POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dell'incendio avvenuto alla Grenfell Tower di Londra: simulazioni e verifiche di soluzioni progettuali

Relatore:
Prof. Roberto Vancetti
Ing. Emiliano Cereda

Candidato:
Maria D'Apolito

A.A 2018/2019

Abstract

The Height buildings are more important in a big metropolis, because they could give to the citizens the opportunity to have a high number of green areas. It is important for that to make sure about the safety of this building in material of the fire because inside, usually live a lot of people so it could be very dangerous for the human life.

My thesis is going to speak about the tragedy of the Grenfell Tower, a residential building into the heart of London. The fire started form the flat 16 on the 4th floor of the residential apartments because of the malfunction of the fridge into the kitchen.

Thanks to the inquiry about the accident we could find a lot of the building documents, videos and photos of the fire and evidence of the Tower occupants survive to the disaster where 72 peoples died. The study of this event was possible thanks to the use of the Fire Safety Engineering, which is an analysis tool that allows to study, through specific software and creation of FDS files, the fire phenomenon, simulating its development, propagation and effects on people, structures. Thanks to this software was possible to reconstruct the events of the Grenfell Tower in order to study the design or organizational solutions that could have prevented the spread of the fire and save human lives.

Introduzione

Al giorno d'oggi costruire in altezza è molto importante a causa del fenomeno di sovraffollamento delle metropoli che, anno dopo anno, cedono zone verdi per dare spazio a nuovi complessi residenziali, uffici e negozi. Ecco perché le costruzioni sviluppate in altezza sono un'esigenza di primaria importanza per l'ecosistema urbano.

Grazie alla costruzione di edifici di questo tipo è possibile sfruttare al massimo il suolo cittadino per restituire alle città aree verdi, molto importanti per l'assorbimento del carbonio contenuto nella CO2.

Questi edifici ospitano un'elevata concentrazione di persone al loro interno, quindi è molto importante affrontare il tema della salvaguardia della vita umana attraverso la previsione sia di piani di esodo dettagliati, in modo da formare gli occupanti in caso di emergenza incendio, sia un piano di intervento per facilitare l'intervento da parte dei soccorritori e fronteggiare velocemente un'emergenza.

Molto importante è anche l'utilizzo di materiali adeguati, sia per l'interno che per l'esterno, caratterizzati da specifiche proprietà di resistenza al fuoco per evitare l'estensione delle fiamme a tutto l'edificio e limitare le fiamme nell'intorno dell'origine dell'incendio.

Un esempio di grave incendio di questa tipologia di edificio è quello della Grenfell Tower a Londra avvenuto il 14 giugno 2017, che ha evidenziato maggiormente l'importanza della sicurezza antincendio all'interno degli edifici e ha messo in luce il ruolo principale che le facciate possono svolgere come vettore di propagazione del fuoco. L'incendio della Grenfell Tower è stato uno dei maggiori incendi degli ultimi decenni, causando 72 morti. La gravità dell'incendio della Grenfell Tower e le sue tragiche conseguenze sono in gran parte dovute alla rapida propagazione del fuoco in direzione verticale sulla facciata est della torre, prima di diffondersi

orizzontalmente attorno alla torre in entrambe le direzioni, in senso orario e antiorario, e la penetrazione del fuoco, attraverso le finestre, negli appartamenti sovrastanti.

Grazie all'inchiesta sul caso è stato possibile eseguire un'analisi delle prove fotografiche, video e documenti disponibili pubblicamente, per quantificare le caratteristiche dell'incendio della Grenfell Tower.

Prove video e fotografiche dimostrano infatti che l'incendio si è diffuso alla facciata esterna fuoriuscendo dalla finestra della cucina di un appartamento situato al quarto piano della facciata est della torre.

Dall'analisi di elaborati grafici analizzati all'interno del report di inchiesta è stato possibile eseguire prima di tutto una ricostruzione dell'edificio nelle condizioni antecedenti dell'incendio stesso e modellandolo attraverso apposito software. Analizzando la documentazione di foto e video si è passati alla modellazione dell'incendio basato su principali istanti di tempo caratteristici dell'evento. Infine, si analizzano le testimoniante raccolte nell'inchiesta e una raccolta tabellata di dati personali e l'ora di uscita degli occupanti presenti all'interno dell'edificio al momento dell'incendio. Questi dati sono stati fondamentali per ricostruire l'evento dal punto di vista del comportamento degli occupanti, permettendo una modellazione fedele alla realtà della modalità di esodo.

La FSE (Fire Safety Engineering) è uno strumento di analisi che permette di studiare, attraverso specifici software e creazione di file FDS, il fenomeno incendio, simulandone sviluppo, propagazione ed effetti su persone, strutture e beni secondo specifiche normative che ne regolano la procedura. Grazie a questo importante strumento è stato possibile ricostruire l'accaduto della Grenfell Tower per studiare infine delle soluzioni progettuali o organizzativi che avrebbero potuto evitare la propagazione dell'incendio all'intero edificio e salvare la vita di molti esseri umani.

Indice

1. Evento Genfell Tower 1

1.1 Normativa di riferimento 1

1.1.1 The Building Regulations 2010 – Fire Safety 1

1.1.2 Fire Safety Engineering 8

1.2 Indagini sull'incendio 17

1.3 Descrizione edificio residenziale 18

1.4 Ristrutturazione 20

1.4.1 Rivestimento involucro esterno 21

1.5 L'Incendio 23

1.5.1 Sviluppo dell'incendio 23

1.5.2 Cause dell'incendio 26

1.5.3 Criticità edificio 28

1.5.4 Intervento dei soccorritori 31

2. Individuazione eventi caratterizzanti 34

3. Modellazione 40

3.1 Modellazione 3D dell'edificio 40

3.2 Modellazione d'incendio 49

3.3 Modellazione esodo 60

3. Risultati 65

3.1 Simulazione 1 65

3.2 Simulazione 2 72

3.3 Simulazione 3 78

4. Analisi dell'evento e proposta delle soluzioni progettuali 83

5. Conclusioni e sviluppi futuri 87

Indice delle figure

Figura 1– The Building Regulations - Caratteristiche del sistema di esodo connesse con l'altezza del fabbricato 4
Figura 2– The Building Regulations - Modalità di classificazione delle superfici esterne 6
Figura 3– The Building Regulations - Previsione di ascensori antincendio 6
Figura 4– The Building Regulations - Componenti di un ascensore antincendio 7
Figura 5– D.M. 3 agosto 2015 - Fasi dell'incendio 14
Figura 6– D.M 3 agosto 2019 - Confronto tra ASET ed RSET 16
Figura 7– Grenfell Tower Inquiry - Individuazione posizione su mappa della Grenfell Tower 18
Figura 8- Nucleo centrale con blocco scala e ascensori 19
Figura 9– Grenfell Tower Inquiry - Rivestimento esterno facciata Grenfell Tower 20
Figura 10– Grenfell Tower Inquiry - Nuovo progetto di riqualificazione di Lancaster Green 21
Figura 11- Particolare costruttivo rivestimento esterno applicato in fase di ristrutturazione 22
Figura 12– Grenfell Tower Inquiry - Verso di propagazione delle fiamme 24
Figura 13– Grenfell Tower Inquiry - Propagazione incendio sulle quattro facciate 25
Figura 14– Grenfell Tower Inquiry - Propagazione dell'incendio nell'intercapedine di facciata 30
Figura 15– Grenfell Tower Inquiry - Stato della Grenfell Tower dopo lo spegnimento delle fiamme 33
Figura 16- Handbook - Curva HRR di un frigorifero 35
Figura 17- PyroSim - Posizionamento focolaio incendio sezione 35
Figura 18- PyroSim - Posizionamento focolaio incendio pianta 36
Figura 19 - Prove sperimentali - Curva HRR del Poliuretano (PE) 37
Figura 20 - PyroSim - Posizionamento focolaio 6° piano 37
Figura 21 - Excel - Curva HRR_PE 72
Figura 22 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 6° piano 73
Figura 23 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 9° piano 73
Figura 24 – Excel - Grafico andamento visibilità 74
Figura 25 – Excel - Grafico andamento FED 74
Figura 26 – Excel - Grafico andamento temperatura 75
Figura 27 – Excel - Grafico andamento irraggiamento 75
Figura 28 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 12° piano 78
Figura 29 – Excel - Grafico andamento visibilità 79
Figura 30 – Excel - Grafico andamento FED 79
Figura 31 – Excel - Grafico andamento temperatura 80
Figura 32 – Excel - Grafico andamento irraggiamento 80
Figura 33 - Patfinder – Propagazione fumo al 12° piano tramite la finestra e il nucleo centrale 81
Figura 34 - Patfinder – Diffusione dei fumi su tutto il 12° piano 81
Figura 35 - Patfinder – Risalita dei fumi tramite blocco scala 82
Figura 36 - Patfinder – Fuga parte degli occupanti ai piani superiori con vista wireframe 82
Figura 37 - D.M. 30 11 83 – Scala protetta con sistema di ventilazione per evacuazione di fumo 85
Figura 38 - Doppia scala e impianto sprinkler 85
Figura 39 - Compartimentazione nucleo centrale, scala protetta e ascensore antincendio in pianta 86
Figura 40 - Dezeen – Nuovo progetto monumento Grenfell Tower 88
Figura 41 - Dezeen – Vista parte vetrata in corrispondenza dell'appartamento 16 89
Figura 42- Dezeen – Terrazzo con giardino Grenfell Tower 90

Indice delle tabelle

Tabella 1 – The Building Regulations - Periodo minimo di resistenza al fuoco.....4
Tabella 2– The Building Regulations - Classificazione dei rivestimenti.....5
Tabella 3 - Excel - Cronistoria evento incendio.....26
Tabella 4 – The Building Regulations - Classificazione di reazione al fuoco.....29
Tabella 5 - D.M. 3 agosto 2015 - Classificazioni in gruppi di materiali per rivestimento e completamento.....29
Tabella 6 – Excel - Valori di tempo e HRR.....54
Tabella 8 – Excel - Valori di tempo e HRR.....57
Tabella 9 – Excel - Valori di CO2 e produzione di fumo del Poliuretano.....57

1. Evento Genfell Tower

1.1 Normativa di riferimento

1.1.1 The Building Regulations 2010 – Fire Safety

In Inghilterra i riferimenti per la Fire Safety nella costruzione degli edifici residenziali sono le Building Regulations 2010: "*HM Government. The Building Regulations 2010. Fire safety. Approved Document B Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses. London. DCLG, 2006 edition incorporating 2007, 2010 and 2013 amendments, Crown Copyright 2006.*"

Il volume 1 è riferito alle abitazioni, mentre il Volume 2 alle altre attività, tra le quali le torri residenziali. Ogni volta che deve essere costruito un nuovo edificio o vengono proposte modifiche a un locale esistente, sarà richiesta l'approvazione delle Building Regulations. Questa normativa è suddivisa in due volumi, il volume 1 è riferito alle abitazioni, il Volume 2 alle altre attività, tra le quali le torri residenziali perché si occupa appunto di edifici di altezza superiore ai 18 metri o abitazioni inusuali.

I piani proposti per i nuovi locali e quelli sottoposti a modifiche vengono generalmente inviati per l'approvazione al dipartimento locale di controllo dell'edificio dell'autorità o a un ispettore autorizzato. I piani proposti verranno quindi trasmessi al Servizio antincendio e salvataggio locale come statutario per la consultazione.

I nuovi edifici e le modifiche agli edifici esistenti dovranno soddisfare cinque requisiti generali in materia di sicurezza antincendio che sono descritti nella norma, questi sono:

B1 - Mezzi di avvertimento e fuga

L'edificio deve essere progettato e costruito in modo tale che vi siano disposizioni adeguate alla segnalazione tempestiva di incendi e mezzi adeguati di fuga in caso di incendio dall'edificio verso un luogo di sicurezza all'esterno dell'edificio in grado di essere utilizzato in modo sicuro ed efficace su tutto il materiale volte.

B2 - Diffusione del fuoco interna

Per inibire la propagazione del fuoco all'interno dell'edificio, i rivestimenti interni devono:

a) resistere adeguatamente alla propagazione della fiamma sulle loro superfici;
b) avere un tasso di rilascio di calore o un tasso di crescita del fuoco ragionevole nelle differenti circostanze.

In questo paragrafo per "rivestimenti interni" si intendono i materiali o i prodotti utilizzati per il rivestimento di pareti divisorie, soffitti o altre strutture interne.

B3 - Diffusione del fuoco interna (struttura)

L'edificio deve essere progettato e costruito in modo tale che, in caso di incendio, la sua stabilità venga mantenuta per un periodo ragionevole.

Una parete comune a due o più edifici deve essere progettata e costruita in modo tale da resistere adeguatamente alla propagazione del fuoco tra tali edifici. Ai fini del presente comma, una casa su una terrazza e una casa bifamiliare devono essere trattate come un edificio separato.

Ove ragionevolmente necessario per inibire la propagazione dell'incendio all'interno dell'edificio, devono essere adottate misure adeguate alla dimensione

e all'uso previsto dell'edificio, comprendendo una o entrambe le seguenti condizioni:

a) suddivisione dell'edificio con struttura resistente al fuoco;
b) installazione di adeguati sistemi automatici di soppressione dell'incendio.
c) L'edificio deve essere progettato e costruito in modo tale da impedire la diffusione invisibile di fuoco e fumo all'interno di spazi nascosti nella sua struttura e tessuto.

B4 - Diffusione del fuoco esterna

Le pareti esterne dell'edificio devono resistere adeguatamente alla propagazione del fuoco sulle pareti e da un edificio all'altro, tenendo conto dell'altezza, dell'uso e della posizione dell'edificio.

Il tetto dell'edificio deve resistere adeguatamente alla propagazione del fuoco sul tetto e da un edificio all'altro, tenendo conto dell'uso e della posizione dell'edificio.

B5 - Accesso e strutture per i vigili del fuoco

L'edificio deve essere progettato e costruito in modo da fornire strutture ragionevoli per assistere i vigili del fuoco nella protezione della vita.

All'interno del sito dell'edificio devono essere previste misure ragionevoli per consentire agli apparecchi antincendio di accedere all'edificio.

Alcuni tipi di locali dispongono anche di guide progettuali specifiche per le scuole e il Memorandum tecnico sanitario per gli ospedali.
Analizziamo brevemente le misure di sicurezza che bisognerebbe adottare nel caso di un fabbricato come la Grenfell Tower:

- Tutte le nuove costruzioni residenziali devono essere muniti di sistema di rivelazione incendi e allarme.

Le strutture portanti devono avere una certa resistenza al fuoco nello specifico devono essere siglati come R120, inoltre è obbligatorio l'impianto sprinkler per i

fabbricati con altezza dell'ultimo piano superiore a 30 m rispetto al piano terra, che sembra non presente nella Grenfell Tower.

Table A2 Minimum periods of fire resistance

Purpose group of building	Minimum periods of fire resistance (minutes) in a:					
	Basement storey [5] including floor over		Ground or upper storey			
	Depth (m) of a lowest basement		Height (m) of top floor above ground, in a building or separated part of a building			
	More than 10	Not more than 10	Not more than 5	Not more than 18	Not more than 30	More than 30
1. Residential:						
a. Block of flats						
– not sprinklered	90	60	30*	60**†	90**	Not permitted
– sprinklered	90	60	30*	60**†	90**	120**
b. Institutional	90	60	30*	60	90	120#
c. Other residential	90	60	30*	60	90	120#

Tabella 5 – The Building Regulations - Periodo minimo di resistenza al fuoco

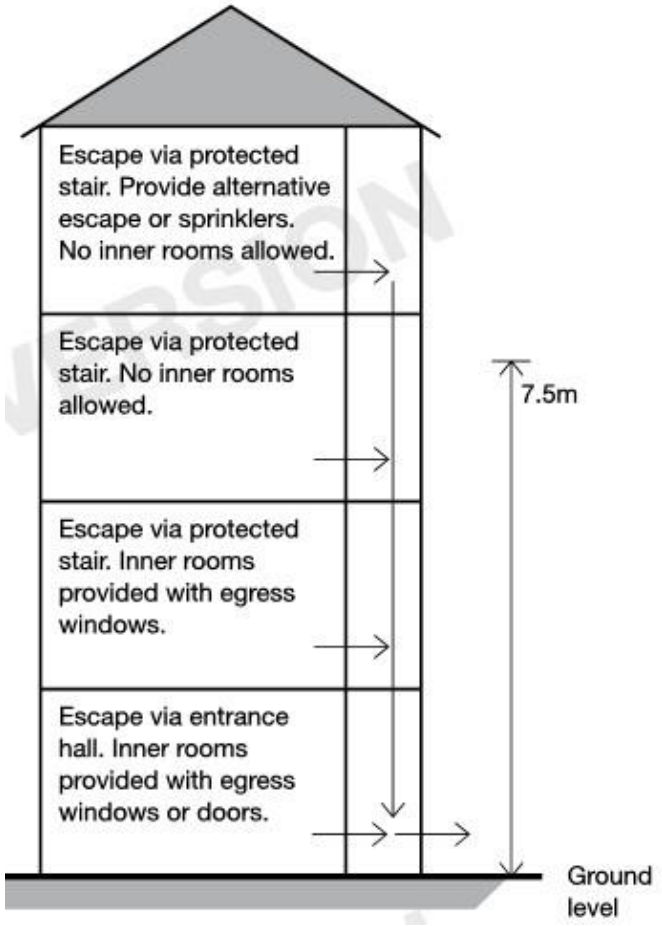


Figura 1– The Building Regulations - Caratteristiche del sistema di esodo connesse con l'altezza del fabbricato

- Le scale di esodo devono essere di tipo protetto e deve essere prevista una via di fuga alternativa al blocco scala oppure l'installazione dell'impianto sprinkler.
- Si definiscono de caratteristiche di resistenza al fuoco delle finiture all'interno dei locali, descritte all'interno della seguente tabella:

Table 1 Classification of linings

Location	National class (1)	European class (1)(3)(4)
Small rooms (2) of area not more than 4m²	3	D-s3, d2
Domestic garages of area not more than 40m²		
Other rooms (2) (including garages)	1	C-s3, d2
Circulation spaces within dwellinghouses		

Tabella 6– The Building Regulations - Classificazione dei rivestimenti

- Per le caratteristiche di reazione al fuoco delle superfici esterne sono ammessi materiali almeno B-s3,d2.
- Per gli edifici "alti" è necessario adottare misure per limitare la combustibilità delle facciate e segnalando la pericolosità delle intercapedini in facciata che possono favorire la propagazione dell'incendio.
- Per tutti i fabbricati di altezza superiore a 18m, i materiali isolanti presenti in facciata devono essere "a limitata combustibilità" che, con riferimento all'Appendice A, si traduce nell'euroclasse A2-s3,d2.

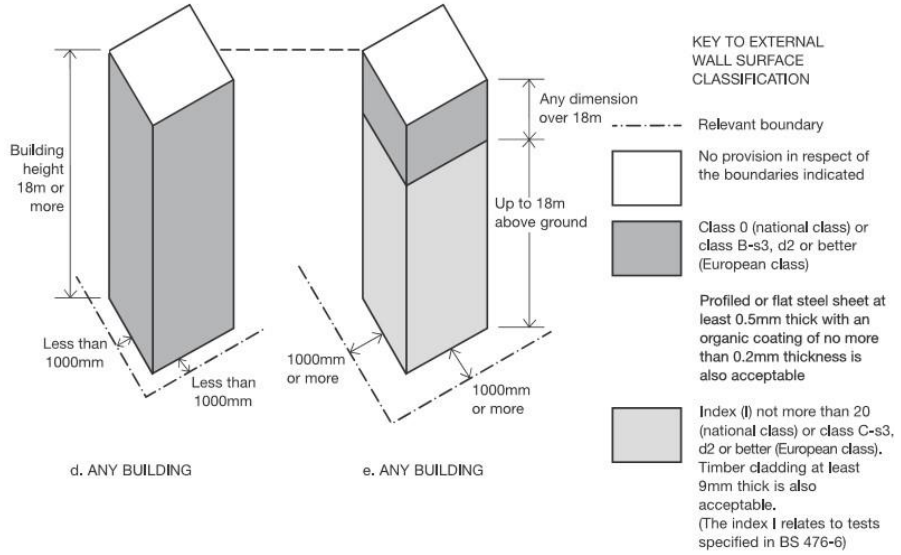


Figura 2– The Building Regulations - Modalità di classificazione delle superfici esterne

- Per quanto riguarda il tema dell'Operatività antincendio, esplicativa l'immagine sotto riportata, per l'accesso dei soccorritori ai piani superiori alla quota di 18m è richiesta la scala a prova di fumo e l'ascensore antincendio.

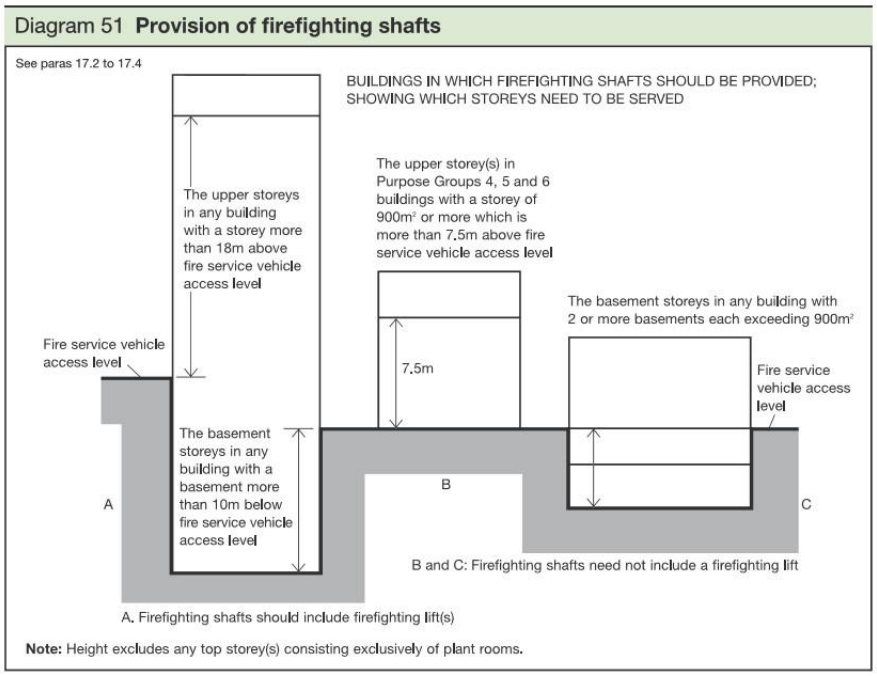


Figura 3– The Building Regulations - Previsione di ascensori antincendio

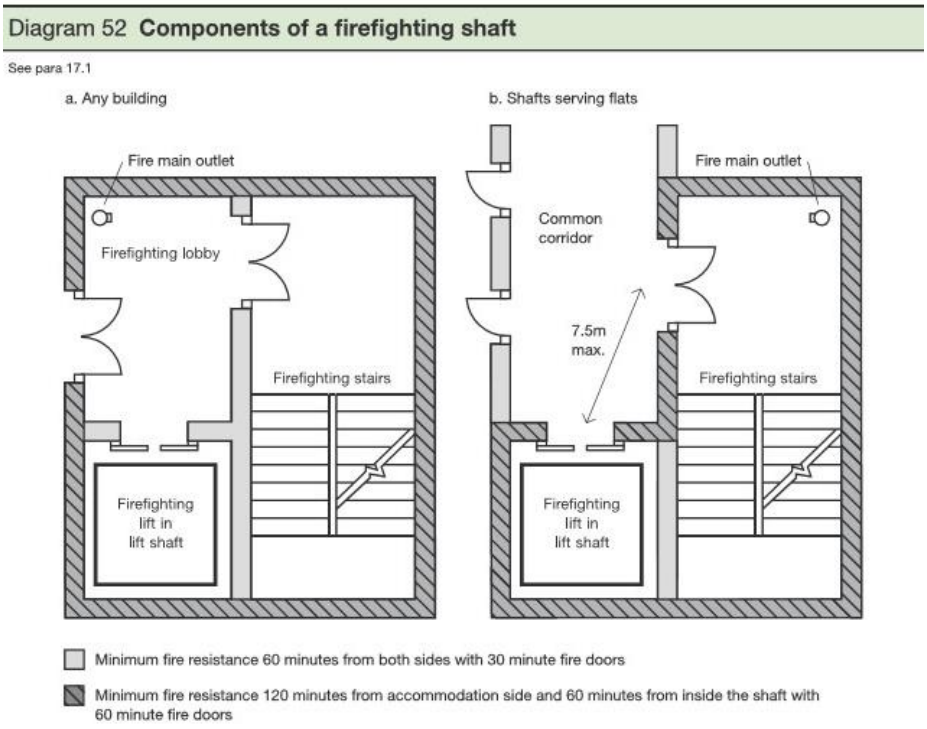


Figura 4– The Building Regulations - Componenti di un ascensore antincendio

1.1.2 Fire Safety Engineering

La Fire Safety Engineering (FSE) è stata introdotta nel quadro normativo nazionale con il D.M. 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio" nel quale si definiscono gli aspetti procedurali del metodo, i criteri da adottare per valutare il livello di rischio incendio e progettare le conseguenti misure compensative al fine di soddisfare gli obbiettivi della prevenzione incendi.

Questo nuovo approccio ingegneristico nacque inizialmente nei paesi anglosassoni, come negli USA e in generale nel Nord Europa, è stato ripreso poi anche in Italia e venne riproposto anche nel Codice di Prevenzione Incendi, D.M. 3 agosto 2015, con successivo aggiornamento delle RTO del 2019, al capitolo M. Questo parla di una metodologia alternativa per la dimostrazione del raggiungimento di un determinato obiettivo progettuale e del conseguente livello di sicurezza.

Con l'introduzione della sezione M relativa ai metodi, si passa da una normativa di carattere prescrittivo ad una "semi-prescrittiva", in quanto sono previste soluzioni differenti. Questo è un rinnovamento storico nello scenario della Prevenzione incendi, poiché la valutazione del rischio e le relative soluzioni progettuali non sono più a carico del normatore, ma è il progettista che, servendosi degli strumenti della Fire Safety Engineering, assume un ruolo determinante nella progettazione della sicurezza antincendio.

La prevenzione incendi prevede due strategie differenti. Da una parte, l'approccio prescrittivo, dominante in Italia, che va a concretizzarsi nell'emanazione di norme estremamente prescrittive e nel ricorso da parte del progettista a strumenti di calcolo molto semplici. Dall'altra, un approccio ingegneristico seguito per lo più nei paesi anglosassoni, che si basa sulla dinamica evolutiva dell'incendio tramite l'applicazione di modelli di calcolo.

La Fire Safety Engineering è un approccio di tipo prestazionale, dove si vanno a definire le prestazioni che si vogliono ottenere, per poi verificare il loro raggiungimento. Questo nuovo metodo di progettazione supera i limiti imposti

dalle normative verticali introducendo metodi di calcolo e simulazioni ingegneristiche atte a simulare la reale dinamica dell'incendio e degli eventi ad esso direttamente connessi quali l'esodo delle persone, la propagazione dei fumi e la risposta strutturale degli edifici sotto le azioni termiche.

Vantaggi

Rispetto ai comuni metodi prescrittivi è possibile affrontare la progettazione antincendi focalizzando l'attenzione sui veri obiettivi da raggiungere:

- sicurezza ed incolumità delle persone
- tutela dei beni e dell'ambiente

Il metodo ingegneristico è applicabile sia negli edifici nuovi che negli esistenti, svincolandosi dai limiti prescrittivi delle normative verticali e potendo così:

- realizzare compartimenti di maggior dimensione,
- gestire vie di esodo di maggior lunghezza,
- ridurre ed in molti casi azzerare i costi inerenti alla protezione al fuoco delle strutture.
- risolvere problematiche non autorizzabili secondo gli ordinari approcci normativi, garantendo i più elevati standard di sicurezza, personalizzando le scelte progettuali sulle singole specifiche esigenze dei committenti.

Di ogni misura alternativa è possibile quantificarne realmente l'effetto, misurandone l'impatto effettivo. Inoltre, rispetto all'approccio ordinario in cui la scelta del gruppo di misure di sicurezza è aleatorio, diviene misurabile l'effetto sulla sicurezza complessiva apportata dalle singole componenti.

Punto di forza della strategia ingegneristica è la sua estrema flessibilità e la capacità di ridurre al minimo gli interventi di adeguamento. In Italia il ricorso alla Fire Safety Engineering è concretizzabile sia per le attività non normate, quindi non aventi una RTV, sia su tutte le attività normate in caso di istituzione di Deroga.

Le ipotesi fondamentali su cui si basa la FSE sono:

- L’incendio di una attività si avvia da un solo punto di innesco;
- Il rischio di incendio non può essere ridotto a zero.

Sezione M

La sezione M – Metodi del D.M. 03/08/2015 descrive l’iter procedurale da seguire con lo scopo di definire soluzioni idonee utilizzando la metodologia dell’ingegneria antincendio prestazionale ed è suddivisa in 3 parti.

1. *Sezione M1-Metodologia per l’ingegneria della sicurezza antincendio*

   Viene descritta la metodologia di progettazione dell’ingegneria della sicurezza antincendio, la quale consente la definizione di soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo. Tale metodologia può essere schematizzata principalmente in tre fasi spiegate di seguito: analisi preliminare, analisi quantitativa e SGSA.

- *Analisi preliminare:*

In tale fase devono essere prese in considerazione le caratteristiche del progetto tenendo conto degli aspetti legati a:

- Vincoli imposti da prescrizioni normative e da esigenze peculiari dell’attività;
- Pericoli d’incendio connessi alla destinazione d’uso prevista per gli edifici e i locali;
- Fattori ambientali specifici collegabili alle conseguenze dello sviluppo dell’incendio;
- Caratteri e comportamenti delle persone presenti in relazione alla tipologia di edificio

  prescelta e alla destinazione d’uso prevista.

Dopodiché si devono identificare, in conformità alle disposizioni in materia di prevenzione incendi e in relazione alle esigenze dell’attività in esame, gli obiettivi di sicurezza:

- Le persone presenti devono essere in grado di lasciare l’opera o di

essere soccorse;

- Deve essere presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso;
- La capacità portante dell'edificio deve essere garantita per un periodo di tempo prefissato in relazione all'evoluzione dell'incendio;
- La produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere deve essere limitata;
- La propagazione del fuoco alle opere vicine deve essere limitata.

In relazione agli obiettivi, devono poi essere indicati i parametri significativi utilizzati per garantire il soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza individuati. Tali parametri, in accordo alla normativa, includono le temperature massime dei gas in ambiente, i livelli di visibilità, i livelli di radiazione termica, i livelli di concentrazione delle specie tossiche, i livelli minimi di ossigeno.

Il primo step è quello di individuare lo scenario d'incendio, descrivendo i fattori critici che possono portare ad un incendio che si traduce nella schematizzazione di eventi che si potrebbero verificare in relazione alle caratteristiche individuate dell'incendio, dell'edificio e delle persone presenti. La scelta degli scenari di incendio di progetto deve individuare le condizioni più gravose per lo sviluppo e la propagazione delle fiamme, la sollecitazione strutturale, la tutela delle persone presenti e la sicurezza delle squadre di soccorso.

Per ogni scenario bisogna individuare:

- *Caratteristiche del fuoco*: stato, tipo e quantitativo delle sostanze combustibili, la loro disposizione e configurazione, profilo temporale del rilascio termico e picco di potenza termica sviluppata (HRR_{max} - *Heat Release Rate*);
- *Caratteristiche dell'edificio*: geometria dei locali, composizione e proprietà termiche delle pareti, degli arredi e delle tappezzerie,

strutture edilizie, condizioni di ventilazione interna ed esterna, stato di apertura o chiusura di porte e finestre;

- *Caratteristiche delle persone presenti*: affollamento massimo, stato psico-fisico degli occupanti, presenza di disabili, familiarità con i luoghi, stato di veglia o sonno ecc.

- *Analisi quantitativa:*

Nella seconda fase deve essere definita la soluzione progettuale da adottare dal punto di vista dell'utilizzo di impianti specifici, volto a compensare il rischio d'incendio; la scelta tra le varie soluzioni proposte viene ottenuta tramite analisi quantitativa. Il passo successivo è quello della scelta dei modelli di calcolo da applicare al caso studio. Il modello scelto fornisce una serie di parametri numerici utili alla descrizione dell'evoluzione dell'incendio e al soddisfacimento dei livelli di prestazione prefissati. Allo stato attuale i modelli più utilizzati sono:

- Modelli analitici semplificati
- Modelli di simulazione dell'incendio a zone
- Modelli di simulazione dell'incendio di campo
- Modelli di simulazione dell'esodo

I modelli di simulazione dell'incendio a zona si distinguono da quelli di campo in base a come viene realizzata la discretizzazione dei volumi, infatti quest'ultimo viene suddiviso in celle, dove in ognuna di queste viene impostata una soluzione matematica delle equazioni che descrivono il problema rilevato.

- *SGSA – Redazione programma di gestione della sicurezza antincendio:*

L'adozione dell'approccio ingegneristico prevede l'obbligo di elaborare un documento contente il programma per l'attuazione del SGSA. Documento

necessario per tenere sotto controllo i parametri utilizzati per l'individuazione dello scenario.

Nel documento deve essere descritto:

- Organizzazione del personale;
- Identificazione e stima dei pericoli derivanti dalle attività svolte;
- Controllo operativo;
- Gestione delle modifiche;
- Pianificazione delle emergenze di controllo delle prestazioni.

2. *Sezione M2-Scenari d'incendio*

Nel capitolo M2 viene descritta la procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio possibili.

Lo scenario d'incendio individuato rappresenta una delle serie di possibili condizioni di innesco che vengono considerate pericolose per l'edificio, i suoi occupanti e l'ambiente.

A causa delle condizioni di pericolosità di un incendio, la sua descrizione deve contenere informazioni riguardanti l'edificio, i suoi contenuti e gli occupanti presenti al momento dell'incendio.

I possibili scenari sono la base per l'individuazione degli scenari di progetto, che poi nel momento della simulazione vengono verificati.

Prima di sviluppare un ipotetico scenario, bisogna raccogliere informazioni e dati su varie situazioni di pre-incendio, che andranno ad influire sulle possibilità che l'incendio si verifichi, sulla modalità di sviluppo e diffusione, e sulla sua potenzialità di causare danni.

Negli scenari di incendio devono essere evidenziate diverse caratteristiche inerenti all'attività, gli occupanti e l'incendio stesso:

- *Attività*

È importante descrivere le caratteristiche fisiche quindi architettoniche dell'edificio, i contenuti e la sua situazione ambientale. Queste vanno ad influenzare l'esodo degli occupanti, la crescita e diffusione dell'incendio, il movimento e la diffusione dei prodotti della combustione.

- *Occupanti*

Le caratteristiche degli occupanti servono a determinare la capacità di questi e a rispondere ed evacuare durante un'emergenza.

- *Incendio*

Le caratteristiche del fuoco descrivono la storia dello scenario di incendio che include:

- Sorgente di innesco;
- Crescita;
- Eventualità che si verifichi il flashover;
- Sviluppo totale;
- Estinzione.

Deve essere descritta tutta la sequenza di evoluzione dell'incendio:

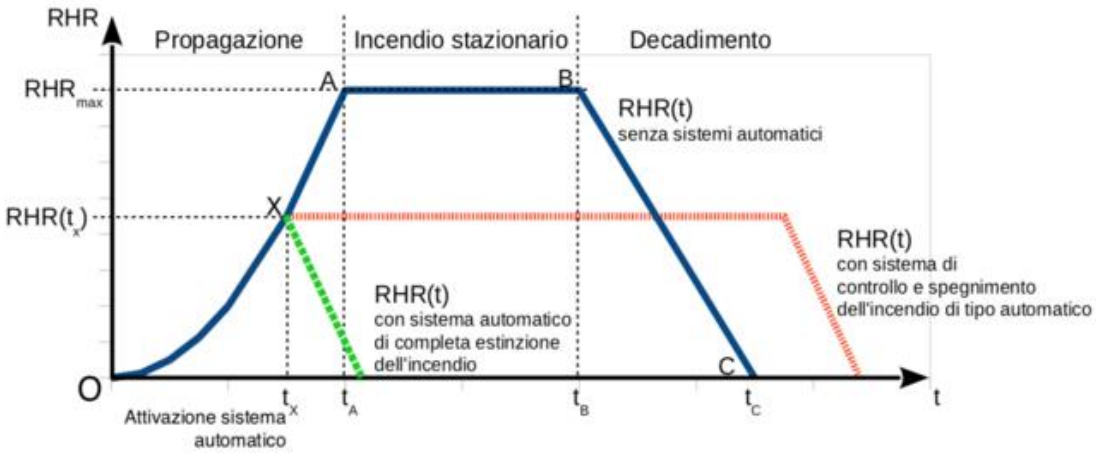


Figura 5– D.M. 3 agosto 2015 - Fasi dell'incendio

Le curve di incendio di progetto sono parti fondamentali per la definizione di uno scenario. Queste sono basate sul tempo e di solito stabiliscono una relazione tra HRR ed il tempo.

La curva attraversa tre stadi, dei quali è necessario stimare i tempi. Questi stadi comprendono l'innesco, il pre-flashover, il falshover e il post-flashover, fase in cui si nota la decadenza dell'incendio.

Il professionista antincendio deve specificare a quale stadio fa riferimento lo scenario ipotizzato e, ai fini della caratterizzazione quantitativa del focolare, può fare ricorso a diversi metodi riportati di seguito:

- L'impiego di dati sperimentali ottenuti da misure dirette, condotte in laboratorio secondo metodologia scientifica consolidata;
- L'utilizzo di dati pubblicati da fonti autorevoli e condivise, citando la fonte e verificando la corrispondenza del campione di prova sperimentale con quello previsto nello scenario di incendio di progetto, utilizzando un approccio prevalentemente conservativo;
- Impiego delle metodologie di stima;
- L'utilizzo di focolari predefiniti individuati nella norma.

3. *Sezione M3-Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale*

Il capitolo M3 parla della salvaguardia della vita umana, fondamentale per lo studio dell'esodo che risulta molto complesso, in quanto governato dall'interazione dell'occupante con l'edificio e l'incendio. Se da un lato le regole tecniche di prevenzione incendi trattano l'esodo in funzione di elementi fisico-geometrici, trascurando le componenti compartimentali; la progettazione prestazionale dell'esodo invece tiene conto degli aspetti comportamentali, fisico-geometrici e ambientali.

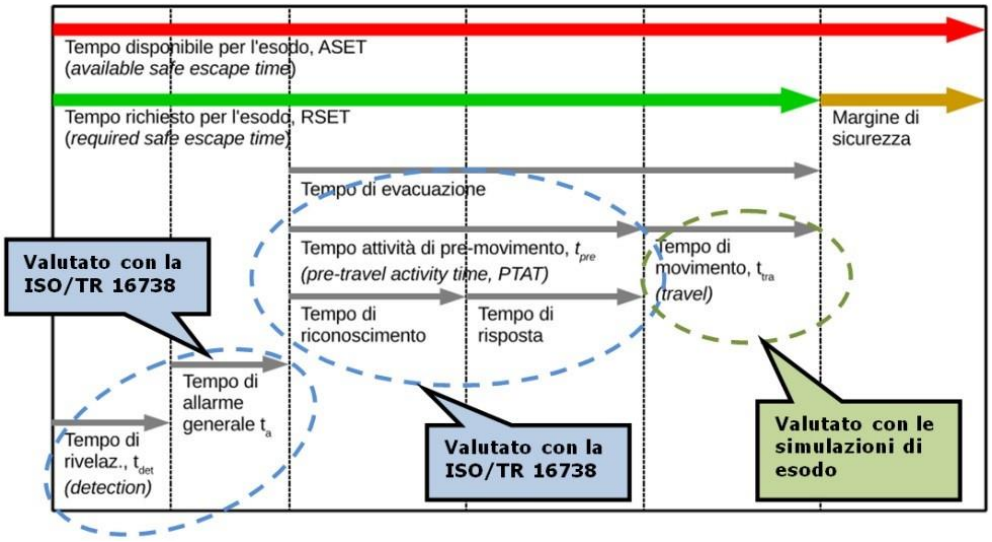


Figura 6– D.M 3 agosto 2019 - Confronto tra ASET ed RSET

La progettazione ideale dovrebbe assicurare agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro senza rendersi conto degli effetti dell'incendio, cosa però non sempre possibile. Per garantire la salvaguardia dell'occupante all'interno di una attività deve essere garantito il criterio di ASET > RSET, ovvero il tempo tra innesco dell'incendio e momento in cui le condizioni diventano tali da non permettere più all'occupante di porsi in salvo (ASET) devono essere maggiori del tempo necessario tra l'innesco e il momento in cui gli occupanti hanno raggiunto luogo sicuro (RSET).

In riferimento a quanto studiato nell'elaborato tesi, la metodologia di verifica tramite la disuguaglianza ASET > RSET è stata presa come riferimento per effettuare alcune considerazioni ed analisi del caso in esame.

1.2 Indagini sull'incendio

Sul tragico evento della Grenfell Tower è stata eseguita un'inchiesta che ha raccolto tutte le testimonianze degli occupanti rimasti illesi o comunque sopravvissuti all'incendio e documentazioni video e foto eseguite da passanti, vicini o occupanti stessi della torre. Questi dati sono stati analizzati per studiare l'evento e sintetizzati in quattro volumi.

Nel primo volume si parla della ristrutturazione eseguita, attraverso una descrizione dettagliata dei materiali utilizzati in facciata per il rivestimento esterno, l'isolante che ricopre la struttura esistente e le nuove finestre installate con specifiche sui materiali e dimensioni.

Il secondo volume è quello che fornisce maggiori dettagli sull'evento incendio, dall'innesco e le cause dello stesso, fino ad un racconto dettagliato di ciò che è accaduto durante la notte dell'incendio sia dal punto di vista degli occupanti che dei soccorritori.

La propagazione delle fiamme sulle quattro facciate è invece descritta nel terzo volume che illustra graficamente ad ogni orario la posizione delle fiamme a la diffusione delle stesse sulla parte esterna dell'edificio. Viene riportato alla fine del documento un elenco dettagliato di tutti gli occupanti con informazioni inerenti al nominativo, genere, piano, appartamento e orario di uscita dall'edificio. In fondo alla lista sono inoltre elencate le persone decedute.

Infine, nell'ultimo volume, il quarto, sono descritte le cause dell'origine dell'incendio, quindi ci racconta da dove è partito l'innescato e perché, descrivendo anche i punti in cui si sono propagate le fiamme e i vari materiali interessati.

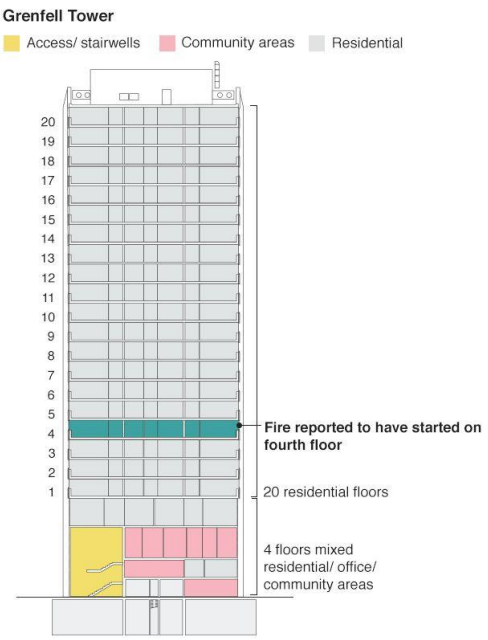
1.3 Descrizione edificio residenziale

Oggetto di studio di questa tesi è la Grenfell Tower, un edificio residenziale situato a Londra, che subì un incendio nella notte del 14 giugno 2017 causando poco più di 70 vittime, tra i quali rimasero coinvolti anche due giovani cittadini italiani, a causa di svariate problematiche sia a causa della mancata efficienza dei tempi di evacuazione sia per i materiali utilizzati nella ristrutturazione dell'edificio avvenuta qualche anno prima.

Figura 7– Grenfell Tower Inquiry - Individuazione posizione su mappa della Grenfell Tower

L'edificio fu progettato nel 1967, durante l'epoca del brutalismo, dall'Architetto Clifford Wearden nel quartiere di North Kensington e venne approvato nel 1970 per la riqualificazione di Lancester West. La costruzione dell'edificio cominciò nel 1972 e si completò nel 1974; prima della realizzazione, i livelli del seminterrato vennero riadattati all'esigenza di avere un parcheggio extra a servizio dell'edificio. All'inizio degli anni '90 si limitò l'entrata all'edificio, interrompendo l'accesso ai primi quattro piani. Venne eseguita una ristrutturazione dell'edificio tra il 2015 e il 2016 con lo scopo di aumentare il valore commerciale, visto che negli anni il quartiere aveva acquisito una progressiva valorizzazione.

La Grenfell Tower è un blocco di 24 piani, alto 67,3 m e costituito da 120 appartamenti, sei abitazioni per piano su venti dei ventiquattro piani destinati ad uso residenziale, ospitando c.a. 600 persone, mentre i quattro piani inferiori erano ad uso commerciale. La torre fu completata nel 1974 ed era uno degli edifici più innovativi del periodo, comparata con le altre torri costruite attraverso l'utilizzo di tradizionali mattoni per i tamponamenti esterni. In questo progetto l'architetto predilige l'uso di blocchi di cemento prefabbricati isolati, conferendo una trama insolita alle pareti. Anche le dieci colonne esterne in cemento erano isolate e la particolarità era quella di avere sei appartamenti per piano anziché quattro, insolito per quel periodo.



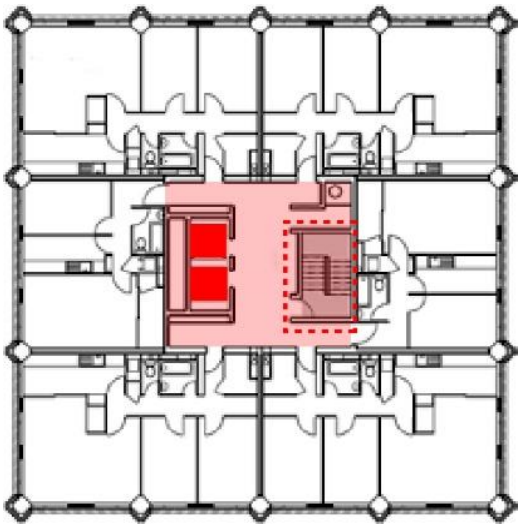


Figura 8- Nucleo centrale con blocco scala e ascensori

L'edificio presenta un nucleo centrale che contiene gli ascensori, la scala principale di tipo aperto, quindi non protetto e tantomeno filtrato, e i montanti verticali per i servizi, per questo le colonne sono state poste unicamente lungo il perimetro

esterno. Gli appartamenti circondano il nucleo centrale degli ultimi venti piani, mentre ai piani bassi sono presenti locali con differenti destinazioni d'uso ma non rilevanti ai fini dell'incendio. Nell'edificio non sono stati istallati né l'impianto di rivelazione o allarme incendio, tantomeno dispone di impianti automatici di estinzione.

1.4 Ristrutturazione

La ristrutturazione dell'edificio fu eseguita fra il 2015 e il 2016 e curata dal proprietario dell'immobile KCTMO, "Kensington and Chelsea Tenant Management Organization", uno dei più grandi proprietari e gestori di immobili in Inghilterra. Questa ristrutturazione aveva principalmente lo scopo di aumentare il valore commerciale dell'immobile, visto che negli anni il quartiere aveva acquisito una progressiva valorizzazione.

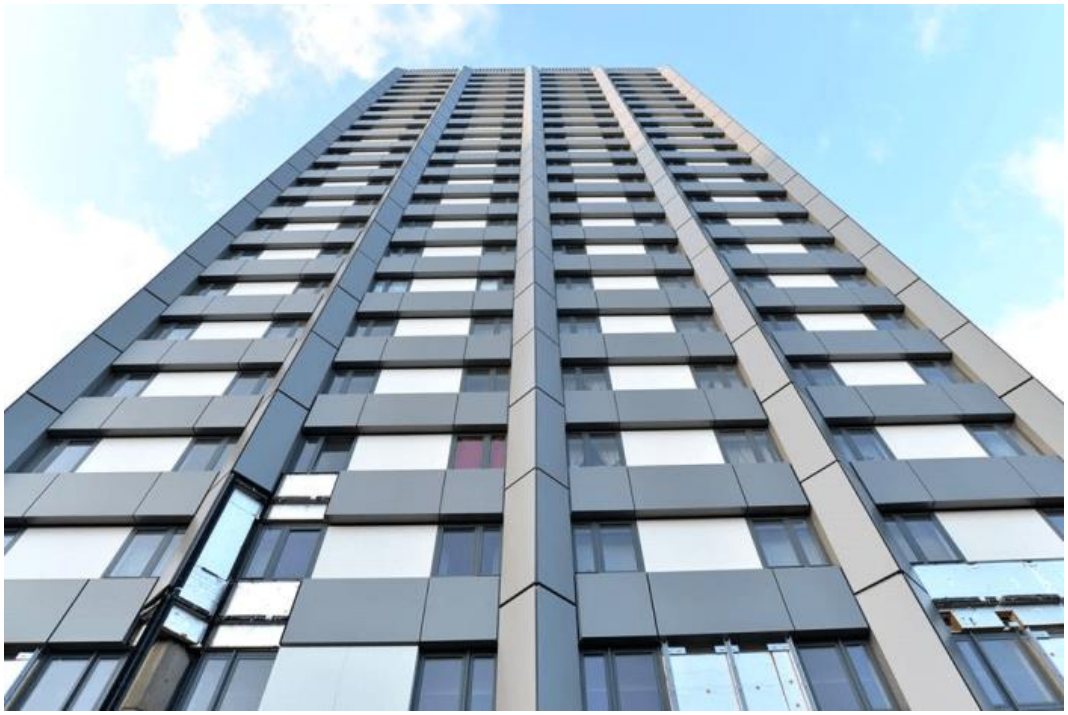


Figura 9– Grenfell Tower Inquiry - Rivestimento esterno facciata Grenfell Tower

Tutto parte da un progetto di riqualificazione dell'area che circondava Lancaster Green e mirava sia ad esigenze di risparmio energetico, andando a sostituire il sistema di riscaldamento, risultato scadente negli anni precedenti, sostituire i

serramenti, aumentare l'efficienza termica della torre, sia ad esigenze di tipo estetico, migliorando l'aspetto della stessa attraverso il rifacimento dell'involucro esterno.

Il rinnovamento della torre venne reso noto nel 2012 con un costo di £ 8,7 milioni e venne completato nel 2016. In fase di progetto si pensò ad un rivestimento esterno in alluminio composito per la protezione contro agenti atmosferici e, in parte, anche per migliorare visivamente la parte esterna dell'edificio.

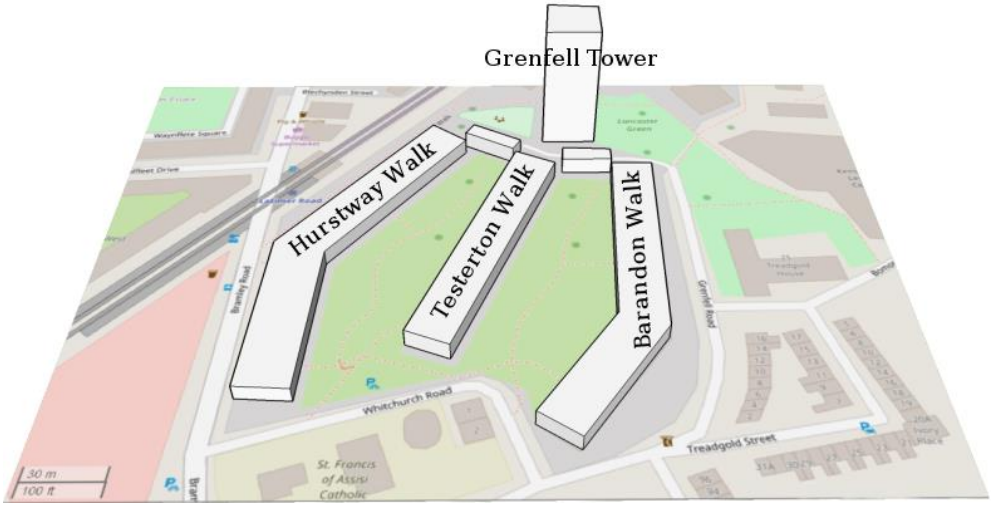


Figura 10– Grenfell Tower Inquiry - Nuovo progetto di riqualificazione di Lancaster Green

1.4.1 Rivestimento involucro esterno

Dalle informazioni reperite, pare che l'intera facciata dell'edificio fosse stata ricoperta con uno strato isolante così composto, descritto dall'esterno verso l'interno):

1. Primo strato esterno composto da un pannello sandwich in alluminio, spesso 3 mm, con un riempimento interno in polietilene denominato Reynobond PE;
2. Cavità ventilata da 50 mm;
3. Pannello isolante (PIR) Celotex FR5000, spessore 150 mm in poliisocianurato;

4. Muro esterno preesistente dell'edificio, in materiale incombustibile.

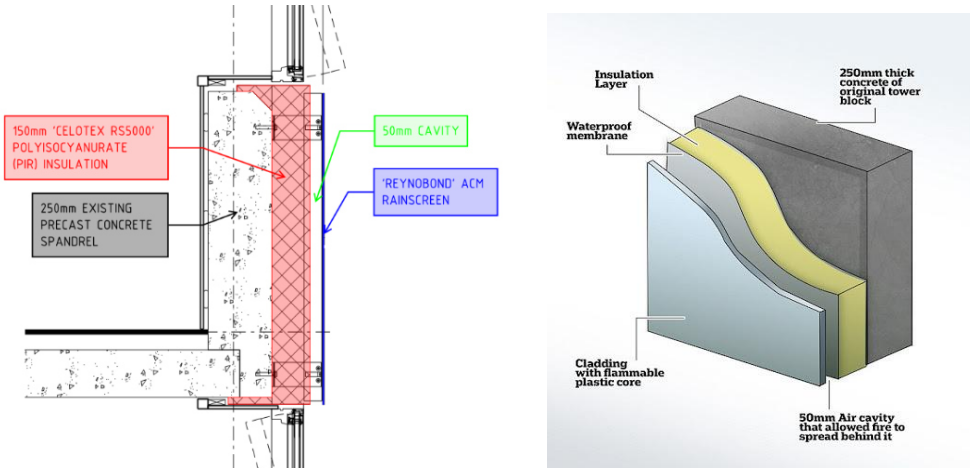


Figura 11- Particolare costruttivo rivestimento esterno applicato in fase di ristrutturazione

Il rivestimento era stato realizzato nel 2016 dalla ditta Rydon su incarico della KCTMO allo scopo di migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio e conferire alla torre un aspetto più moderno.

Il pannello Celotex FR5000 è prodotto dalla Saint Gobain ed ha le seguenti caratteristiche:

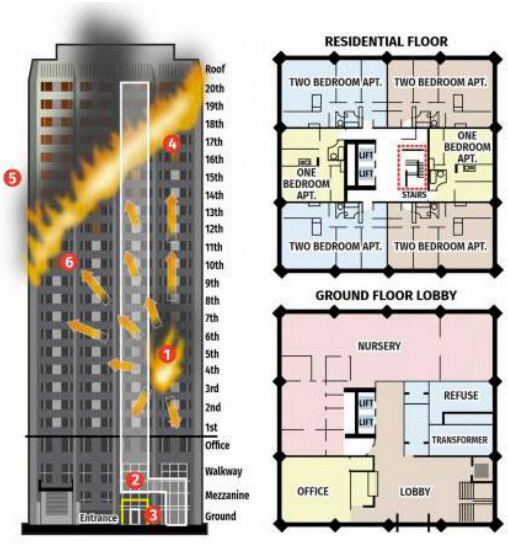
- Lastre di dimensioni 1,2 x 2,4 m;
- Spessori variabili da 50 a 150 mm (la versione con spessore 150 mm, quella utilizzata nella Grenfell Tower, è denominata FR5150);
- Fattore lambda 0.021 W/mK;
- Rivestimento esterno in foglio di alluminio;
- Costituito da poliisocianurato (PIR) rigido espanso;
- Classe di Reazione al fuoco: Classe 0 secondo la norma BS 476;
- Peso 4.98 Kg/mc;
- Costo di circa 40-45 €/mq.

Il lavoro venne eseguito da Harley Facades di Crowborough ed East Sussex, per un costo totale di £ 2,6 milioni.

1.5 L'Incendio

1.5.1 Sviluppo dell'incendio

Il 14 giugno del 2017, intorno all'una di notte, ci fu la prima telefonata al servizio di emergenza che segnalava un incendio partito da un appartamento del quarto piano della torre, causato da un malfunzionamento del motore di un frigorifero. Il proprietario, purtroppo, si accorse dell'incendio molto tardi rispetto al suo innesco, prima di chiamare la polizia ed avvisare gli inquilini del suddetto piano. Arrivarono i soccorritori per lo spegnimento delle fiamme all'interno dell'edificio e nel frattempo cominciarono ad arrivare richieste di aiuto dai piani superiori che reclamavano presenza di fumo nei loro appartamenti. Queste telefonate ricevute erano inspiegabili da parte del comando dei vigili, sapendo del già avvenuto intervento al quarto piano e pensando di aver risolto l'accaduto. Seguendo la procedura standard in caso di incendi, si consigliava a coloro che chiamavano per segnalazioni di restare chiuso in casa e non abbandonare il proprio appartamento fin quando i vigili del fuoco non li avessero raggiunti, ignari però di ciò che stava realmente accadendo. Ciò che il comando dei vigili non sapeva, ma di cui i vigili del fuoco fuori dall'edificio iniziarono a notare, era che l'incendio si stava estendendo lungo tutta la facciata. Le fiamme, fuoriuscite dalla finestra della cucina del quarto piano avevano raggiunto, attraverso il cappotto esterno dell'edificio e il rivestimento isolante, i piani superiori e, a causa delle molte finestre lasciate aperte, delle alte temperature estive e delle tende di materiale infiammabile, rientrarono all'interno degli appartamenti sovrastanti. L'incendio si stava



estendendo quindi verso l'alto coinvolgendo in poco tempo tutta la fascia fra le colonne della facciata est.

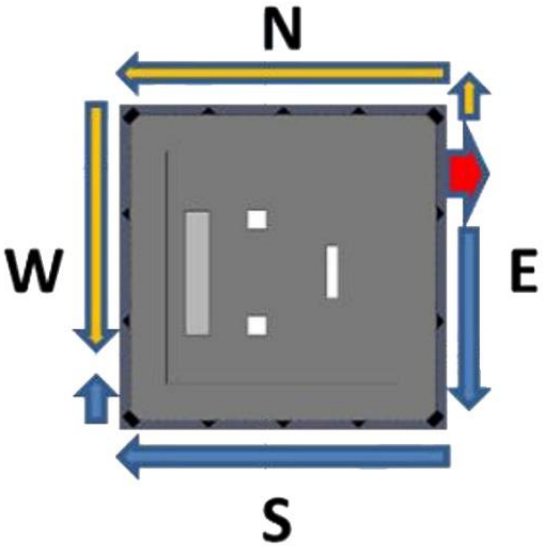


Figura 12– Grenfell Tower Inquiry - Verso di propagazione delle fiamme

Dopo circa 15 minuti le fiamme, attraverso il rivestimento, passarono alla facciata nord, cominciando a risalire verso l'alto con un andamento obbliquo. In mezz'ora le fiamme arrivarono all'ultimo piano, ma si estendeva contemporaneamente anche lateralmente, non solo in verso antiorario ma anche in verso orario sulla facciata sud. Verso circa le quattro e trenta di notte, tutte le facce dell'edificio vennero coinvolte dall'incendio, causando danni irreversibili all'edificio e soprattutto alle persone.

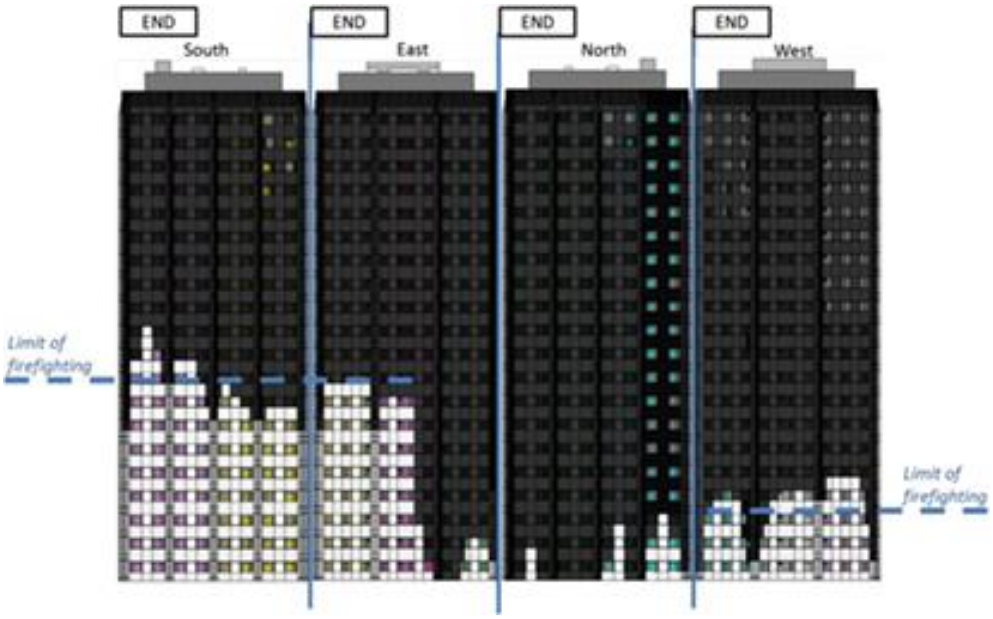


Figura 13– Grenfell Tower Inquiry - Propagazione incendio sulle quattro facciate

Coloro che abitavano ai piani superiori, avendo ricevuto l'ordine di non abbandonare l'appartamento per ragioni di sicurezza, si ritrovarono coinvolti nell'incendio che, rapidamente, avvolse tutto l'edificio. Furono circa 200 le persone che si salvarono da sole, ignorando le raccomandazioni ricevute di restare nei propri appartamenti. Coloro che invece cercarono di salire sempre più in alto, speranzosi che, una volta arrivati in cima al palazzo, gli elicotteri dei soccorsi sarebbero andati a prenderli, persero la vita perché, trovando la porta per raggiungere il tetto chiusa, fu impossibile per i soccorsi raggiungerli.

In tabella è possibile individuare i vari eventi in successione e l'orario in cui sono avvenuti, riferiti sia all'evento incendio, sia alla modalità di esodo e all'intervento dei soccorritori.

Cronistoria incendio	
00:50:00	Scoppio incendio
00:54:29	Prima chiamata
00:55:14	Partenza tre squadre VVF dalla stazione di servizio
00:59:12	Partenza quarta squadra VVF
00:59:24	Arrivo prime tre squadre VVF
01:01:00	Cinque soccorritori entrano nella torre
01:03:00	segnalazione ai soccorritori del frigo in fiamme

01:08:33	Arrivo quarta squadra VVF
01:06:00	Montaggio dell'impianto
01:08:00	Quantità significativa di fumo nell'atrio dell'edificio
01:10:00	Le fiamme avvolgevano l'esterno della finestra
01:13:00	Appartamento al 5° piano a fuoco
01:15:00	Le fiamme raggiungono dall'esterno le finestre del 17° piano
01:15:53	Primo getto di acqua dall'esterno verso la finestra del 4° piano
01:16:00	le fiamme si estendono sulla parte orientale dell'edificio
01:17:00	Uscita di alcuni dei soccorritori dall'edificio per richiesta di cure per le vittime
01:18:00	Erano già uscite 35 persone, fra cui 10 di loro dal piano 12 o 13.
01:19:00	Necessità di altre pompe in azione per la quantità di fumo elevata al piano 6
01:20:00	Soccorritori entrano nella cucina per spegnere le fiamme
01:21:00	Caduta di detriti provenienti del rivestimento esterno andato a fuoco
01:21:24	1° chiamata dal 22° piano segnalando puzza di fumo
01:24:57	2° chiamata dal piano 12 con fiamme e fumo in cucina
01:25:16	3° chiamata dal piano 14 rilevava puzza di fumo dall'atrio
01:25:36	4° chiamata sempre dal 12° piano
01:26:37	Le fiamme si estendevano sulla facciata est dell'edificio
01:26:54	5° chiamata dal 21° piano diceva che tutto l'edificio era in fiamme
01:26.58	6° chiamata dal 12° piano segnalava fuoco dalla finestra e fumo dall'atrio
01:27:58	Rapida propagazione delle fiamme sulla facciata Est
01:28:12	Comunicazione dei VVF che le persone erano oramai avvolte dalle fiamme
01:28:26	7° chiamata dal piano 11 diceva di essere bloccato con fumo nell'atrio
01:29:00	Le fiamme raggiunsero i piani superiori dell'edificio
01:30:00	L'incendio ha avvolto l'edificio
01:36:00	Arrivò l'allarme che diceva ai soccorritori di uscire dall'edificio
01:38:00	Fine dell'intervento dei soccorsi

Tabella 7 - Excel - Cronistoria evento incendio

1.5.2 Cause dell'incendio

La causa dello scoppio dell'incendio fu il malfunzionamento del motore del

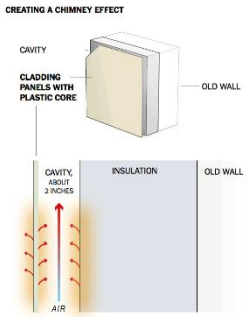
frigorifero del quarto piano che favorì l'innesco dell'incendio. Il fatto che le apparecchiature elettriche possano costituire causa di innesco è ben noto a chiunque si occupi di prevenzione incendi e non. È anche noto il fatto

che i frigoriferi, fra tutte le apparecchiature elettriche, siano fra le più pericolose perché, per esempio, producono calore, sono rivestiti da materiali isolanti facilmente combustibili, lo scambiatore di calore è facile che si sporchi, ecc. Dopo l'incendio alla Grenfell Tower la ditta ha invitato gli acquirenti del medesimo modello a verificarne le caratteristiche di sicurezza ed a contattare il produttore, telefonando su una apposita linea verde o registrandosi al sito internet. Dopo la tragedia il Governo britannico ordinò un'immediata verifica del modello in questione da parte di una commissione tecnica. Purtroppo, la posizione dell'innesco ad un piano così basso, ha certamente favorito la propagazione dell'incendio ai piani più alti. Dalle foto disponibili è chiaramente visibile che i danni ai piani inferiori al quarto sono molto limitati. Mentre, la maggior parte dei danni si sono verificati al di sopra del piano di innesco dove le fiamme si sono propagate verso l'alto.

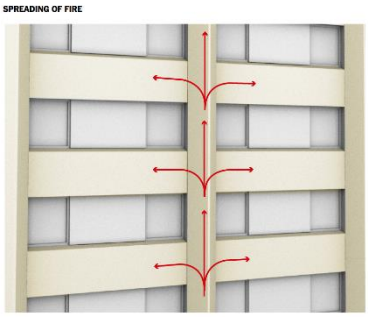
Dalla propagazione del fuoco in verticale, si può facilmente intuire che la vera e propria causa dell'estensione del focolaio, che portò ad avere un alto numero di vittime, fu proprio il rivestimento dell'edificio. Il tipo di cappotto ha permesso al fuoco di risalire un lato dell'edificio, prima di inghiottire l'intero blocco. Il rivestimento aveva uno strato esterno in metallo e uno strato isolante interno in poliuretano espanso che, secondo l'Associazione per la protezione antincendio, se montato correttamente dovrebbe poter resistere tranquillamente al fuoco. L'isolante era posto esternamente alla struttura preesistente in cemento che percorreva l'edificio e che era completamente resistente al fuoco.

1.5.3 Criticità edificio

Le informazioni diffuse finora dai media britannici confermano che i pannelli di rivestimento esterno installati recentemente sulle facciate della Grenfell Tower fossero i pannelli sandwich “Reynobond PE”, con strato isolante interno in polietilene con cattive proprietà di reazione al fuoco. Per motivi esclusivamente di risparmio economico è stato scelto questo materiale invece dell’altro disponibile, la “Reynobond FR”, che prevedeva un trattamento ritardante l’incendio. Il sovraprezzo della versione con le migliori caratteristiche sarebbe stato di circa 2£/mq, per un extra-costo totale di circa 5.000£.



Radiant heat from the burning cladding and insulation, combined with air rushing through the gap, increased the intensity of the fire.



Flammable cladding and insulation enabled the fire to spread rapidly on the exterior of the building.

I fornitori del materiale dichiararono che la versione infiammabile “Reynobond PE” viene solitamente installata in edifici di piccole dimensioni e non certamente nelle torri residenziali. Inoltre, negli Stati Uniti, questo materiale è stato “bannato” per edifici più alti di 12,2 m.

Solamente nella città di Londra pare che tale materiale infiammabile venga utilizzato in edifici residenziali con un numero superiore a undici piani, nonostante si verificarono già altri incendi analoghi. Nel caso in esame questi pannelli sono stati applicati su un edificio di 24 piani e con un’altezza di 64 m.

La questione più rilevante però, è ovviamente la classificazione di reazione al fuoco del materiale. La Class 0 inglese secondo la BS 476 non corrisponde affatto alla Classe 0 italiana: prima della Class 0 ci sono due classi migliori, “non-combustible” e “limited combustibility”, da assimilare a grandi linee rispettivamente alla Classe 0 italiana e Classe 1. La Class 0 inglese corrisponderebbe quindi alla Classe 2 italiana.

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

Tabella 8 – The Building Regulations - Classificazione di reazione al fuoco

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				
Partizioni interne, pareti, pareti sospese						
Rivestimenti a pavimento [1]	1	B_{fl}-s1	1	C_{fl}-s1	2	C_{fl}-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.						

Tabella 5 - D.M. 3 agosto 2015 - Classificazioni in gruppi di materiali per rivestimento e completamento

Si tratta di una classe intermedia, non particolarmente preoccupante dal punto di vista del rischio incendio, eppure, ciò non corrisponde con quanto visto nei filmati e soprattutto con l'estrema velocità della propagazione dell'incendio.

Il rivestimento esterno della facciata presentava un isolamento centrale ricoperto con uno strato di materiale metallico, sottile e leggero che, durante l'incendio, si separò dall'isolante causando caduta di materiale alla base dell'edificio. Questo causò non pochi problemi ai soccorritori che stavano intervenendo al contenimento delle fiamme e al salvataggio degli abitanti della torre. L'anima

combustibile rimase quindi esposta al fuoco e si favorì la rapidissima propagazione delle fiamme, oltre alla produzione di una quantità notevole di fumo e sostanze tossiche. Questa modalità di reazione al fuoco del rivestimento considerato è rilevabile dalle immagini e dai video dell'incendio alla Grenfell Tower, dai quali infatti si denota chiaramente che:

1. Lo strato esterno si delamina e crolla al suolo, rendendo difficile l'avvicinamento all'edificio dei vigili del fuoco.
2. L'anima interna, ad alte temperature, si infiamma facilmente rilasciando particelle ardenti che cadono alla base dell'edificio.
3. L'incendio si sviluppò molto rapidamente non lasciando agli occupanti il tempo di mettersi in salvo, producendo grandi quantità di fumo nero che avvolse i piani superiori dell'edificio.

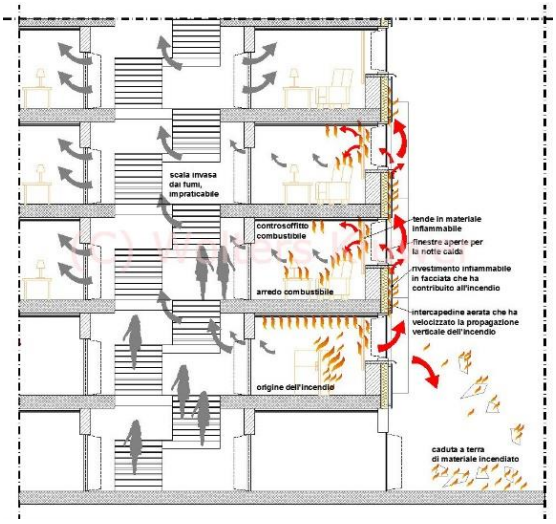


Figura 14– Grenfell Tower Inquiry - Propagazione dell'incendio nell'intercapedine di facciata

La Torre non presentava inoltre l'installazione di detectori di fumo o allarme antincendio che sarebbero stati utili per dare l'allarme all'interno dell'edificio avvertendo gli occupanti dell'accaduto in tempi più idonei.

Un altro punto da esaminare e quello della presenza di una scala non protetta e quindi non a prova di fumo, progettata in un edificio di elevata altezza dove sarebbe stata opportuna la progettazione di una scala in linea con la tipologia di edificio. Non era inoltre presente nessuna compartimentazione fra i vari piani o

per parti significative dell'edificio che sarebbe risultato funzionale per una controllata propagazione limitando i danni a beni e persone.

Opportuno sarebbe stata l'installazione di almeno un ascensore antincendio per dare una possibilità di esodo maggiore agli abitanti della torre ed evitando la propagazione del fumo dall'ascensore agli atrii dei vari piani.

1.5.4 Intervento dei soccorritori

La prima telefonata al servizio di emergenza venne effettuata alle 0:54:29, segnalando un incendio nel palazzo partito dalla cucina del quarto piano. Il

proprietario, si accorse dell'incendio poco dopo del suo innesco e contatto appena possibile la polizia e avvertì gli inquilini del suddetto piano. Quattro mezzi dei vigili del fuoco arrivarono pochi minuti dopo, muniti dell'occorrente per lo spegnimento dell'incendio dell'appartamento. L'intervento da parte dei vigili del fuoco era mirato quindi, nel domare unicamente le fiamme presenti all'interno della cucina del quarto piano. I soccorritori, appena arrivati sul posto, iniziarono con il montaggio dell'attrezzatura e si collegarono all'impianto antincendio a secco di cui era disposta la torre. Entrarono nell'edificio e raggiunsero il piano dell'innesco. Si fecero evacuare gli inquilini del suddetto piano che, non avendo sentito nessun allarme erano ignari della situazione.

I soccorsi domarono le fiamme dopo circa un'ora, intanto le fiamme avevano però avvolto la finestra della cucina e, attraverso il rivestimento si sono propagate ai piani superiori. Di ciò non si accorsero i soccorritori che erano all'interno, che credevano di aver estinto l'incendio. Il servizio di emergenza continuava a ricevere telefonate, la prima all' 1:21:24 da un occupante al 22° piano che diceva di sentire

puzza di fumo, questi gli dissero di rimanere in casa con la parta chiusa e aspettare l'arrivo dei soccorsi. Le telefonate aumentarono e tutte provenienti dai piani superiori. A queste richieste di aiuto veniva consigliato di restare in casa e non abbandonare il proprio appartamento, ignari di ciò che stava accadendo esternamente all'edificio e attenendosi alla solita procedura adottata in caso di emergenza. Due soccorritori stavano raggiungendo i piani superiori, avendo ricevuto comunicazione di gente in pericolo. L'ascensore utilizzato si bloccò però al 15° piano, riempiendosi di fumo. Si diressero quindi giù per le scale e fra il piano 10 e 14 ci furono due uomini che stanno evacuando che dissero di aver visto gente in difficoltà al 16° piano e che aveva bisogno dell'arrivo dei soccorsi. Trovarono un uomo vicino la porta dell'atrio e un altro sul pavimento ancora cosciente. Aiutarono quest'ultimo a scendere le scale. Ritornarono nell'atrio ed entrarono negli appartamenti per cercare di aiutare chi era ancora all'interno, ma non trovarono nessuno e constatarono che era pieno di fumo ed era molto caldo, così scesero giù consapevoli di non avere ormai più ossigeno. Nella discesa aiutarono parecchie persone ad evacuare.

All'1:30 l'incendio aveva avvolto l'intero edificio e i tentativi dei vigili del fuoco di spegnere l'incendio e salvare vite umane furono vani. I soccorritori all'interno ricevettero, nel frattempo, la comunicazione di uscire dall'edificio perché le fiamme erano arrivate in cima alla torre. Anche i tentativi di spegnimento delle fiamme dall'esterno furono vani anche a causa dell'elevata altezza dell'edificio e quindi, della lunghezza limitata del getto d'acqua che non riuscivano a raggiungere i piani superiori.

La maggior parte degli inquilini del palazzo che abitavano i piani superiori, rimanendo bloccati da fumo che arrivava dal basso all'interno del vano scala e che invase gli atrii, pensarono di salire fino in cima all'edificio per essere poi salvati dai soccorritori attraverso per mezzo di elicotteri. Purtroppo, non fu così perché persero la vita a causa di una porta chiusa. Fu impossibile per i soccorsi metterli in salvo perché vennero travolti dalle fiamme e dal fumo che risaliva rapidamente;

solo una piccola parte degli inquilini si salvò e furono coloro che ignorando il consiglio di rimanere in casa, scesero in strada salvandosi, così, la vita.

Figura 15– Grenfell Tower Inquiry - Stato della Grenfell Tower dopo lo spegnimento delle fiamme

I soccorsi presenti sul posto furono inermi nei confronti delle tante vite che furono spezzate a causa della propagazione del fuoco tramite l'isolante esterno dell'edificio. Erano concentrati internamente all'edificio e nessuno si aspettava o si accorse di quello che stava realmente accadendo. La polizia conferma che alle 8:00 del mattino vennero portate in ospedale 50 persone per ricevere cure mediche, mentre furono 72 le vittime accertate dopo lo spegnimento delle fiamme che, da quanto pare, alle 9:45 non erano ancora del tutto domate. I pompieri stavano intervenendo all'ultimo piano dell'edificio, quando ormai non c'era più nulla da fare né per l'edificio stesso, tantomeno per il salvataggio di coloro che abitavano i piani superiori.

2. Individuazione eventi caratterizzanti

Sono stati analizzati diversi eventi considerati caratterizzanti per comprendere lo sviluppo dell'incendio, dal suo scoppio alla propagazione delle fiamme in pochissimo tempo su tutte e quattro le facciate dell'edificio.
Gli eventi più importanti che sono stati individuati, sono necessari per comprendere la modalità di modellazione dell'incendio e successivamente anche per l'esodo.

- *Scenari di incendio analizzati*

Sono stati scelti i tre istanti riportati di seguito poiché risultano essere i più rappresentativi dell'intera durata dell'incendio. Questi istanti analizzati sono fondamentali per poter individuare i vari parametri da inserire nelle successive modellazioni. Per ognuna di queste individueremo una curva relativa al rilascio di calore, il materiale dell'elemento che viene bruciato, lo stato delle porte che risulta essenziale per la propagazione dei fumi e soprattutto per l'esodo degli occupanti, lo stato delle persone e le varie condizioni al contorno.

1. **Innesco dell'incendio**

   L'incendio è scoppiato a causa di un malfunzionamento del motore di un frigorifero per cui è stato possibile individuare attraverso l'Handbook, la curva HRR relativa a quella di un frigorifero.

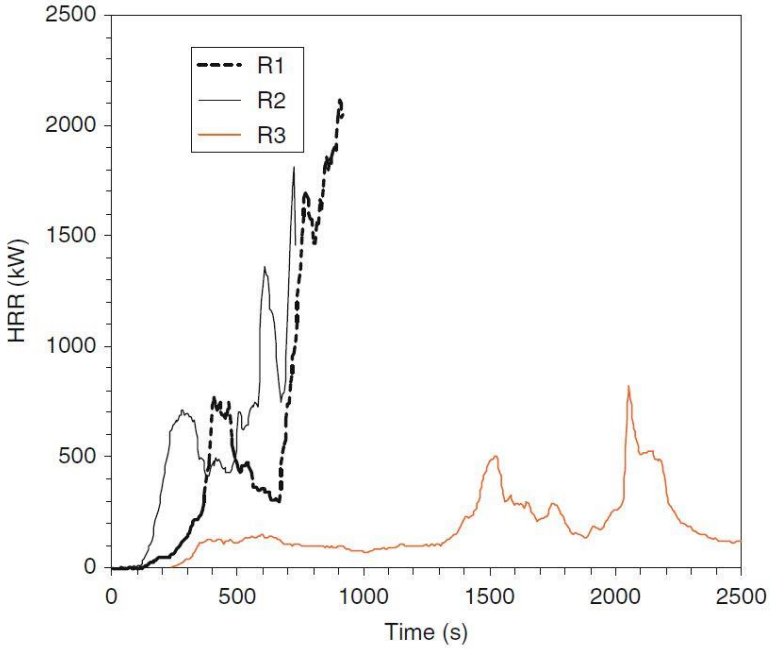


Figura 16- Handbook - Curva HRR di un frigorifero

Dopo aver individuato la curva HRR relativa ad un frigorifero, andiamo ad individuare la posizione di innesco del focolare che si dice essere partito dall'appartamento 16 sito al quarto piano. Di seguito riportato vediamo la posizione della fonte che andrà a simulare l'incendio avvenuto.

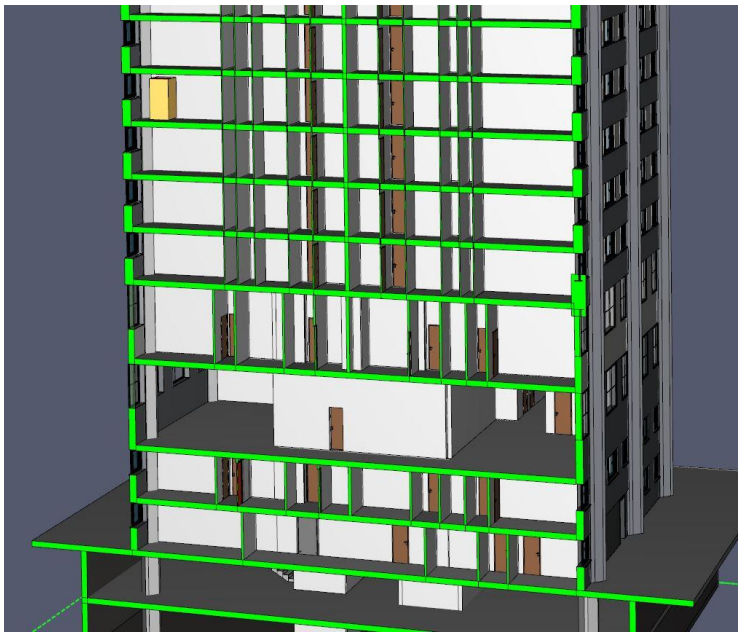


Figura 17- PyroSim - Posizionamento focolaio incendio sezione

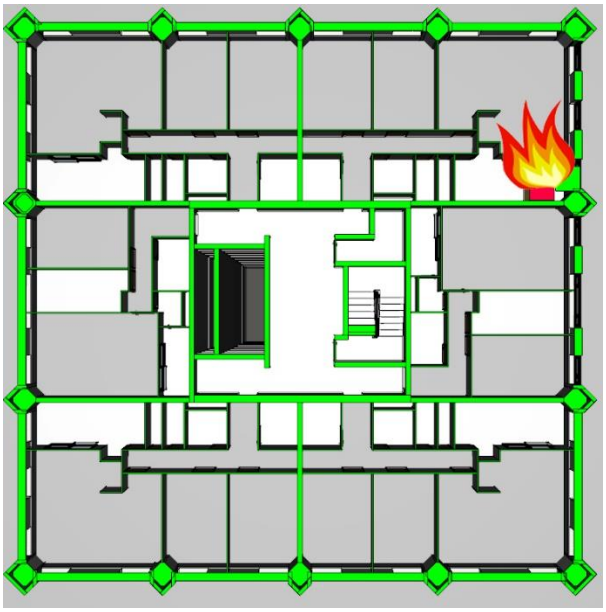


Figura 18- PyroSim - Posizionamento focolaio incendio pianta

Nel piano interessato erano presenti sedici persone, fra cui tre di esse occupavano l'appartamento dove si è innescato l'incendio. Gli occupanti dell'appartamento interessato dal focolaio e quelli degli appartamenti adiacenti hanno abbandonato l'edificio relativamente subito avvertiti anche dal proprietario dell'appartamento sedici, mentre coloro che abitavano nell'angolo opposto della torre non si accorsero subito dell'accaduto e uscirono qualche decina di minuti dopo. Non ci fu nessun morto o ferito in questo piano.

2. Propagazione delle fiamme verso l'alto e lateralmente

Successivamente allo scoppio dell'incendio al quarto piano le fiamme si sono rapidamente propagate, tramite l'apertura della finestra e il materiale isolante, ai piani superiori rientrando dalle finestre all'interno delle cucine degli altri appartamenti, propagandosi anche in direzione orizzontale e in modo obbliquo verso la facciata ovest.

In questo caso la curva HRR di riferimento e quella del materiale isolante posto esternamente in Poliuretano.

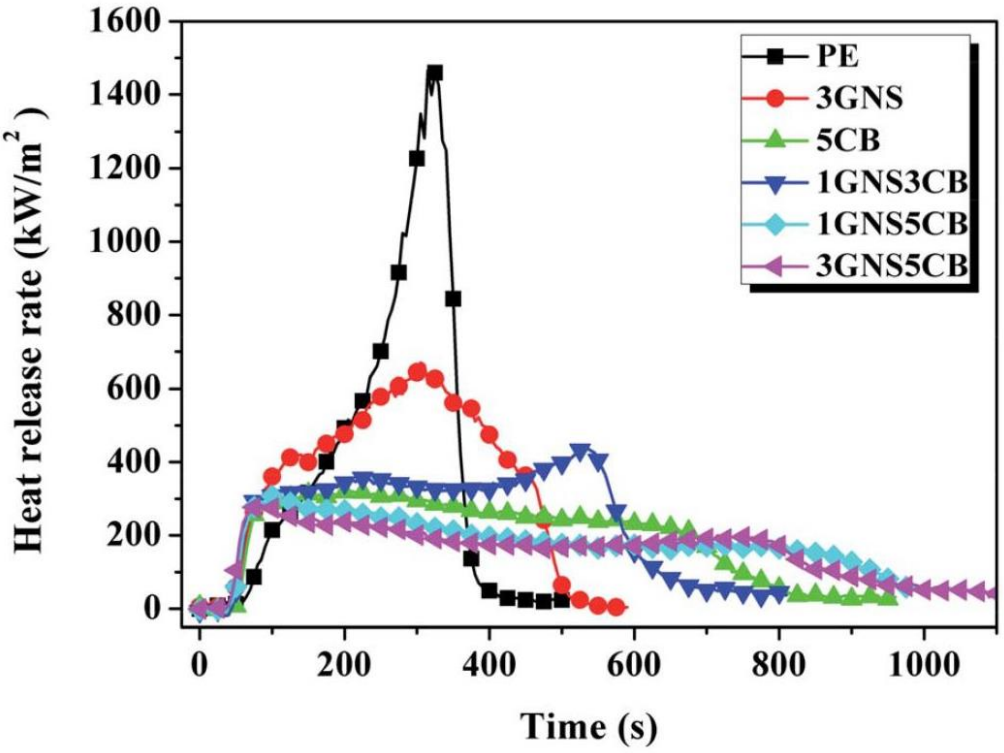


Figura 19 - Prove sperimentali - Curva HRR del Poliuretano (PE)

Le superfici brucianti per simulare questo istante dell'incendio sono state poste una al sesto piano nell'appartamento, adiacente a quello dello scoppio del focolare e l'altro al nono piano sulla facciata ovest.

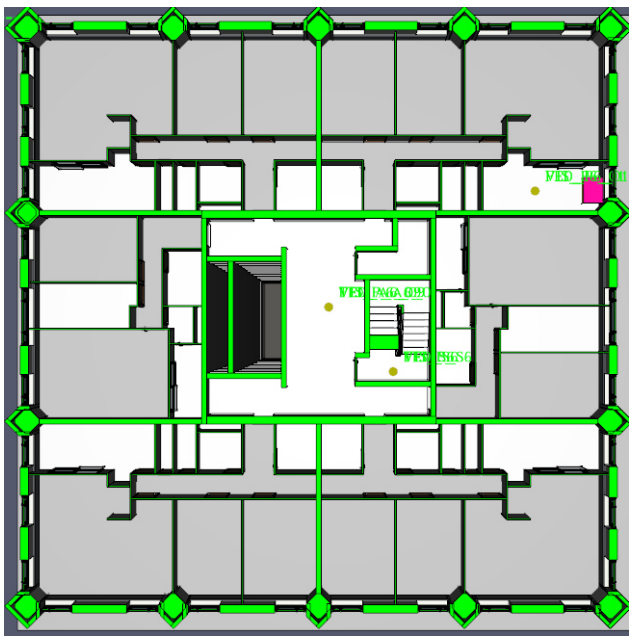


Figura 20 - PyroSim - Posizionamento focolaio 6° piano

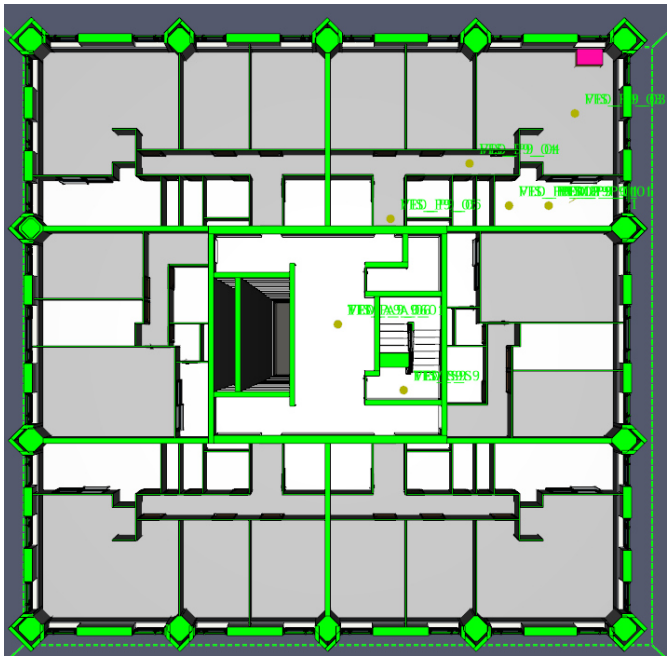


Figura 21 - PyroSim - Posizionamento focolaio 9° piano

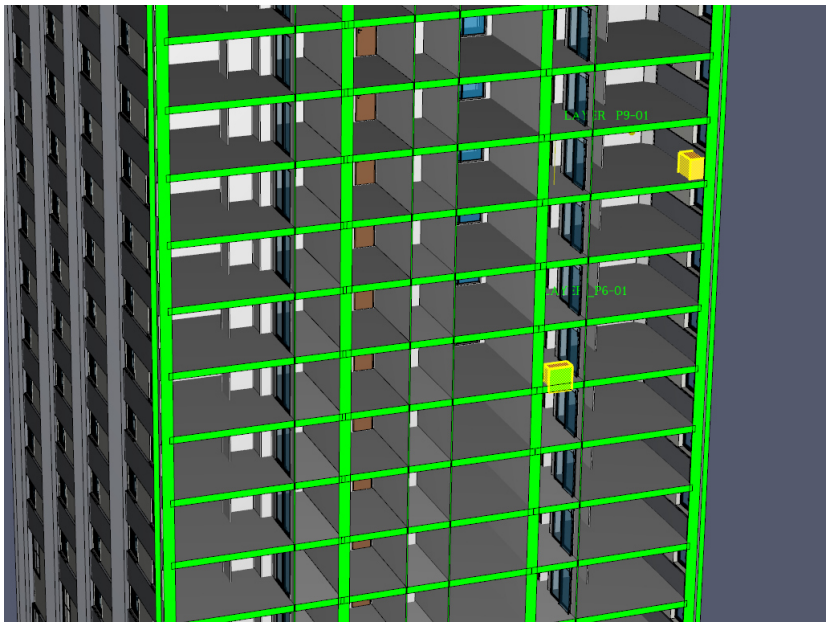


Figura 22 - PyoSim - Posizionamento focolai in sezione

Tra il sesto e il nono piano c'erano in media quattro o cinque persone per ogni appartamento fra cui non tutti si sono accorti immediatamente dell'incendio e quindi alcuni di loro che hanno cercato di fuggire più tardi sono rimasti feriti o con lievi sintomi causati dall'intossicazione da fumo. Non ci furono fortunatamente morti su questi piani.

3. Presenza di fumo negli atrii dei piani superiori

In fine il terzo istante analizzato vede interessati i piani superiori dove si sono presentate maggiori problematiche. La curva HRR utilizzata, come nel caso precedente, è quella riferita al materiale dell'isolante esterno in poliuretano.
Le superfici brucianti sono state poste al dodicesimo piano, una sempre in corrispondenza dell'isolante perimetrale, punto in cui da dove si sono trasmesse le fiamme dall'esterno all'interno e l'altra nel blocco sala per simulare la propagazione del fumo che dagli appartamenti dei piani inferiori risale verso l'alto e rientra all'interno degli atrii e successivamente nei vari appartamenti tramite la porta d'ingresso.

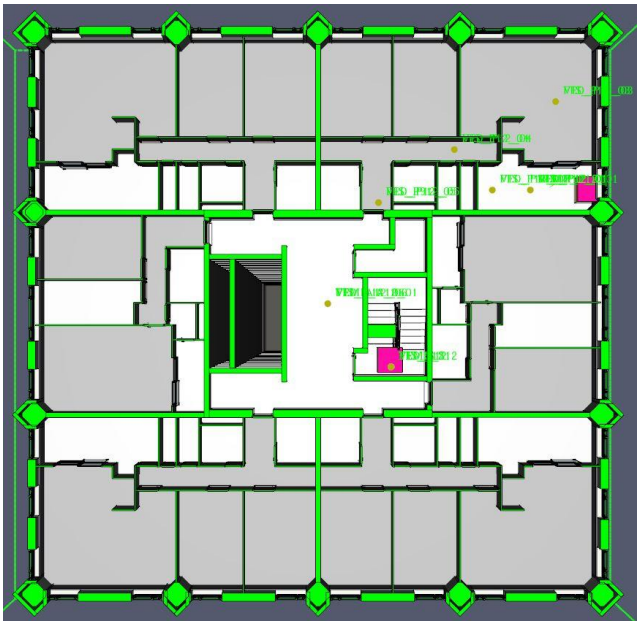


Figura 23 - PyroSim - Posizionamento focolai 12° piano

In quest'ultimo caso gli ultimi piani erano abbastanza popolati ed è qui che si è registrato il maggior numero di vittime sia perché le fiamme avevano quasi avvolto tutto l'edificio e non c'era possibilità di fuga né verso l'uscita principale posta in basso, né tantomeno dirigendosi verso l'alto in direzione del tetto, questo perché il fumo imprigionava sempre di più gli occupanti dal basso verso l'alto. Le vittime contate a incendio domato furono 72 fra cui anche parecchi bambini.

3. Modellazione

3.1 Modellazione 3D dell'edificio

La ricostruzione della torre è stata resa possibile attraverso metodologia BIM che ha premesso di modellare l'edificio oramai gravemente danneggiato, attraverso il software Revit Architecture messo a disposizione di Autodesk. Questo software è basato sul Building Information Modeling, che aiuta ad automatizzare la creazione di diverse fasi della progettazione di un modello attraverso la possibilità di ottenere differenti viste dell'edificio, inserire informazioni sulla struttura, sulle stratigrafie degli elementi costruttivi utilizzati e dei relativi materiali, ottenere schede sui costi di tutti gli elementi del progetto.

Gli elaborati grafici e le testimonianze dei sopravvissuti analizzati e raccolti all'interno del report dell'inchiesta della Grenfell Tower, hanno reso possibile la ricostruzione dell'edificio al suo stato originario, antecedente l'evento incendio subito. Partendo dalle piante dei vari piani dell'edificio, sezioni e prospetti, che hanno fornito delle basi da cui partire, è stato modellato l'edificio contenente tutti i suoi componenti.

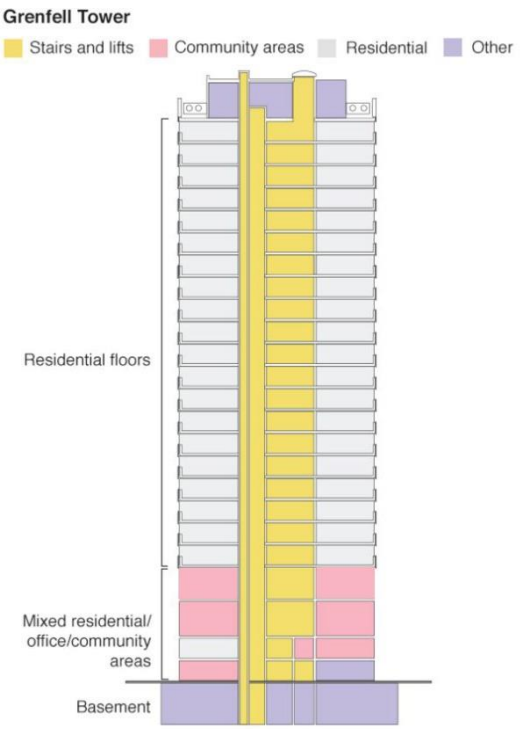
Piante, prospetti e sezioni aggiornate della torre sono stati reperiti dal sito della "KCTMO- Kensington & Chelsea", che era la ditta proprietaria dell'immobile nonché autrice della ristrutturazione dell'edificio.

Sono riportati di seguito alcune tavole progettuali dei principali elaborati grafici risultati utili per la modellazione:

Figura 24 - KCTMO- Kensington & Chelsea - Piante di progetto proposte

Figura 25- KCTMO- Kensington & Chelsea - Sezioni di progetto proposte

Dalla sezione sulla sinistra possiamo apprendere che la torre era costituita da un primo blocco di quattro piani, dove erano collocati uffici, aree comuni e residenze, con quattro appartamenti per piano. Al di sopra di questo blocco si sviluppano i 20 piani residenziali di cui esiste una pianta tipo unica che si ripete per tutti i piani superiori. I vari piani sono suddivisi in sei appartamenti ciascuno, quattro con due camere da letto da 75,5 m^2 e due con una sola zona notte con superficie di 51,4 m^2. Queste informazioni visibili sia dagli elaborati che descritte nei report sono stati utili per la modellazione interna dell'edificio.



Le varie caratteristiche degli spessori delle stratigrafie degli elementi applicati e dei materiali utilizzati nel rivestimento esterno della torre è visibile dalla tavola di progetto realizzata dalla ditta proprietaria che realizzò il progetto riportato di seguito, e da immagini di stratigrafie 3D ricavate dal report:

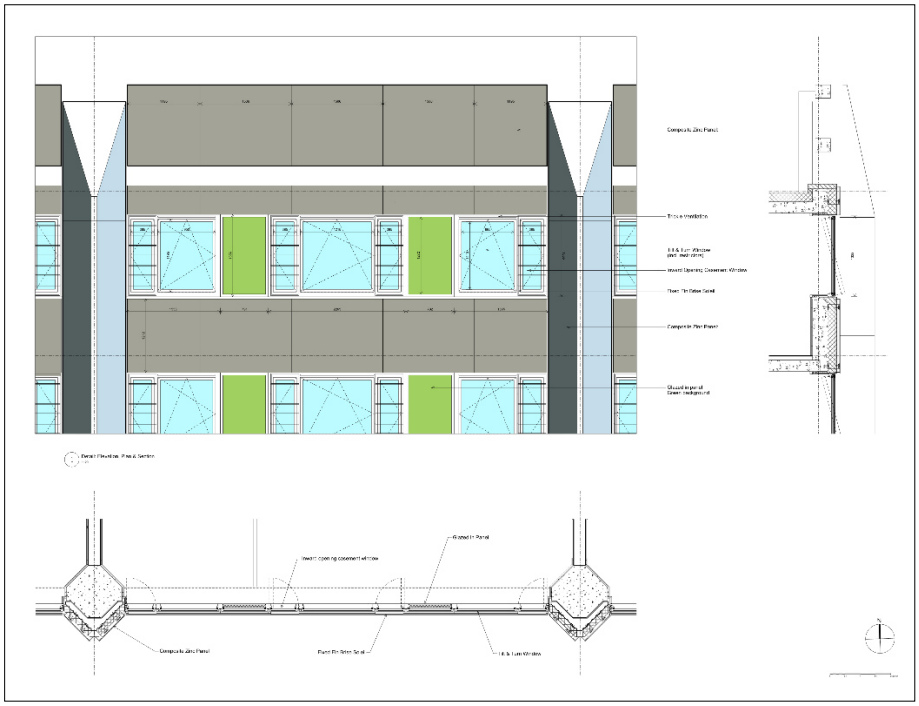


Figura 26- KCTMO- Kensington & Chelsea - Prospetto e sezione rivestimento esterno facciata

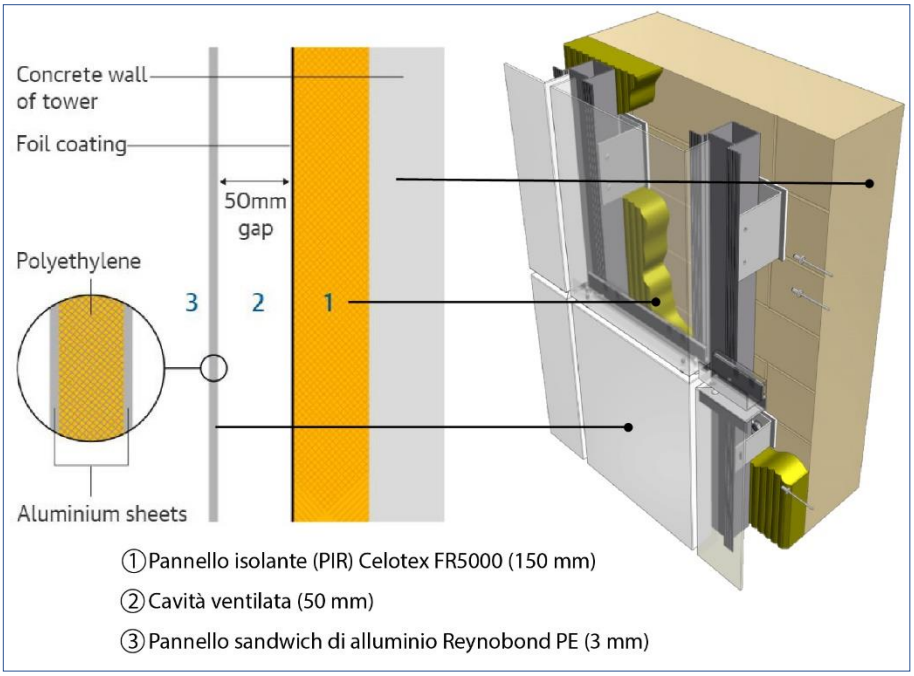


Figura 27 – Grenfell Tower Inquiry - Dettaglio costruttivo rivestimento esterno facciata

- *Importazione elaborati CAD*

Dai documenti di progetto ho ricavando i file CAD delle piante dell'edificio e le ho importate su Revit, impostando ciascuna pianta sui differenti livelli in base alle altezze realistiche di piano. È visibile dallo screen del software Revit riportato di seguito il risultato di questa importazione che passa dal 2D al 3D e fungendo da base per la ricostruzione del modello dell'edificio.

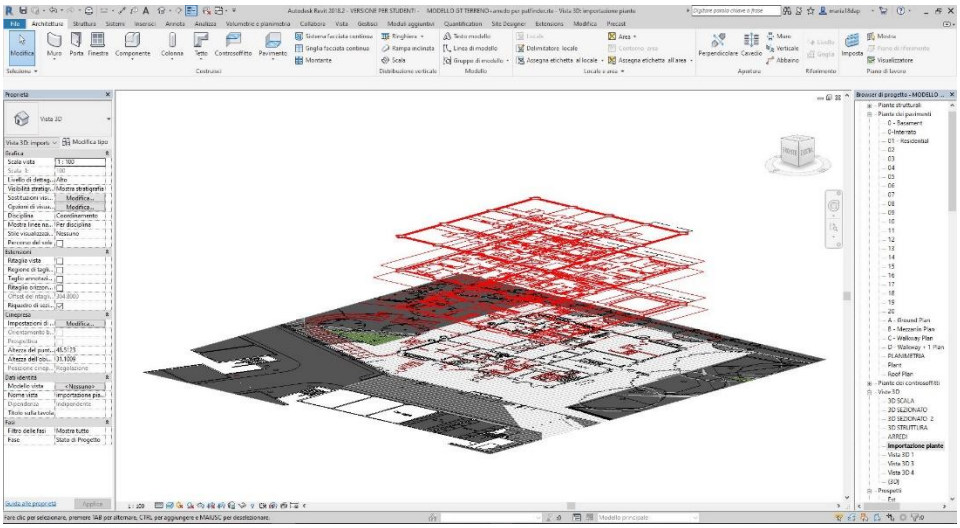


Figura 28 - Schermata software Revit – importazioni planimetrie

- *Modellazione elementi*

Grazie alle piante importate è stato modellato l'edificio partendo dalla realizzazione della struttura, inserendo quindi tutti gli elementi strutturali come ad esempio pilastri, travi, solai e scale. Tramite la vista 3D attivabile sul software si ricava una visione d'insieme della struttura principale, priva di elementi costruttivi visibili ad occhio nudo.

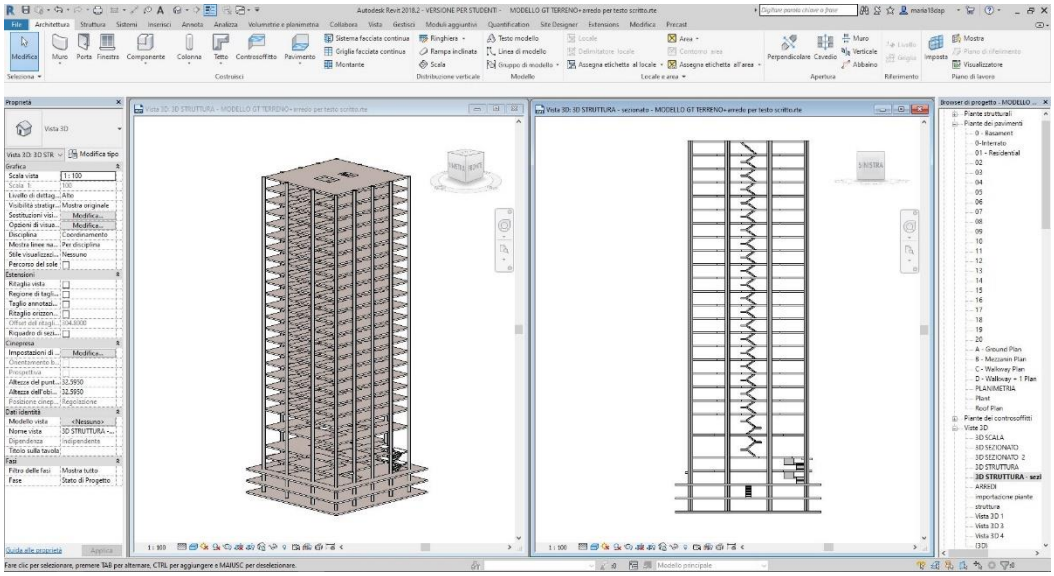


Figura 29 - Schermata software Revit – struttura edificio

Dopo aver modellato la struttura ho inserito gli elementi di divisione interna con le rispettive porte in corrispondenza delle aperture indicate in pianta e modellato il cappotto di rivestimento esterno che circonda l'edificio inserendo gli infissi lì dove indicato in prospetto. È mostrato il modello base nella figura sottostante di come risultava il modello modellato sia della parte strutturale che di quella architettonica ma ancora con materiali base.

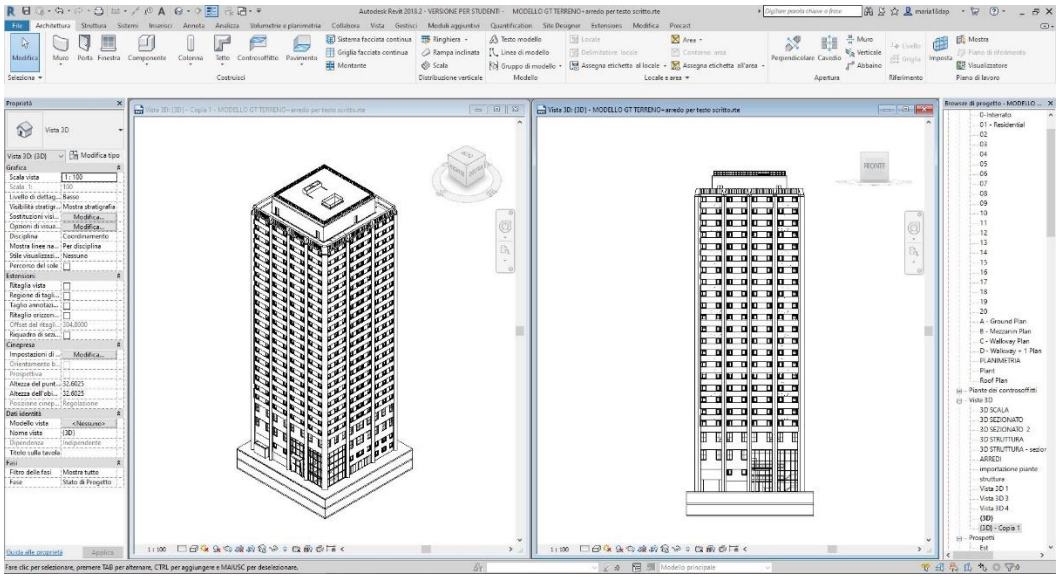


Figura 30 - Schermata software Revit – Edificio modellato

- *Inserimento materiali e stratigrafie*

Il posso finale per ottenere un edificio modellato fedelmente rispetto alla realtà è quello di assegnare ad ogni elemento architettonico e strutturale i materiale di cui questi sono costituiti e per quanto riguarda elementi di divisioni interne, cappotto esterno e solai interni ed esterni, è quello di assegnare lo spessore massimo, dettagliando la stratigrafia interna con informazioni riguardanti oltre che lo spessore anche il tipo di materiale, la sua texture nelle varie visualizzazioni e anche delle informazioni sulle caratteristiche dei materiali, cosi e nome del prodotto.
Vi è riportata di seguito la stratigrafia dell'involucro esterno della Grenfell Tower, ricreata fedelmente in base alle informazioni reperite in fase di analisi dei dati:

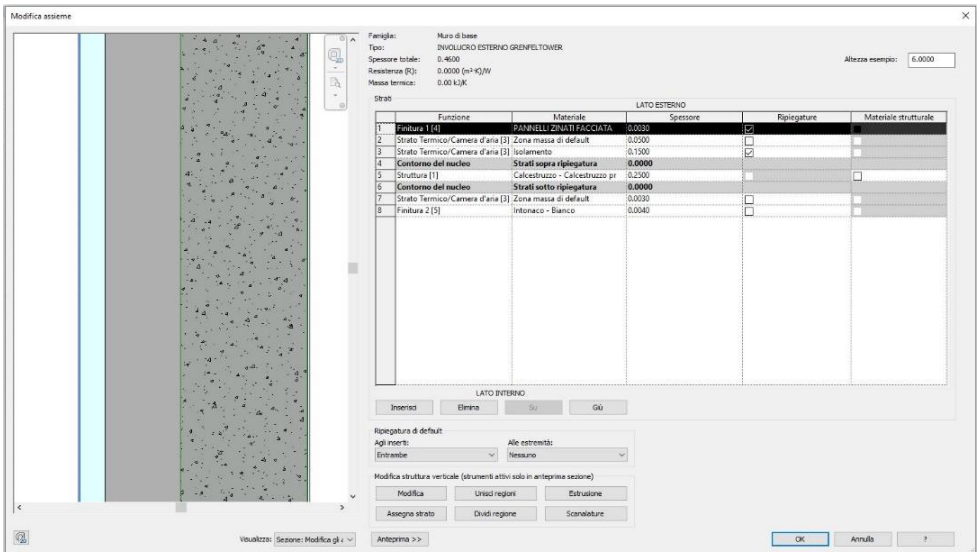


Figura 31 - Schermata software Revit – Stratigrafia involucro esterno

Mentre di seguito vediamo illustrata la stratigrafia del solaio di copertura con le informazioni dei vari spessori e materiali utilizzati:

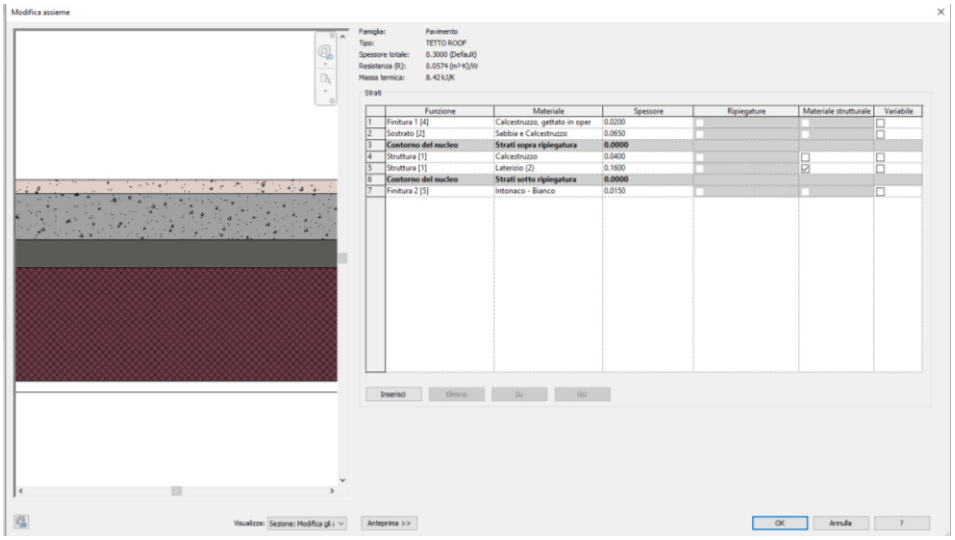


Figura 32 - Schermata software Revit – Stratigrafia solaio di copertura

La modellazione di tutti gli elementi strutturali, architettonici e l'inserimenti dei vari materiali è fondamentale per la successiva modellazione dell'incendio, in quanto bisogna avere come base il modello architettonico pe poter intervenire e simulare i vari scenari di incendio.

- *Modellazione arredi*

È possibile, inoltre, inserire all'interno del modello, che a questo punto sarà fedele all'edificio esistente in tutte le sue parti, l'arredamento dei vari appartamenti e dei vari spazi presenti per avere una visione completa dell'edificio e degli spazi interni per rendere questi ultimi più fruibili possibili. L'inserimento degli arredi è stato possibile grazie a delle foto presenti nel report dell'interno degli appartamenti, utili anche per i materiali della pavimentazione.

Di seguito riportate vi sono le foto analizzate degli interni:

Figura 33 – Grenfell Inquiry - Foto interne di uno degli appartamenti della Grenfell Tower

Possiamo vedere nell'immagine seguente una vista 3D dell'edificio sezionato con l'inserimento degli arredi e un render realistico della zona pranzo che è possibile realizzare direttamente tramite il software Revit.

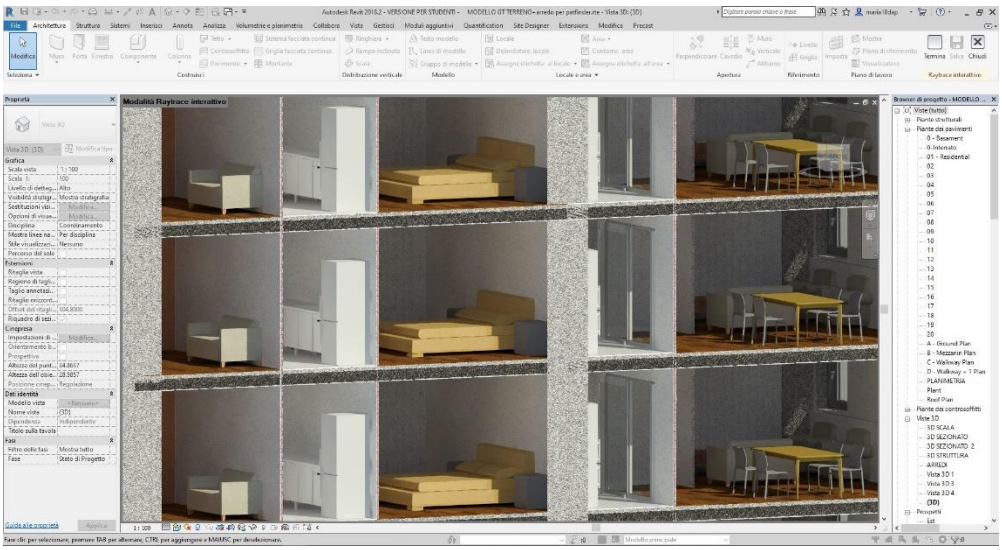


Figura 34 - Schermata software Revit – Sezione assonometrica con arredi

L'inserimento degli arredi all'interno degli ambienti è fondamentale per la successiva modellazione dell'esodo, in quanto è necessario ricavare la superficie calpestabile all'interno di ogni appartamento dell'edificio, lì dove sono presenti occupanti e c'è bisogno di simulare ed individuare i percorsi di esodo e gli ostacoli che potrebbero trovasi lungo il percorso.

Figura 35 - Render dell'interno e dell'esterno della Grenfell Tower

Una volta terminata la modellazione di tutti gli elementi e gli arredi, il file del modello 3D può essere esportato dal software attraverso il formato IFC, formato che permette di essere utilizzato in altri software che supportano e leggono questo tipo di formato, per poter continuare con la progettazione e modellazione di altri aspetti fondamentali connessi con l'edificio. In questo caso l'esportazione del software è indispensabile per poter procedere nella modellazione dell'incendio e della modalità di esodo, ai fini di studiare l'evento incendio della Grenfell Tower realmente avvenuto.

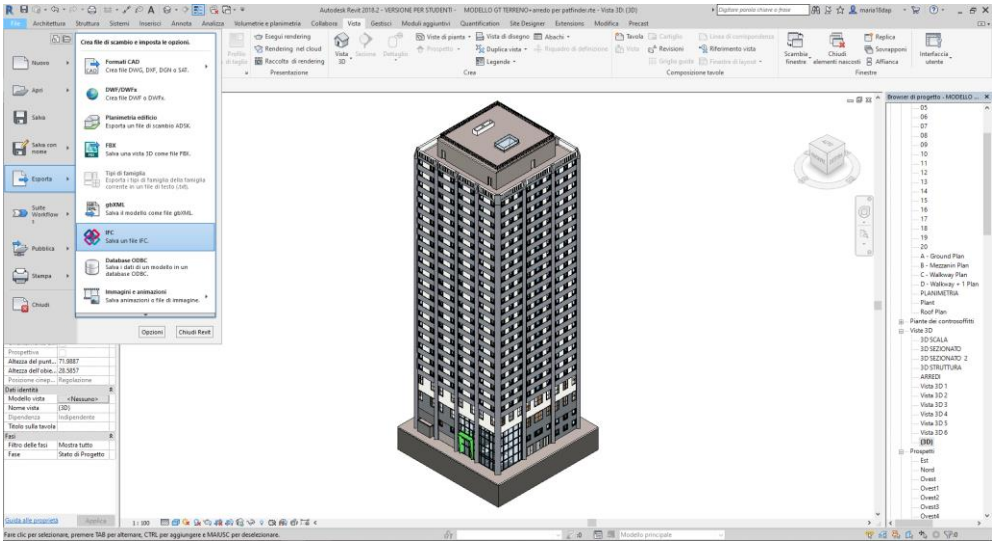


Figura 36 - Schermata software Revit – Esportazione IFC

Il file in formato IFC verrà poi importato inizialmente all'interno del software PyroSim per la modellazione degli scenari di incendio e inserito all'interno di Patfinder, insieme ai risultati FDS ottenuti tramite PyroSim, per modellare l'esodo e avere una visione d'insieme dell'evento incendio che colpì la Grenell Tower.

3.2 Modellazione d'incendio

Per la modellazione dell'incendio è stato utilizzato PyoSim, software ideato della Thunderhead Engineering. PyroSim è un'interfaccia grafica realizzata per la Fire Dynamics Simulation (FDS), che è strettamente integrato nel software. I modelli FDS possono simulare la presenza di fumo, temperatura, monossido di carbonio e

altre sostanze che si verificano solitamente in un incendio. I risultati di questa simulazione vengono utilizzati per garantire la sicurezza degli edifici sia in fase di progettazione ma anche per valutare il rischio di incendio all'interno di attività soggette, ricostruire gli incendi per le indagini post-incendio e fornire assistenza nella formazione dei vigili del fuoco.

Nel caso in esame, la modellazione d'incendio è fondamentale per la ricostruzione del tragico evento della Grenfell Tower.

- *Importazione del modello architettonico*

Il file IFC creato del modello realizzato precedentemente in Revit è stato importato all'interno del Software Pyrosim per procedere con la modellazione dell'incendio. Il software ha rilevato correttamente tutti i materiali e gli elementi architettonici creati, avendo il modello completo dell'edificio su cui studiare l'evento.

Ottengo così il modello architettonico importato in PyroSim con tutti i dettagli inseriti durante la modellazione:

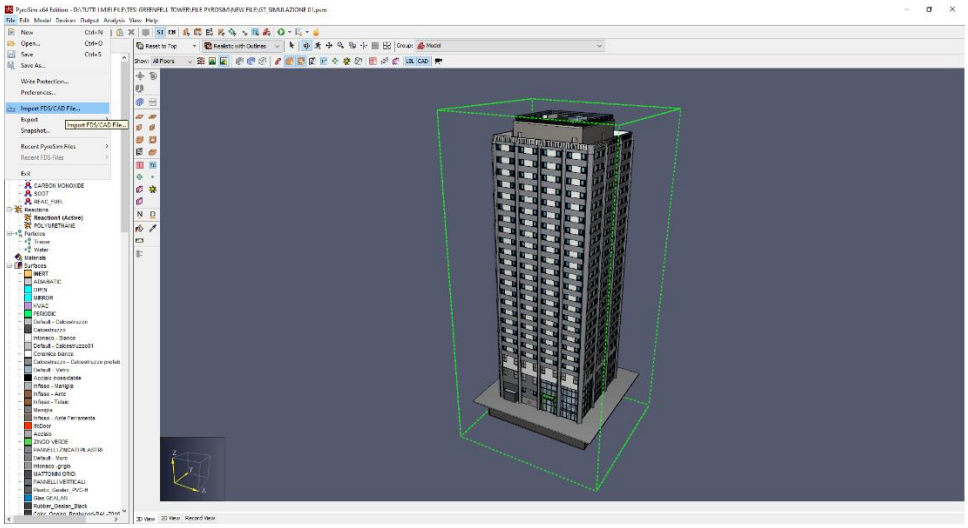


Figura 37 - Schermata PyroSim – importazione modello architettonico

- *Creazione delle Mesh di calcolo*

Una volta importato il modello, questo viene suddiviso in celle nelle quali, al proprio interno, vengono risolte delle equazioni di conservazione di massa, energia e quantità di moto, attraverso un metodo definito degli elementi finiti. Per l'ottenimento di risultati sempre più accurati, le mesh create devono avere delle dimensioni che siano le più ridotte possibili e anche un numero elevato per ricavare informazioni più dettagliate. Solitamente vengono utilizzate delle celle di 0,20 – 0,50 centimetri per poter entrate nel dettaglio dell'incendio. Nel caso della Grenfell Tower, che presenta dimensioni elevate soprattutto in altezza, non è stato possibile applicare delle celle di dimensioni molto piccole, altrimenti si sarebbero verificati dei tempi di attesa durante la simulazione molto lunghi. Sono state quindi applicate celle di 1 m nelle zone dell'edificio non interessanti per i fini della modellazione del focolaio di incendio, mentre nelle zone di applicazione dei dati ai fini della simulazione si è pensato di optare per celle dalla dimensione di 50 centimetri per ottenere risultati più dettagliati solo lì dove ce ne fosse bisogno.

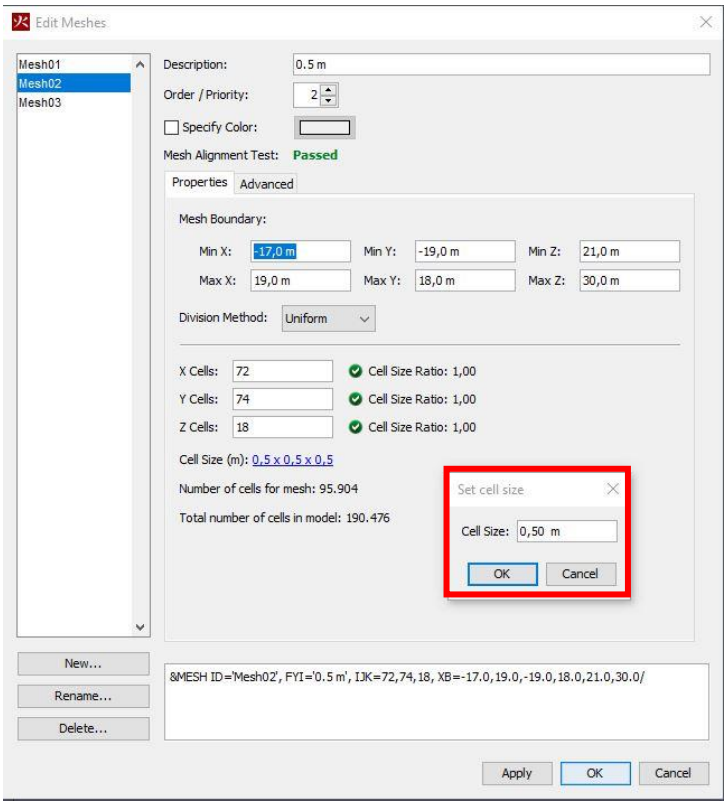


Figura 38 – PyoSim – - PyroSim - Impostazione dimensioni celle

- *Dati di input per la modellazione*

Al fine di valutare lo scenario in cui si analizza l'evento iniziatore dell'incendio, ovvero il guasto elettrico al frigorifero dell'appartamento 16 sito al quarto piano, si è presa come riferimento la curva contenuta nel manuale "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" del 2015 [1] relativa all'incendio di un frigorifero. La curva presa in considerazione è quella tratteggiata, indicata come R1 e visibile nel grafico di seguito, risultando essere la più gravosa. La curva è costante sullo zero circa per i primi 100 secondi per poi aumentare, ottenendo un primo picco attorno i 500 secondi e risalendo nuovamente arrivando al picco massimo ad un tempo poco minore dei 1000 secondi. Il picco evidenzia un valore di HRR pari a 2100 kW.

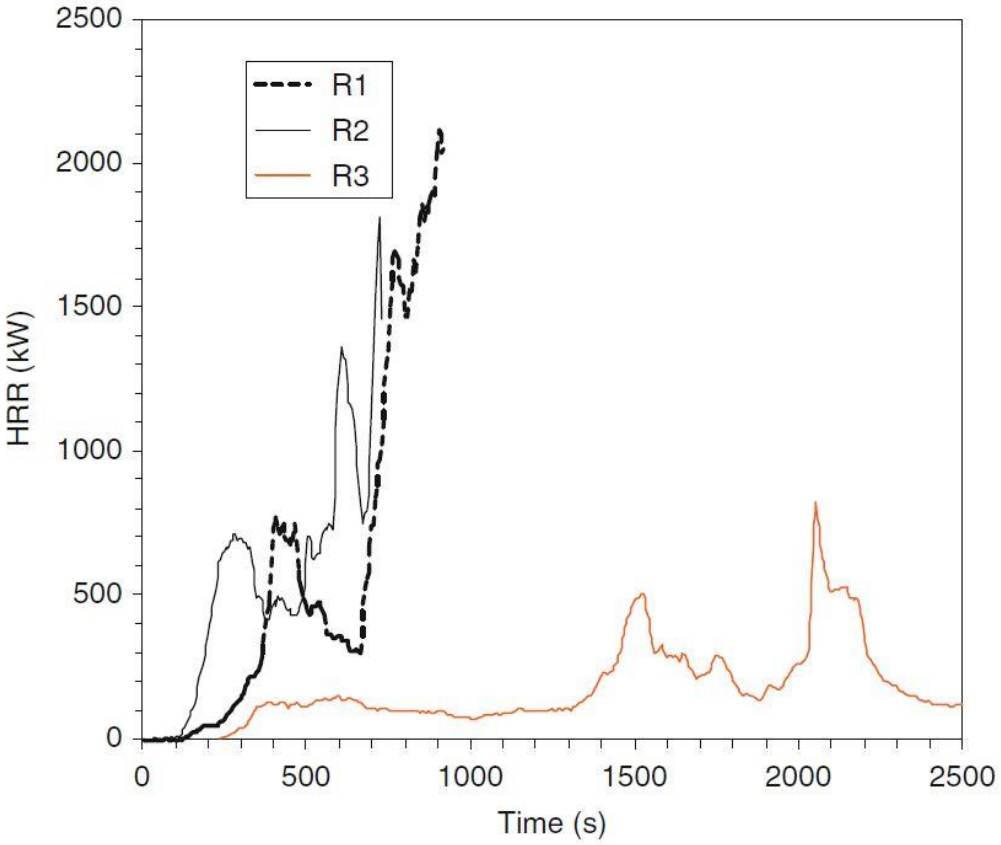


Figura 39 - Handbook - Curva HRR di un frigorifero

La curva estrapolata dall'Handbook è stata elaborata traslando la stessa verso l'origine di circa cento secondi, in quanto, i primi istanti si riferiscono a valori di HRR molto prossimi allo zero.

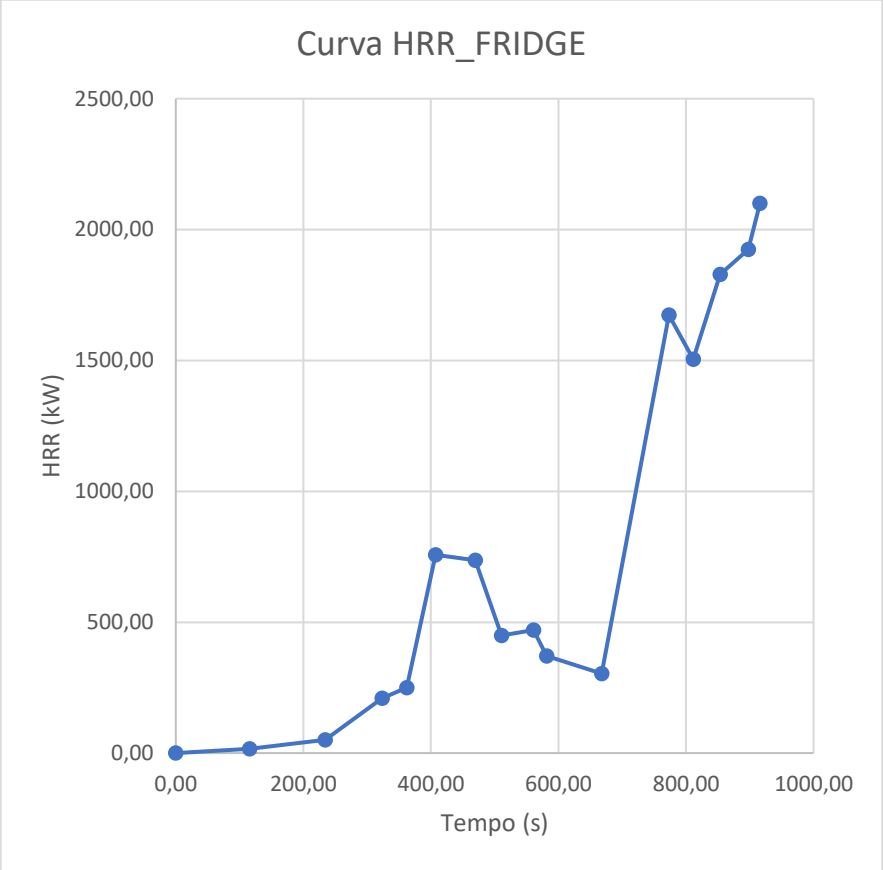


Figura 40 - Excel – Curva HRR di un frigorifero

Nella tabella vengono riportati i valori di tempo, di HRR e della frazione di quest'ultimo, che sono stati inseriti in Pyrosim per ottenere dei valori simili a quelli rilevati durante l'incendio.

Tempo (s)	HRR (kW)
0,00	0,00
115,68	16,76
234,34	50,43
323,50	209,31
362,10	249,85
407,19	757,23
469,44	736,85
510,62	449,24
561,06	469,47

581,70	371,34
667,62	303,56
773,04	1673,51
811,39	1504,31
853,30	1829,02
897,89	1923,68
916,00	2100,00

Tabella 6 – Excel - Valori di tempo e HRR

- *Prodotti della combustione*

Nella prima simulazione, riguardante l'innesco dell'incendio causato dal guasto del motore di un frigorifero, sono stati pesi in considerazione come valori della combustione quelli dettati da codice che risultano essere più cautelativi, individuando nella tabella seguente i valori standard di Y_{CO} e $Y_{SOOT,}$ relativi alla produzione di anidride carbonica, fuliggine, incapacitante nei confronti della visibilità, e gas della combustione. Il codice, inoltre da indicazioni anche sulla formula chimica di una generica combustione.

Parametro	**Focolare predefinito**	
	per attività civile	**per altre attività**
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_α	150 s (fast)	75 s (ultra-fast)
RHR_{max} totale RHR_{max} per m^2 di superficie del focolare	5 MW 250–500 kW/m^2 [1]	50 MW 500-1000 kW/m^2 [1]
Resa in particolato Y_{soot}	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y_{CO}	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH_C	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y_{CO2}	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y_{H2O}	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR(t) in irraggiamento (*Radiative fraction*)	35% [3]	
[1] Da impiegare in alternativa all'RHR_{max} totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato. [2] Robbins A P, Wade C A, Study Report No.185 "*Soot Yield Values for Modelling Purposes – Residential Occupancies*", BRANZ, 2008 [3] "*C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design*", New Zealand Building Code [4] "*SFPE handbook of fire protection engineering*", NFPA, 4th ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da *polyurethane flexible foams*. [5] Stec A A, Hull T R, "*Fire Toxicity*", Woodhead Pub., 2010, § 2.4 con $\Phi = 1.25$ (*underventilated fire*). [6] In alternativa alle rese Y_{CO2} e Y_{H2O}, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico $CH_2O_{0,5}$.		

Tabella 7 - D.M. 03_08_15 - Focolare predefinito

Per quanto riguarda invece gli eventi successivi a quelli dell'innesco dell'incendio la curva HRR, la reazione e i valori specifici inseriti sono differenti, in quanto la propagazione delle fiamme e del fumo è avvenuta a causa della combustione dei materiali dell'involucro esterno, realizzato in materiali con bassa resistenza al fuoco. La curva inserita è quella del PE cioè del poliuretano, di cui era appunto composto l'isolante. Di seguito riportata la curva HRR ricavata da prove sperimentali eseguite sui materiali plastici.

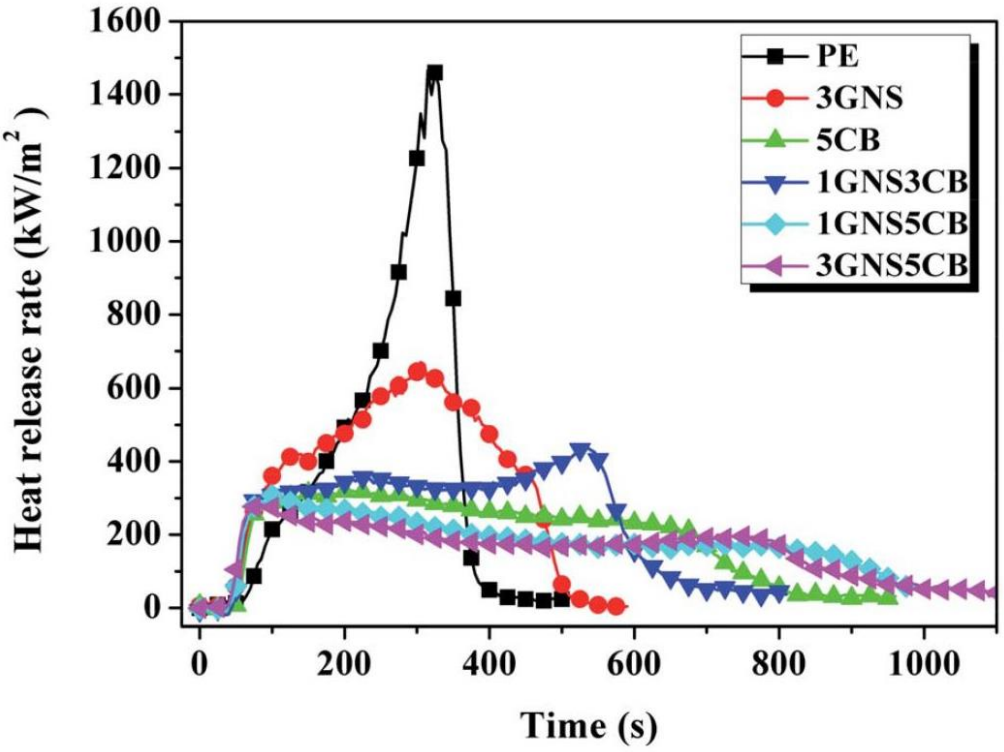


Figura 41 – Prove sperimentali - Curva HRR del Poliuretano (PE)

La curva, come in precedenza, è stata rielaborata su Excel e sono stati ricavati i valori di tempo e HRR.

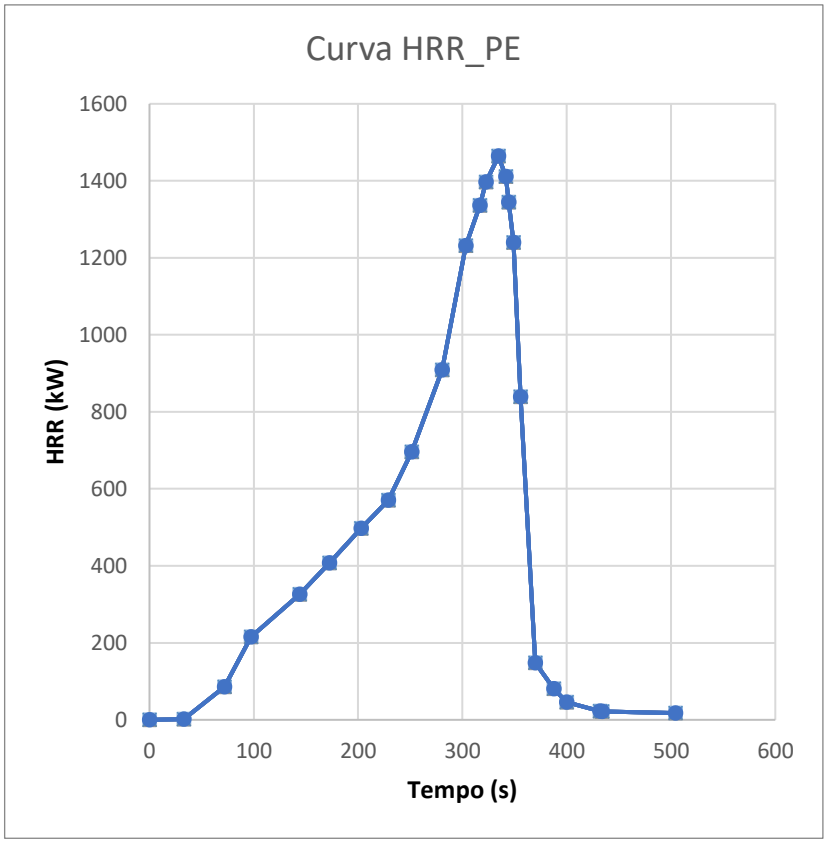


Figura 42 - Excel – Curva HRR del PE

Mentre questi sono i valori tabellati di tempo e HRR:

Tempo (s)	HRR_PE
0	0
33,05	1,86
72,03	85,36
97,49	215,03
144,13	325,7
172,43	407,17
202,93	497,01
229,04	570,13
251,28	695,63
280,55	909,04
303,16	1231,39
316,72	1336,01
322,49	1396,7
334,7	1464
341,78	1411,23
344,48	1344,19

349,05	1239,45
355,71	839,4
369,82	148,2
387,78	81,09
399,98	45,38
431,78	22,12
433,9	21,89
504,21	17,42

Tabella 8 – Excel - Valori di tempo e HRR

I valori per la produzione di anidride carbonica, fuliggine e gas, relativi al poliuretano, sono stati presi dalla tabella presente nell'Handbook, facendo una media fra i valori delle differenti classificazioni di poliuretano.

MATERIALS	Yco (g/g)	Ys (g/g)
Polyurethane (rigid) foams		
GM29	0,031	0,130
GM31	0,038	0,125
GM35	0,025	0,104
GM37	0,024	0,113
GM41	0,046	-
GM43	0,051	-
	0,036	**0,12**

Tabella 9 – Excel - Valori di CO2 e produzione di fumo del Poliuretano

- *Misurazioni per la verifica delle condizioni ambientali nel corso dell'incendio*

Fondamentale è l'inserimento all'interno del software di Layer e Device per il rilevamento di temperatura, visibilità, irraggiamento e FED, che ci restituiscono poi dei valori di output da importare nello specifico software per la modellazione dell'esodo. I Device sono stati posizionati ad un'altezza di 2 metri dal livello del pavimento per valutare se sono garantiti i valori soglia di visibilità a cui sono stati indicativamente sottoposti gli occupanti durante l'evento per poter evacuare in

sicurezza. Sono stati inseriti nelle vicinanze del focolaio di innesco, negli atrii dei vari piani interessati e nel blocco scala.

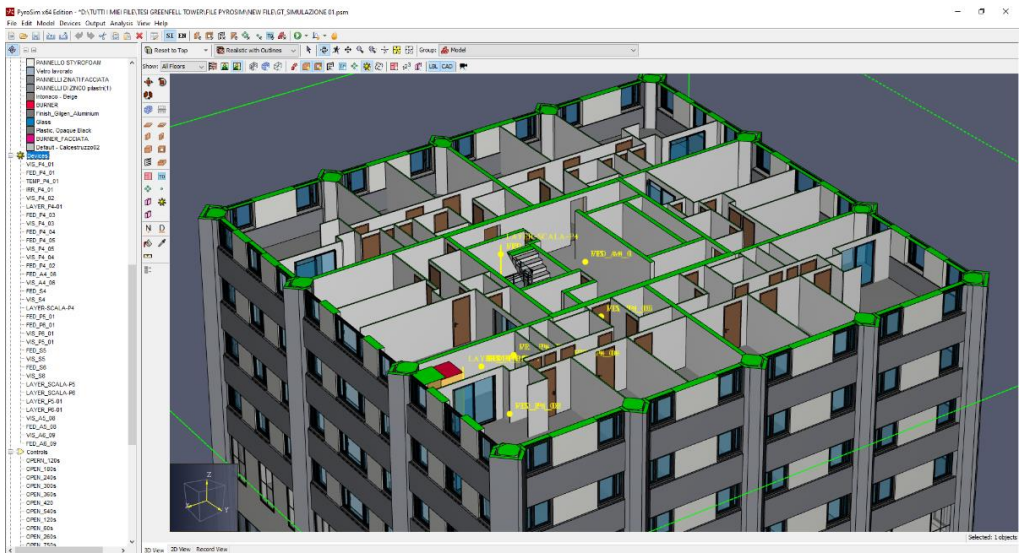


Figura 43- PyroSim - Disposizione Device e Layer

È inoltre possibile impostare delle sezioni orizzontali o verticali dette Slice 2D, che illustrano l'andamento, nel corso dell'incendio, delle grandezze analizzate di temperatura e visibilità negli spazi che ci interessano, nell'immediata vicinanza del focolare e nelle zone di diffusione di fiamme e fumi.

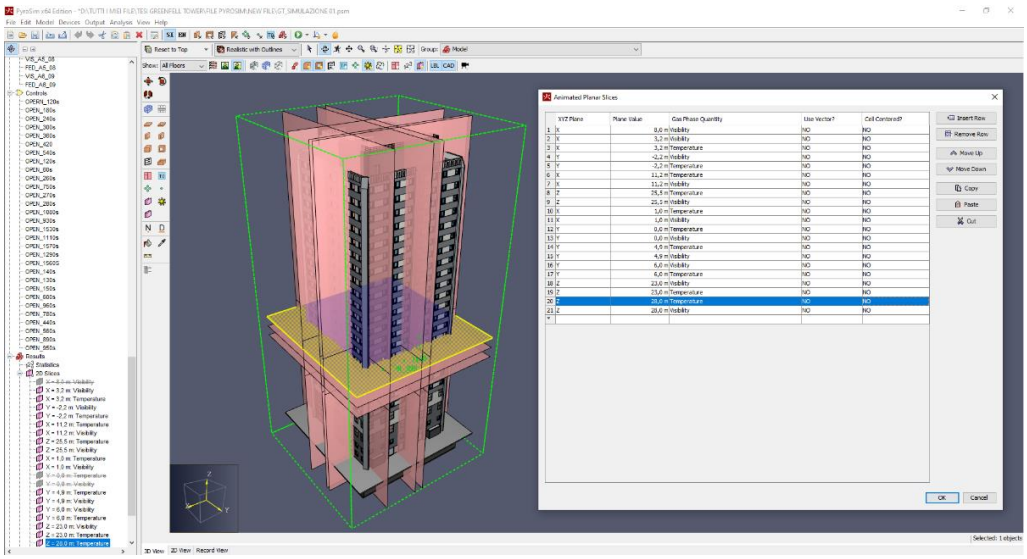


Figura 44 - PyroSim – Inserimento Slice 2D

- *Stato delle aperture*

Dalle testimonianze degli occupanti, dai dati tabellati degli orari di uscita degli occupanti e dalla propagazione delle fiamme sono stati impostati dei tempi di disattivazione di porte e finestre, in base al momento, ricreando l'istante in cui sono state aperte dagli occupanti o danneggiate dal fuoco rientrato tramite l'involucro esterno negli appartamenti superiori e adiacenti.

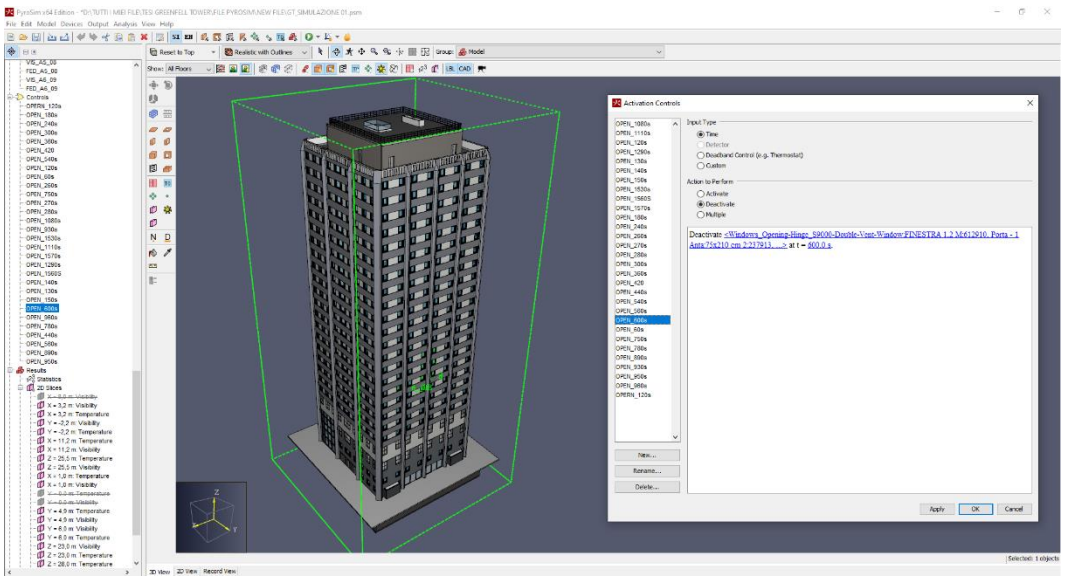
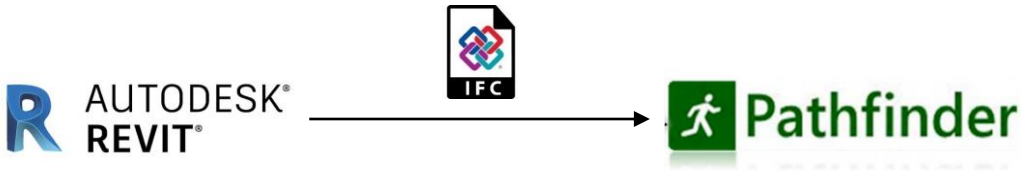


Figura 45 - PyroSim – Controlli disattivazione infissi

L'inserimento di tutti questi parametri sarà propedeutico per ricavare dati di output dettagliati e poter leggere correttamente i risultati finali.

3.3 Modellazione esodo

La modellazione della modalità di esodo verificatasi durante l'incendio è stata possibile grazie all'uso del software Pathfinder. La modalità di importazione del modello architettonico avviene nella stessa modalità esplicata precedentemente in PyroSim.



Tra i documenti dell'inchiesta è stato possibile reperire delle tabelle con gli orari di uscita degli occupanti che sono state molto utili per assegnare l'esatto orario di uscita ad ognuno degli abitanti della torre.

- *Modellazione degli spazi e degli elementi della navigazione*

Pathfinder utilizza un modello di geometria 3D. All'interno di questo modello geometrico è presente una maglia definita come una superficie triangolare 2D continua, denominata "mesh di navigazione". Il movimento degli occupanti avviene su questa maglia che è una superficie unilaterale irregolare rappresentata da triangoli adiacenti. Si generano quindi, dal modello 3D, delle superfici piane che rappresentano gli spazi che possono essere percorsi dagli occupanti.

Gli elementi modellati all'interno del software sono indispensabili per permettere la corretta circolazione degli occupanti che devono essere in grado di percorrere le vie di fuga indispensabili per raggiungere l'uscita di emergenza più vicina.

Questi elementi sono:

- Rooms: stanze dove sono collocati gli occupanti configurate come superfici piane chiuse.
- Doors: porte che collegano le varie stanze per permettere lo spostamento da una stanza all'alta agli occupanti. Si distinguono in porte di separazione

di due ambienti e porte di uscita, dove si individua il punto di ritrovo in uno spazio sicuro o all'esterno dell'edifici, al sicuro dall'incendio.

- Stairs: scale di collegamento dei vari piani dell'edificio per facilitare la percorrenza in verticale agli occupanti.

In figura viene mostrato il modello architettonico dell'interno di un appartamento e i corrispondenti elementi modellati.

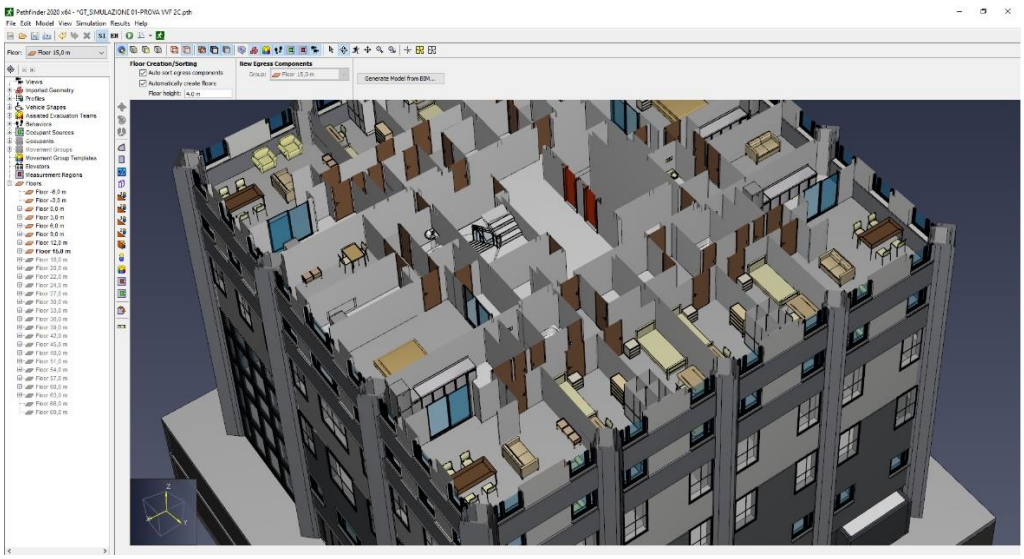


Figura 46 - Pathfinder – Modello architettonico

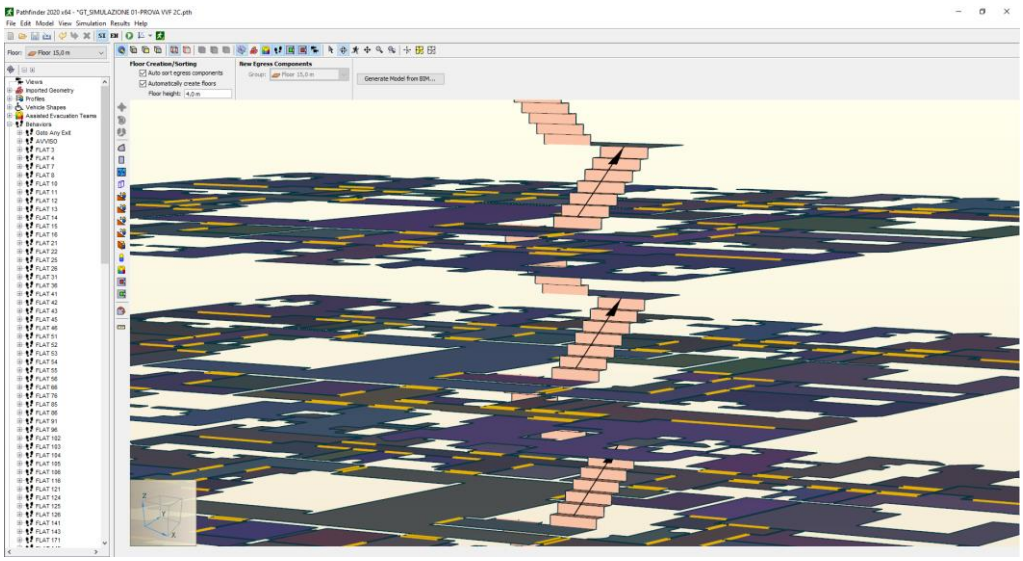


Figura 47 - Pathfinder – Elementi modellati

- *Modellazione occupanti*

Categorie e profili occupanti:

Dopo la modellazione degli spazi passiamo ad identificare e descrivere le caratteristiche degli occupanti in termini fisico-dimensionali, descrivendo in dettaglio gli ingombri, la velocità di esodo, l'età del singolo occupante, lo stato di veglia, ecc.… È stato quindi necessario individuare l'identità dei vari occupanti per comprendere se fra di essi vi erano bambini, giovani, adulti o anche anziani che influenza differenti parametri tra cui la velocità, ma anche l'ingombro che verrà ad esso assegnato. Importante e capire cosa stessero facendo gli occupanti al momento dello scoppio dell'incendio, se erano svegli, se stavano dormendo o facendo altro caratterizzante ai fini della modellazione.

Il software dà la possibilità di modellare profili differenti in base alla tipologia di occupante ed associare ad ognuno di questi un comportamento ben definito, indicando il movimento in una determinata stanza, impostando dei punti lungo il percorso d'esodo da seguire, tempi di attesa e tempo a cui parte la movimentazione.

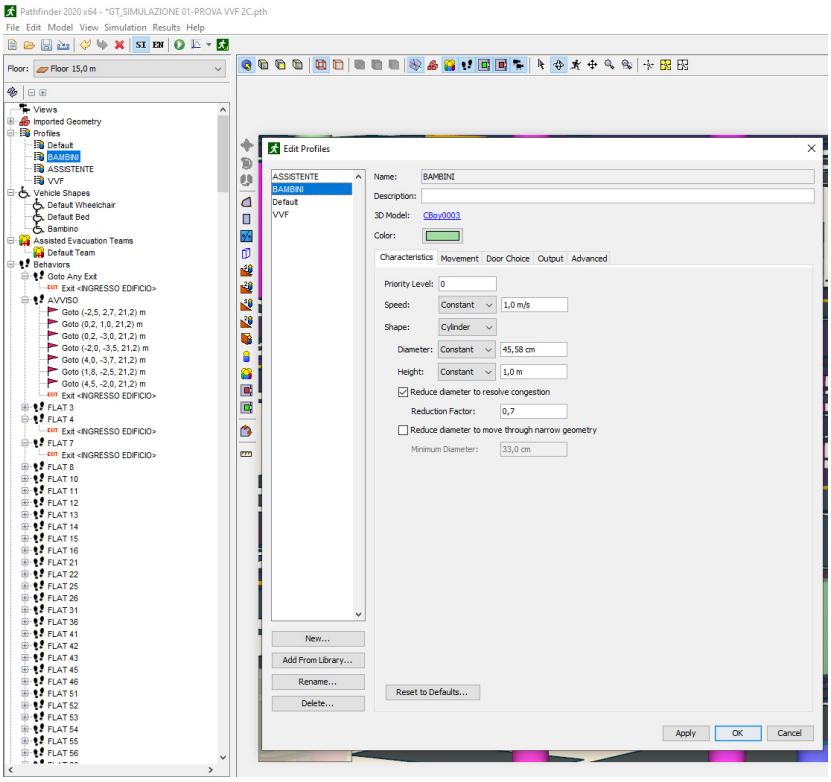


Figura 48- Pathfinder – Creazione Profili

Per il caso analizzato è stato necessario modellare bambini, assistenti e vigili del fuoco per poi assegnare questi profili ai vari occupanti.

Gli occupanti hanno inoltre forma cilindrica a cui può essere assegnato un colore connesso con un determinato comportamento o solo per differenziarli.

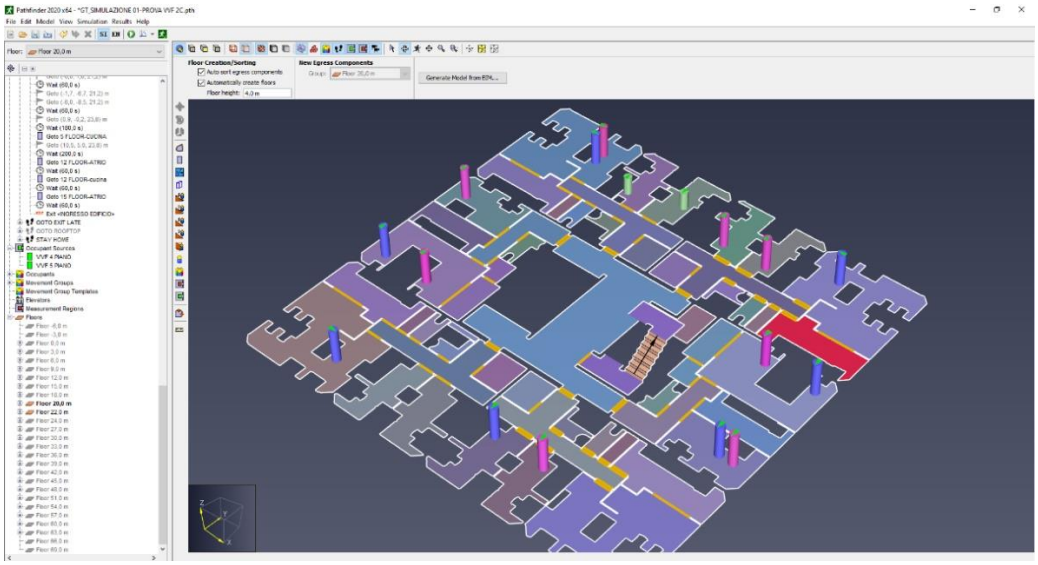


Figura 49 - Pathfinder – Modellazione occupanti

Comportamenti degli occupanti:

Oltre il profilo si possono creare dei comportamenti per ogni singolo occupante o per un gruppo di persone. Sulla base delle testimonianze e i racconti riportati nei report è stato possibile analizzare il comportamento di alcuni occupanti o gruppi di essi per comprendere e ricostruire l'accaduto in modo più fedele possibile alla realtà. La maggior parte degli occupanti ha come comportamento quello di prendere la via più breve per evacuare dall'edificio, altri invece, quelli a cui nella realtà è stato consigliato di rimanere all'interno degli appartamenti, hanno come comportamento quello di non muoversi. Infine, un gruppo di occupanti evidenziano nel loro comportamento quello di salire verso l'alto dell'edificio che, come quelli rimasti all'interno degli appartamenti, persero la vita rimanendo soffocati dalle sostanze tossiche prodotte e avvolti dalle fiamme.

Oltre al comportamento, grazie alla raccolta dell'orario di uscita degli occupanti e delle vittime, si è a conoscenza dei tempi che essi hanno avuto durante la fase di

esodo o se, essendo rimasti bloccati è stato impossibile per una parte degli occupanti evacuare dall'edificio.

- *Modellazione soccorritori*

La modellazione dei soccorritori viene eseguita in modo diverso da quello utilizzato per gli occupanti. Si creano dei cubi a cui si possono associare dei valori logaritmici tabellare per assegnare il numero di vigili del fuoco che entrano nell'edificio. In questo caso sono state posizionate delle sorgenti virtuali per ottenere l'entrata di cinque vigili del fuoco caratterizzati da comportamenti e tempi di azione differenti. È possibile associare a questi un profilo e anche un comportamento o sequenza di comportamenti.

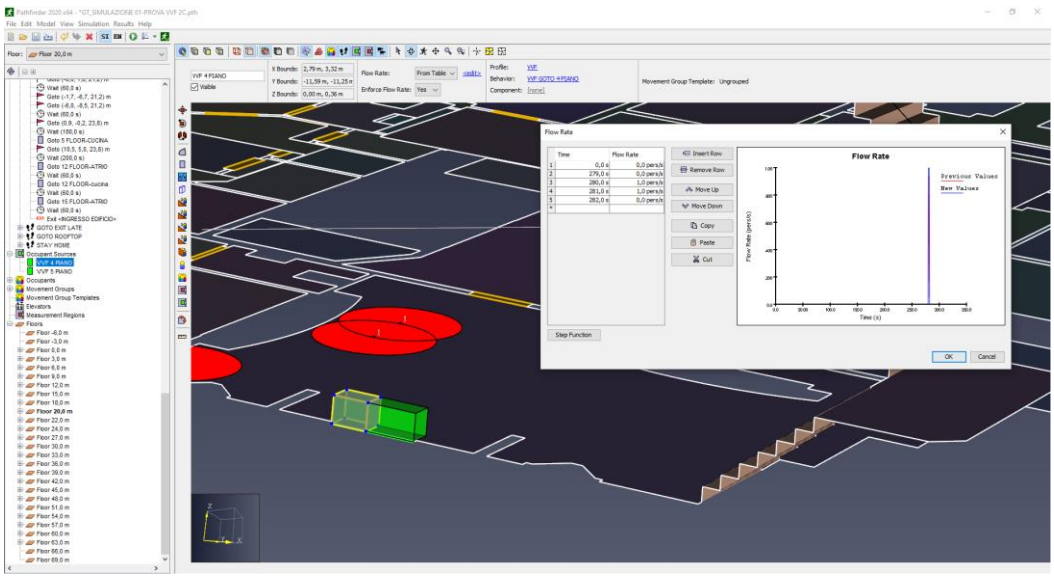


Figura 50 - Pathfinder – Modellazione soccorritori

3. Risultati

Di seguito verranno riportati i risultati ottenuti dalle differenti simulazioni ottenute in fase di modellazione, sia degli istanti significativi di incendio che di quelli inerenti alla modalità di esodo.

Per quanto riguarda la modellazione degli istanti di incendio, sono riportati di seguito i grafici nei quali vi sono riportati i valori delle soglie minime e massime da garantire e, in caso ce ne fosse bisogno, la soglia critica raggiunta.

I parametri ottenuti dalle simulazioni sono sostanzialmente quelli di *FED, Temperatura, Irraggiamento e Visibilità.*

3.1 Simulazione 1

Vediamo di seguito la curva HRR della simulazione S.1 ricavata da PyroSim, ottenuta dall'inserimento dei valori di input di tempo e frazione che ci hanno restituito questa curva simile a quella estrapolata dall'Handbook relativa all'incendio di un frigorifero.

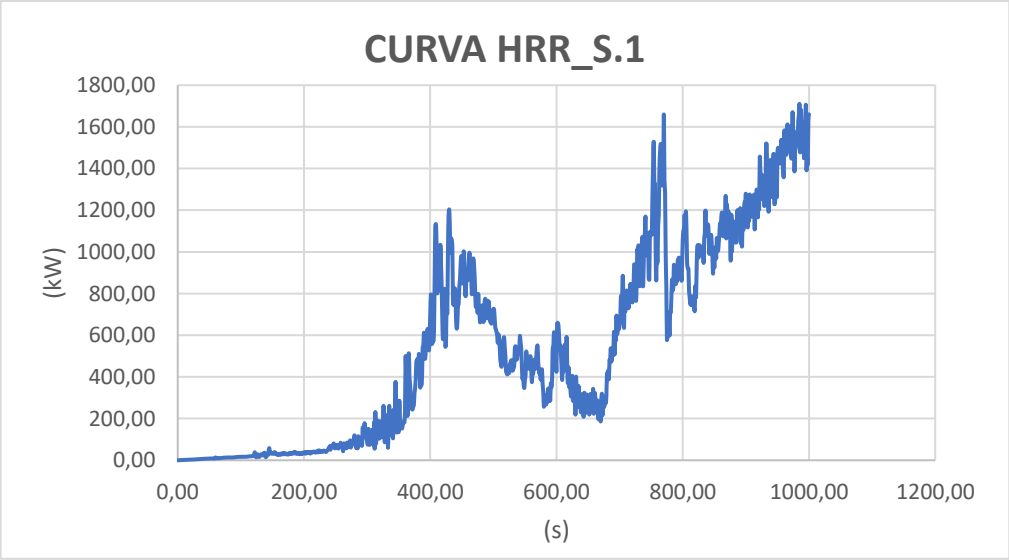


Figura 51 – Excel - Grafico Curva HRR S.1

In pianta è possibile individuare il posizionamento delle sonde poste nelle vicinanze del focolare d'incendio e nel blocco centrale che comprende atrio e blocco scale dove è indispensabile il rilevamento della presenza di fumo per

garantire la visibilità degli occupanti durante la fase di esodo. Le sonde sono ad un'altezza di due metri, soglia minima per la visibilità.

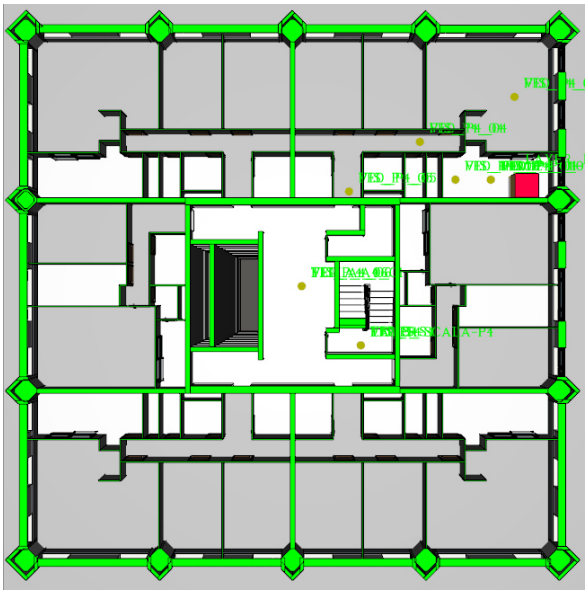


Figura 52 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento

Nelle tabelle riportate in basso vediamo i valori ricavati dall'inserimento delle varie tipologie di device:

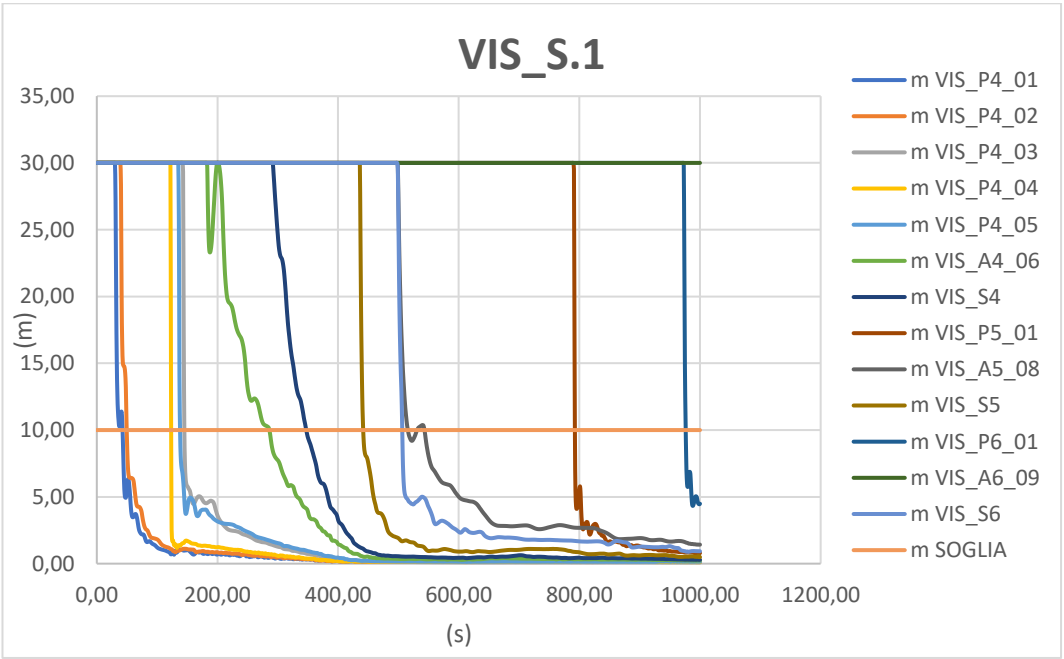


Figura 53 – Excel - Grafico andamento visibilità S.1

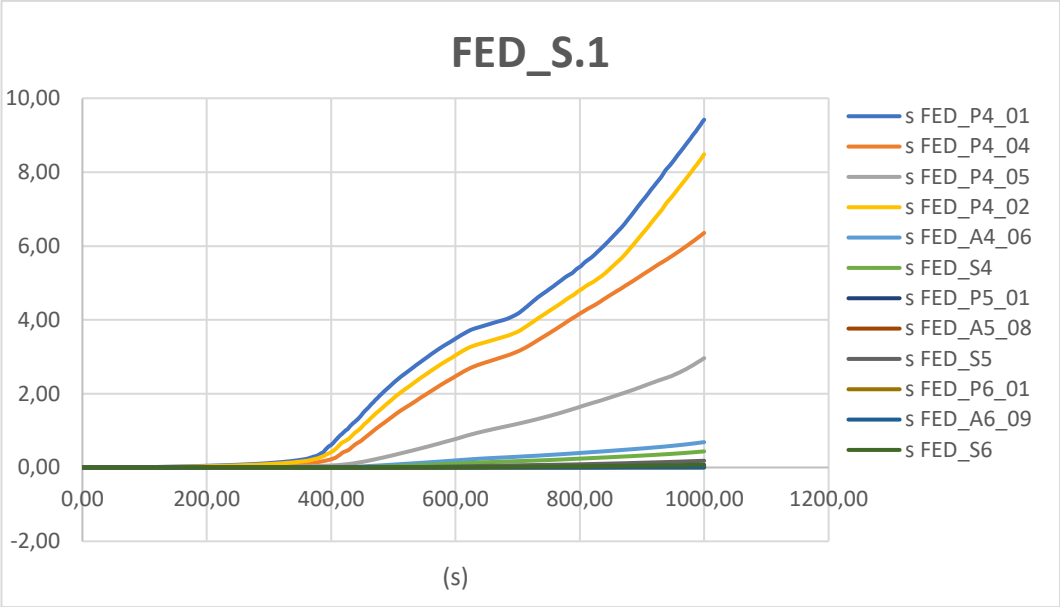


Figura 54 – Excel - Grafico andamento FED S.1

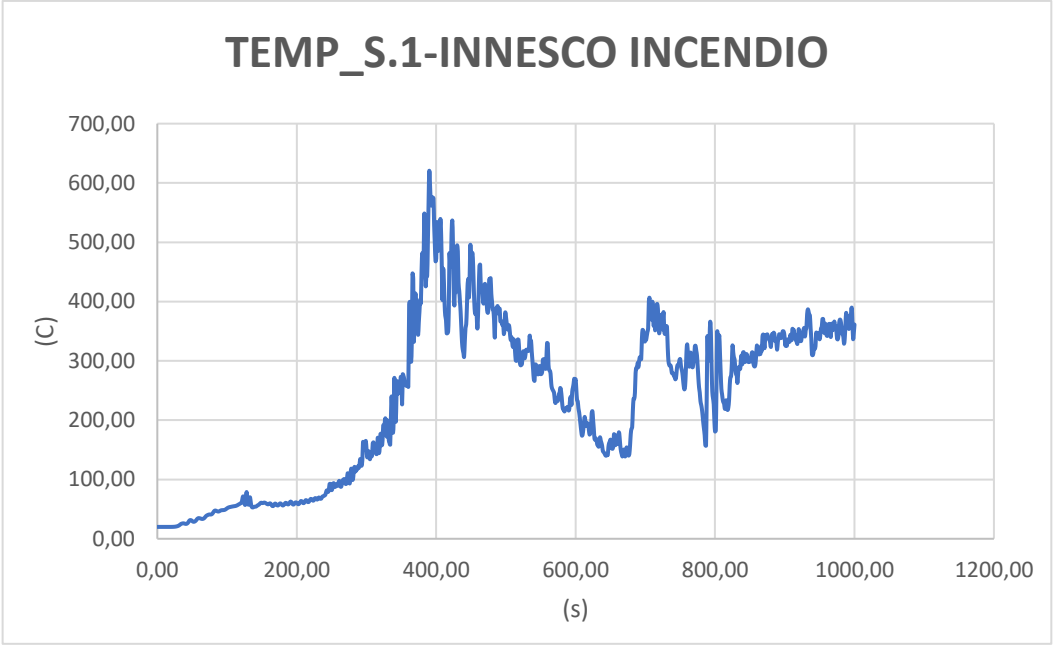


Figura 55 – Excel - Grafico andamento temperatura S.1 (innesco incendio)

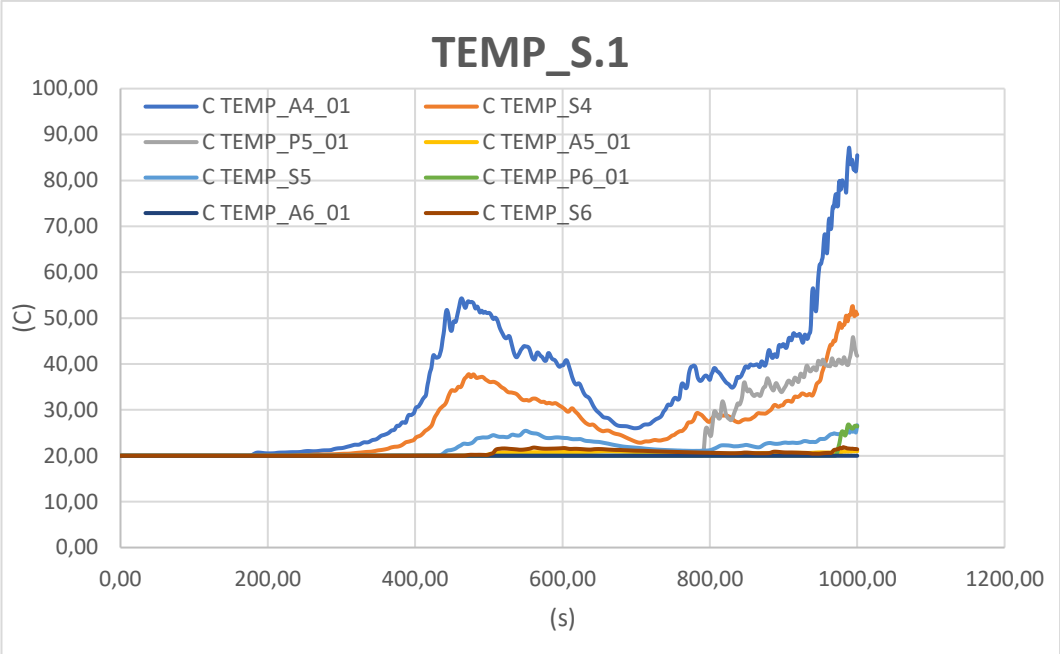


Figura 56– Excel - Grafico andamento temperatura S.1

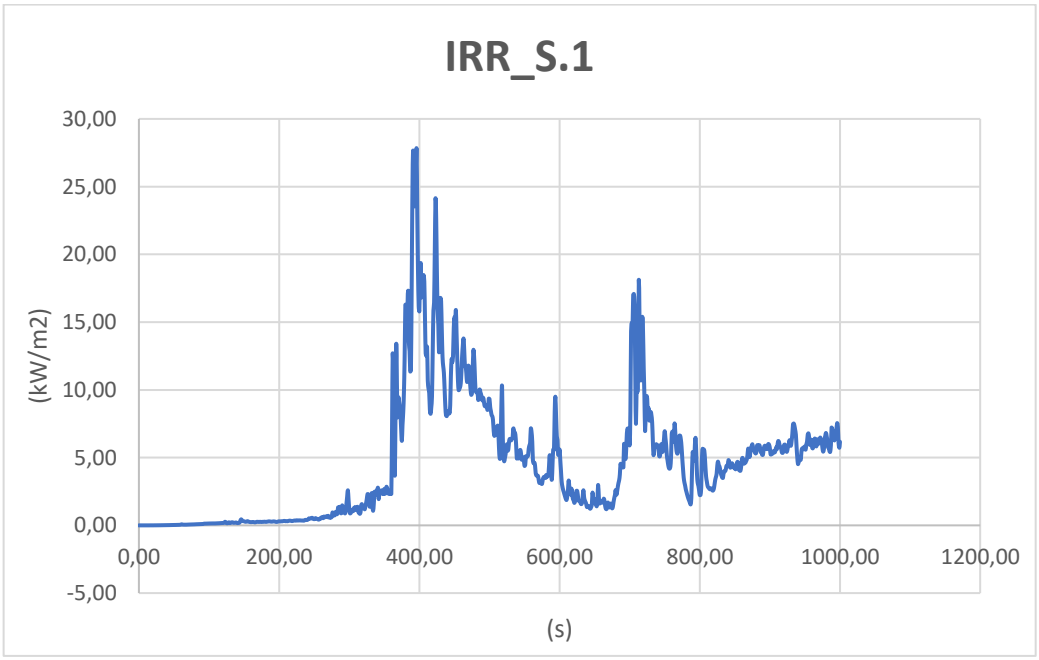


Figura 57 – Excel - Grafico andamento irraggiamento S.1

Dai grafici della simulazione S. 1 si può intuire che i valori massimi raggiunti si verificano nelle vicinanze del focolaio e il parametro critico risulta essere quello della visibilità che, raggiunge il valore limite di 10 metri già dopo circa 40 secondi nella cucina dell'appartamento 16 al quarto piano dove è scoppiato l'incendio.

Tutti i valori di visibilità relativi ai primi tre piani dove si sviluppa l'incendio, risultano comunque superare il valore limite seppur dopo un tempo maggiore.

Gli occupanti, quindi, sono stati probabilmente sottoposti a valori incapacitanti fin dai primi minuti dell'incendio. Sebbene questo scenario interessi la fase iniziale di innesco dell'incendio, non solo gli occupanti dell'appartamento 16 risultano coinvolti dai prodotti della combustione ma anche tutte quelle persone che in quei primi istanti hanno percorso le scale per mettersi in salvo.

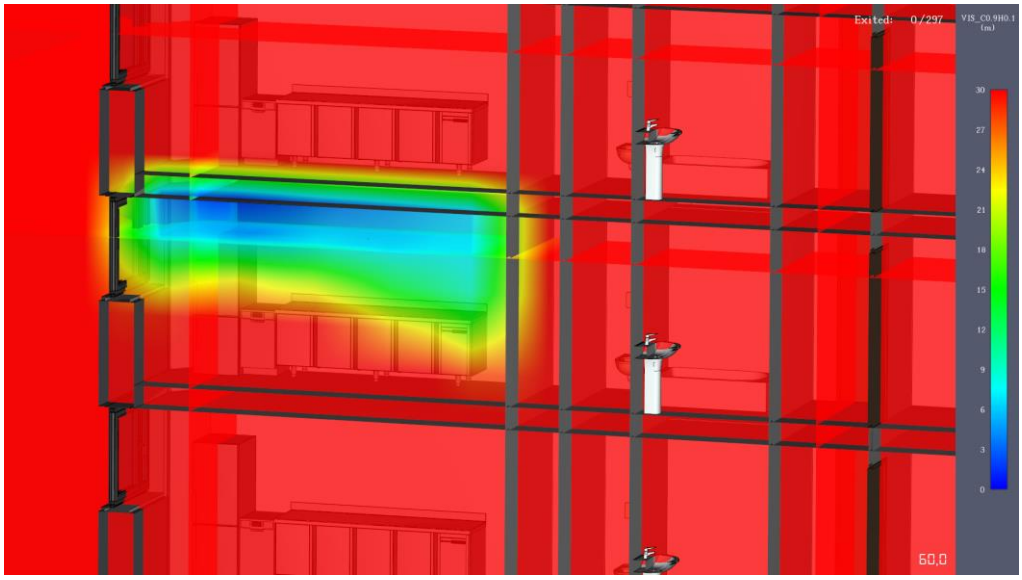


Figura 58 – PyroSim - Scoppio incendio sezione S.1

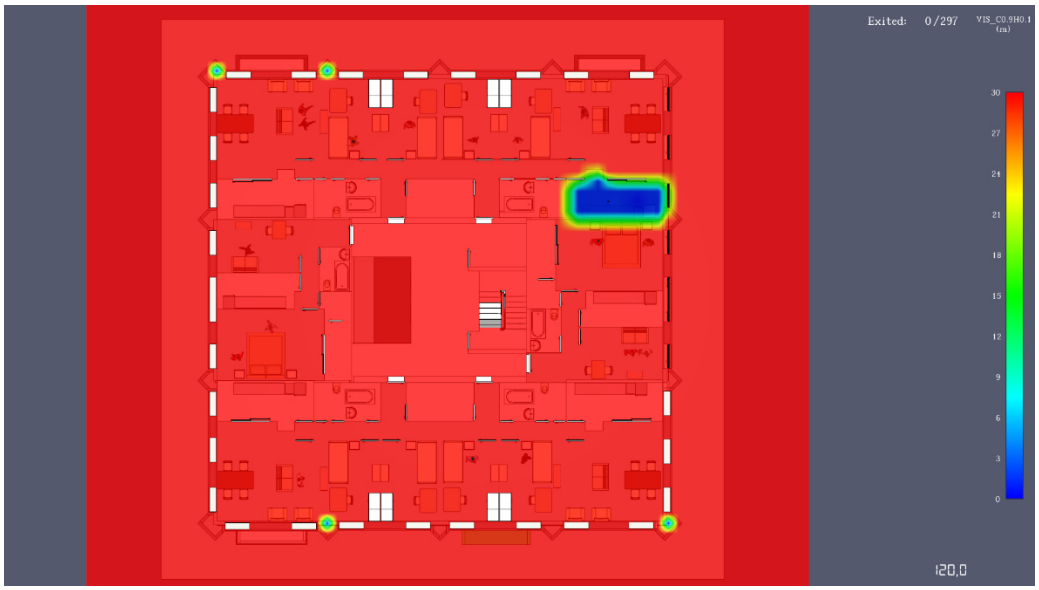


Figura 59 – PyroSim - Scoppio incendio in pianta S.1

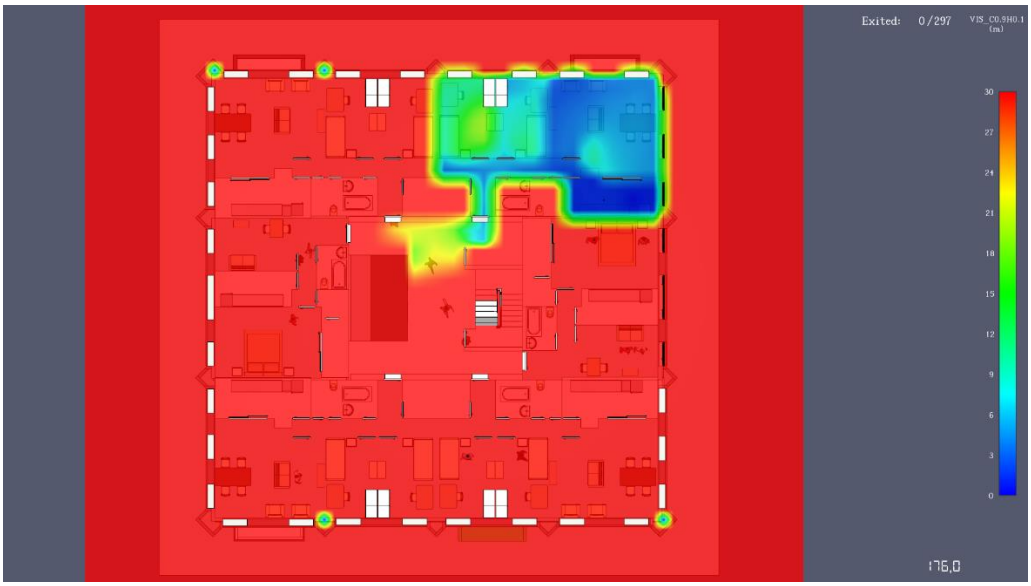


Figura 60– PyroSim - Propagazione fumo nell'atrio centrale

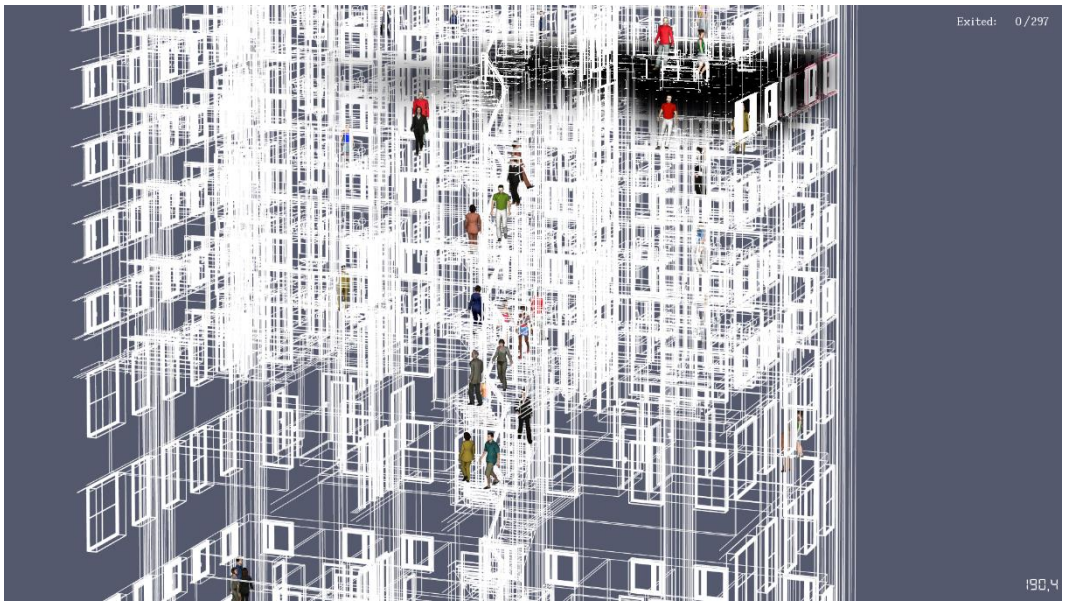


Figura 61 – Pathfinder - Esodo occupanti quarto piano in wireframe

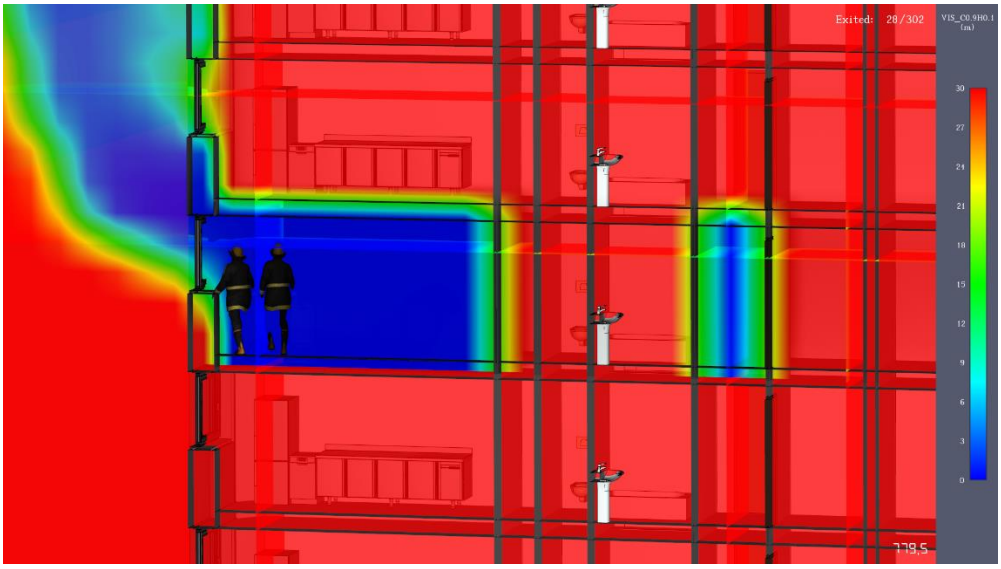


Figura 62 – Pathfinder - Spegnimento focolare

3.2 Simulazione 2

Nella simulazione S.2, dove sono stati individuati come istanti principali la propagazione delle fiamme sia in senso verticale verso i piani superiori, sia in senso orizzontale lungo la facciata Nord al piano nove, è stata inserita dei valori di curva HRR differente e relativa all'incendio del materiale presente in facciata, che ci ha restituito la seguente curva:

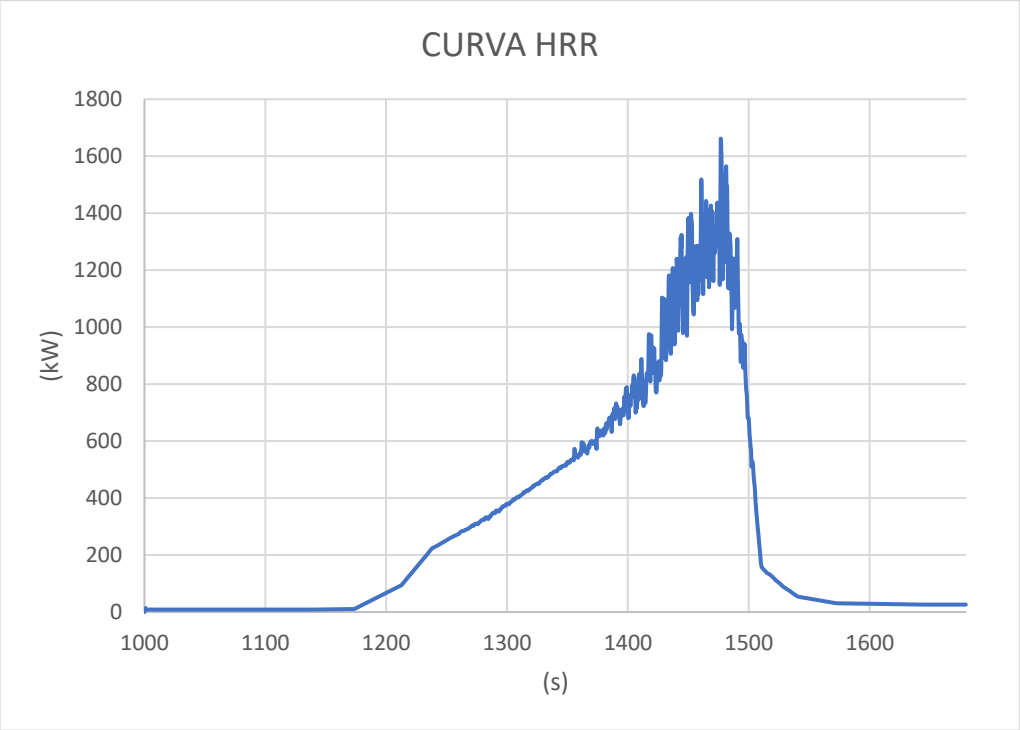


Figura 21 - Excel - Curva HRR_PE

Sono stati analizzati anche in questo caso i parametri indicati per la prima simulazione. Sono indicate le varie sonde nelle piante di seguito riportate ed i risultati esplicitati attraverso i grafici riportati.

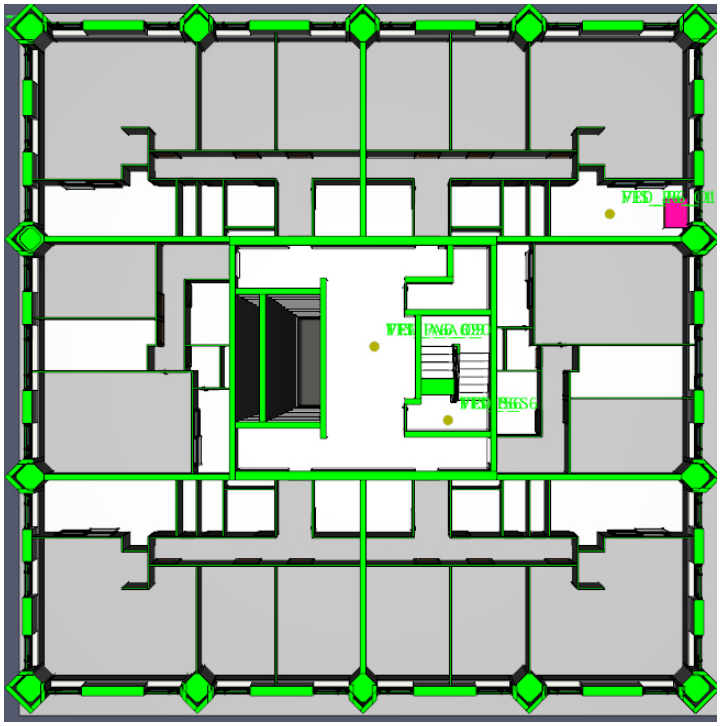


Figura 22 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 6° piano

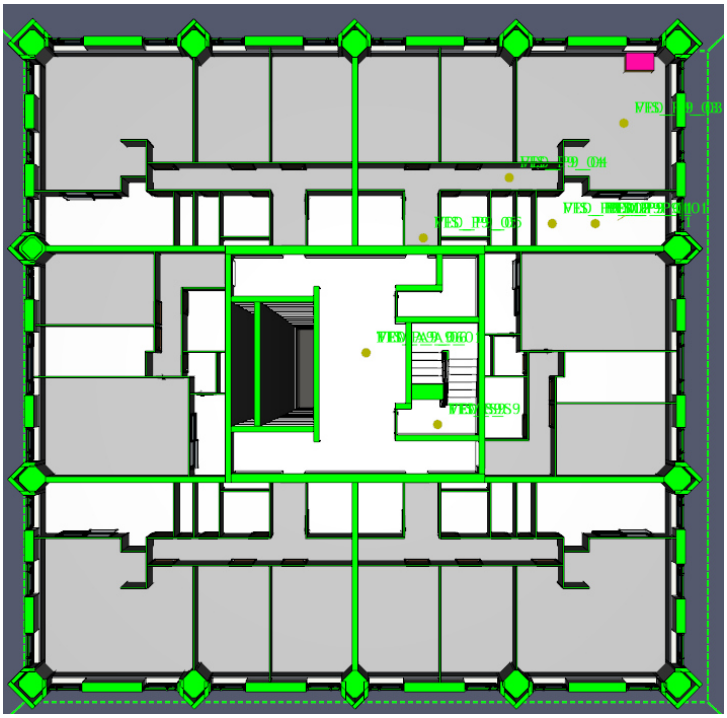


Figura 23 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 9° piano

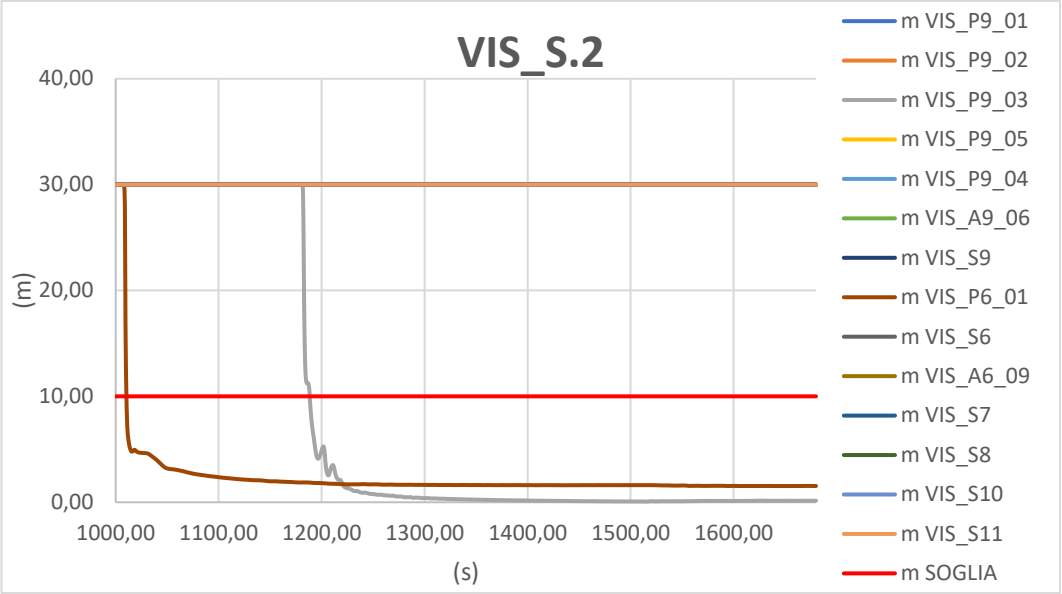


Figura 24 – Excel - Grafico andamento visibilità

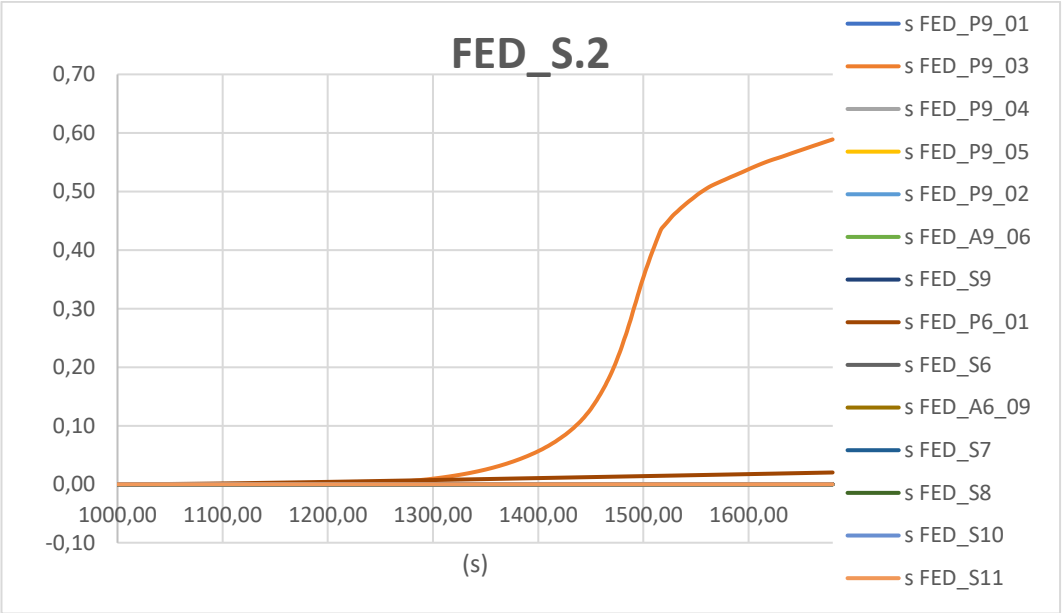


Figura 25 – Excel - Grafico andamento FED

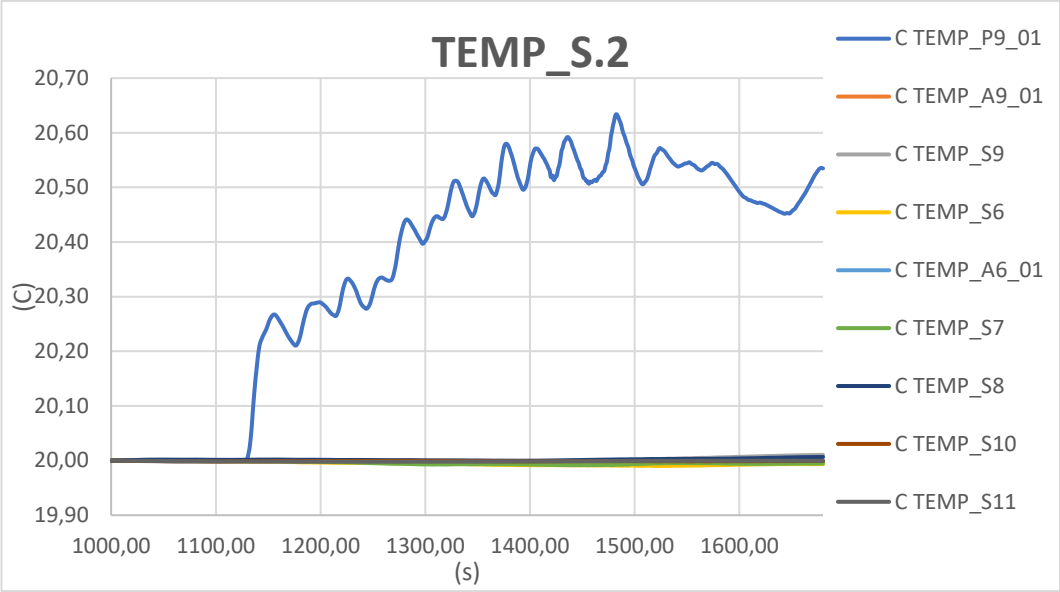


Figura 26 – Excel - Grafico andamento temperatura

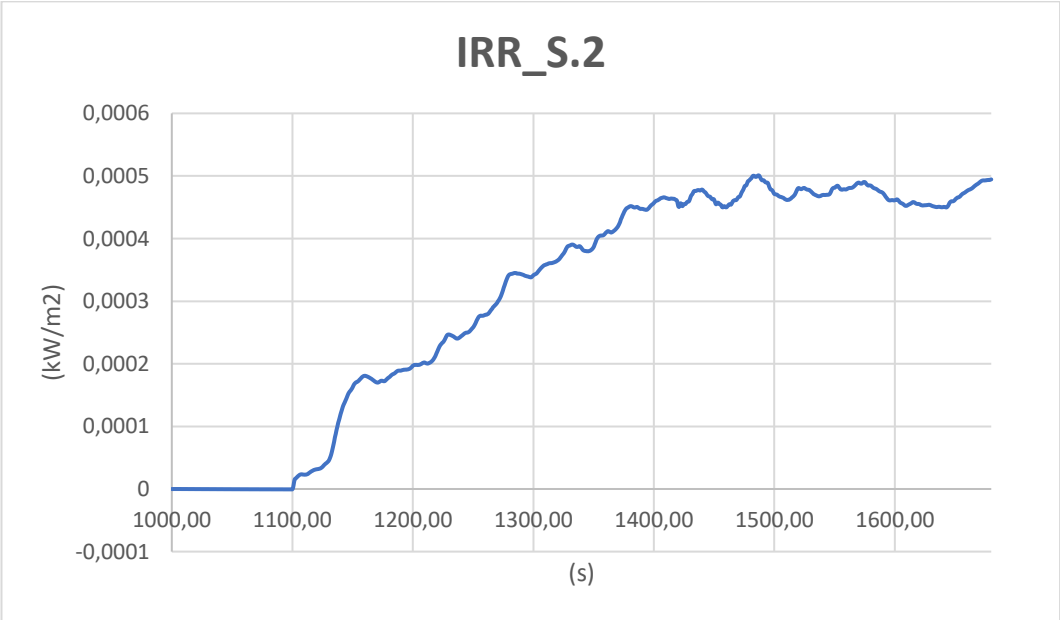
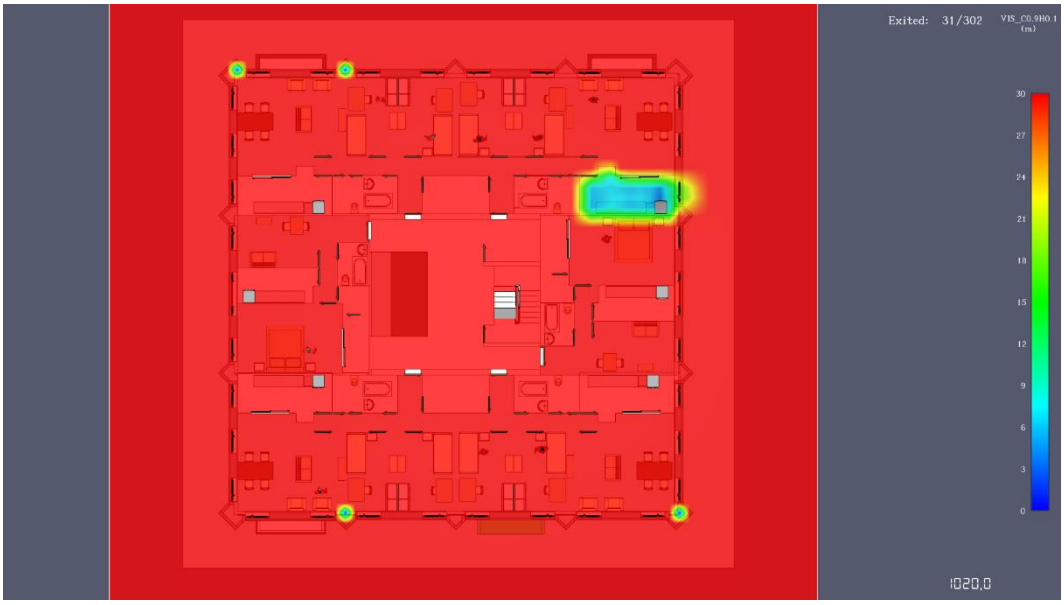
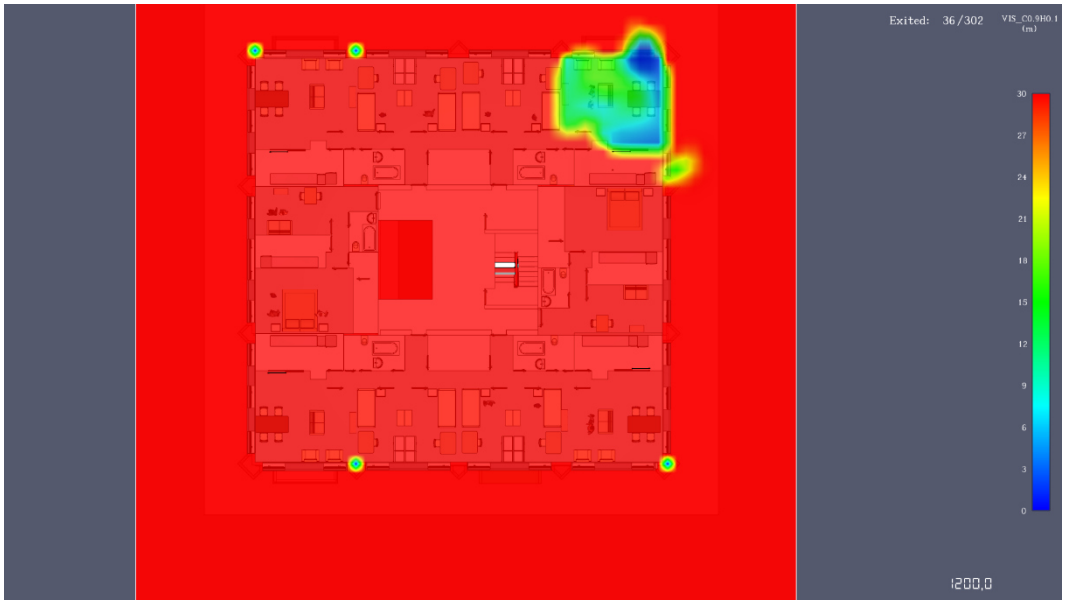


Figura 27 – Excel - Grafico andamento irraggiamento

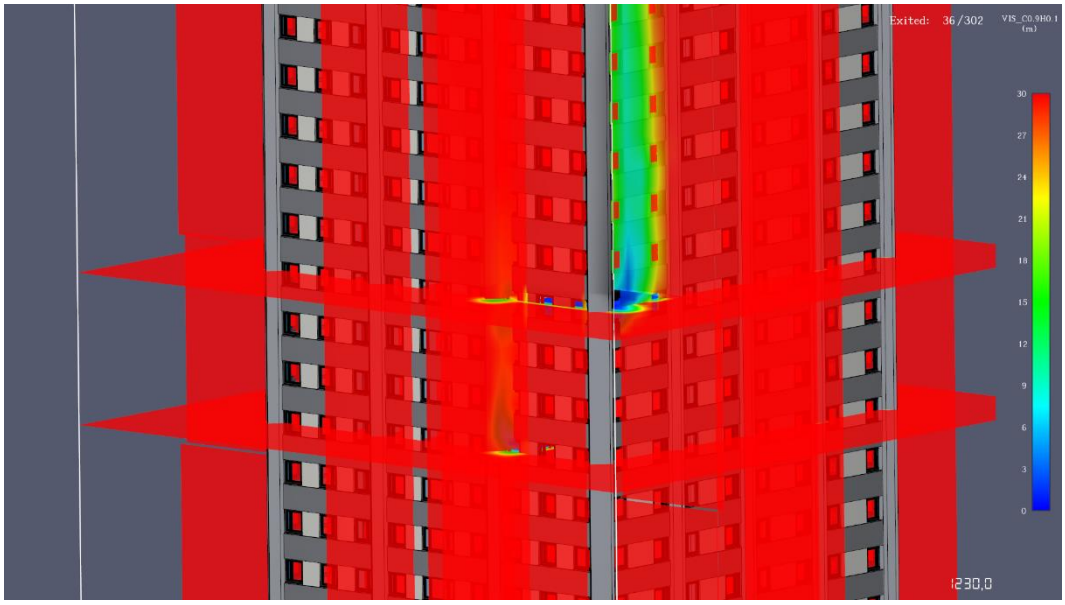
Anche in questo caso il valore che supera i limiti consentiti riguarda la visibilità che scende al di sotto dei 10 metri. Il limite di visibilità viene superato principalmente nelle vicinanze del focolaio impostato in tempi brevissimi, mentre in tempi leggermente maggiori la visibilità scende anche nel blocco scala limitando la visibilità in fase di esodo.



Patfinder – Propagazione incendio 6° piano



Patfinder – Propagazione incendio 9° piano



PyroSim – Diffusione delle fiamme su tutte le facciate dell'edificio

Patfinder – Esodo occupanti 9° piano con vista wireframe

3.3 Simulazione 3

Nella terza simulazione l'istante principale dell'evento avvenuto è quello del rilevamento di fumo negli atrii e nelle scale e le fiamme alle finestre dei piani superiori. La curva HRR inserita è sempre quella relativa all'involucro esterno riportata in precedenza, che è stata la causa della propagazione delle fiamme su tutte le facciate.

In pianta vediamo le sonde poste sul dodicesimo piano e di seguito i valori analizzati riportati nei grafici illustrati.

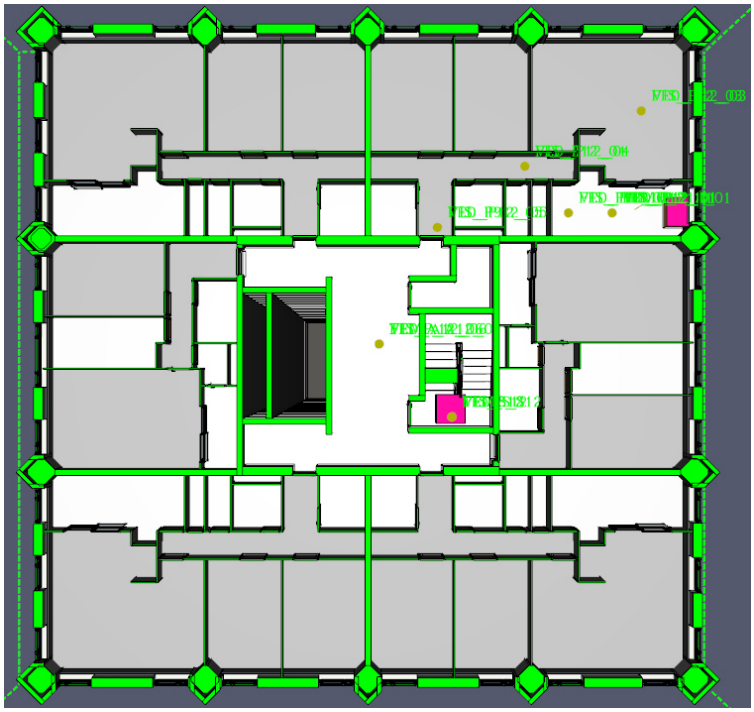


Figura 28 - PyroSim - Posizionamento sonde di rilevamento 12° piano

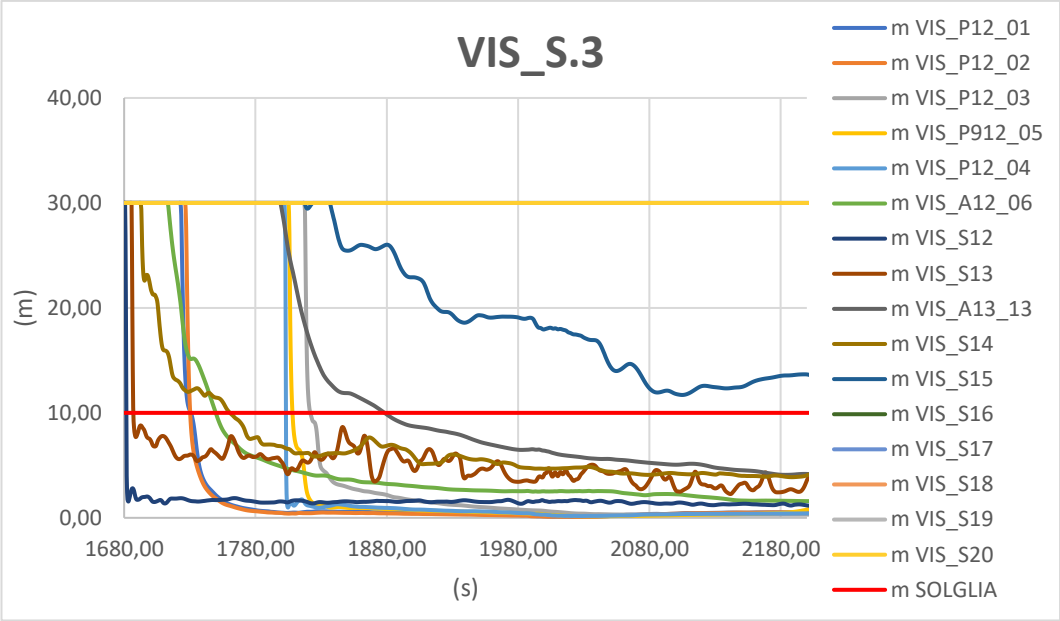


Figura 29 – Excel - Grafico andamento visibilità

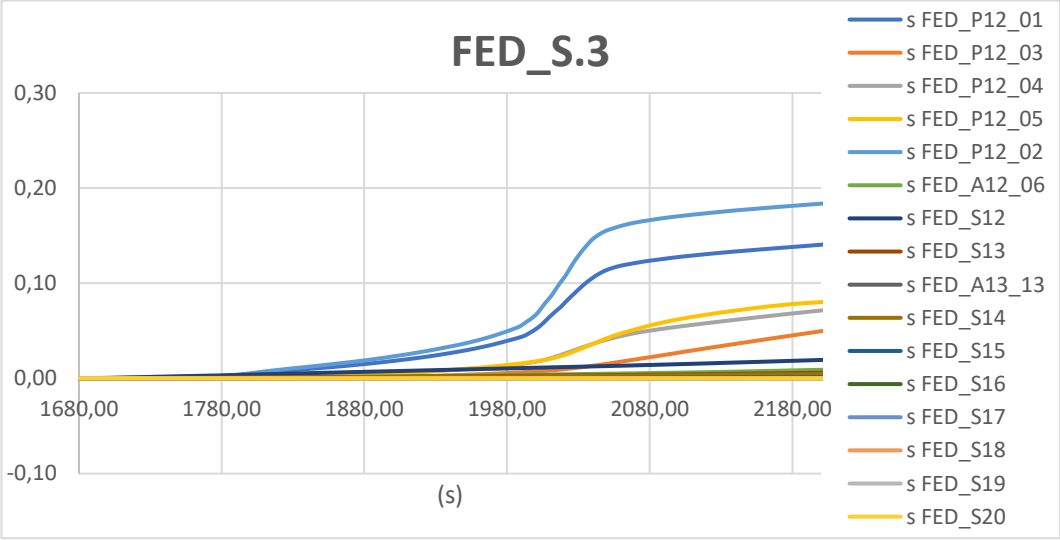


Figura 30 – Excel - Grafico andamento FED

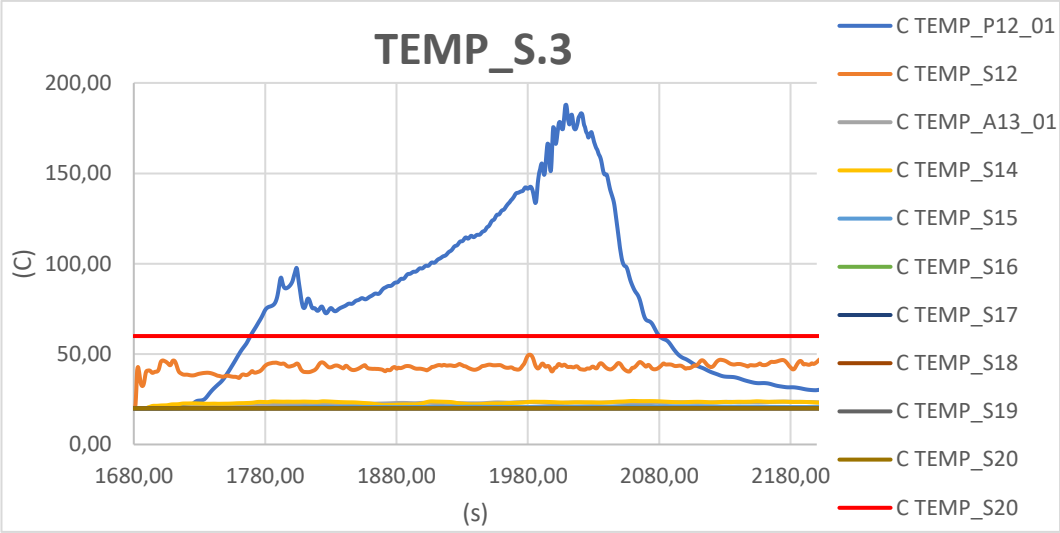


Figura 31 – Excel - Grafico andamento temperatura

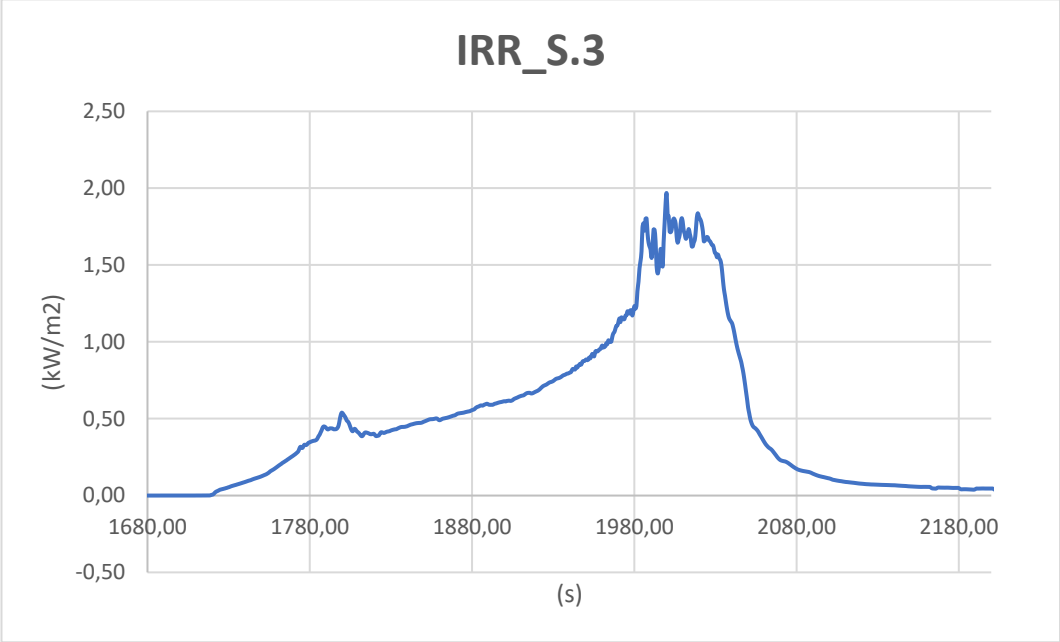


Figura 32 – Excel - Grafico andamento irraggiamento

La visibilità scende in questo caso sia in corrispondenza del focolaio che nel blocco scala dove le sonde sono state poste su tutti i piani superiori dal dodicesimo al ventesimo.

Oltre la visibilità, anche la temperatura supera i valori limite superando i 60° C nelle vicinanze della fonte di incendio.

Dall’analisi di questi valori possiamo comprendere la difficolta che hanno avuto gli occupanti che abitavano gli ultimi piani e l’impossibilità incontrata da essi nella fase di esodo causata dalla presenza di fumo nel blocco scala e l’alta temperatura proveniente dalle pareti perimetrali dell’edificio, ormai avvolto dalle fiamme dopo circa trenta minuti dallo scoppio dell’incendio al quarto piano. Questa è stata una delle cause dell’elevato numero di vittime che sono state rilevate.

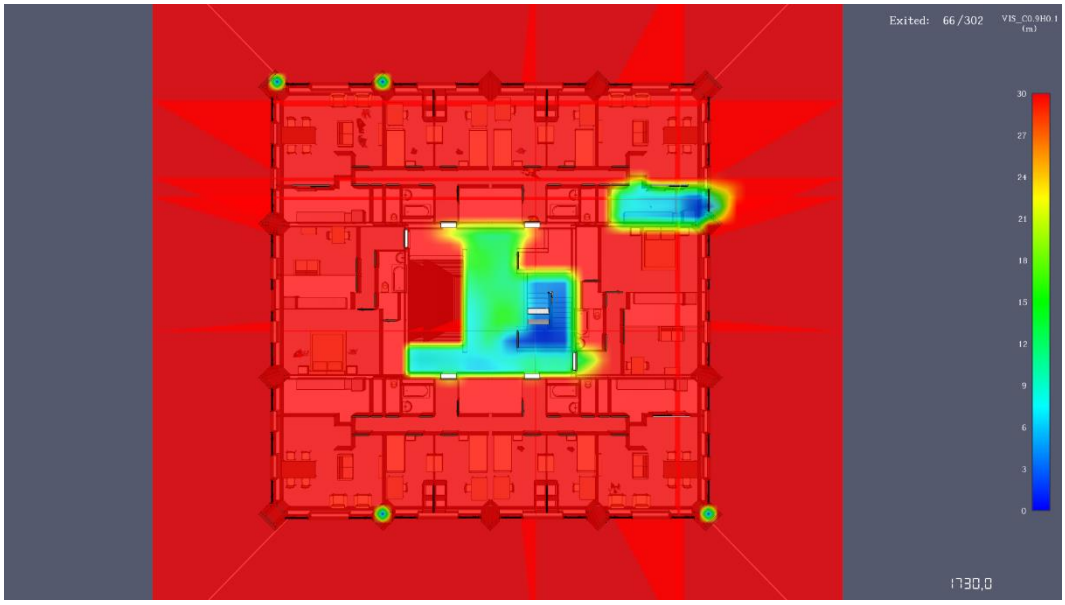


Figura 33 - Patfinder – Propagazione fumo al 12° piano tramite la finestra e il nucleo centrale

Figura 34 - Patfinder – Diffusione dei fumi su tutto il 12° piano

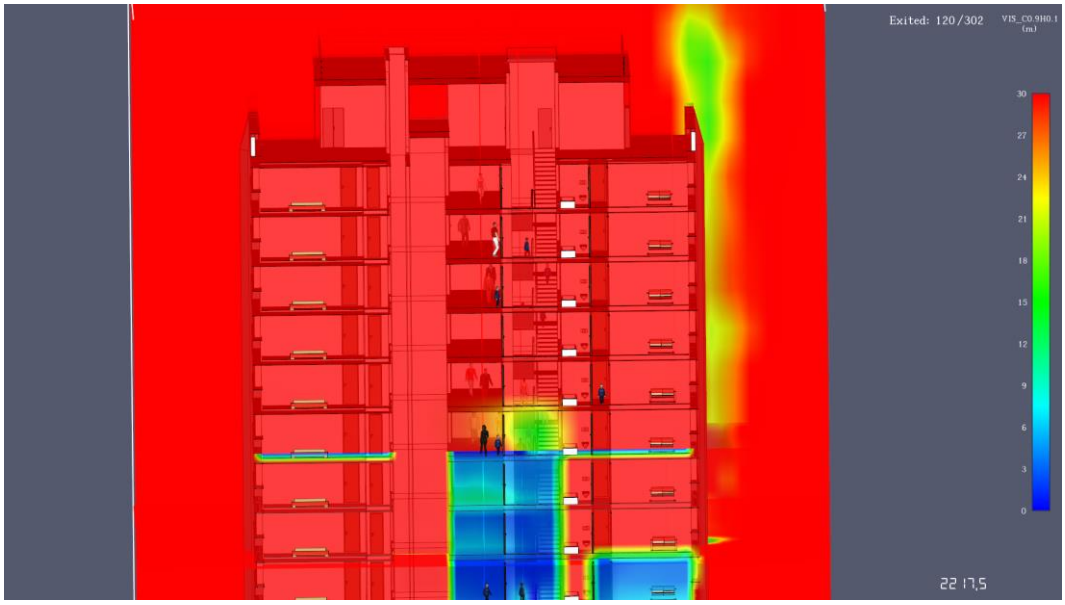


Figura 35 - Patfinder – Risalita dei fumi tramite blocco scala

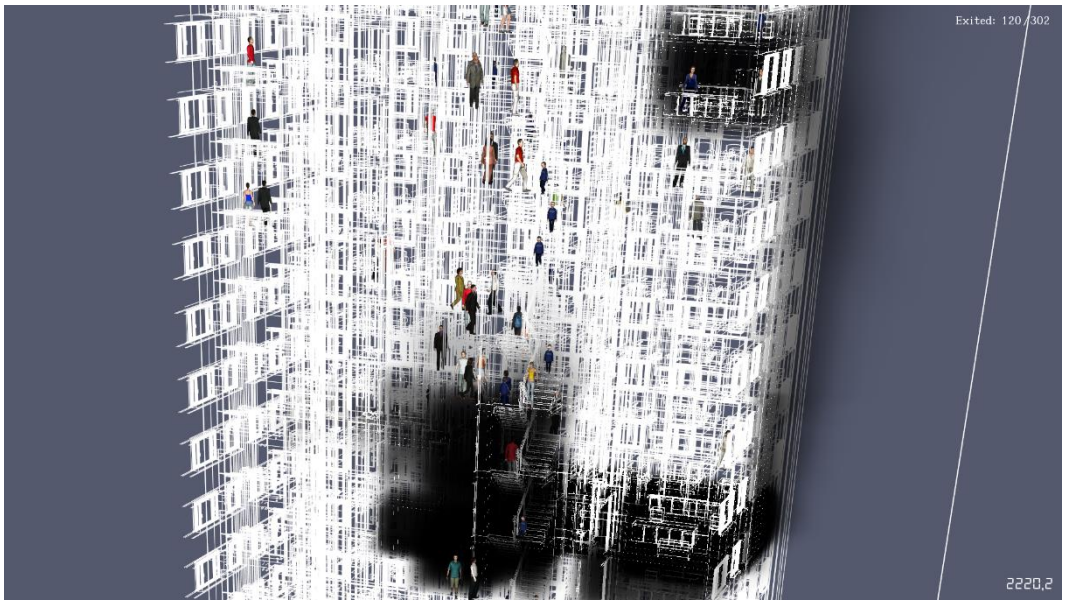


Figura 36 - Patfinder – Fuga parte degli occupanti ai piani superiori con vista wireframe

4. Analisi dell'evento e proposta delle soluzioni progettuali

Dall'analisi dell'evento incendio dell'edificio a torre studiato, possiamo riflettere e trarre delle soluzioni progettuali o gestionali che si sarebbero potute adottare in fase di progettazione o in fase di gestione dell'emergenza per evitare l'alto numero di vittime rilevato.

Le soluzioni proposte sono descritte di seguito:

Materiali: studiando i report di inchiesta eseguiti per la comprensione dell'accaduto si evidenzia l'uso inappropriato di materiali applicati in fase di ristrutturazione e la mancanza di normative che regolino questo tipo di rivestimento esterno. Il materiale utilizzato nel progetto di ristrutturazione per l'isolamento esterno non presentava nessuna proprietà di resistenza al fuoco. Delle ricerche hanno accertato l'esistenza di un isolante fabbricato dalla stessa ditta produttrice con delle proprietà di resistenza al fuoco elevate ma con un costo leggermente maggiore che non avrebbe inciso molto sul costo finale dell'intervento. È possibile che sia questa la causa del mancato utilizzo di materiali più prestanti che hanno portato poi a maggiori danni su tutto l'edificio e messo a rischio molte vite umane. Molto importante è quindi assicurarsi delle caratteristiche di resistenza al fuoco, la produzione di fumo, l'incendiabilità, la propagazione, ecc. dei vari materiali che vengono utilizzati in un progetto per evitare tragedie simili a quella avvenuta.

Gestione dell'emergenza: analizzando la modalità di esodo adottata al momento dello scoppio dell'incendio e dalle indicazioni date dal call center agli occupanti dei piani superiori, è evidente che venne evacuato inizialmente solo il piano interessato dal focolaio d'incendio mentre, gli occupanti degli altri piani che si sono accorti dell'incendio in un secondo momento, ricevettero l'ordine di rimanere all'interno dei propri appartamenti e di chiudere tutte le finestre in attesa dell'arrivo dei soccorsi, questo nonostante molti rilevarono presenza di

fumo e fiamme dall'esterno. Coloro che si salvarono furono coloro che ignorarono le indicazioni ricevute e lasciarono in tempo il loro appartamento. Non è stata subito compresa l'entità della pericolosità e dei danni che le fiamme stavano causando a cose e persone. Di fronte a un incendio di tali proporzioni e in grado di propagarsi tanto velocemente, poco hanno potuto fare i soccorritori. Sono intervenuti in massa ma sono stati costretti ad agire da terra e dall' esterno, quindi efficaci non oltre la metà dell' altezza utile dell' edificio e gli occupanti avranno potuto fare ben poco, essendo nella condizione di non riuscire a trovare vie di uscita mentre fuoco e fumo invadevano i locali. Questo risultò uno degli elementi critici che causò la morte delle 72 persone rimaste coinvolte. Se tutti avessero evacuato l'edificio nei primi istanti si sarebbero salvate molte più vite umane.

Sarebbe stato conveniente un monitoraggio della propagazione delle fiamme sia dall'interno che dall'esterno in modo da poter comunicare lo stato di allerta sia agli occupanti rimasti all'interno che ai soccorritori che operavano allo spegnimento del focolaio iniziale.

Soluzioni di tipo progettuale: l'edificio, per quanto riguarda la prevenzione incendi, non era fornito a sufficienza, in quanto presentava un'unica scala centrale non protetta e tantomeno a prova di fumo. I due ascensori installati non erano ascensori antincendio, quindi furono inutilizzabili dagli occupanti sin dai primi istanti dello scoppio dell'incendio a causa della rapida propagazione dei fumi prodotti. Sarebbe stato fondamentale progettare delle aperture in sommità del vano scala per favorire l'evacuazione dei fumi e del calore verso l'esterno, in quanto uno dei principali problemi che causarono la morte di molte persone fu la presenza di fumo accumulatosi nell'atrio centrale e successivamente nel vano scala, bloccando gli occupanti dei piani superiori che morirono per soffocamento.

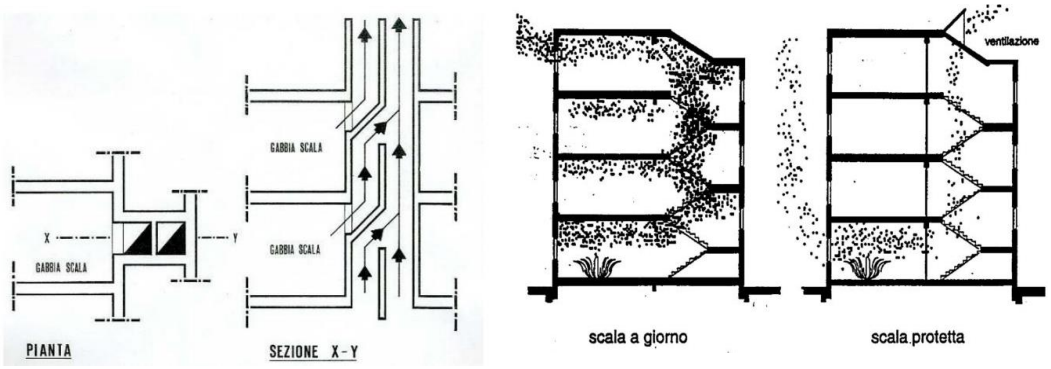


Figura 37 - D.M. 30 11 83 – Scala protetta con sistema di ventilazione per evacuazione di fumo

Un'altra soluzione fondamentale da adottare potrebbe essere la progettazione di due rampe di scala separate o comunque di una scala protetta o a prova di fumo che avrebbe isolato l'unico collegamento verticale dell'edificio dalla presenza di fumo nei vari piani interessati, facendo appunto da filtro per il fumo creatosi dallo scoppio dell'incendio. Si sarebbe potuto affiancare anche un sistema di spegnimento automatico con sprinkler sia esterno che interno che al tempo della costruzione dell'edificio non era previsto.

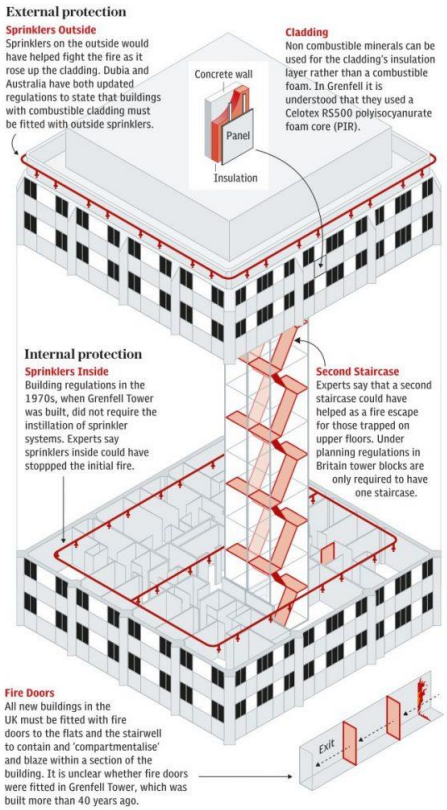


Figura 38 - Doppia scala e impianto sprinkler

Interessante è anche la possibilità di inserire dei compartimenti nei vari piani o blocchi di piani per poter contrastare la propagazione dei fumi e delle fiamme nei vani adiacenti evitando in poco tempo il coinvolgimento dell'intera struttura.

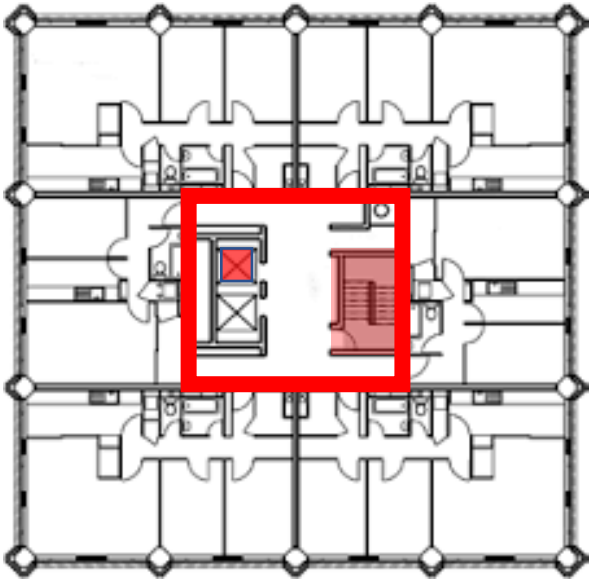


Figura 39 - Compartimentazione nucleo centrale, scala protetta e ascensore antincendio in pianta

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'incendio della Grenfell Tower a Londra avvenuto il 14 giugno 2017 ha messo in luce il ruolo principale che i materiali utilizzati in facciata possono svolgere come vettore di propagazione del fuoco. È stato uno dei più disastrosi incendi degli ultimi decenni e le sue tragiche conseguenze sono in gran parte dovute alla rapida propagazione del fuoco sia in direzione verticale che orizzontale sulle facciate esterne. Grazie all'esistenza di un'inchiesta è stato possibile eseguire un'analisi delle prove rinvenute per arrivare a delle conclusioni ben strutturate partendo dalla realizzazione 3D dell'edificio e modellando l'evento incendio e l'esodo.

Tutto ciò è stato possibile grazie all'utilizzo della FSE (Fire Safety Engineering), uno strumento di analisi che permette di studiare il fenomeno incendio e gli effetti su persone, strutture e beni secondo specifiche normative che ne regolano la procedura. Grazie a questo importante strumento è stato possibile ricostruire l'accaduto e individuare delle soluzioni progettuali o gestionali che avrebbero potuto evitare la propagazione dell'incendio all'intero edificio e salvare la vita di molti esseri umani.

Dalle soluzioni progettuali proposte in precedenza si comprende l'importanza della progettazione ai fini della sicurezza antincendio, essenziale in edifici residenziali come la Grenfell Tower che ospita un numero elevato di persone. Molto importante è però educare chi vive in questi edifici sul comportamento idoneo da adottare in caso di emergenza, istruendo gli occupanti su come leggere la segnaletica antincendio, sul percorso da prendere per arrivare in breve tempo all'uscita d'emergenza più vicina, trasmettendo loro sicurezza e non panico e caos che si potrebbero riflettere nel momento in cui affronteranno un'emergenza.

Un possibile sviluppo futuro, sulla base del presente lavoro di tesi, potrebbe sicuramente consistere nel prevedere e implementare differenti soluzioni progettuali per poi analizzarne l'efficacia per mezzo di simulazioni di incendio e di esodo dedicate. Uno step successivo potrebbe concernere lo sviluppo di un

approccio in grado di educare e informare adeguatamente gli occupanti di questi particolari edifici.

La torre è al momento abbandonata a sé stessa, ma circolano notizie sul web di un nuovo progetto di riqualificazione dell'edifico come monumento commemorativo a ricordo del tragico evento e in memoria delle 72 vittime che persero la vita nell'estate del 2017.

Lo studio di architettura londinese JAA ha rivelato una proposta per racchiudere il guscio bruciato della Grenfell Tower in un sarcofago di cemento nero come memoriale per le vittime dell'incendio, in modo che la tragedia non svanisca presto dalla memoria collettiva.

Figura 40 - Dezeen – Nuovo progetto monumento Grenfell Tower

JAA propone di lasciare la torre in piedi, sigillata all'interno di un sarcofago a tutta altezza realizzato con 224 pannelli di cemento nero, mentre i primi quattro piani dell'edificio saranno vetrati per poter realizzare nuove aree contenenti un centro comunitario e una palestra di boxe in sostituzione di quella distrutta dall'incendio. Di notte, un faro nell'appartamento 16, l'origine del fatale incendio, si accende in memoria dell'accaduto.

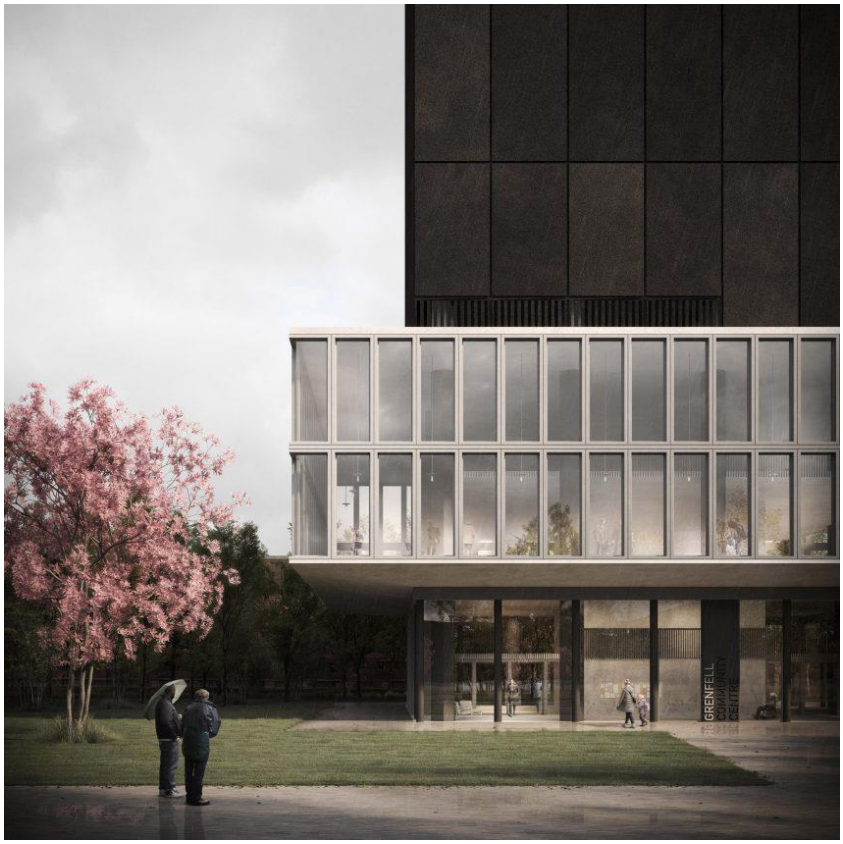


Figura 41 - Dezeen – Vista parte vetrata in corrispondenza dell'appartamento 16

Il tetto della torre sarebbe stato reso accessibile, con un giardino commemorativo di fiori di campo piantato lungo il perimetro e sottili colonne di cemento sorreggerebbero un baldacchino, formando una passerella coperta rendendo il giardino utilizzabile tutto l'anno.

Figura 42- Dezeen – Terrazzo con giardino Grenfell Tower

Nonostante la proposta presentata, si prevede che la torre sia demolita, tuttavia, alcuni dei sopravvissuti, i parenti delle vittime e la comunità locale vorrebbero che il guscio bruciato venga lasciato al suo posto in memoria del tragico incidente.

Bibliografia:

- *The Building Regulations - Approved_Document_B__fire_safety__volume 2 – 2019 edition*
- *D.M. 03 agosto 2015 - Aggiornamento novembre 2019 – Norme tecniche di prevenzione incendi*
- *Grenfell Tower Inquiry - Phase 1 full report - volume 1,2, 3, 4*
- *SEPE Handbook of Fire protection engineering, 5th edition, 2016*
- *Metodi Per L'ingegneria Della Sicurezza Antincendio*
- *Thunderhead Engineering, Pathfinder 2018*
- *Thunderhead Engineering, PyroSim User Manual, 2018*
- ISO 16732-1 - *Fire safety engineering - Fire risk assessment*
- ISO_TS 16733 - *Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires*
- ISO_TR 16738 - *Fire safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*
- *D.M. 16 febbraio 2007 – Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzion*
- *D.M. 30 novembre 1983 – Termini e definizioni di prevenzione incendi*

Sitografia:

- https://www.rbkc.gov.uk/planning/searches/details.aspx?adv=0&simple=Grenfell+Tower&simpleBatch=20&simSubmit=Search&id=PP/12/03163&cn=143819+IBI+Taylor+Young%2C+Chadsworth+House%2C+Wilmslow+Road%2C+01625+542200&type=decision&tab=tabs-planning-2#tabs-planning-6
- https://www.rbkc.gov.uk/planning/searches/details.aspx?adv=0&simple=Grenfell+Tower&simpleBatch=20&simSubmit=Search&id=PP/12/04097&cn=145691+IBI+Taylor+Young+Chadsworth+House+Wilmslow+Road+01625+542200&type=decision&tab=tabs-planning-2#tabs-planning-6
- https://www.rbkc.gov.uk/planning/searches/details.aspx?adv=0&simple=Grenfell+Tower&simpleBatch=20&simSubmit=Search&id=PP/12/03163&cn=143819+IBI+Taylor+Young%2C+Chadsworth+House%2C+Wilmslow+Road%2C+01625+542200&type=decision&tab=tabs-planning-2
- https://www.ingenio-web.it/19620-lincendio-alla-grenfell-tower-di-londra-cosa-ci-puo-insegnare-una-tragedia
- https://www.teknoring.com/news/antincendio/incendio-grenfell-tower-report-ufficiale-cause-origini/
- https://www.itv.com/news/2018-06-06/resident-of-flat-where-grenfell-blaze-started-terrified-about-giving-evidence/
- https://www.dailymail.co.uk/news/article-4605324/How-Grenfell-Tower-fire-unfolded-15-minutes.html
- https://architectsforsocialhousing.co.uk/2017/07/21/the-truth-about-grenfell-tower-a-report-by-architects-for-social-housing/
- https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fam.2763
- https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fam.2765
- https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fam.2766
- https://www.theguardian.com/uk-news/2017/jun/23/grenfell-tower-fire-police-considering-manslaughter-charges
- https://www.grenfelltowerinquiry.org.uk/
- https://www.dezeen.com/2018/08/08/grenfell-memorial-tower-jaa-architecture-news/