A2-s1,d0	1	B-s2,d0	2	C-s2,d0
Controsoffitti, materiali di copertura [2], pannelli di copertura [2], lastre di copertura [2]						
Pavimentazioni sopraelevate (superficie nascosta)						
Rivestimenti a parete [1]	1	B-s1,d0	1	C _r -s1	2	C _r -s2
Partizioni interne, pareti, pareti sospese						
Rivestimenti a pavimento [1]	1	B _r -s1	1	C _r -s1	2	C _r -s2
Pavimentazioni sopraelevate (superficie calpestabile)						
[1] Qualora trattati con prodotti vernicianti ignifughi, questi ultimi devono avere la corrispondente classificazione indicata ed essere idonei all'impiego previsto.						
[2] Si intendono tutti i materiali utilizzati nell'intero pacchetto costituente la copertura, non soltanto i materiali esposti che costituiscono l'ultimo strato esterno.						

Figura 4-7: tabella S.1-6 "Classificazione in gruppi di materiali per rivestimento e completamento"

nel caso di materiali per isolamento

Descrizione materiali	GM1		GM2		GM3	
	Ita	EU	Ita	EU	Ita	EU
Isolanti protetti [1]	2	C-s2,d0	3	D-s2,d2	4	E
Isolanti lineari protetti [1], [3]		C _L -s2,d0		D _L -s2,d2		E _L
Isolanti in vista [2], [4]	0,	A2-s1,d0	1,	B-s2,d0	1,	B-s3,d0
Isolanti lineari in vista [2], [3], [4]	0-1	A2 _L -s1,d0	0-1	B _L -s3,d0	1-1	B _L -s3,d0
[1] Protetti con materiali non metallici del gruppo GM0 oppure prodotti di classe di resistenza al fuoco K 10 e classe minima di reazione al fuoco B-s1,d0.						
[2] Non protetti come indicato nella nota [1] della presente tabella						
[3] Classificazione riferita a prodotti di forma lineare destinati all'isolamento termico di condutture di diametro massimo comprensivo dell'isolamento di 300 mm						
[4] Eventuale doppia classificazione italiana (componente esterno che ricopre su tutte le facce esposte alle fiamme il componente isolante - componente isolante a sé stante) riferita a <i>materiale isolante in vista</i> realizzato come prodotto a più strati di cui almeno uno sia componente isolante; quest'ultimo non esposto direttamente alle fiamme						

Figura 4-8: tabella S.1-7: "Classificazione in gruppi di materiali per l'isolamento"

- GM4: tutti gli altri materiali

“Sulle facciate devono essere utilizzati materiali di rivestimento che limitino il rischio di incendio delle facciate stesse nonché la sua propagazione, a causa di un eventuale fuoco avente origine esterna o origine interna, per effetto di fiamme e fumi caldi che fuoriescono da vani, aperture, cavità e interstizi”⁴

Le soluzioni conformi consistono nella definizione del gruppo di materiali da impiegare, le soluzioni alternative sono sempre ammesse con riferimento al capitolo G.2 del Codice a patto che il raggiungimento del livello di prestazione venga dimostrato attraverso le modalità riportate nel capitolo G.2.7 o altresì attraverso i metodi della FSE.

4.5.2. Capitolo V.13

Questa regola verticale si applica alle chiusure d’ambito degli edifici civili, siano essi ad uso residenziale, strutture sanitarie, istituzionali, uffici, ecc...

Per prima cosa si definisce chiusura d’ambito la *“frontiera esterna dell’edificio ad andamento orizzontale o verticale, comprese le frontiere esterne interrato, frontiere tra ambiti diversi dell’edificio (es. intercapedini) o tra diversi edifici, se si affacciano verso un volume d’aria”⁵*. Si evidenzia che nella nuova definizione sono comprese anche le coperture e l’intradosso dei porticati e degli aggetti.

Mentre le regole della citata Lettera Circolare del 2013 dipendevano esclusivamente dalla tipologia della facciata ora viene fatta un’ulteriore distinzione relativamente alla tipologia di edificio in cui queste sono installate:

- 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 ≤ 300 occupanti e che non includono compartimenti con R_{vita} pari a D1, D2;
 - ii. edifici fuori terra, ad un solo piano;

⁴ Testo coordinato dell’allegato I del DM 3 agosto 2015 - Codice di prevenzione incendi, Sezione S.1.7, art.2

⁵ Testo coordinato dell’allegato I del DM 3 agosto 2015 - Codice di prevenzione incendi, Sezione V.13.2, art.1

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

Non sono richiesti requisiti di reazione e resistenza al fuoco per le chiusure d'ambito di tipo SA.

I componenti delle facciate di tipo SB ed SC quali:

- Isolanti termici e sistemi di isolamento esterno
- guarnizioni, sigillanti e materiali di tenuta, qualora occupino complessivamente una superficie $> 10\%$ dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito
- gli altri componenti, ad esclusione dei componenti in vetro se non rivestiti da materiali combustibili come pellicole filtranti, qualora occupino complessivamente una superficie $> 40\%$ dell'intera superficie lorda della chiusura d'ambito

a prescindere della tecnologia costruttiva, dovranno appartenere al gruppo di materiali GM2 se parte di chiusure di tipologia SB e al gruppo GM1 se parte di chiusure SC.

Per quanto riguarda le coperture di edifici SB ed SC viene consigliato l'impiego di materiali almeno GM3.

Le fasce di separazione costituiscono la principale misura di protezione e la loro progettazione viene direttamente affrontata nella presente Regola Tecnica; non sono un concetto completamente nuovo, ma derivano in parte dalle prescrizioni già state definite nella Guida Tecnica del 2013 sui requisiti antincendio delle facciate.

Secondo la normativa suddetti elementi devono essere realizzati con materiali di classe di reazione al fuoco A2-s1,d0 o migliore e nel caso di facciate semplici o continue devono possedere caratteristiche di resistenza al fuoco almeno EI 30, requisito che viene però incrementato a EI 60 nel caso di chiusure d'ambito di tipo SC (con eventualmente l'aggiunta del requisito R se tali strutture sono anche portanti). La larghezza delle fasce deve essere sempre tale da garantire uno sviluppo lineare di almeno 1 metro, a prescindere dalla conformazione geometrica della stessa.

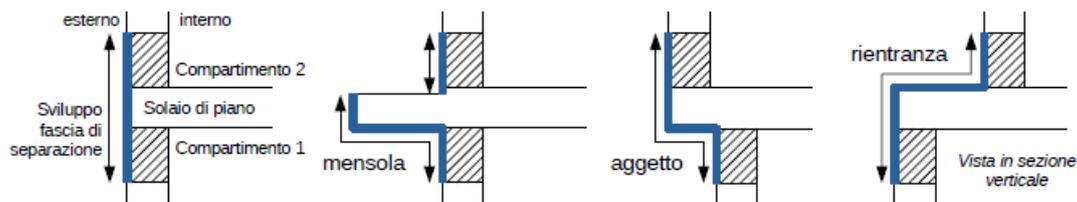


Figura 4-9: Fascia di separazione orizzontale, sezione verticale

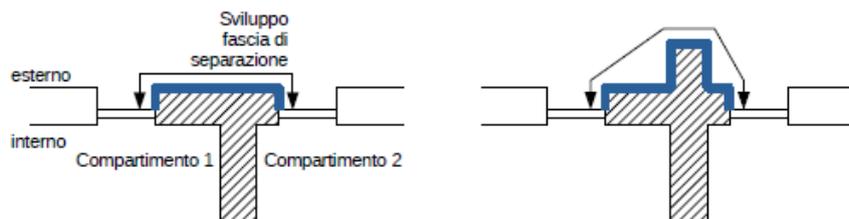


Figura 4-10: Fascia di separazione verticale, sezione orizzontale

Bisogna però sottolineare che tale misura va considerata come quella minima indicata da normativa, ma l'estensione deve sempre essere valutata dal professionista a seconda del contesto: una fascia di larghezza pari ad 1 metro lineare non fornisce infatti la stessa protezione di una di egual sviluppo ma che comprende una sporgenza. Particolare attenzione deve essere fatta nel caso in cui in corrispondenza della giunzione delle facciate si vengano a formare angoli acuti ($\alpha < 90^\circ$), conformazione che notoriamente aumenta la velocità e l'estensione della propagazione del fuoco: in casi di questo tipo la normativa stessa richiede venga prevista una fascia di separazione di larghezza maggiore.

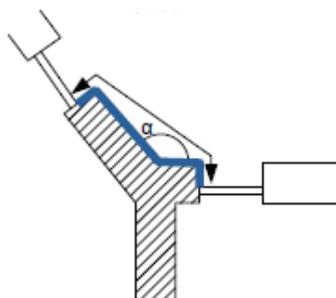


Figura 4-11: Fascia di separazione nel caso di superfici formanti un diedro, sezione orizzontale

In questo caso lo sviluppo lineare dovrà avere larghezza $\geq 1,00\text{m} + (ds.3 - 1) \cdot \cos \alpha$, con ds.3 distanza di separazione tra i compartimenti in metri calcolata secondo paragrafo S.3.11.

Integrando quindi le prescrizioni del capitolo S.1 relative agli isolanti e quelle della RTV V.13 relativa alle chiusure d'ambito si può far riferimento al seguente schema riepilogativo:

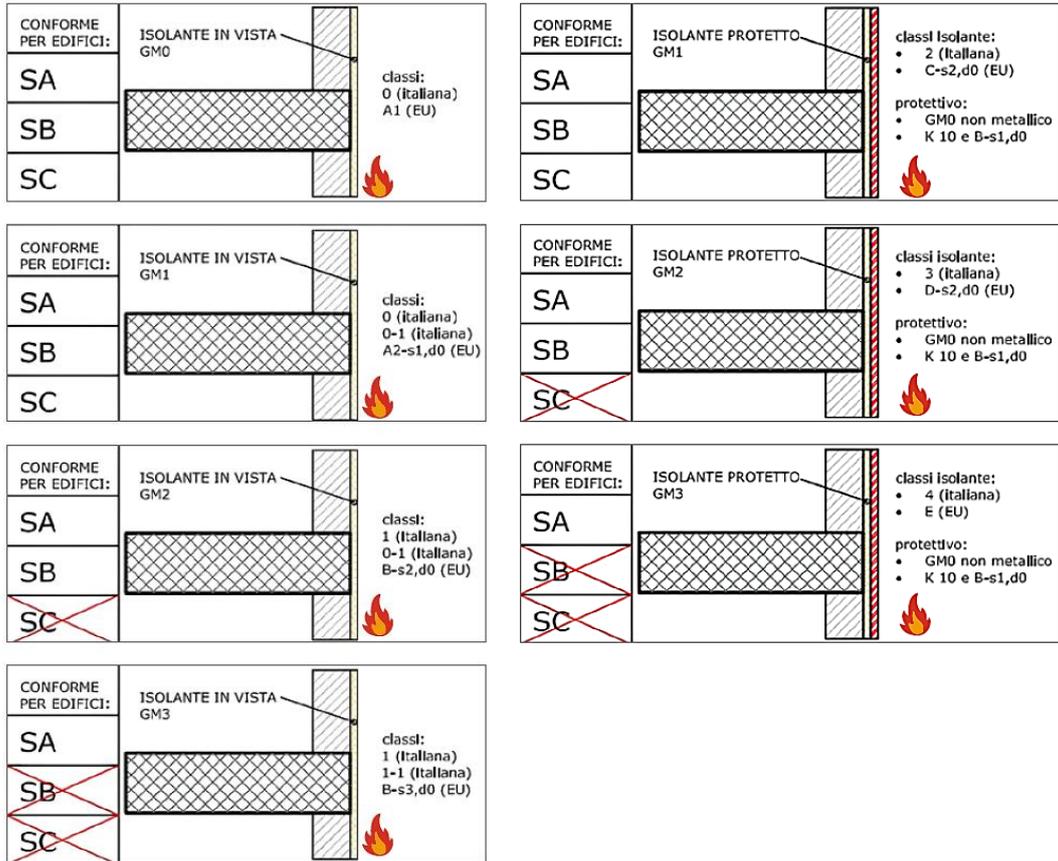


Figura 4-12: Schema riepilogativo delle prescrizioni sulla reazione al fuoco delle chiusure d'ambito

4.5.3. Capitolo V.14

Per completezza, anche se non necessariamente rilevante ai fini dello studio oggetto di questa tesi, si evidenzia l'ultima Regola Tecnica aggiunta con il D.M. 19 maggio 2022 all'interno del Codice al capitolo V.14 che pone l'attenzione sulla prevenzione incendi negli edifici destinati prevalentemente a civile abitazione di altezza antincendio > 24 m. Può quindi essere considerato come l'aggiornamento del D.M. 16 maggio 1987 n. 246, modificato con il D.M. del 25 gennaio 2019, che comunque resta ancora il riferimento per gli edifici con altezza antincendio da 12 e 24 metri.

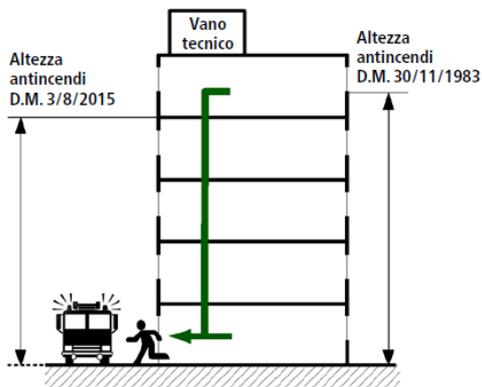


Figura 4-13: Diversa definizione di altezza antincendi

Si noti che bisogna tenere conto della diversa definizione di altezza antincendi a cui si fa riferimento nel Codice e quella contenuta nei decreti ministeriali precedenti: nel Codice si fa riferimento alla massima quota dei piani dell'attività (esclusi i piani con presenza occasionale e di breve durata di personale addetto come vani tecnici) e non più alla quota inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitabile e/o agibile, escluse quelle dei vani tecnici.

In ogni caso, la norma specifica che per le facciate deve essere applicato il capitolo V.13 del Codice in merito alle chiusure d'ambito degli edifici civili introdotto dal D.M. 30 marzo 2022.

5. Caso studio

Il seguente capitolo fa riferimento ad un caso studio reale sito in Genova.

L'immobile sorge nel quartiere di Sestri Ponente e si colloca in un contesto prevalentemente produttivo ed industriale; è confinante con lotti di altre proprietà, in particolare, l'edificio confina in direzione Sud e Sud-Est con la ferrovia lato da cui per altro avviene l'accesso, in direzione Ovest con altri complessi produttivi ed in direzione Nord e Nord-Est con edifici adibiti ad uso residenziale e terziario.

L'edificio può essere idealmente considerato come la composizione di due blocchi principali collegati tra loro, uno a Sud-Est costituito da 11 piani fuoriterra che ospita al suo interno uffici ed uno costituito invece da 9 piani fuori terra dedicato in parte ad uffici in parte a locale magazzini e laboratori.

Nella fotografia seguente viene riportato un estratto complessivo indicante l'ubicazione del fabbricato all'interno del contesto cittadino.



Figura 5-1: Vista satellitare del sito e distinzione blocchi costitutivi: blocco Sud-Est (rosso), blocco Nord-Ovest (verde)



Figura 5-2: Ripresa fotografica dello stabilimento – Vista Sud-Est

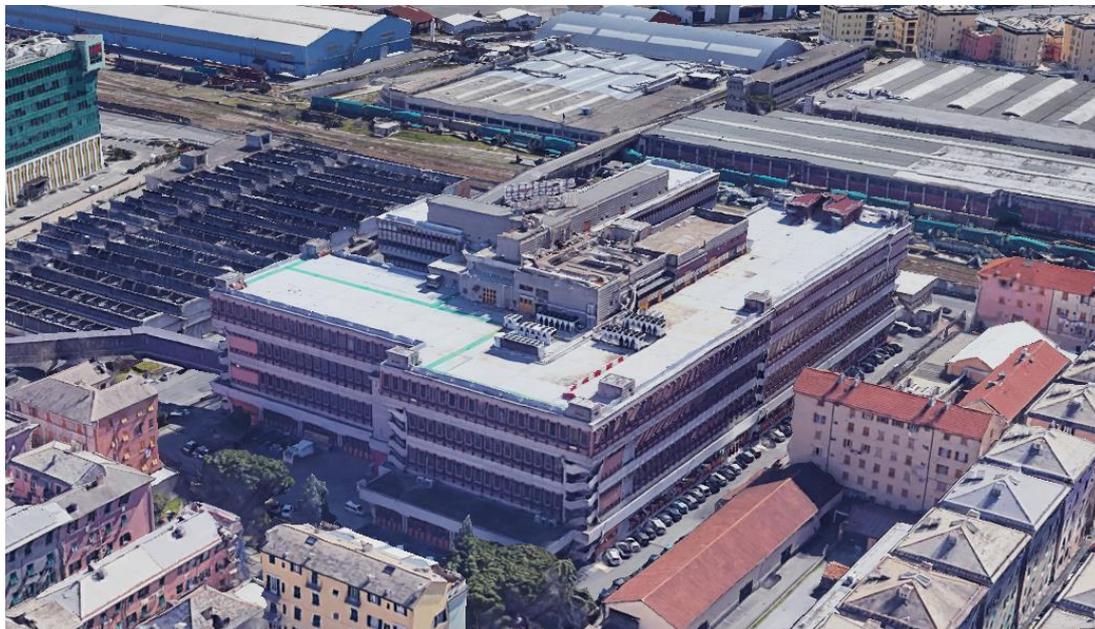


Figura 5-3: Ripresa fotografica dello stabilimento – Vista Nord-Ovest

5.1. Restituzione tridimensionale

Per poter procedere con lo studio della reazione al fuoco della facciata dell'edificio è stato necessario in primo luogo ricreare un modello tridimensionale; per far ciò ci si è avvalsi del software Revit Architecture sviluppato da Autodesk. Questo software utilizza la metodologia BIM (Building Information Model) e nello specifico consente la progettazione di edifici con elementi di modellazione parametrica e permette di integrare il modello progettuale con informazioni numeriche e/o tipologiche non necessariamente visibili nel modello 3D digitale ma utili ad esempio durante l'importazione del modello stesso in altri software, informazioni di questo tipo possono essere codici progressivi univoci per ciascun elemento, costi o come nel caso corrente stratigrafie e caratteristiche dei materiali.

Il materiale di partenza per la modellazione non era molto, ma nonostante ciò le planimetrie in formato CAD fornite, integrate con fotografie ed informazioni raccolte durante alcuni sopralluoghi, sono state sufficienti per la realizzazione del modello digitale.

Ciascun file CAD è stato importato in Revit associandolo ad un livello di riferimento, nello specifico il livello di pavimento finito di ciascun piano calpestabile.

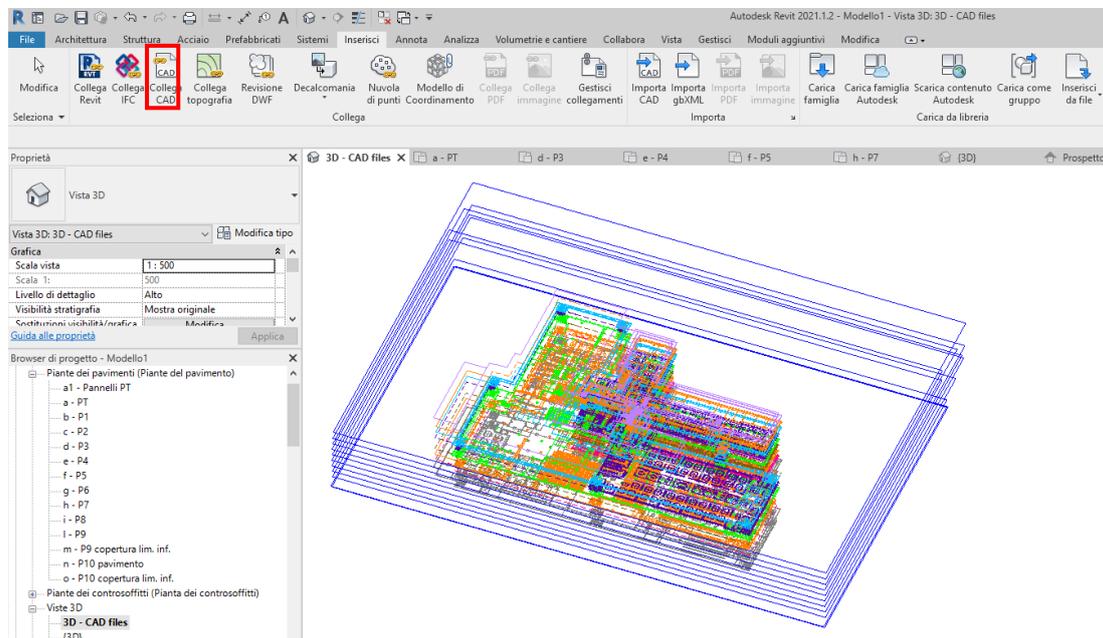


Figura 5-4: Importazione delle planimetrie 2D

L'edificio è stato quindi modellato andando ad inserire gli elementi strutturali quali pilastri, solai e setti in calcestruzzo. Internamente il blocco Sud-Est risulta suddiviso in 11 piani separati da solai laterocementizi di 30 cm ed un'altezza interpiano di 3 metri, la quota dell'ultimo solaio praticabile risulta essere 32,70 m. La quota dell'ultimo solaio calpestabile, nel blocco Nord-Ovest, è invece 25,80 m; internamente è suddiviso da solai in laterocemento di 30 cm presenti in corrispondenza dei livelli P2, P4, P6, P7 e P8. L'altezza interpiano, fatta eccezione per i piani sesto, settimo ed ottavo in cui rimane invariata rispetto all'altro blocco, risulta quindi essere di 6,30 m.

Di seguito viene riportato il prospetto Ovest del blocco Nord-Ovest adibito ad uffici, magazzini e laboratori. Il prospetto Est dello stesso blocco risulta uguale.



Figura 5-5: Prospetto Ovest- quote livelli pavimento finito [cm]

La facciata è stata realizzata invece ricorrendo al sistema di facciata continua di Revit, andando a modellare per ogni tipologia di facciata un modulo specifico da riproporre in serie lungo tutta la facciata. Nell'immagine sottostante viene riportata una visione d'insieme della struttura completa.

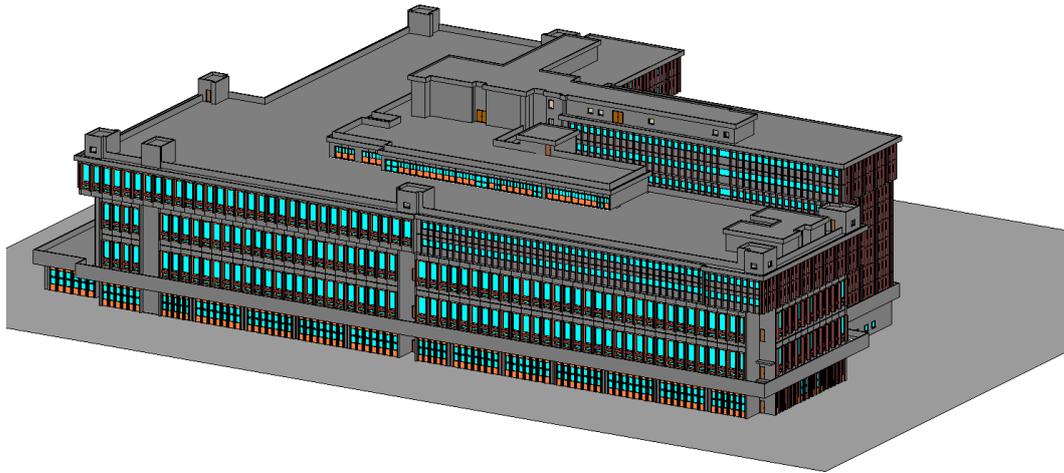


Figura 5-6: Modello 3D

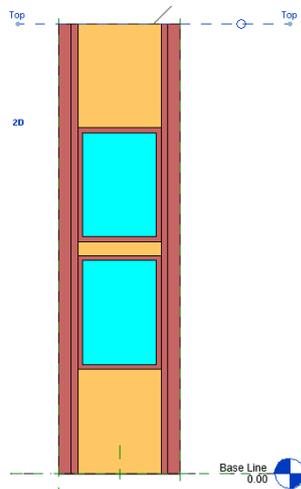
5.1.1. La facciata

Lo studio di questa tesi verte sull'analisi della reazione al fuoco della facciata, quest'ultima risulta realizzata mediante diverse tipologie di pannelli, differenti per geometria ma simili tra loro da punto di vista dei materiali costitutivi.

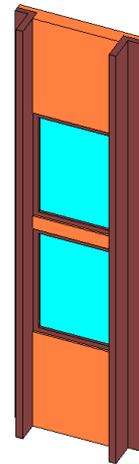
Modulo PT



Rilievo fotografico



Prospetto



Rappresentazione 3D

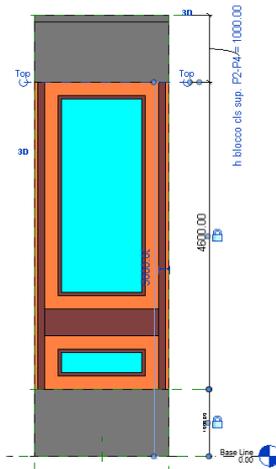
I moduli PT, installati lungo il perimetro del piano terra, risultano così composti:

1. Pannello opaco in alluminio
2. Montanti verticali in alluminio
3. Infissi in alluminio

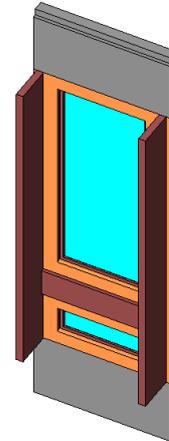
Modulo P2-P3 (uguale a modulo P4-P5)



Rilievo fotografico



Prospetto



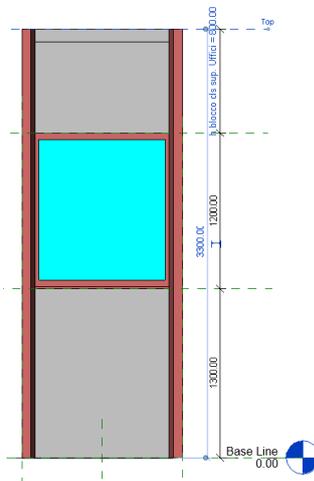
Rappresentazione 3D

I moduli P2-P3 e P4-P5, installati lungo il perimetro dell'ala dell'edificio dedicata a laboratori/magazzino ai piani secondo e quarto, risultano simili ai precedenti ma presentano una fascia inferiore e superiore in muratura isolata ($h = 1\text{ m}$)

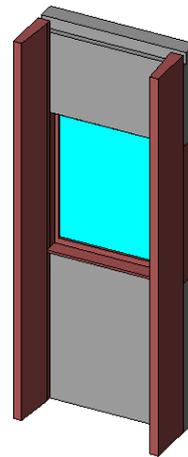
Modulo Uffici (P6-P7)



Rilievo fotografico



Prospetto



Rappresentazione 3D

I moduli P6 e P7, installati lungo il perimetro ai piani sesto e settimo, risultano così composti:

1. Montanti verticali in alluminio
2. Infissi in alluminio
3. Fascia inferiore ($h = 1,30\text{ m}$) e superiore ($h = 0,80\text{ m}$) in muratura isolata

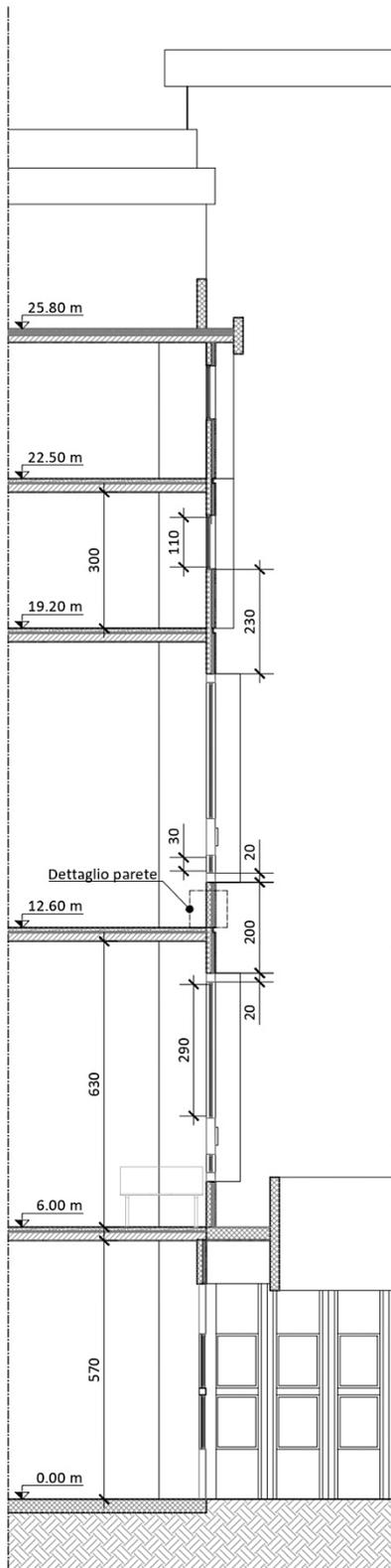
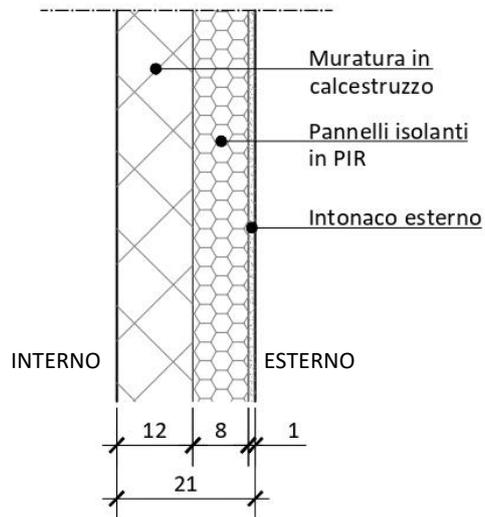


Figura 5-7: Sezione della facciata tipo



La facciata, la cui stratigrafia è stata semplificata ai fini dell'analisi, risulta composta da tre strati che, analizzati dall'interno all'esterno, risultano essere:

- 1) Muratura piena in calcestruzzo, sp. 12 cm.
- 2) Cappotto termico in PIR, sp. 8 cm.
- 3) Finitura esterna, sp. 1 cm.

Questa prima parte di modellazione è stato il passo preliminare per lo studio dell'evoluzione dell'incendio. Una volta terminato il modello architettonico ed impostati i materiali dei vari elementi è stato possibile procedere all'esportazione dello stesso in formato IFC; questa tipologia di file contiene il modello dell'edificio, mantenendo i suoi elementi, materiali e forme spaziali ed è importabile su altri software senza perdita di suddette informazioni, è infatti un formato che garantisce una buona interoperabilità tra i programmi BIM di settore.

5.2. Strategia antincendio

Si riporta nel seguente capitolo un riassunto delle considerazioni applicabili al caso studio:

1. Secondo quanto riportato nel D.P.R. 151/2011 ricadono nell'attività soggetta n°. 77 gli edifici di altezza superiore a 24 metri destinati ad uso civile; questa definizione è ambigua rispetto a quella riportata nella normativa vigente precedentemente (D.M. 16 maggio 1987 n. 246) in cui venivano trattati nello specifico gli edifici civili destinati ad abitazione; nonostante il cambio di definizione il decreto del 2011 si riferisce ad edifici prevalentemente ad uso residenziale e pertanto il fabbricato oggetto di studio non ricade in tale categoria.

L'attività ricade invece nell'attività 71 ed in particolare nella categoria 3.C definite come *"Aziende ed uffici, con oltre 800 persone presenti"*. La regola tecnica di riferimento per la progettazione, costruzione ed esercizio di edificio di questo tipo è il D.M. 22 febbraio 2006, aggiornata da l D.M. 10 marzo 2020, anche se è applicabile in alternativa anche il Codice di Prevenzione Incendi» facendo riferimento allo specifico capitolo V.4 riguardante nello specifico l'organizzazione e gestione dell'esodo.

2. La facciata presa in esame risulta avere uno sviluppo di 15,80 metri in altezza.
3. Dal punto di vista della facciata si può applicare la regola tecnica di recente introduzione V.13 del "Codice Prevenzione Incendi"

Essendo che la quota dei piani supera i 24 metri di altezza la tipologia di chiusura d'ambito risulta essere SC.

I materiali della facciata devono quindi appartenere al gruppo GM1, così come definiti alla sezione S.1 del Codice.

Per i rivestimenti a parete i materiali dovrebbero quindi appartenere alla classe 1 (secondo classificazione italiana) o all'equivalente classe europea B-s1,d0.

Gli isolanti impiegati, essendo di tipo protetto, dovrebbero essere di classe C-s2,d0 o migliore (il PIR viene classificato come B-s1,d0).

4. Il sistema di facciata non presenta corridoi d'aria e può essere quindi considerata una facciata semplice multistrato.
5. Le aperture di competenza di ciascun piano distano da quelle sottostanti e quelle soprastanti da un minimo di 2 metri ad un massimo di 2,30 metri.

6. Per quanto riguarda la dimensione delle superfici vetrate di ciascun modulo si possono considerare i seguenti valori:
 - Modulo PT: due aperture sovrapposte, ciascuna di 90x120cm.
 - Modulo P2-P3 e P4-P5: 120x290 cm.
 - Modulo P6 e P7: 100x110 cm.
7. Non sono presenti particolare geometrie di facciata, che risulta avere uno sviluppo piano.
8. Si dichiara che lo stabilimento non è dotato di impianto di rivelazione incendio automatico.
9. Si dichiara che lo stabilimento non è dotato di impianto di spegnimento automatico.

5.3. Modellazione dell'incendio

A livello europeo si inizia a parlare di Fire Safety Engineering (FSE) con le norme ISO/TR 13387 del 1999 che affrontano l'applicazione di principi ingegneristici nell'ambito del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, volti alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell'ambiente, alla quantificazione dei rischi d'incendio e/o dei relativi effetti ed alla valutazione analitica delle misure antincendio ottimali.

In Italia se ne inizia a parlare solo con l'emanazione del decreto ministeriale del 9 maggio 2007 – “Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”. Successivamente il Codice, all'interno della sezione M, ne riprende i concetti e ne propone l'utilizzo da parte del progettista per la dimostrazione il raggiungimento di determinati livelli di prestazione di soluzioni non conformi.

Nell'approccio utilizzato l'incendio iniziale viene quantificato utilizzando le curve di rilascio termico associate all'innesco di una postazione di lavoro. La valutazione della crescita e della propagazione degli incendi si basa poi sulla capacità del simulatore di incendio FDS di fare stime verosimili sulla velocità e sulle dimensioni di un incendio all'interno del contesto.

5.3.1. Codice di Prevenzione Incendi – Sezione M

La sezione M del Codice di Prevenzione Incendi descrive nel dettaglio la metodologia di progettazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio in un'ottica puramente prestazionale; in questa sezione vengono descritti le procedure per l'identificazione e quantificazione degli scenari di incendio di progetto al fine di sviluppare un'analisi di tipo quantitativo che permetta di validare o meno il raggiungimento degli obiettivi progettuali. Si compone di tre parti:

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

Al fine di questa tesi i primi due sono quelli di maggiore rilevanza in quanto il terzo è legato per lo più all'esodo degli occupanti e non propriamente al fenomeno chimico dell'incendio.

Il primo capitolo, introduttivo, descrive la metodologia da seguire e l'analisi preliminare in cui vengono individuati gli scopi della progettazione antincendio e specificati gli obiettivi di sicurezza antincendio da perseguire in relazione alle specifiche esigenze dell'attività in esame ed alle finalità della progettazione e quest'ultimi vengono tradotti in soglie di prestazione quantitative.

Nel secondo capitolo vengono invece descritte le modalità per l'identificazione e quantificazione degli scenari di incendio di progetto, verranno scelti ai fini dell'analisi i più gravosi eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività.

Vengono tradotti in termini quantitativi lo sviluppo dell'incendio e la diffusione dei prodotti di combustione tenendo in considerazione:

- localizzazione e geometria dell'attività, dimensioni e distribuzione degli ambienti interni;
- descrizione materiali strutturali e non strutturali;
- dimensione, localizzazione e stato di apertura/chiusura/rottura efficace delle aperture di ventilazione di progetto e potenziali, come porte, finestre, lucernari;
- barriere che influenzano il movimento dei prodotti della combustione;
- presenza di impianti di spegnimento automatico.

Per descrivere quantitativamente il fenomeno dell'incendio si può far riferimento alle curve HRR (Heat Release Rate). Il Codice fornisce le modalità per effettuare una stima della potenza termica rilasciata dall'incendio al variare del tempo nelle fasi di propagazione, nella fase stazionaria e nella fase di decadimento.

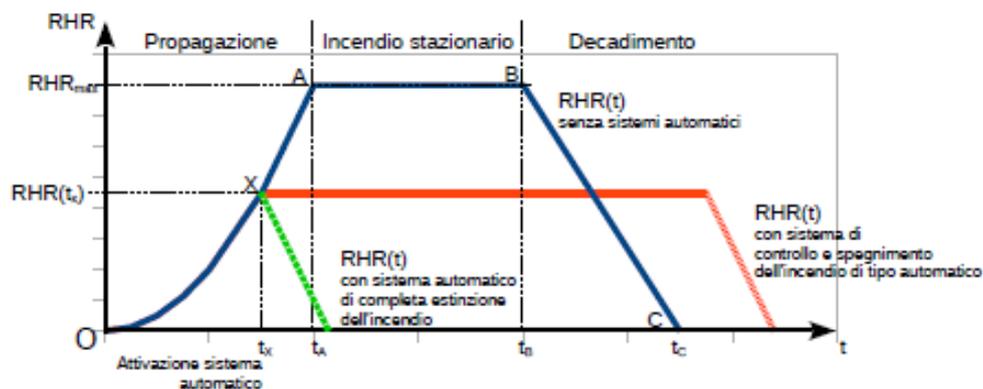


Figura 5-8: Fasi dell'incendio

Infine, grazie alla modellazione analitica della soluzione progettuale e degli scenari di incendio su software FDS (Fire Dynamics Simulator) come Pyrosim, vengono calcolati gli effetti ad essi correlati; se conservano un adeguato margine di sicurezza rispetto alle soglie di prestazione precedentemente stabilite, allora la soluzione progettuale analizzata è considerata accettabile.

Al fine di questa tesi la scelta di Pyrosim come software di calcolo è stata dettata innanzitutto dalla disponibilità della licenza d'uso, rilasciata gratuitamente dalla casa produttrice Thunderhead Engineering Consultants, Inc. agli studenti che ne fanno richiesta, ed in secondo luogo dalla sua interfaccia grafica: essa permette infatti di modellare un incendio senza avere conoscenze specifiche del linguaggio informatico; poter vedere direttamente gli effetti dei dati di input consente di valutare preventivamente le scelte effettuate ed eventuali modifiche da apportare. Inoltre in fase di post-processing il suddetto permette di osservare in maniera chiara ed immediata la propagazione del fumo (attraverso l'attivazione della visualizzazione Smokeview) oppure l'andamento delle temperature dei fumi (attraverso l'opportuna realizzazione di slice 2D o 3D).

5.3.2. Dominio di calcolo

In generale il professionista antincendio può optare tra diversi modelli di calcolo disponibili, per l'analisi svolta in questa tesi e presentata nei paragrafi successivi verrà utilizzato un modello numerico ed in particolare verrà svolta una simulazione di campo in quanto un modello di questo tipo permette la gestione di geometrie complesse. Il dominio fisico della simulazione viene suddiviso in celle tridimensionali e per ciascuna di esse il software risolve equazioni di massa, della quantità di moto ed energia calcolando i valori delle variabili di interesse quali la concentrazione di specie chimiche, temperatura, pressione, visibilità e velocità di gas e fumi.

La definizione della dimensione della mesh e delle sue celle è un passaggio di fondamentale importanza da cui dipende l'accuratezza dei risultati dell'analisi; in generale è consigliabile che le celle siano sufficientemente regolari nelle tre direzioni e piccole e approssimabili alle dimensioni delle ostruzioni solide presenti le modello, al contrario la mesh deve essere sufficientemente grande in modo che i confini di quest'ultima non si trovino in corrispondenza di punti in cui ci si aspettano condizioni critiche (tipicamente il fuoco per esempio).

È stato condotto inoltre un controllo delle dimensioni delle celle secondo il metodo proposto ne "Handbook of fire protection Engineering, IV edition":

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} = 6,00 \text{ m}$$

Dove D^* è la lunghezza caratteristica del pennacchio di fuoco, \dot{Q} è l'HRR (in questo caso correlata all'incendio di una postazione di lavoro, pari quindi a 6801,9 kW), ρ è la densità dell'aria ambiente, c_p è il calore specifico dell'aria, T è la temperatura dell'aria ambiente e g è l'accelerazione gravitazionale. La dimensione della cella da utilizzare nelle simulazioni dovrebbe essere inferiore a $0,1 \cdot D^*$, si ottiene quindi una massima dimensione della cella utilizzabile pari a 60 cm.

Per studiare nel dettaglio l'evoluzione dell'incendio, ma avere anche un volume d'aria sufficientemente grande senza incrementare i tempi di elaborazione la procedura adottata è stata quella di suddividere due regioni:

- una inferiore in cui le celle cubiche di lato 0,25 cm, che bene approssimano lo spessore della parete studiata;

Order / Priority: 1

Specify Color:

Mesh Alignment Test: **Passed**

Properties **Advanced**

Mesh Boundary:

Min X: 45,0 m Min Y: 26,0 m Min Z: 0,0 m

Max X: 59,0 m Max Y: 56,0 m Max Z: 37,0 m

Division Method: Uniform

X Cells: 56 Cell Size Ratio: 1,00

Y Cells: 120 Cell Size Ratio: 1,00

Z Cells: 148 Cell Size Ratio: 1,00

Cell Size (m): [0,25 x 0,25 x 0,25](#)

Number of cells for mesh: 994.560

Total number of cells in model: 1.002.120

Figura 5-9: Definizione dominio di calcolo inferiore

- una superiore, al di sopra dell'edificio, a maglia più larga (1x1x1 m) con il solo fine di incrementare il volume d'aria.

Order / Priority: 2

Specify Color:

Mesh Alignment Test: **Passed**

Properties **Advanced**

Mesh Boundary:

Min X: 45,0 m Min Y: 26,0 m Min Z: 37,0 m

Max X: 59,0 m Max Y: 56,0 m Max Z: 55,0 m

Division Method: Uniform

X Cells: 14 Cell Size Ratio: 1,00

Y Cells: 30 Cell Size Ratio: 1,00

Z Cells: 18 Cell Size Ratio: 1,00

Cell Size (m): [1,0 x 1,0 x 1,0](#)

Number of cells for mesh: 7.560

Total number of cells in model: 1.002.120

Figura 5-10: Definizione dominio di calcolo superiore

Tutte le superfici delimitanti il dominio di calcolo, fatta eccezione per quella inferiore a contatto con il suolo, sono definite come “OPEN surface”: una condizione al contorno di questo tipo presuppone che oltre tale superficie sussistano le condizioni ambientali.

5.3.3. Chimica e fisica dell'incendio

L'incendio si basa sul fenomeno chimico della combustione che essendo una reazione di tipo esotermico comporta come risultato la produzione di calore, il quale può avere effetti dannosi sulle persone nonché sugli edifici e strutture in genere.

È impossibile definire con assoluta certezza gli effetti di un incendio a priori in quanto durante il processo di combustione entrano in gioco molte variabili aleatorie quali ad esempio le temperature di ignizione dei materiali nonché i materiali stessi, le quantità, la conformazione geometrica e le condizioni al contorno dell'ambiente; esistono comunque in letteratura numerosi dati ricavati da test sperimentali o simulazioni numeriche già validate a cui il progettista può far riferimento al fine di prevedere in generale l'evoluzione dell'incendio e definire così soluzioni progettuali e/o indicazioni al fine di limitare i danni o il pericolo.

La temperatura è il parametro che influenza maggiormente la velocità di reazione; secondo la teoria degli urti infatti sussiste una correlazione tra l'aumento di temperatura e la velocità di reazione all'innalzarsi della prima, si accresce l'energia cinetica delle particelle e di conseguenza aumenta anche la frequenza degli urti tra essi portando ad un aumento dell'energia del sistema: superata una certa soglia (che prende il nome di energia di attivazione) la reazione di combustione avrà luogo.

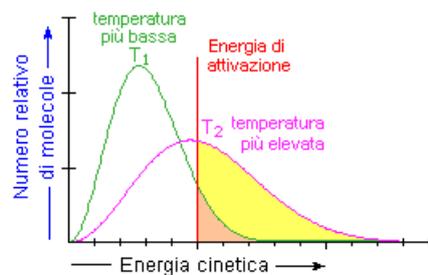


Figura 5-11: Distribuzione dell'energia cinetica delle particelle a diverse temperature

La temperatura che porta al raggiungimento di queste condizioni prende invece il nome di temperatura di ignizione e varia notevolmente a seconda del materiale considerato e delle caratteristiche fisiche dell'elemento, in particolare in relazione alla sua suddivisione: particelle più piccole comportano una quantità di calore inferiore richiesta per infiammarsi, parti più grandi richiedono invece una maggiore quantità di calore e durata di esposizione per far avvenire la reazione.

Il fenomeno dell'incendio è comunque la risultante di 3 fattori che devono essere contemporaneamente presenti e che possono essere schematizzati nel cosiddetto triangolo del fuoco:



- Combustibile: il materiale in grado di combinarsi chimicamente con l'ossigeno producendo energia termica.
- Comburente: sostanza che alimenta la combustione permettendo l'ossidazione del combustibile, generalmente l'aria.
- Innesco: fonte di calore sufficiente a dare avvio alla combustione.

Figura 5-12: Triangolo del fuoco

L'interruzione del triangolo del fuoco comporta lo spegnimento dell'incendio.

La pericolosità degli incendi è legata a ciò che viene prodotto da fuoco che non si riduce al solo calore ed è particolarmente importante indagare tali effetti; si distinguono:

- Fumo: costituito da particelle solide e/o liquide incombuste che determinano una condizione di pericolo per l'effetto di oscurazione della vista ed irritazione delle mucose; rappresenta l'ostacolo principale per l'esodo degli occupanti e le attività dei soccorritori.
- Gas di combustione: prodotti della combustione che restano allo stato gassoso anche dopo il raffreddamento a temperatura ambiente (convenzionalmente 15°C) e che hanno effetti nocivi o addirittura tossici sulle persone; i principali sono rispettivamente il biossido di carbonio (CO₂) e monossido di carbonio (CO), ma dipendono dalla combustione chimica dei combustibili e comburente coinvolti.
- Fiamme: emissione luminosa il cui colore in relazione alla temperatura raggiunta dai gas durante la combustione.
- Calore: l'energia termica rilasciata che comporta l'aumento di temperatura dei corpi esposti al suo effetto provocandone il danneggiamento ed eventualmente l'innesco.

I parametri utilizzati per la caratterizzazione della combustione al fine di questa tesi sono quelli forniti nella sezione M del Codice per il focolare predefinito:

The image shows two screenshots of a software interface for defining a combustion reaction. The top screenshot shows the 'Fuel' tab with the following settings:

- Description: Codice prevenzione incendi, Sezione M.2.7
- Reaction Type: Simple Chemistry
- Fuel Type: Simple Chemistry Model
- Fuel assumed to contain only C, O, H, and N.
- Composition:
 - Carbon atoms: 2,0
 - Hydrogen atoms: 4,0
 - Oxygen atoms: 1,0
 - Nitrogen atoms: 0,0

The bottom screenshot shows the 'Advanced' tab with the following settings:

- Energy Released:
 - Specify release per unit mass oxygen: 1,31E+4 kJ/kg
 - Specify heat of combustion: 0,0 kJ/kg
 - Radiative Fraction: 0,35
 - Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)
- CO Yield (Y_{CO}): 0,1
- Soot Yield (Y_s): 0,07
- HCN Yield (Y_{hcn}): 0,0
- Hydrogen Fraction: 0,1

Figura 5-13: Parametri di input nella reazione - "Edit Reaction"

La selezione degli scenari d'incendio è fortemente influenzata dall'obiettivo che il professionista antincendio intende raggiungere. Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere individuati gli incendi realisticamente ipotizzabili nelle condizioni di esercizio previste, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio, considerando sia gli effetti sulle strutture sia la salvaguardia e sicurezza degli occupanti ed addetti ai soccorsi. Nel presente caso studio avendo come obiettivo principale quello di studiare l'evoluzione di un incendio su una facciata di un edificio principalmente adibito ad uffici si è scelto come evento iniziatore un incendio localizzato al secondo piano e

che coinvolge una postazione di lavoro a ridosso di una finestra immaginando che si verifichi una fuoriuscita delle fiamme dall'apertura.

Avendo come obiettivo quello di valutare la propagazione delle fiamme dall'interno dell'edificio all'esterno attraverso un'apertura un aspetto il cui studio a priori può essere interessante è l'altezza che potrebbero raggiungere le fiamme; l'altezza di fiamma è definita come l'altezza al di sotto della quale la fiamma è presente per almeno il 50% del tempo. L'altezza di fiamma è legata al tasso di rilascio di calore ed una stima può essere effettuata attraverso la seguente relazione ("Handbook of fire protection engineering", 5th edition, SFPE/NFPA, 2016):

$$\frac{Z_f}{D} = f(\dot{Q}^*)$$

$$L_f = D \cdot (3,7 \cdot (\dot{Q}^*)^{\frac{2}{5}} - 1,02) = 5,37 \text{ m}$$

Dove:

- D=è il diametro equivalente alla base del fuoco pari a 2,18 m;
- \dot{Q}^* è il tasso di rilascio di calore adimensionalizzato. L'altezza di fiamma può quindi essere valutata in relazione alla quantità di moto del flusso di combustibile e agli effetti di galleggiamento dei gas dovuti alla gravità. Il numero di Froude (Fr) è il parametro che permette di rappresentare suddette grandezze.

$$\dot{Q}^* = \sqrt{Fr} = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{gD} D^2} = 0,86 [-]$$

Le varie simulazioni effettuate, considerando come evento iniziatore l'incendio di una postazione da lavoro, hanno portato a dedurre che tale evento da solo non è in grado di innescare un incendio sul rivestimento esterno dell'edificio in quanto la temperatura raggiunta dai fumi è inferiore a quella di ignizione del PIR. Considerando però un'altezza interpiano di 6,30 metri ed avendo calcolato l'altezza che possono raggiungere le fiamme nel caso di un incendio di questo tipo, è plausibile considerare che la diffusione del fuoco dall'interno all'esterno avvenga per contatto diretto delle fiamme che fuoriescono dalla finestra con la facciata esterna.

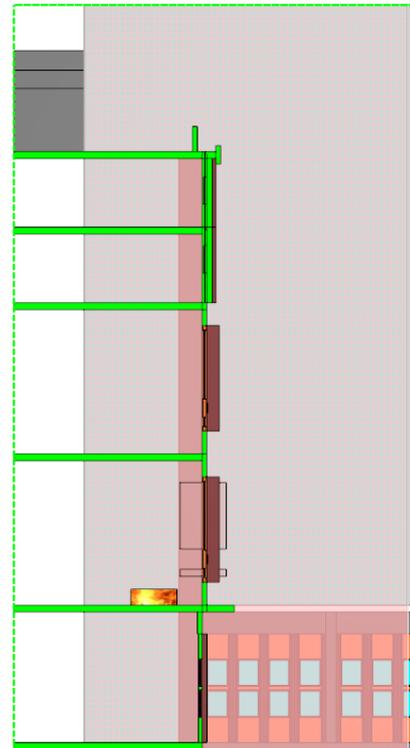
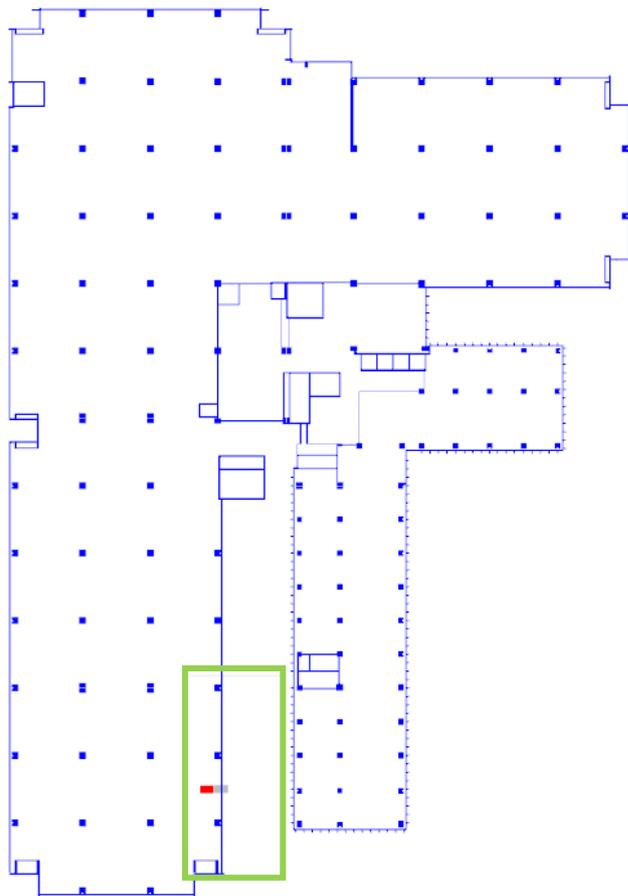
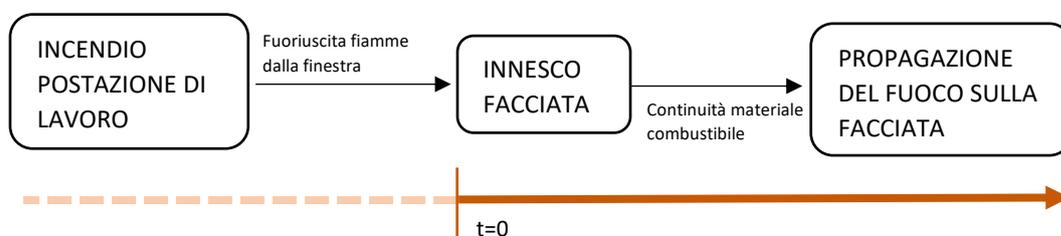


Figura 5-14: Planimetria piano secondo, con indicazione della facciata analizzata (verde) e posizione della workstation (rosso) Figura 5-15: Sezione del fabbricato - posizione della workstation

In seguito a questa considerazione si è quindi proceduto analizzando lo sviluppo dell'incendio sulla facciata assumendo che all'istante iniziale della simulazione la porzione di facciata soprastante la finestra posta in corrispondenza della postazione di lavoro sia già stata innescata.



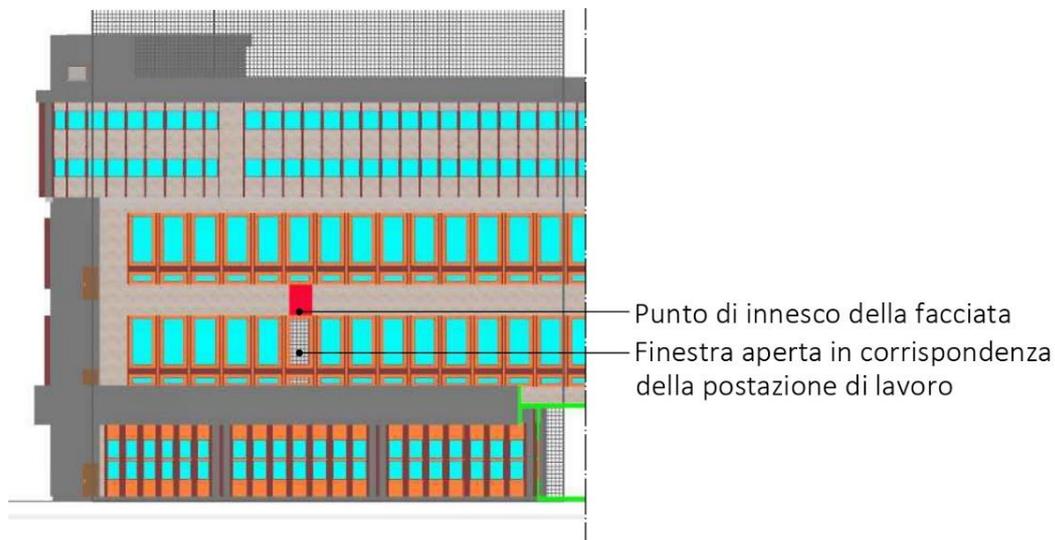


Figura 5-16: Rappresentazione all'istante $t=0$ s

Per esaminare in maniera esaustiva lo sviluppo di un incendio bisogna analizzare l'ambiente in cui si verifica tenendo in considerazione non solo i materiali coinvolti inizialmente in fase di innesco ma anche le caratteristiche e le quantità di quelli che potrebbero essere coinvolti successivamente; questo si fa andando a valutare:

- la temperatura dell'aria, dei fumi e delle pareti/solidi presenti nelle vicinanze;
- la temperatura di infiammabilità e/o di accensione;
- il potere calorifico: ovvero la quantità di calore sviluppata dalla combustione di una quantità unitaria di combustibile [MJ/kg];
- la temperatura di combustione: ossia la temperatura massima teorica che possono raggiungere i prodotti combustibili;
- la velocità di crescita della potenza termica;
- la durata complessiva dell'incendio;
- la geometria dell'ambiente, o nel caso specifico di questo studio della facciata: è importante valutare infatti la distanza da altri edifici o porzioni dello stesso, la presenza di eventuali sporgente, la posizione nonché la dimensione delle aperture.

Per sottolineare l'importanza di questi aspetti, essi verranno affrontati nel dettaglio nei capitoli successivi.

5.3.4. Materiali e Heat Release Rate

Per la valutazione della propagazione di un incendio su una facciata è necessario analizzare:

- la geometria della facciata;
- dimensione delle aperture per poter valutare la propagazione delle fiamme/calore dall'interno all'esterno e viceversa;
- materiali costitutivi della facciata ed eventualmente delle strutture portanti per avere una conoscenza generale sul carico d'incendio;



Figura 5-17: Prospetto della facciata analizzata con riferimento alla geometria delle aperture [cm]

Il parametro di input principale nei software di modellazione FDS a cui si fa riferimento per la simulazione dell'incendio è la curva HRR che descrive in maniera quantitativa l'andamento temporale della potenza termica rilasciata dall'incendio durante le diverse fasi di sviluppo (fase

iniziale, eventuale flashover, fase di stazionarietà e fase finale o di decadimento). Questo andamento in funzione del tempo è descritto dalla relazione seguente:

$$HRR_{(t)} = m_c \cdot (t) \cdot H$$

Dove m_c è la velocità di combustione [m/s] e H il potere calorifico [kJ/kg].

Il Codice individua quattro curve predefinite in relazione alla velocità caratteristica prevalente dell'incendio t_{α} ; a seconda dei casi studio esistono comunque in letteratura dati relativi a test sperimentali, una delle fonti più complete è l' "Handbook of fire protection engineering", 5th edition, SFPE/NFPA, 2016. Proprio da quest'ultimo, al fine di questa tesi, si è ricavata la curva HRR relativa all'incendio di una postazione di lavoro (in particolare si fa riferimento alla curva F, relativa ad una postazione di lavoro con arredamento moderno).

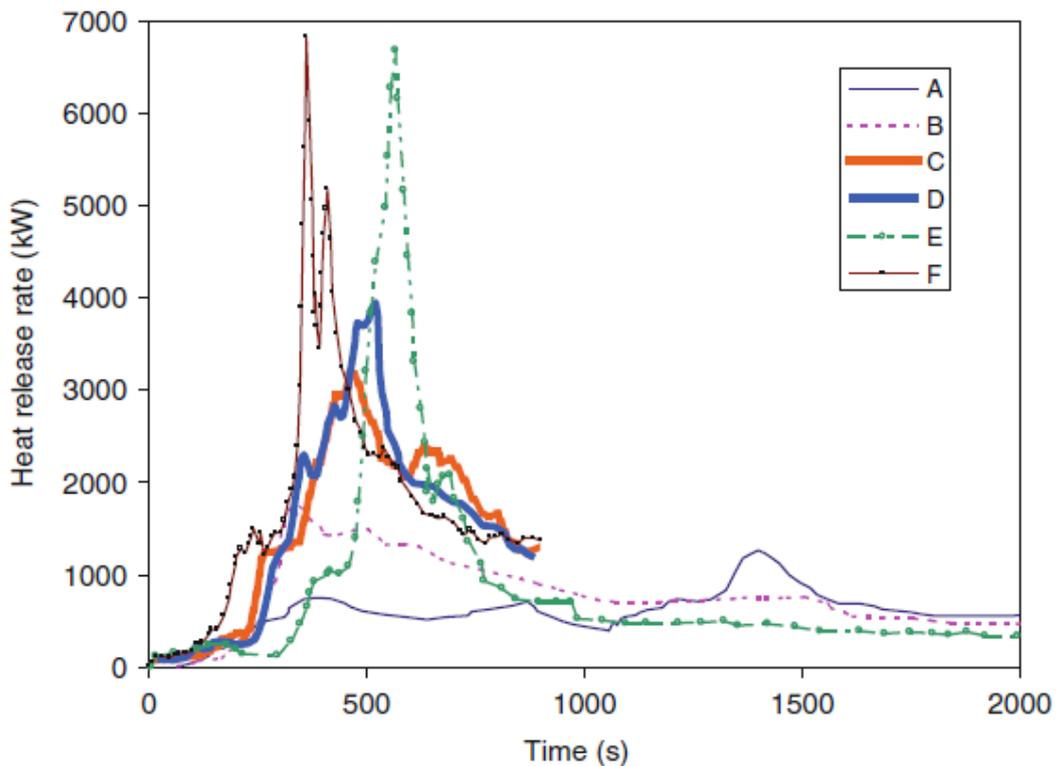


Figura 5-18: HRR per una postazione di lavoro - test NIST del 1988 e 1992

La curva è stata discretizzata per poterla inserire all'interno del software di simulazione ottenendo:

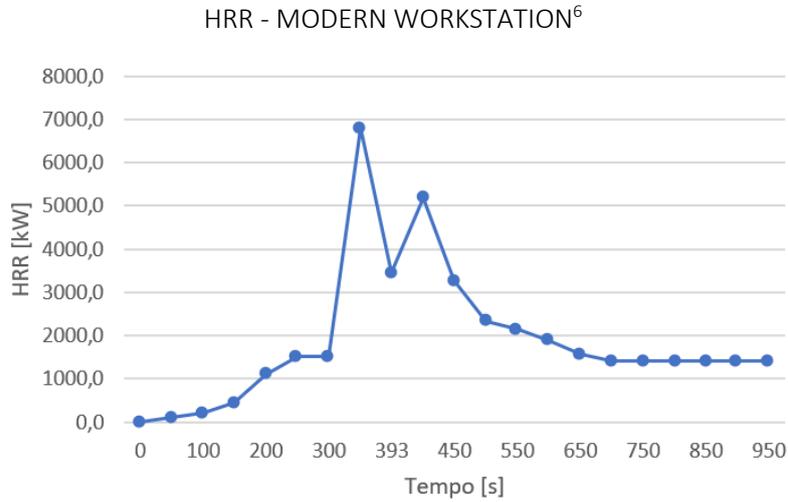


Figura 5-19: Curva HRR rielaborata relativa ad una postazione di lavoro

Per quanto riguarda invece gli eventi successivi all'innesco la curva HRR, la combustione coinvolge gli elementi della facciata e la diffusione è imputata alla presenza di materiale isolante in PIR, pertanto la reazione e la curva HRR considerata in questa fase saranno differenti. La curva inserita è quella relativa al PIR cioè del poliuretano espanso rigido ed è stata ricavata da test sperimentali eseguite in laboratorio:

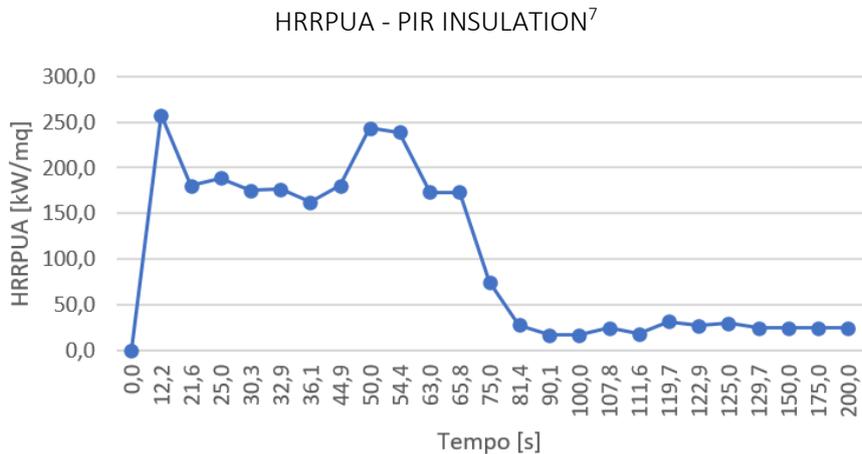


Figura 5-19: Curva HRRPUA rielaborata relativa al PIR

⁶ SFPE "Handbook of fire protection engineering", 5th edition, SFPE/NFPA, 2016.

⁷ Eleni ASIMAKOPOULOU, "Assessment of fire behaviour of polyisocyanurate (PIR) insulation foam", 2018.

Pyrosim permette di simulare il comportamento dei materiali andando a definire le proprietà di ciascuno di essi quali densità, calore specifico, conducibilità termica, emissività e coefficiente di assorbimento:

Material ID	Description	Density (kg/m³)	Specific Heat (kJ/(kg·K))	Conductivity (W/(m·K))	Emissivity	Absorption Coefficient (1/m)
CONCRETE	NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation	2200,0	0,88	1,8	0,9	5,0E+4
ALUMINIUM6060		2700,0	0,92	175,0	0,03	5,0E+4
GLASS		2579,0	0,84	1,0	0,89	5,0E+4
PIR		34,0	1,5	0,022	0,9	5,0E+4

Figura 5-21: Proprietà materiali

Spesso gli oggetti reali che vengono coinvolti in un incendio non sono costituiti da un unico materiale ma piuttosto da una stratificazione di essi; per far fronte a questa necessità di rappresentazione Pyrosim permette di definire per gli oggetti coinvolti nella simulazione delle superfici (“*Surfaces*”); di default a tutti gli elementi importati o realizzati nel modello FDS vengono assegnate le proprietà di inerte, cioè aventi superfici che rimangono fisse alla temperatura ambiente e non vi è trasferimento di calore da i gas sviluppatasi durante l’incendio e le superfici in questione. Per ricreare un ambiente il più verosimile possibile è necessario definire delle superfici stratificate (“*layered surfaces*”) e nel caso oggetto di studio le Surfaces che entrano in gioco sulla facciata sono:

- Pannelli in alluminio
- Finestre

- Facciata esterna
- Facciata interna
- Facciata interna – Burn immediately

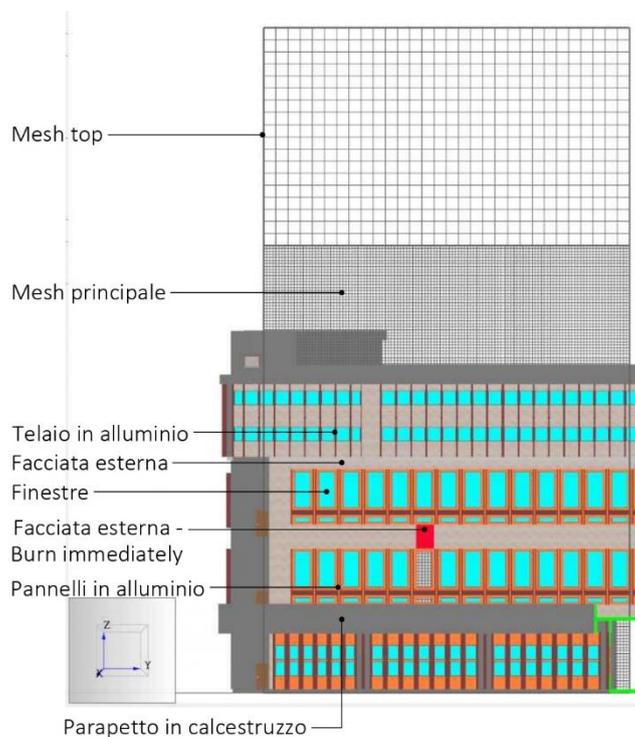


Figura 5-22: Distinzione Surfaces nel modello FDS

La distinzione tra facciata interna ed esterna è dovuta al fatto che la muratura non è simmetrica e presenta una stratigrafia differente se analizzata a partire dalla faccia esposta o da quella degli ambienti interni, l'unica differenza comunque consiste nell'inversione degli strati.

Layered surfaces definite nel modello	Materiali (sp. mm)	Backing	Reaction
Pannelli in alluminio	ALUMINIUM6060 (2 mm)	Air gap (void)	Governed by material
Finestre	GLASS (2 mm)	Air gap (void)	Governed by material
Facciata esterna	CONCRETE (120 mm) PIR (80 mm) INTONACO (10 mm)	Exposed	Governed by material
Facciata interna	INTONACO (10 mm) PIR (80 mm) CONCRETE (120 mm)	Exposed	Governed by material
Facciata esterna – Burn immediately	CONCRETE (120 mm) PIR (80 mm) INTONACO (10 mm)	Exposed	Governed manually

La voce backing è relativa a come la superficie si interfaccia con l'ambiente circostante. Questa voce risulta utile quando si vuole differenziare le temperature a cui è soggetta ad esempio, come nel caso studio, la parete in corrispondenza dell'interfaccia con i locali interni e dell'interfaccia con l'ambiente esterno. La superficie più esterna sarà quindi esposta alle condizioni ambientali così come definite nel capitolo seguente "5.3.5. Condizioni al contorno" mentre le superfici interne saranno esposte alla temperatura degli ambienti interni fissata inizialmente a 23°C (backing = air gap); si può anche utilizzare l'impostazione backing = "exposed" ed in questo caso FDS calcola la conduzione del calore attraverso l'intero spessore della parete ed utilizza la temperatura della fase gassosa ed il flusso di calore sulle superfici interne ed esterne per definire le condizioni al contorno in ogni istante.

Il software permette di controllare il comportamento del materiale durante l'evoluzione dell'incendio attraverso due modalità:

1. Governed manually
2. Governed by material

Nel primo caso l'utente, oltre a definire le condizioni al contorno, la stratigrafia della parete (spessori e materiali), quali di questi strati partecipino all'incendio può definire i valori di energia rilasciata per unità di superficie che brucia (HRRPUA) e come questa vari nel tempo. Può inoltre indicare la temperatura di ignizione, in modo da simulare l'innesco della stessa anche se non a diretto contatto con le fiamme, ma dovuto ad esempio all'esposizione a fumi prodotti da un incendio sviluppatosi nelle vicinanze aventi temperatura sufficientemente elevata (ovvero superiore a quella di ignizione del materiale).

Nel secondo caso invece vengono inseriti i parametri relativi alle condizioni al contorno e la stratigrafia dell'elemento, ma il comportamento al fuoco è definito dalle proprietà dei singoli materiali da cui è composta.

Nel caso studio la prima modalità è stata applicata ad un pannello 120x200 cm, il primo ad innescarsi come conseguenza dell'incendio sviluppatosi all'interno, coinvolgendo una postazione da lavoro, per il cortocircuito di un PC.

Si riportano di seguito i parametri di input per la definizione della reazione dei materiali costitutivi della facciata:

- Facciata esterna – Burn immediatamente: descrive il comportamento del pannello di innesco. È definita la curva HRRPUA all'istante $t = 0$ s inizia a bruciare.

The screenshot shows a software interface for defining fire reaction parameters. The 'Surface ID' is 'Facciata esterna BURN IMMEDIATELY' and the 'Description' is 'Primo pannello innescato'. The 'Color' is a light orange and the 'Appearance' is a red square. The 'Surface Type' is 'Layered'. The 'Reaction' tab is active, showing 'Governed Manually' selected. Under 'Heat Release', 'Heat Release Rate Per Area (HRRPUA)' is set to 257,6 kW/m². Under 'Ignition', 'Burn Immediately' is selected. The 'Allow obstruction to burn away' checkbox is checked.

Figura 5-23: Parametri che governano la reazione del pannello di innesco

- Facciata esterna: equivalente alla facciata interna. La curva HRRPUA inserita è equivalente a quella del caso sopradescritto ma in questo caso i pannelli vengono innescati se esposti a fumi di temperature superiori a 300°C.

The screenshot shows a software interface for defining fire reaction parameters. The 'Surface ID' is 'Facciata esterna' and the 'Description' is empty. The 'Color' is a light green and the 'Appearance' is a brown square. The 'Surface Type' is 'Layered'. The 'Reaction' tab is active, showing 'Governed Manually' selected. Under 'Heat Release', 'Heat Release Rate Per Area (HRRPUA)' is set to 257,6 kW/m². Under 'Ignition', 'Ignite at' is selected with a value of 300,0 °C. The 'Allow obstruction to burn away' checkbox is checked.

Figura 20: Parametri che governano la reazione della facciata

- Pannelli in alluminio: la reazione è definita sulla base delle caratteristiche del materiale costitutivo (ALUMINIUM 6060, così come definito in figura 5-21).

Surface ID: Pannello solido esterno P2/P4
 Description:
 Color: [Orange] Appearance: [Orange]
 Surface Type: Layered

Material Layers		Surface Props		Thermal
Geometry	Reaction	Species Injection	Particle Injection	Advanced
<input checked="" type="radio"/> Governed by Material <input type="radio"/> Governed Manually				
Heat Release				
<input checked="" type="radio"/> Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 1000,0 kW/m ²		<input type="radio"/> Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m ² ·s)		
Ramp-Up Time: Default		1,0 s		
Extinguishing Coefficient:		0,0 m ² /(kg·s)		
Ignition				
<input checked="" type="radio"/> Burn Immediately <input type="radio"/> Ignite at: 4000,0 °C <input type="checkbox"/> Heat of Vaporization: 0,0 kJ/kg				
<input type="checkbox"/> Allow obstruction to burn away				

Figura 5-25: Parametri che governano la reazione dei pannelli in alluminio

- Finestre: la reazione è definita sulla base delle caratteristiche del materiale costitutivo (GLASS, così come definito in figura 5-21).

Surface ID: Vetro pann esterno P2/P4
 Description:
 Color: [Cyan] Appearance: [Cyan]
 Surface Type: Layered

Material Layers		Surface Props		Thermal
Geometry	Reaction	Species Injection	Particle Injection	Advanced
<input checked="" type="radio"/> Governed by Material <input type="radio"/> Governed Manually				
Heat Release				
<input checked="" type="radio"/> Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 1000,0 kW/m ²		<input type="radio"/> Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m ² ·s)		
Ramp-Up Time: Default		1,0 s		
Extinguishing Coefficient:		0,0 m ² /(kg·s)		
Ignition				
<input checked="" type="radio"/> Burn Immediately <input type="radio"/> Ignite at: 4000,0 °C <input type="checkbox"/> Heat of Vaporization: 0,0 kJ/kg				
<input type="checkbox"/> Allow obstruction to burn away				

Figura 5-26: Parametri che governano la reazione dei vetri delle finestre

5.3.5. Condizioni al contorno

Nella modellazione di un incendio è importante valutare le condizioni al contorno che possono influenzare la combustione e la propagazione delle fiamme libere come la temperatura dell'aria ambiente, la concentrazione di ossigeno e anidride carbonica, l'umidità relativa e nel caso di un incendio all'aperto bisogna tenere conto del vento.

La potenza termica e la durata dell'incendio dipendo infatti in modo stretto dal connubio tra comburente disponibile e combustibile. L'aria gioca un ruolo fondamentale per lo sviluppo dell'incendio e la sua velocità in particolare influisce sulla propagazione dei fumi e delle fiamme libere.

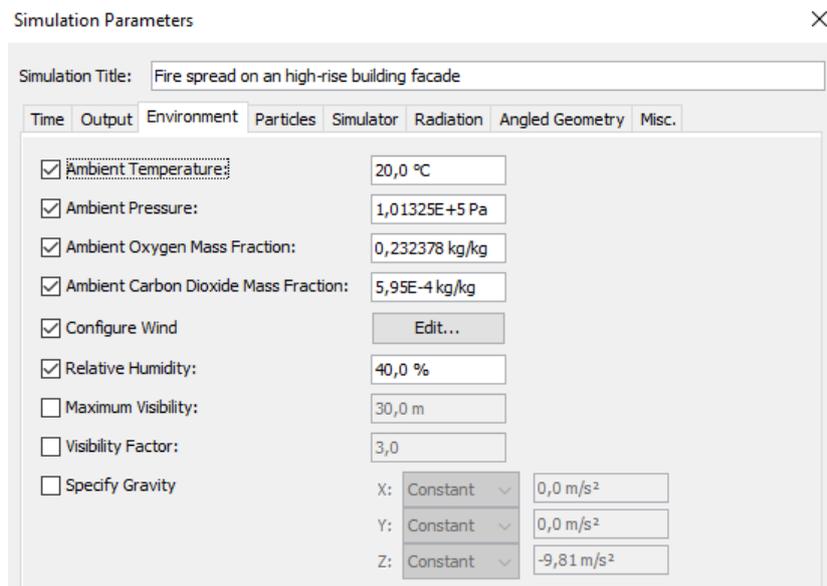
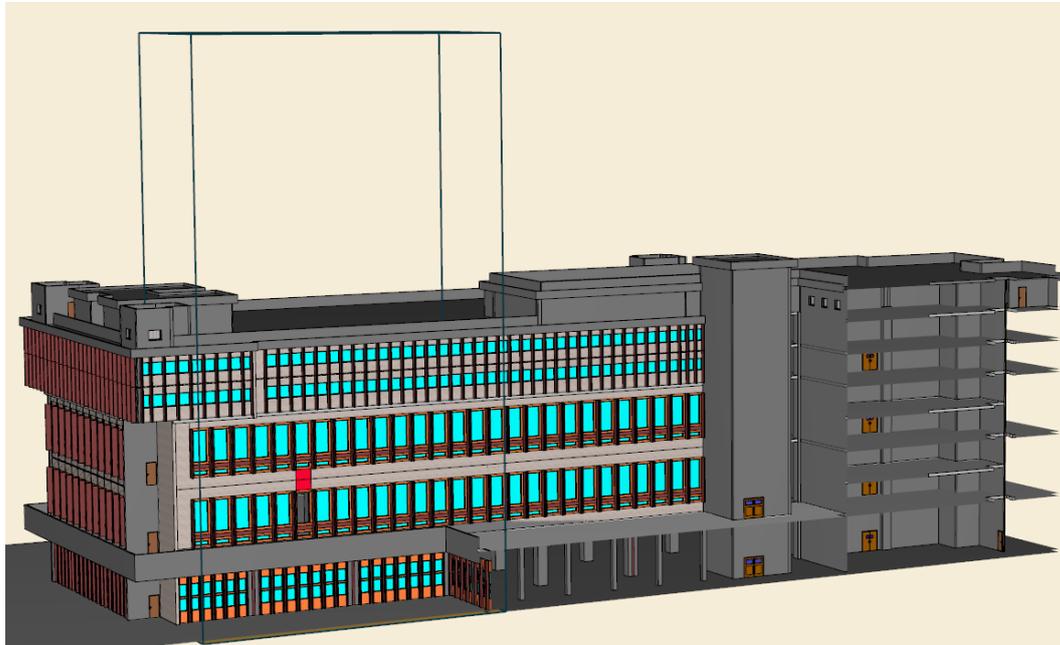


Figura 5-27: Parametri ambientali

Si noti che è pratica comune considerare le condizioni di vento costante nonostante le raffiche di vento possano avere un impatto nel corso dell'incendio, nel presente caso studio si è considerata una velocità pari a 5 km/h in relazione a dati statici raccolti per la zona di Genova.

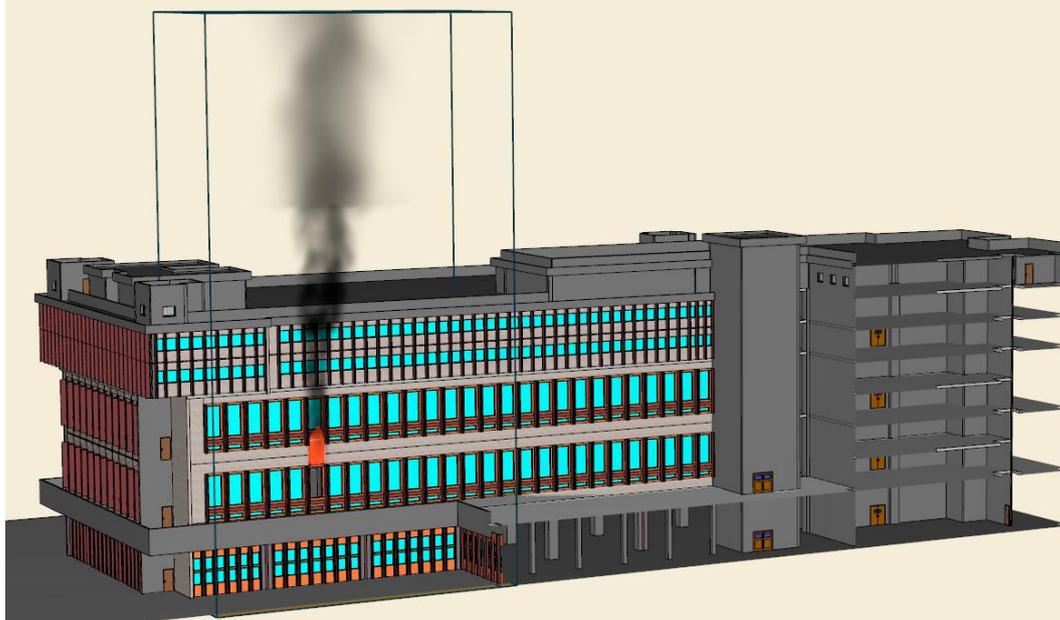
5.3.6. Risultati

Istante $t = 0$ s - innesco del primo pannello della facciata



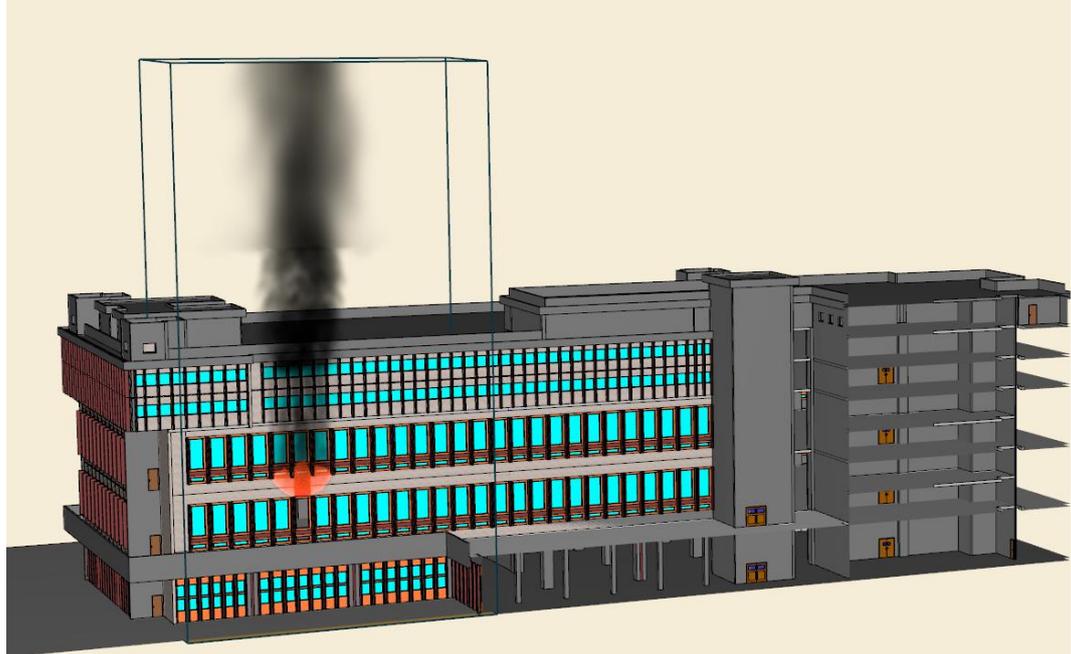
Il pannello soprastante la finestra aperta viene innescato dal contatto diretto con le fiamme.

Istante $t = 50$ s



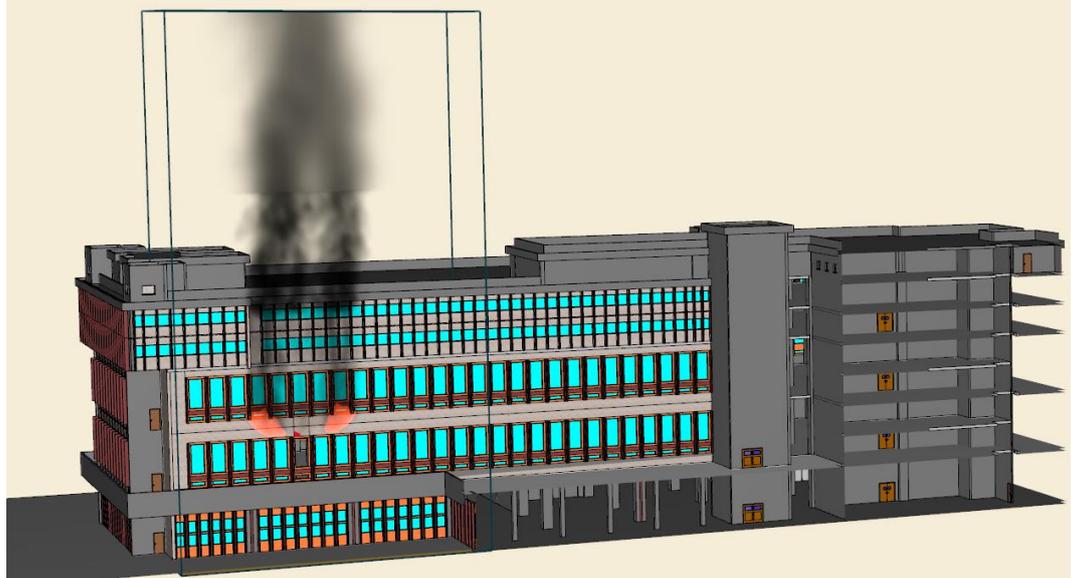
Per una prima fase l'incendio rimane localizzato sul singolo pannello.

Instante t = 90 s



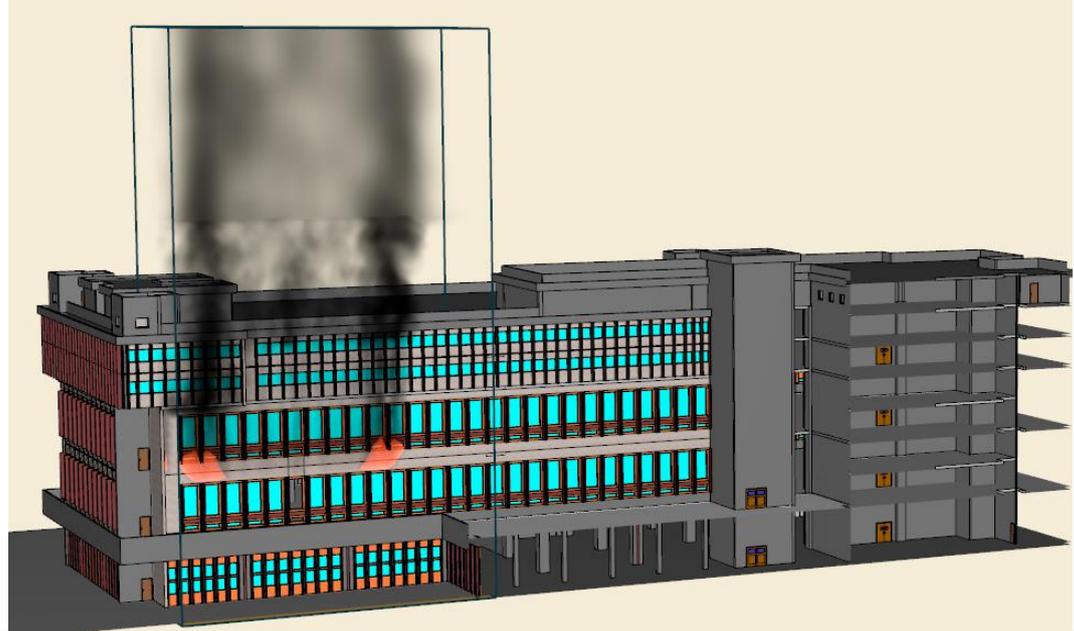
Le fiamme iniziano ad estendersi ai pannelli di facciata adiacenti

Instante t = 190 s



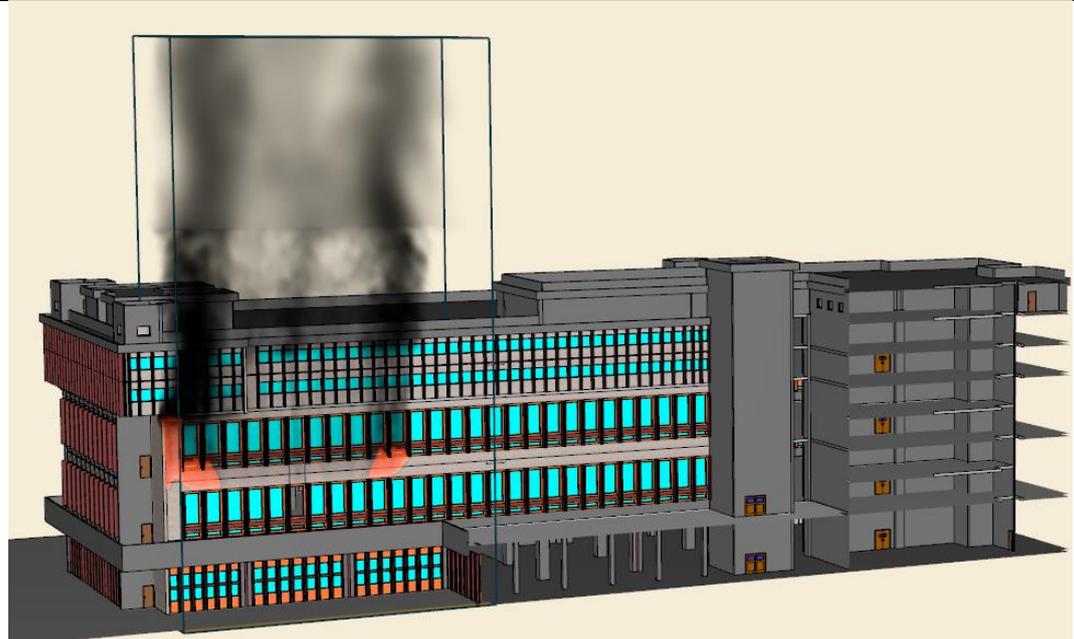
Si evidenzia il fatto che le fiamme si propagano in direzione orizzontale ma non comportano l'innesco di pannelli a quota superiore. Questo è dovuto al fatto che i pannelli posti a chiusura delle aperture sono in alluminio (e quindi incombustibili) e la distanza tra la fascia in muratura isolata inferiore e superiore è di 4,60 m.

Istante t = 330 s



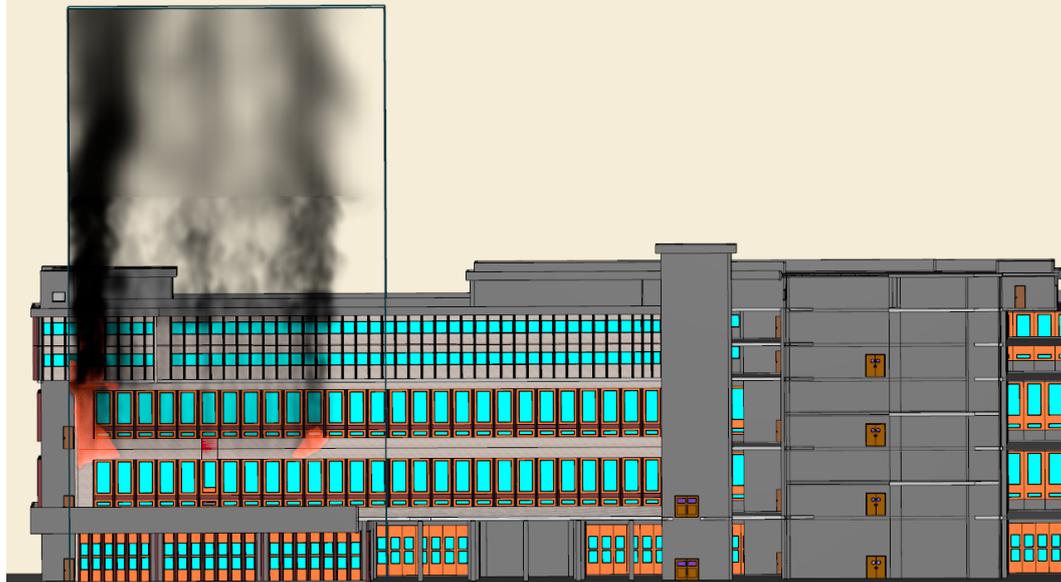
L'incendio continua a propagarsi solamente in direzione orizzontale sulla facciata per continuità di materiale.

Istante t = 410 s



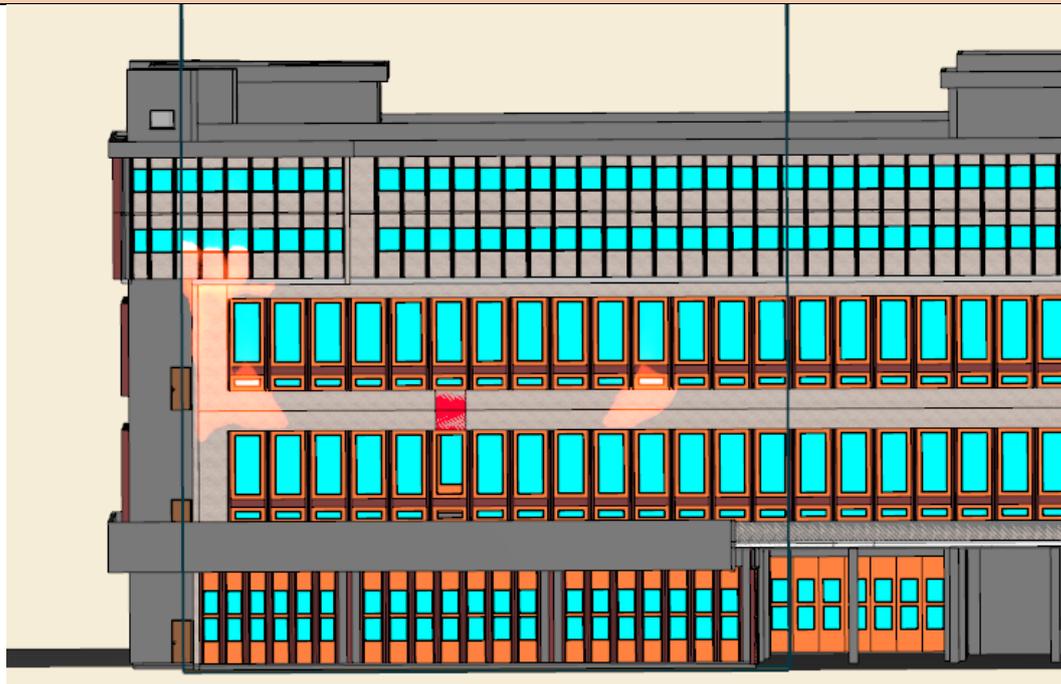
L'incendio, raggiunta l'estremità sinistra della facciata (in riferimento all'immagine soprastante), si propaga velocemente verso l'alto lungo la fascia laterale in muratura isolata.

Istante t = 480 s



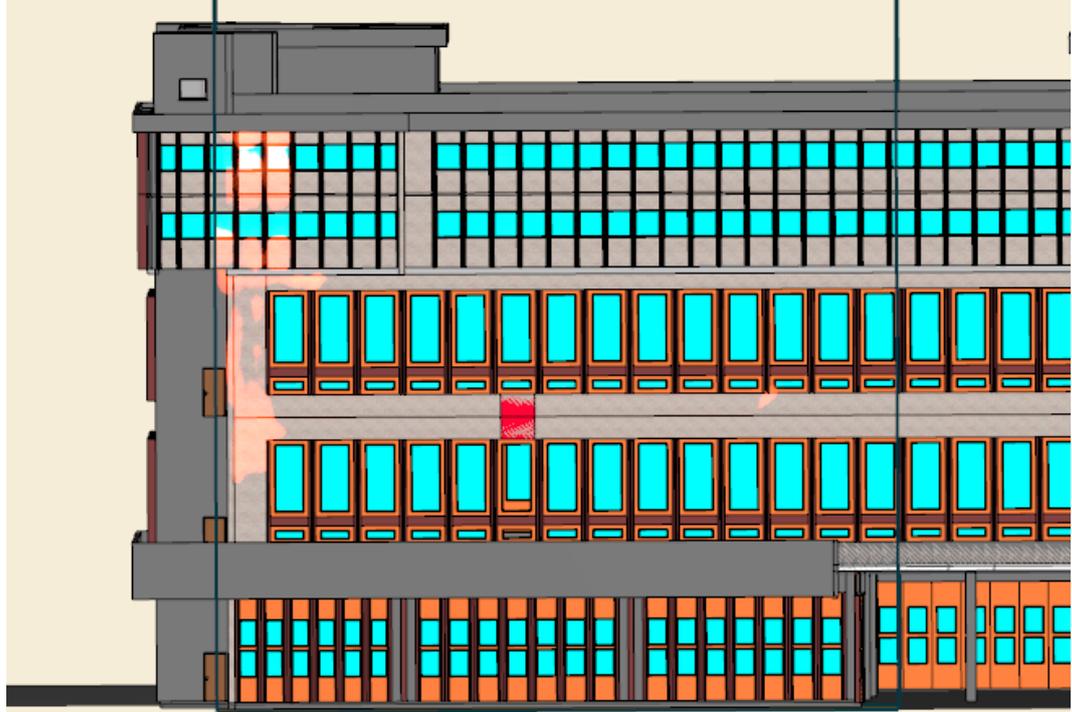
A destra (in riferimento all'immagine soprastante) le fiamme continuano ad estendersi orizzontalmente, a sinistra interrano tutta la fascia laterale e si estendono ai piani superiori.

Istante t = 520 s



Si noti che dalla visualizzazione è stata nascosta la visualizzazione del fumo prodotto dall'incendio per meglio mettere in luce il percorso delle fiamme.
L'incendio coinvolge la fascia inferiore della facciata in corrispondenza del piano sesto.

Istante $t = 680$ s



Dopo quasi 11 minuti e mezzo dall'innesco del primo pannello isolante l'incendio raggiunge la sommità dell'edificio coinvolgendo totalmente tre moduli di facciata. In questo caso la propagazione delle fiamme orizzontalmente è contrastata dalla presenza di montanti in alluminio che sporgono rispetto il filo esterno della parete di 40 cm e di larghezza 17 cm; essendo la somma di queste dimensioni ($40 + 17 + 40 = 97$ cm) circa un metro questi montanti possono essere considerati come una fascia di separazione.

Le massime temperature raggiunte, in corrispondenza delle fiamme ad una distanza di 75 cm dal filo esterno della facciata risulta essere di 220°C.

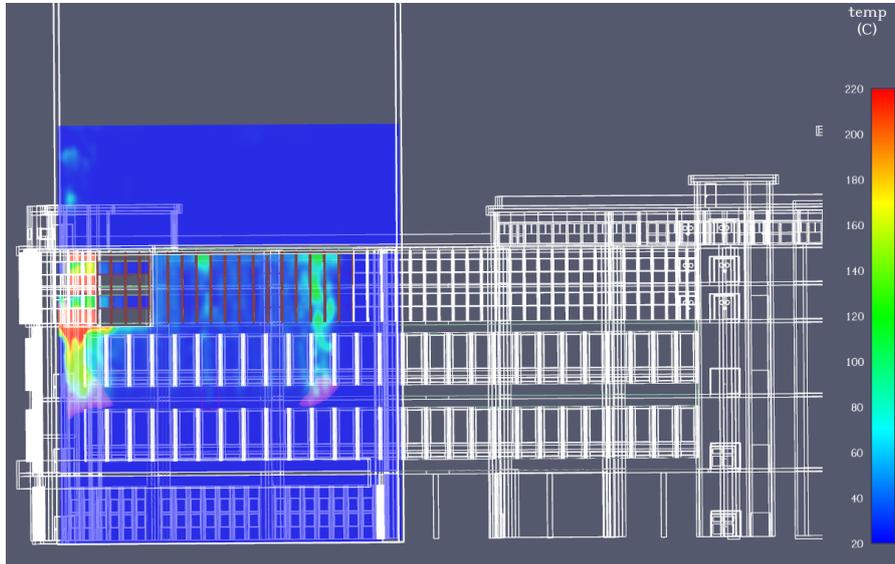


Figura 5-28: Temperature registrate all'istante $t=520$ s

La curva HRR associata all'incendio sviluppatosi sulla facciata, ricavata da Pyrosim, risulta essere:

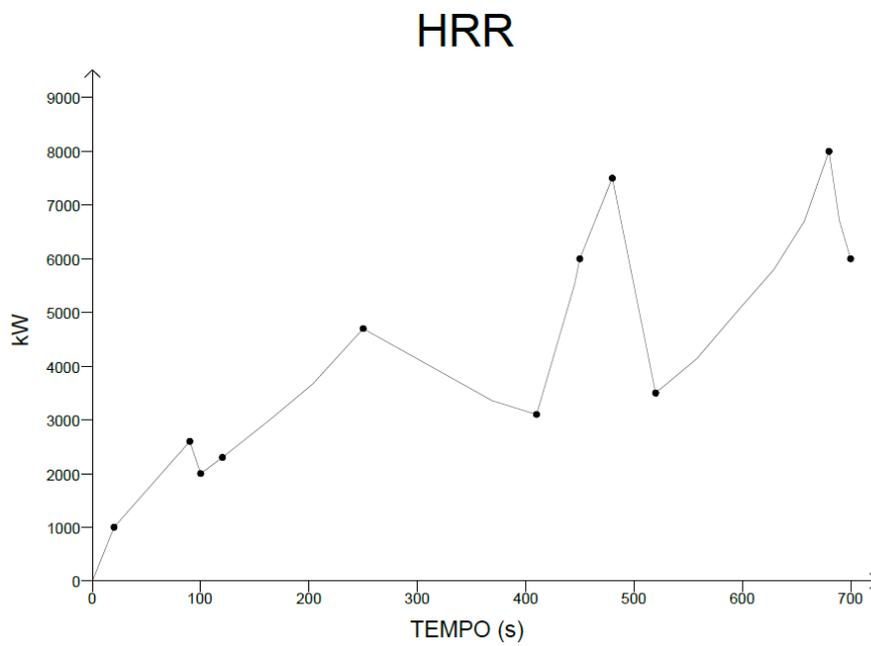


Figura 5-29: Curva HRR ricavata dall'analisi su Pyrosim

6. Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti dall'analisi svolta mediante Pyrosim mettono in luce che:

1. Le fiamme si propagano principalmente in direzione orizzontale: questo dimostra che la distanza tra le fasce in muratura al di sopra e al di sotto degli infissi esterni dovrebbe essere sufficiente a limitare la propagazione verticale delle fiamme.

La propagazione delle fiamme dal piano secondo al piano quarto è implicata alla presenza di continuità di materiale isolante in una fascia verticale posta allo spigolo della facciata; l'inserimento di una fascia tagliafuoco in corrispondenza di questo punto potrebbe intervenire nella limitazione della propagazione.

2. I profili in alluminio che suddividono i moduli di facciata ai piani sesto e settimo contribuiscono anch'essi a limitare la propagazione, ma in questo caso in direzione orizzontale, delle fiamme.
3. Le fiamme, originatesi a 5,60 m dalla quota del piano secondo raggiungono la sommità della facciata in un tempo pari a circa 11 minuti e mezzo.

Facendo riferimento all'evento verificatosi alla Grenfell Tower, in cui le fiamme si sono propagate dal piano quarto alla sommità dell'edificio (ventiquattresimo piano) in un arco temporale di circa 20 minuti, si può notare una coerenza tra i due sviluppi.

4. Le temperature raggiunte nella fase di sviluppo dell'incendio non superano i 220°C; essendo la temperatura di ignizione dell'isolante utilizzato nella realizzazione del cappotto esterno pari a circa 300°C, secondo l'analisi condotta in questa tesi, i fumi prodotti dall'incendio non sarebbero quindi in grado di innescare pannelli di facciata non attigui.

Andando a considerare i risultati ottenuti dall'analisi dell'incendio avvenuto alla Grenfell Tower, tenendo conto che anche in quel caso l'isolante presente nel rivestimento esterno era il PIR, e che nello specifico riportava una stima delle temperature raggiunte dai fumi comprese tra i 110°C e i 220°C, i risultati ottenuti dall'analisi oggetto di questa tesi risulterebbero in linea.

In conclusione, nonostante i risultati ottenuti dall'analisi svolta in questo lavoro di tesi, possano per certi aspetti essere confrontabili con un evento affine realmente verificatosi come quello

della Grenfell Tower, una validazione sperimentale del modello realizzato risulta altamente improbabile; il modello da realizzare in quel caso, per simulare il più possibile la realtà, dovrebbe tenere conto del quantitativo di combustibile presente all'interno dell'edificio in quanto, trattandosi di ambienti adibiti ad uffici, magazzini e laboratori il carico d'incendio sarebbe rilevante per la propagazione delle fiamme dall'esterno all'interno e a quel punto in tutti gli ambienti interni.

Altro aspetto che potrebbe essere implementato è la caratterizzazione chimica dell'incendio: in questo caso infatti è stata utilizzata quella proposta dal Codice di Prevenzione Incendi, ma andando ad adottare quella relativa alla combustione del PIR si otterrebbero risultati più veritieri.

Ancora, un ulteriore approfondimento potrebbe riguardare le condizioni al contorno, andando a considerare diverse condizioni metereologiche, come la presenza di un vento che spira a velocità più o meno elevate considerando che il contesto in cui si trova il fabbricato è quello di una città sul mare ed il vento molto variabile.

Ulteriore analisi di approfondimento potrebbe essere quella sviluppata andando a considerare la presenza ed intervento di un sistema di spegnimento automatico, quantificando poi gli eventuali effetti migliorativi a cui porterebbe tale intervento.

Infine potrebbe essere interessante l'estensione di questa analisi anche al blocco del fabbricato situato a Sud-Est, dove la facciata è per tutti gli 11 piani uguale a quella presente ai piani sesto e settimo del blocco Nord-Ovest per avere una valutazione complessiva dell'edificio.

7. Bibliografia e sitografia

- [1] The Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 report, volume 1, Ottobre 2019
- [2] The Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 report, volume 4, Ottobre 2019
- [3] G. Zaccarelli, L'incendio alla Grenfell Tower di Londra: cosa ci può insegnare una tragedia, 2018, <https://www.ingenio-web.it/19620-lincendio-alla-grenfell-tower-di-londra-cosa-ci-puo-insegnare-una-tragedia>
- [4] V. Vanzini, Incendi e normativa di sicurezza degli edifici di notevole altezza, 2021
- [X] E. Guillaume, V. Dréan, B. Girardin, F. Benameur, M. Koohkan, T. Fateh, Reconstruction of Grenfell Tower fire. Part 3—Numerical simulation of the Grenfell Tower disaster: Contribution to the understanding of the fire propagation and behaviour during the vertical fire spread, Novembre 2019, FAM Fire and Materials, Vol. 44, Issue 1
- [X] E. Guillaume, V. Dréan, B. Girardin, T. Fateh, Reconstruction of the Grenfell Tower fire – Part 4: Contribution to the understanding of fire propagation and behaviour during horizontal fire spread, Settembre 2020, FAM Fire and Materials, Vol. 44, Issue 8
- [X] A. Tosti, Ci sono Grenfell Tower in Italia? – Un approfondimento tecnico, Luglio 2017, http://www.archimede.ws/download/Grenfell_Tower.pdf
- [X] I. Kotthoff, J. Riemesch-Speer, Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA “Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems”, 2013, <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130902010>
- [X] E. Guillaume, V. Dréan, B. Girardin, F. Benameur, M. Koohkan, T. Fateh, Reconstruction of Grenfell Tower fire. Part 3—Numerical simulation of the Grenfell Tower disaster: Contribution to the understanding of the fire propagation and behaviour during the vertical fire spread, Novembre 2019, FAM Fire and Materials, Vol. 44, Issue 1
- [X] S. T. McKenna, N. Jones, G. Peek, K. Dickens, W. Pawelee, S. Oradei, S. Harris, A. Stee, T. R. Hull, Fire behaviour of modern façade materials – Understanding the Grenfell Tower fire, Dicembre 2018, Journal of Hazardous Materials
- [X] V. Vanzini, Sicurezza Antincendio Edifici Civili, 2019, Grafill Editore
- [X] E. S. Mazzucchelli, A. Lucchini, A. Stefanazzi, Fire safety issues in high-rise building façades, 2019, Technologies Engineering Materials Architecture, Vol.5 n. 1
- [X] M. Smolka, B. Messerschmidt, J. Scott e B. le Madec, Semi-natural test methods to evaluate fire safety of wall claddings, 2013
- [X] L. Mazziotti, Le norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione - il decreto M.I. 25 gennaio 2019, Novembre 2020, <https://www.ingenio-web.it/28388-norme-di->

sicurezza-antincendi-per-gli-edifici-di-civile-abitazione-cosa-cambia-con-il-dm-25-gennaio-2019

[X] I. Kotthoffa, J. Riemesch-Speer, Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA “Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems, 2019, MATEC Web of Conferences Vol. 9

[X] M. J. Rukavina, M. Carević, I. B. Pečur, Fire protection of façades - The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts, 2017, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

[X] F. Cosi, Facciate, coperture, chiusure d’ambito: lettura commentata della nuova RTV.13, che costituisce integrazione del Codice di Prevenzione Incendi, Giugno 2022, Antincendio, EPC Editore

[X] M. Malizia, La nuova regola tecnica verticale per gli edifici di civile abitazione. Confronto con le vecchie norme di sicurezza antincendi, Luglio 2022, Antincendio, EPC Editore

[X] Dipartimento dei vigili del fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile, Testo coordinato del D.M. 16 maggio 1987 - Norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione, Maggio 1987

[X] Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, D.M. 25 gennaio 2019 - Modifiche ed integrazioni all'allegato del decreto 16 maggio 1987, n. 246 concernente norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione

[X] Il Presidente della Repubblica, D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151

[X] Dipartimento dei vigili del fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile, Lettera Circolare n°5043 del 15/04/2013, Marzo 2013

[X] Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Testo coordinato dell'allegato I del DM 3 agosto 2015 - Codice di prevenzione incendi, Edizione in vigore dal 7 luglio 2022

[X] J. Hidalgo, J. L. Torero, S. Welch, Fire performance of charring closed-cell polymeric insulation materials: Polyisocyanurate and phenolic foam, Giugno 2018, FAM Fire and Materials, Vol. 42, Issue 4

[X] C. Barbera, A. Bascià, G. Di Salvo, A. Galfo, R. Lala, S. Lucidi, D. Maisano, G. Mancini, V. Puccia, F. Vorraro, Fire Safety Engineering: una applicazione, Giugno 2018, Istituto Superiore Antincendi – Roma

[X] L. Mazziotti, Incendi esterni delle facciate – il rischio di propagazione, Settembre 2016, DCPST Roma

[X] E. Asimakopoulou, Assessment of fire behaviour of polyisocyanurate (PIR) insulation foam enhanced with lamellar inorganic smart fillers, 2018, Journal of Physics: Conference Series, Volume 1107, Issue 3

[X] M. J. Hurley, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, 2016, Springer

[X] <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2030>

[Ultimo accesso: 26/07/22]

[X] <https://www.gov.uk/government/collections/approved-documents>

[Ultimo accesso: 20/04/22]

[X] <https://www.vigilfuoco.it/asp/home.aspx>

[Ultimo accesso: 25/08/22]

[X] <https://www.vigilfuoco.it/asp/ReturnDocument.aspx?IdDocumento=4993>

[Ultimo accesso: 25/08/22]

[X] https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/genova_italia_3176219

[Ultimo accesso: 25/08/22]

[X] https://en.wikibooks.org/wiki/Fire_Simulation_for_Engineers/FDS#Inside_FDS

[Ultimo accesso: 19/09/22]