

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Edile-Architettura

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



**Il rischio incendio in ambienti di elevata altezza.**

*Propagazione dei fumi e ottimizzazione  
dei sistemi di evacuazione*

Relatore: Prof. Ing. Paolo SETTI

Tesi di laurea di:

Debora BUSNELLI Matricola 787035

Beatrice FOSSATI Matricola 787076

Anno Accademico 2013-2014





## Abstract

Gli edifici complessi sono sempre più caratterizzati dalla presenza al loro interno di ambienti comunicanti tra loro, dove spesso attorno ad un ampio volume centrale di elevata altezza si affacciano diversi spazi che accolgono attività di vario genere. Questa tendenza nasce da esigenze distributive, funzionali e di comfort dell'utenza ma, contemporaneamente, è resa possibile grazie alle nuove tecnologie disponibili. La progettazione di tali sistemi richiede necessariamente di combinare tra loro la funzionalità dell'opera, la sicurezza che questa deve garantire nei confronti dell'utenza durante la sua vita utile e la fattibilità tecnico-economico-ambientale. Tra questi fattori rientra quindi la progettazione della sicurezza antincendio con particolare interesse alla propagazione e alla gestione dei prodotti della combustione, che risulta essere critica e articolata, data la configurazione architettonica degli spazi e la tipologia di utenza.

In Italia gli strumenti normativi in materia di prevenzione incendi sono di natura essenzialmente prescrittiva e in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e non è presente alcun documento che permetta una valutazione esaustiva del fenomeno dell'incendio sviluppatosi in ambienti di questo tipo. L'approccio che quindi deve essere adottato è di tipo prestazionale, basato sulla Fire Safety Engineering, affrontata in Italia solo da un punto di vista procedurale e non supportata da modelli di calcolo o linee guida specifiche.

Dalla necessità di gestire il fenomeno incendio in questi ambienti e dall'assenza di strumenti italiani idonei, la tesi si propone di ricercare nel panorama straniero i modelli analitici semplificati per la comprensione del fenomeno incendio e della dinamica di propagazione dei prodotti della combustione; individuare le criticità e le peculiarità derivanti dall'evento sviluppatosi in questa tipologia di ambienti; definire e comprendere i modelli di calcolo numerico più idonei a supportare la progettazione antincendio e individuare i rischi associati a diversi scenari d'incendio.

L'analisi viene supportata a livello pratico dall'applicazione dell'approccio prestazionale e dell'ingegneria antincendio ad un caso-studio specifico.



## **Abstract** *english version*

Complex buildings are increasingly characterized by the presence of communicating rooms, where often different spaces face around a large central volume of high altitude; these spaces accommodate a variety of activities. This trend comes out from distribution and functional requirements and comforts demanded by the users, but, at the same time, it is made possible thanks to the innovative technologies available. The planning of such systems requires necessarily the combination of: the functionality of the work, the security granted to the users during the useful life of the work, the technical, economic and environmental feasibility. Among these factors, the planning of fire safety with special interest to propagation and management of the combustion products, which results to be critical and complex because of the architectural shape of the spaces and the kind of users.

In Italy, the legal instruments in the field of fire prevention are essentially prescriptive and related to the intended use of the building and there is no document that allows an exhaustive assessment of the phenomenon of fire developed in this kind of environments. The method to follow is centered on the performance, based on the fire safety engineering, which is examined in Italy only from a procedural point of view and is not supported by model calculations or specific guidelines.

By the need to manage the phenomenon fire in these places and because of the lack of suitable Italian tools the thesis aims to search in the foreign scene the simplified analytical models for understanding the fire phenomenon and the dynamics of propagation of the combustion products; identify the criticalities and the peculiarities arising from the event developed in this type of environments; define and understand the models of numeric calculation best suited to support the planning of fire protection and identify risks associated with different fire scenarios.

The analysis is pragmatically supported application of the performance approach and the engineering fire protection to a specific case of study.







## Indice

Introduzione.....	1
1. Ambienti di elevata altezza .....	3
1.1. Premessa .....	3
1.2. Dall'atrium alle Mall, agli atri e ai grandi volumi .....	4
2. Il rischio incendio in ambienti di elevata altezza .....	22
2.1. Interesse per la sicurezza al fuoco .....	22
2.2. Casi significativi d'incendio.....	25
2.3. Quadro legislativo italiano .....	30
2.4. Ingegneria antincendio e Fire Safety Engineering .....	32
3. Analisi qualitativa del fenomeno incendio .....	38
3.1. Caratteristiche dell'incendio.....	38
3.2. Produzione e propagazione dei fumi.....	41
3.3. Effetti sulle persone e vie d'esodo.....	44
3.4. Strategie per il controllo dell'incendio e dei fumi .....	47
3.5. Modelli di calcolo .....	54
4. Analisi quantitativa del fenomeno incendio .....	56
4.1. Cenni sulla meccanica dei fluidi .....	56
4.2. Processo di combustione .....	58
4.3. Incendi reali .....	63
4.3.1. Ignizione .....	63
4.3.2. Crescita .....	70
4.3.3. Flashover e incendio generalizzato.....	71
4.3.4. Decadimento .....	72
4.4. Rilascio termico .....	72
4.5. Produzione fumi.....	78



5. Propagazione dei prodotti della combustione .....	84
5.1. Studi ed esperienze.....	84
5.2. Axisymmetric plume .....	86
5.2.1. Caratteristiche della fiamma.....	88
5.2.2. Caratteristiche del plume .....	92
5.2.3. Air entrainment.....	95
5.2.4. Stratificazione dei fumi.....	97
5.2.5. Ceiling jet.....	99
5.2.6. Influenza delle aperture.....	102
5.3. Spill plume .....	104
5.4. Sistemi di evacuazione fumo e calore.....	110
5.4.1. Ventilazione naturale.....	111
5.4.2. Ventilazione meccanica.....	113
6. Modellazione .....	116
6.1. Approccio procedurale .....	116
6.1.1. Analisi preliminare.....	117
6.1.2. Analisi quantitativa.....	130
6.2. Caso studio: Museo MAGA di Gallarate.....	161
6.2.1. Caratteristiche geometriche e vincoli.....	164
6.2.2. Livelli di prestazione.....	170
6.2.3. Scenari d'incendio .....	172
6.2.4. Iter di progettazione e ottimizzazione del sistema di evacuatori.....	178
6.2.5. Commento finale ai risultati.....	207
Conclusioni.....	210
Bibliografia.....	212
Testi e pubblicazioni.....	212
Normative .....	214
Indice delle figure .....	216





## Introduzione

Gli ambienti di elevata altezza sono spazi caratterizzati da uno sviluppo in altezza prevalente rispetto alle altre dimensioni in pianta, oggi sempre più diffusi in edifici complessi come shopping malls, teatri, musei, uffici ecc...

La valutazione del rischio incendio, la comprensione della dinamica del fenomeno e, in particolare, della propagazione dei prodotti della combustione, risulta una tematica particolarmente complessa ed interessante.

La tesi inizialmente descrive l'evoluzione storica e il quadro attuale degli edifici che adottano questa tipologia di spazi, le destinazioni d'uso più frequenti, i principali vincoli e le caratteristiche architettoniche che possiedono.

Successivamente si riportano le motivazioni che giustificano l'interesse per l'analisi del rischio incendio di questi ambienti, supportate dalla descrizione di eventi significativi verificatisi in passato e dal quadro legislativo italiano ed internazionale. Nell'ambito del quadro legislativo si sottolinea la mancanza, nel panorama italiano, di strumenti esaustivi per un'analisi approfondita della sicurezza antincendio, la necessità di un approccio di tipo prestazionale e l'esistenza di normative e linee guida straniere più idonee.

Il fenomeno incendio viene quindi analizzato da un punto di vista qualitativo, specificando quali siano gli aspetti peculiari da prendere in considerazione per la progettazione antincendio: dall'importanza della comprensione della dinamica di propagazione dei fumi, necessaria per garantire la sicurezza delle persone, alla definizione delle strategie per il controllo dell'incendio e dei fumi che più si adattano a questi volumi. In seguito, l'analisi viene condotta da un punto di vista ingegneristico individuando i modelli di calcolo analitici che descrivono il processo di produzione e propagazione dei fumi, con l'obiettivo di comprendere la dinamica del fenomeno e le criticità.

Infine si studia un caso reale in cui si applica l'approccio prestazionale per ottimizzare il sistema di evacuazione, il tutto supportato di un modello di calcolo numerico di simulazione a zone.



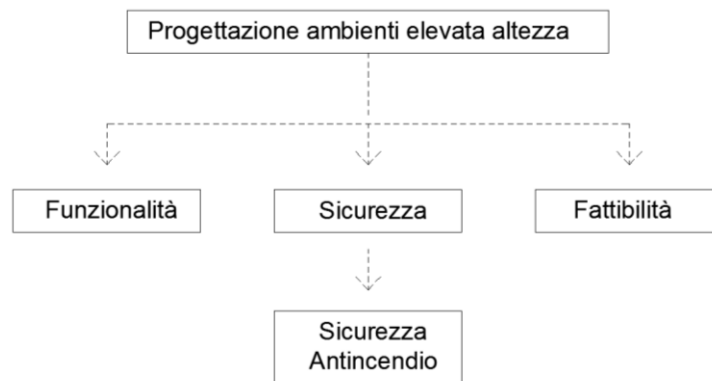


## Capitolo 1

# Ambienti di elevata altezza

### 1.1. Premessa

Negli ultimi decenni i gli edifici complessi nei quali è presente un volume centrale, su cui si affacciano diversi ambienti distribuiti su più livelli, si sono diffusi con sempre più frequenza. Il progetto di questi sistemi è il risultato della combinazione congiunta di diversi fattori che possono essere riassunti in tre categorie: la funzionalità dell'opera in rapporto alla destinazione a cui è riferita; la sicurezza che l'opera garantisce nei confronti dell'utenza durante il suo esercizio; la fattibilità tecnico-economico-ambientale.



In particolare, nel caso di edifici caratterizzati da tali ambienti, questi tre fattori si combinano in modo da essere quasi inscindibili e ogni aspetto di progetto diviene così un tutt'uno con le esigenze funzionali e di sicurezza, coordinate nell'ottica della fattibilità.

Si riporta di seguito l'evoluzione storica e il panorama attuali con particolare attenzione nell'individuazione delle principali caratteristiche che possiedono da un punto di vista funzionale e spaziale, e le differenti destinazioni d'uso, con l'obiettivo di comprenderne gli aspetti peculiari che influenzeranno la progettazione della sicurezza antincendio.

## 1.2. Dall'atrium alle Mall, agli atri e ai grandi volumi

Nell'antichità, il confine tra lo spazio urbano e quello familiare, più intimo, era rappresentato nella casa romana antica da uno spazio apposito, l'atrio.

Quasi sempre la "domus romana" si sviluppava con ingresso dal "vestibulum" che, attraverso un breve corridoio, conduceva all' "atrium", luogo centrale dell'abitazione: oltre a ricevere la luce dall'alto e a raccogliere l'acqua piovana nell' "impluvium", qui si ricevevano le visite ufficiali e da qui si dipartivano tutti gli altri locali. Questo spazio era situato nella parte anteriore della casa, ove erano esposte le immagini degli antenati, le statue dei Lari, dei Mani e dei Penati, protettori della casa, della famiglia e di altre divinità, le opere d'arte, gli oggetti di lusso e altri segni di nobiltà o ricchezza.

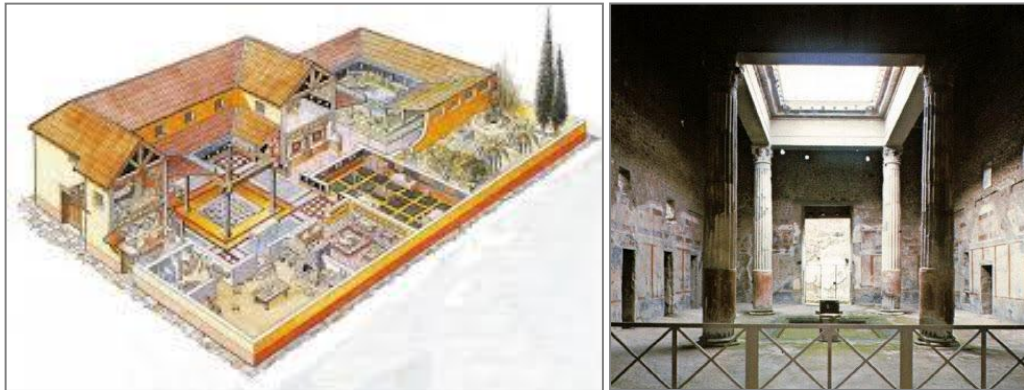


Figura 1: ricostruzione "domus romana" e veduta dell' "atrium" in una casa pompeiana

Vitruvio<sup>1</sup> individua cinque tipologie di atri (tuscanicum, corinthium, tetrastylum, displuviatum, testudinatum) in base alla modalità costruttiva e alle caratteristiche formali. [*De Architectura, libro VI, cap. III*].

Durante il Medioevo l'atrio è soprattutto il cortile a cielo aperto antistante la chiesa, spesso circondato da portici (quadriportico o triportico a seconda che i quattro o tre lati dello spazio antistante la chiesa siano circondati da portici). Nella maggior parte degli esempi conosciuti i portici sono formati da arcate su colonne con pilasti d'angolo. Spesso tra atrio e basilica era interposto il narcece, specie di vestibolo interno o esterno dove si trattenevano i catecumeni e i penitenti.

Se a Roma molte basiliche avevano l'atrio, ne erano in genere mancanti quelle d'Oriente, che avevano il solo narcece. La scomparsa dei catecumeni e penitenti contribuì verso il secolo XII e XIII al progressivo ridursi dell'atrio e poi alla sua quasi totale abolizione .

<sup>1</sup> Marco Vitruvio Pollione: 80 a.C. circa - 15 a.C. circa è stato un architetto e scrittore romano, attivo nella seconda metà del I secolo a.C., considerato il più famoso teorico dell'architettura di tutti i tempi.



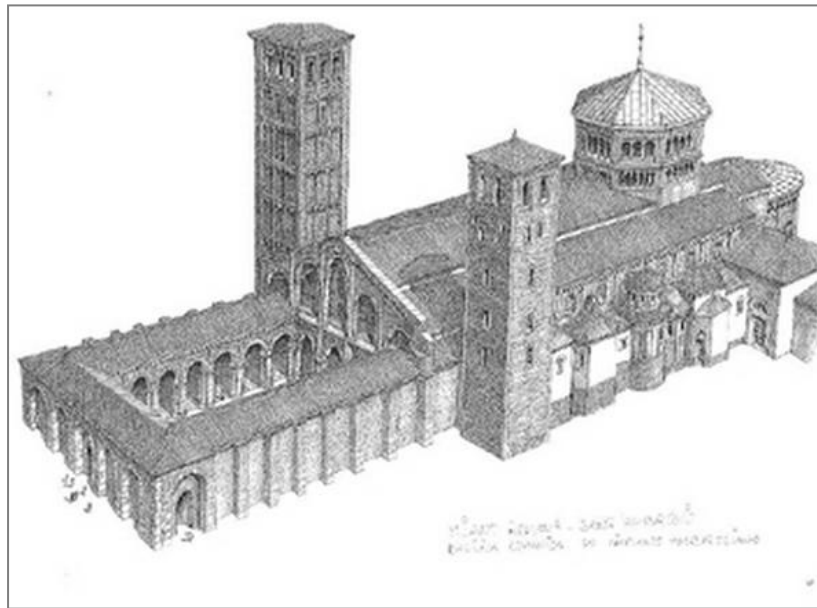


Figura 2: quadriportico basilica di Sant'Ambrogio, Milano 1099

Anche tutta la trattatistica architettonica rinascimentale continua a studiare con interesse lo snodo progettuale dell'atrio, considerandolo il "cuore" dell'edificio, sorta di ingresso sontuoso e accogliente, aperto all'esterno mediante un porticato.

La vera svolta nella tipologia di fruizione avviene, però, con la Rivoluzione Industriale, che inizia a separare, distinguere, specializzare gli spazi, le funzioni, i ruoli, così come fa con le classi sociali, le professioni, le famiglie: non è un caso se il XIX secolo produce i due elementi chiave nella costruzione dei moderni spazi del consumo: il grande magazzino e l'insediamento suburbano.

Con l'avvento di ideali di uguaglianza e democrazia che coinvolgono nuovi strati sociali della popolazione, rispondendo ad una serie di aspirazioni e ideologie proprie di una nuova classe emergente, la borghesia capitalistica, si sente la necessità di usufruire di luoghi simbolo di aggregazione sociale: i teatri, le Esposizioni Universali, i grandi magazzini, le gallerie coperte e i musei.

Architetture come il Crystal Palace divengono luoghi di consumo collettivo del tempo libero e il visitatore è inserito in un'ampia, teatrale e quasi disarmante aula unica, che funge sì da punto modale di distribuzione e orientamento dei servizi e delle sale ma, al contempo, offre un punto di vista grandissimo e impressionante dell'edificio.



Figura 3: Crystal Palace, Londra 1851

In età moderna, più il visitatore-utente assume la forma di "consumatore" dei luoghi di aggregazione, più lo spazio d'ingresso si trasforma in un bacino autonomo e scorporato dalle altre funzioni. L'estremizzazione di questa tendenza progettuale si ha, ad esempio, nel Salomon Guggenheim Museum di New York (1946) dove l'ingresso coincide con il museo stesso, o la Tate Gallery dove, nel 1995 lo studio Herzog & de Meuron ha convertito la Turbine Hall in un atrio di ingresso.

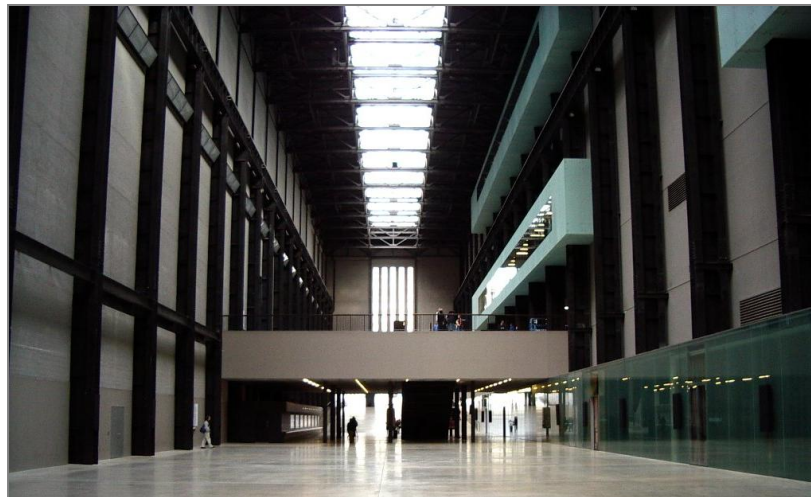


Figura 4: Turbine Hall, Tate Gallery, Londra 1995

A partire dagli anni '50 negli Stati Uniti d'America e, poco più tardi, in Europa, una certa tipologia di edifici, il museo ad esempio, entra a far parte della sfera dell'industria del turismo, in cui prevale la logica del "servizio" sulla visita. Il visitatore-turista trascorre sempre più tempo negli spazi comuni: l'ingresso si trasforma così in piazza, in cui una folla di persone si muove in una sorta di rito collettivo [L.P.Puglisi, *La storia dell'architettura 1905-2008*, 2013].



Figura 5: Great Court, British Museum, Londra 2000

Questo vale oggi giorno anche per i centri commerciali. Precedenti illustri sono le gallerie commerciali della "Belle Epoque", come la Galleria Vittorio Emanuele II a Milano.



Figura 6: Galleria Vittorio Emanuele II, Milano 1877

Una vera e propria epoca d'oro di questa tipologia è quella legata alla nascita delle grandi Mall commerciali, delle quali le gallerie rappresentano uno degli elementi costitutivi fondamentali. Queste costituiscono degli spazi di raccolta che consentono una visuale attraverso i vari livelli dell'edificio (e attraverso gli altri spazi, grazie alle pareti vetrate).



Possono essere aperte su più piani, a tutt'altezza, avere una copertura trasparente o, comunque, grandi finestre, allo scopo di conferire a questo spazio una buona illuminazione naturale [ *P. Coleman, Shopping environments: evolution, planning and design, Architectural Press, 2006*].

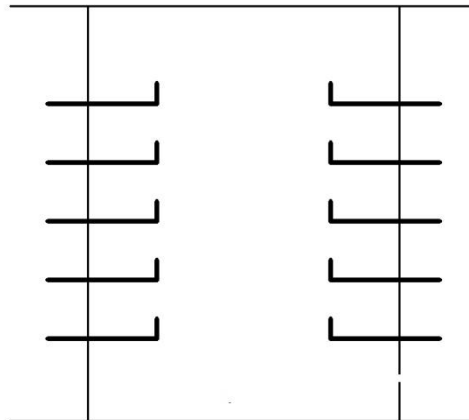
Gli shopping center esprimono al massimo l'ambiguità odierna pubblico/privato. Gli edifici non vengono più concepiti come delle perfette macchine funzionanti, ma come un insieme interagente di volumi, spazi, percorsi, interrelazioni che creano nuova permeabilità, aprendo in questo modo nuove occasioni di utilizzo con la consapevole tendenza a modellare una scena sempre più dinamica, sinonimo di una ricerca di sviluppo di nuove socialità.

Questo layout compositivo crea un collegamento non solo visivo tra gli spazi, ma anche pratico e funzionale, poiché diverse scale e ponti assicurano collegamenti brevi tra le diverse aree.

Il panorama urbano degli edifici con caratteristiche di fruibilità simili sembra essere così ritmato da un idioma universale, apparentemente replicabile ovunque, cui sembra corrispondere un'idea di "spazio universale", adattabile a tutti gli usi, climaticamente artificializzato, attraverso un'architettura sempre più concepita come un'opera spettacolare che si inserisce nella scena urbana come una "performance" e che, anche tecnologicamente, afferma la sua natura espressiva.

Indipendentemente dalla destinazione d'uso, tale " spazio universale" (e oggettivo), viene definito in questo studio come:

*"spazio coperto libero di forma variabile, più o meno ampio, circondato da attività di vario genere e realizzato su più piani, sito o all'incrocio di più corridoi e più largo di essi o progettato in modo tale che abbia la funzione di spazio di raccolta. L'ambiente ivi definito è caratterizzato da un'estensione prevalentemente verticale e la sua larghezza in pianta è molto minore dell'altezza  $b \ll h$ ".*



Attualmente, edifici caratterizzati da questi ambienti possono essere destinati ad occupazioni differenti e generalmente sono sedi di attività aperte ad un pubblico indifferenziato: essi comprendono ambienti principalmente destinati ad attività culturali e/o luoghi di vendita, senza escluderne la presenza in tipologie di altra natura.



Come già accennato, si cerca di affrontare lo studio prescindendo dalla destinazione d'uso degli ambienti ma, per individuarne la volumetria e gli spazi, è comunque necessario valutare a quali destinazioni d'uso può essere associato e le motivazioni progettuali che portano a determinarne la configurazione.



## Centri commerciali

Il centro commerciale è un complesso edilizio omogeneo nel quale sono presenti numerose attività come punti vendita di grande distribuzione, cinema e ristoranti. L'ambiente centrale, attorno al quale vengono organizzati vari negozi integrati con altre attività e disposti su più livelli è detto " Mall".

La configurazione spaziale delle attività commerciali segue una logica basata sui seguenti aspetti:

- spazi d'affaccio sulla Mall centrale adibiti alla sosta e al passaggio;
- sistemi di collegamento verticali interni alla Mall ;
- percorsi e arredi fissi che non devono costituire ostacolo o impedimento alla fruizione degli spazi;
- visibilità delle vetrine delle attività commerciali dai diversi livelli;
- utenza che non ha familiarità con gli spazi;
- numero elevato di presenze.

Una delle motivazioni che portano a prevedere l'inserimento di una Mall all'interno di un centro commerciale è la possibilità di dare all'utente una visione d'insieme delle attività presenti nel complesso. Questo influenza, per esempio, la scelta di come posizionare le strutture rispetto agli spazi di circolazione del pubblico.

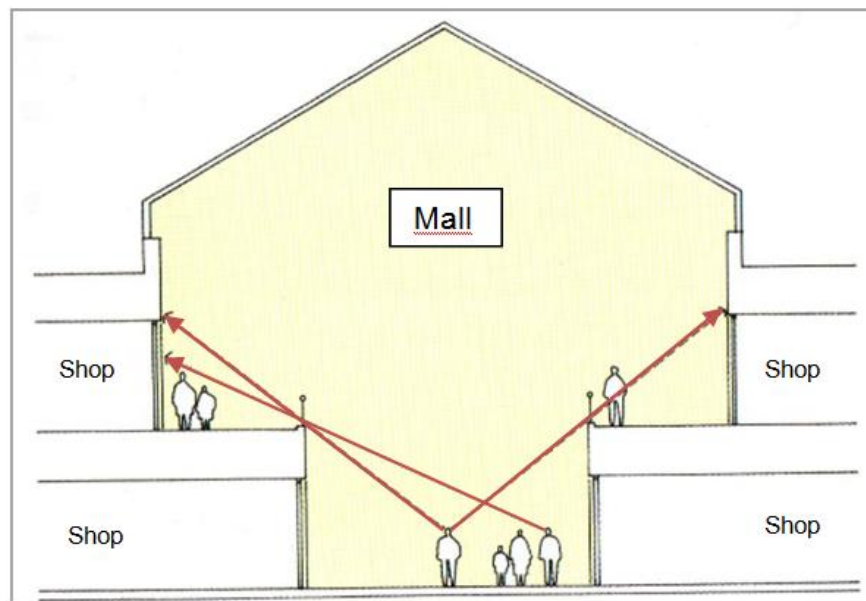
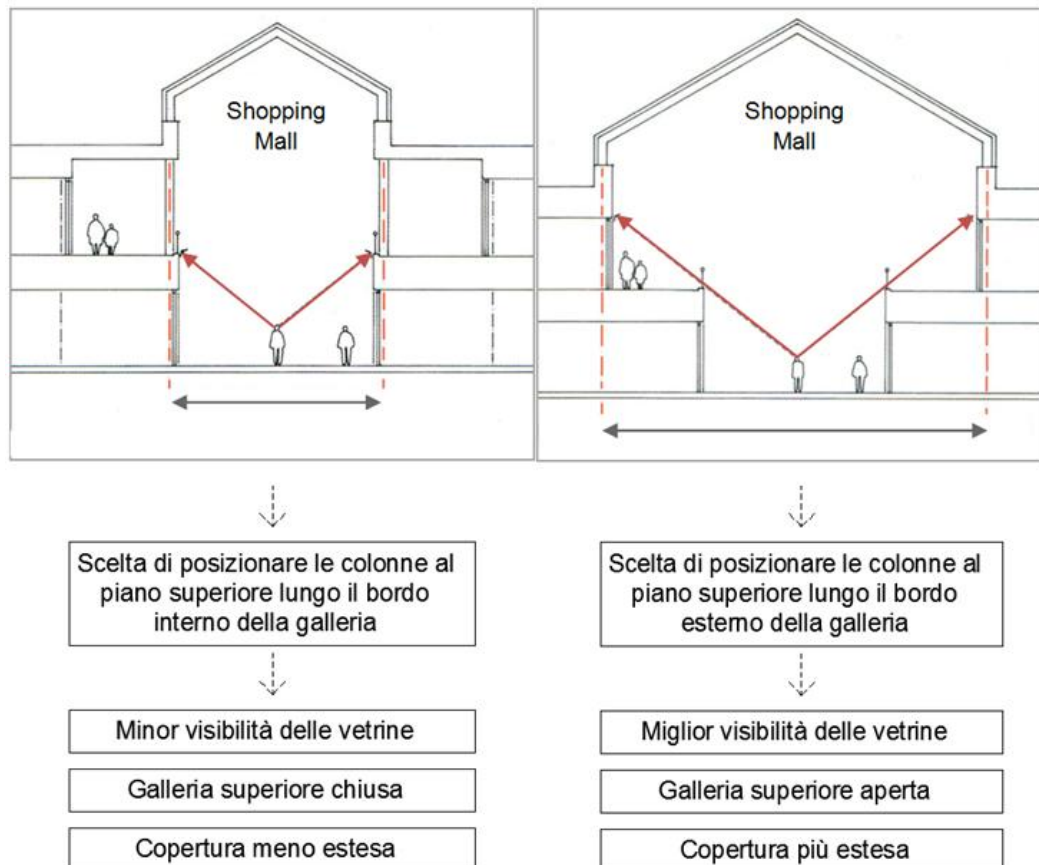


Figura 7: schema visibilità piani superiori nella Mall

Da tale considerazione e per quanto riguarda gli spazi con una o più gallerie ai piani superiori che si affacciano sull'ambiente centrale, deriva la necessità di coordinare la posizione della struttura di ogni piano definendo gli spazi coperti, confinati e aperti, in funzione della posizione della struttura che deve reggere la copertura.



Come riportato nella figura, la scelta di posizionare le colonne del piano terra in linea o dietro le vetrine determinerà la presenza di colonne al piano superiore lungo il bordo interno della galleria. Questo diminuirà la visibilità da parte degli utenti che si trovano nella Mall.

Un esempio di questa configurazione spaziale, ossia la Mall che si sviluppa verticalmente mantenendo la stessa ampiezza, è il centro commerciale "Sevens" a Dusseldorf, Germania, completato nel 2001 dagli architetti di Düsseldorf RKW Rhode Kellermann Wawrowsky. Il centro commerciale ha un'estensione di 15000 m<sup>2</sup> ed è distribuito su sette livelli.



Figura 8: shopping center Sevens, Dusseldorf 2001

Se, invece, si decide di posizionare le colonne dei piani superiori in linea con le vetrine, per cercare di renderle più visibili, al piano inferiore gli elementi strutturali cadranno internamente all'attività commerciale. Questa seconda scelta porta alla realizzazione di gallerie superiori completamente aperte sullo spazio centrale e ad una copertura più estesa. Un approccio alternativo potrebbe essere quello di realizzare una copertura modesta con l'obiettivo di massimizzare la visibilità inserendo colonne snelle e con interassi maggiori ai piani superiori.

Esempio italiano della seconda tipologia, di recente inaugurazione e ampliamento, 2014, è il centro commerciale 20Twenty di Bolzano sviluppato su 4 livelli comunicanti tramite una Mall nella quale è stato realizzato un sistema di ascensori e scale mobili. L'estensione della zona commerciale del centro è di circa 30500 m<sup>2</sup>.



Figura 9: shopping center 20 Twenty, Bolzano 2014

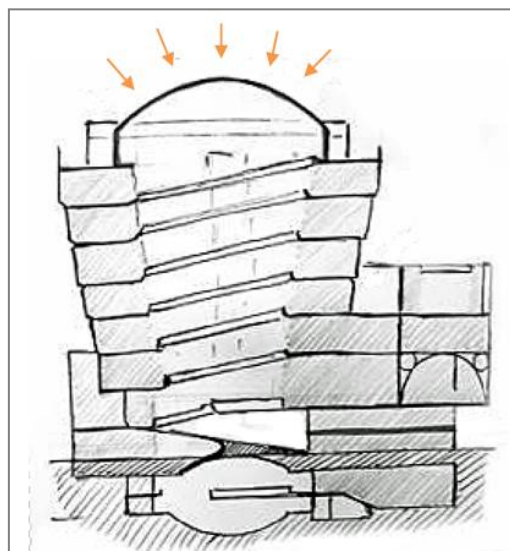


## Musei

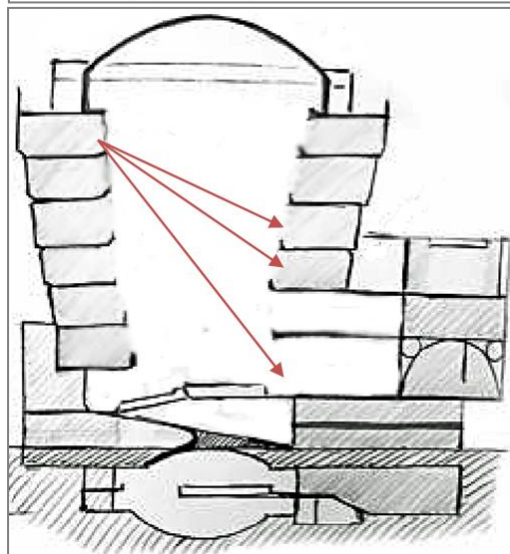
Analoghe considerazioni si possono fare per gli spazi che ospitano attività con caratteristiche simili a quelle di natura commerciale. In questi spazi, nel caso in cui sia presente un ambiente di elevata altezza, si denota una tendenza a realizzare spazi totalmente comunicanti con quello centrale, di grandezza non rilevante e che sfruttano la luce naturale per rendere visibili le opere o i testi.

La configurazione spaziale delle strutture sociali e culturali segue la stessa logica di quelle commerciali, in più è necessario prevedere l'illuminazione naturale per garantire la visione delle opere.

illuminazione naturale dell'ambiente



visibilità delle opere dai vari livelli





Esempio esplicativo è il Guggenheim Museum di Frank Lloyd Wright a New York, realizzato tra il 1943 e il 1959: il suo "nucleo" è costituito da una rampa a spirale in espansione, che sale attraverso un volume centrale in bande sempre più ampie, favorendo l'ingresso di luce naturale dalla coperture e la visione delle opere da diverse posizioni [M. Colombo, «I Maestri dell'Architettura: Frank Lloyd Wright,» San Giovanni Lupatoto (VR), Hachette, 2009, pp. 56-67].

Anche nel panorama italiano sono presenti strutture museali progettate attorno ad un ambiente a tutt'altezza: la Mole Antonelliana, simbolo dell'architettura di Torino, ultimata nel 1889 e sede del Museo del Cinema; il MAXXI, Museo nazionale delle arti del XXI secolo a Roma, inaugurato nel 2010 e progettato dall'architetto Zaha Hadid, due esempi illustri.

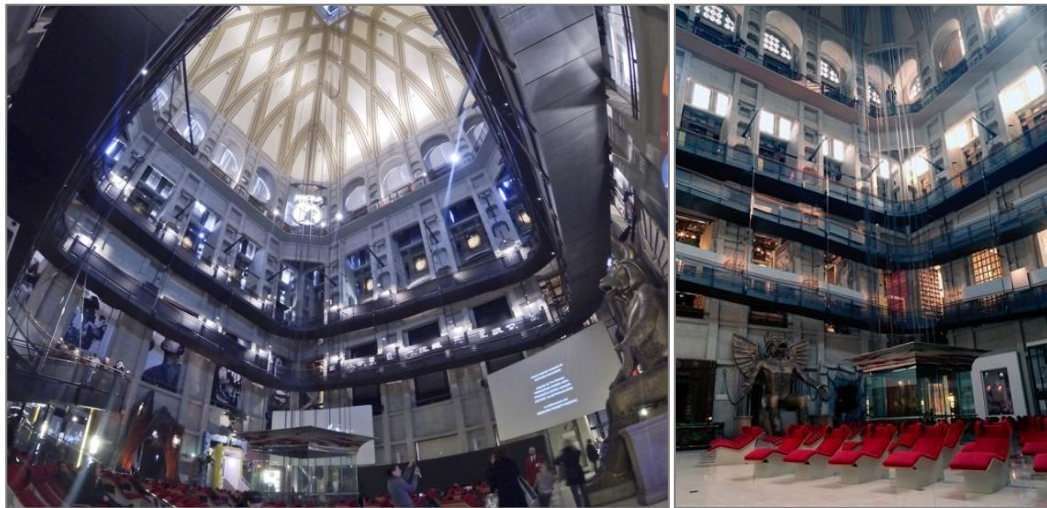


Figura 10: Mole Antonelliana, Torino 1889



Figura 11: MAXXI Museo Nazionale delle arti, Roma 2010



## **Biblioteche e Librerie**

Come già anticipato, spazi sociali realizzati attorno ad un ambiente elevato possono essere destinati a biblioteche o librerie, per creare continuità tra gli ambienti e permettere il passaggio di luce naturale. Un esempio è la biblioteca della Facoltà di Giurisprudenza dell'Università di Zurigo, realizzata da Santiago Calatrava nel 2004.

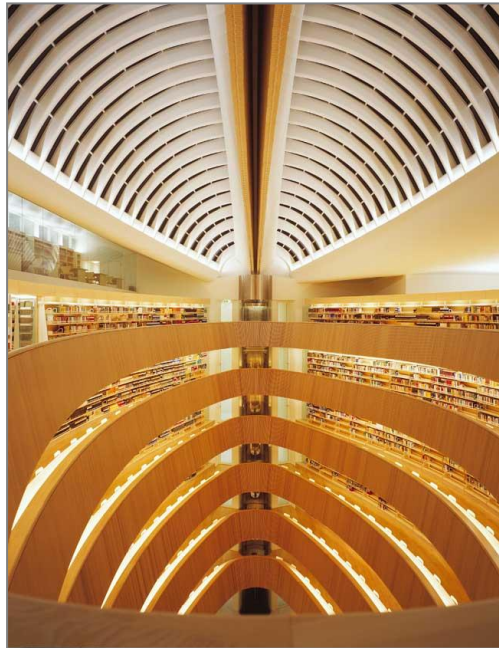


Figura 12: : biblioteca universitaria facoltà di giurisprudenza, Zurigo 2004

Nella biblioteca di Zurigo, sotto una cupola di acciaio e vetro si snodano sei anelli di forma ellittica la cui ampiezza diminuisce man mano che ci si avvicina al suolo; ognuno degli anelli ospita le postazioni di lettura allineate lungo parapetti di legno che si affacciano sulla cavità centrale, con alle spalle gli scaffali contenenti i libri [M. Colombo, «I Maestri dell'Architettura: Santiago Calatrava,» San Giovanni Lupatoto (VR), Hachette, 2009, pp. 42-45].



Figura 13: postazioni di studio biblioteca di Zurigo





Ulteriori esempi sono la biblioteca civica di Stoccarda, inaugurata nel 2011, che si sviluppa su otto livelli, oppure la biblioteca dell'Università di Aberdeen inaugurata nel 2012 in Scozia e progettata dallo studio danese Schmidt Hammer Lassen. In entrambi i casi, il nucleo centrale dell'edificio connette i vari livelli delle biblioteche.



Figura 14: biblioteca Civica, Stoccarda 2011

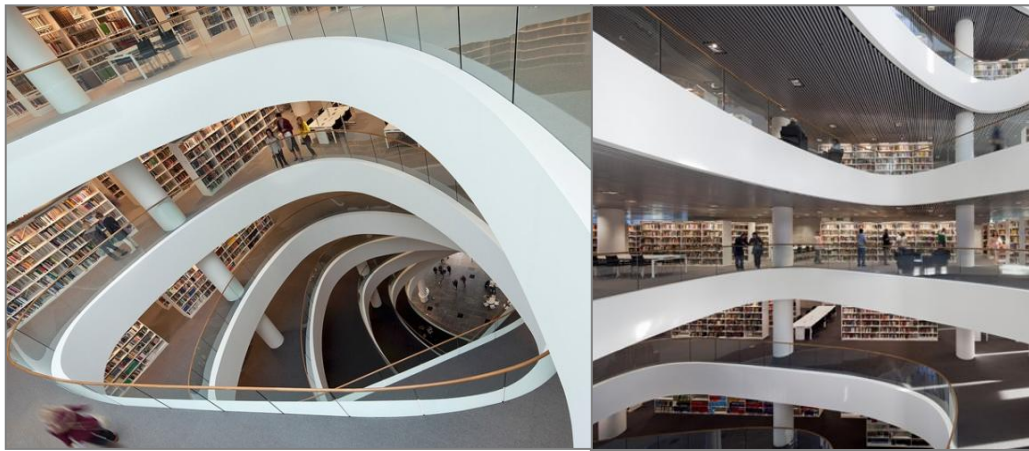


Figura 15: biblioteca Universitaria, Aberdeen (Scozia) 2012

Una particolarità è costituita da edifici che, in passato, avevano tutt'altra destinazione d'uso e che, in tempi recenti, sono stati convertiti in librerie, conservando l'impianto tipologico originale: è il caso della Selexyz Dominicanem a Maastricht, una delle più incredibili librerie del mondo, ospitata in una ex chiesa gotica del XIII secolo trasformata nel 2005 ad opera dello studio Merckx&Girod, in cui gli spazi commerciali sfruttano la magnificenza spaziale dell'architettura della chiesa; oppure la libreria El Ateneo a Buenos Aires che, da teatro inaugurato del 1919, è stata trasformata nel 2000 in una suggestiva libreria o la Barter Books ad Alnwick, situata in una ex stazione della ferrovia vittoriana costruita nel 1987 e aperta nel 1991.



Figura 16: libreria Selexyz Dominicanen Maastricht 2005

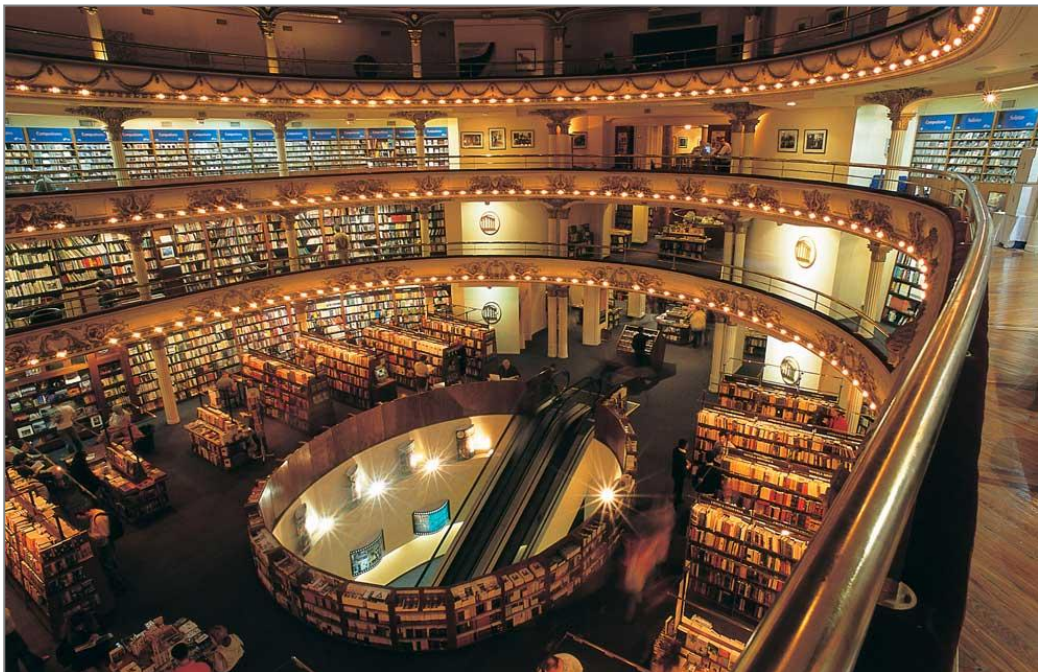


Figura 17: libreria El Ateneo Buenos Aires 2000



## Teatri

Anche per le strutture per lo spettacolo si rileva l'esigenza di disporre attorno ad un ambiente centrale altri spazi che comunicano con il primo direttamente e senza separazioni di alcun genere; molti aspetti che caratterizzano questi luoghi sono assimilabili ai casi precedenti, nonostante la diversa destinazione d'uso.

Qui però l'ambiente centrale non ha esigenze legate al benessere luminoso. La progettazione degli spazi è finalizzata a garantire a tutti gli utenti, soprattutto a quelli che si trovano sulle balconate, buoni livelli di visibilità e acustica delle attività svolte nell'ambiente centrale.

Numerosi sono gli esempi di edifici caratterizzati da un ampio volume sviluppato anche in altezza, realizzato allo scopo di accogliere concerti e rappresentazioni teatrali e attorno al quale sono posizionate balconate destinate agli spettatori dell'opera.

Il Royal Conservatory of Music di Marianne McKenna a Toronto in Canada è, per esempio, distribuito su quattro livelli ed aperto al pubblico dal 2009 ed ospita rappresentazioni liriche e spettacoli teatrali.



Figura 18: Royal Conservatory of Music Toronto 2009

Un ulteriore esempio è il KKL Kultur-und-Kongresszentrum di Jean Nouvel a Lucerna in Svizzera del 2000, realizzato su cinque livelli.



Figura 19: teatro KKL Lucerna 2000

### **Altre destinazioni**

La casistica non si risolve con le tipologie sopra descritte. Spazi con caratteristiche assimilabili a quelle appena trattate possono essere molti altri: aeroporti, stazioni ferroviarie, chiese, uffici.

Un esempio rivoluzionario di uffici è il Larkin Administration Building, di F.L.Wright (Buffalo, New York, 1906). E' costituito da un corpo principale a corte centrale illuminata dall'alto da un ampio lucernario a vetri, su cui si affacciano le gallerie superiori degli uffici. Esempio simile di più recente realizzazione, 1989, è il KI Building di Kajima Design, a Tokyo.



Figura 20: Larkin Administration Building, Buffalo, New York 1906; KI Building, Tokyo 1989





La St. Pancras international railway station di St. Pancras a Londra e il Terminal 3 dell'aeroporto di Dubai sottolineano ulteriormente come questo genere di spazi sia comune a più destinazioni e come l'architettura moderna sia orientata verso volumi sempre più estesi, realizzabili grazie alle nuove tecnologie.



Figura 21: St. Pancras international railway station Londra



Figura 22: Terminal 3 aeroporto Dubai



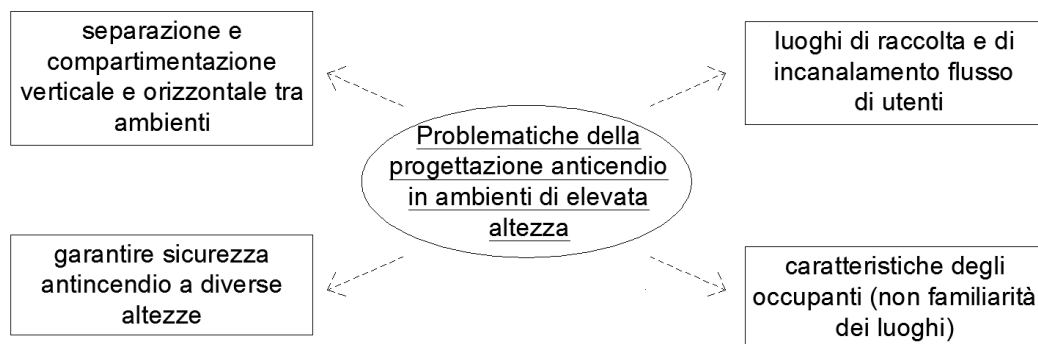


## Capitolo 2

# Il rischio incendio in ambienti di elevata altezza

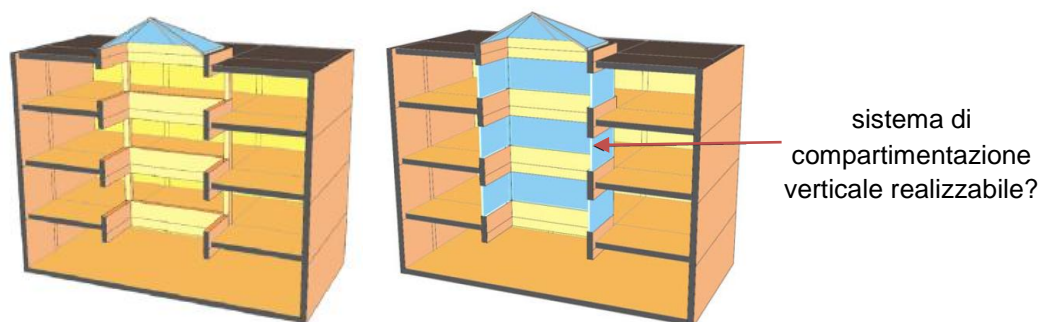
### 2.1. Interesse per la sicurezza al fuoco

L'interesse per lo studio degli incendi di questi ambienti nasce dalla difficoltà nell'affrontare la loro progettazione antincendio, derivante dall'unicità delle loro relazioni geometriche e spaziali e dalle caratteristiche degli utenti. Le problematiche che li caratterizzano sono di diversa natura: dalla difficoltà o impossibilità di applicare alcune strategie antincendio elementari, alla gestione di flussi, numerosi e disordinati, di persone.



Generalmente, per garantire la protezione antincendio in un determinato ambiente, vengono realizzate chiusure e partizioni verticali e orizzontali, per creare un compartimento in grado di contenere la propagazione del fuoco e dei prodotti di combustione.

Tuttavia, gli ambienti ivi studiati sono progettati in modo tale da essere collegati a locali o spazi adiacenti, aperti su quello principale. Per questo motivo viene violato questo approccio in termini di compartimentazione orizzontale e verticale, inoltre la mancanza fisica di queste separazioni permette la facile diffusione di fumo negli spazi che si affacciano sull'ambiente, rendendo la progettazione antincendio particolarmente complessa.



Un altro aspetto critico è che, costituendo spesso luoghi di raccolta, questi spazi possono contenere un numero significativo di occupanti e costituire via di fuga.



Figura 23: affollamento di un Centro Commerciale e di un Teatro durante una rappresentazione

Si pensi, a titolo esemplificativo, al caso in cui si abbia una Mall di un centro commerciale, su cui si affacciano attività di vario genere: in questo caso, quest'area potrebbe costituire uno spazio di raccolta per gli utenti, ma anche la via d'esodo più intuitiva; la conseguente presenza di un numero elevato di persone che potrebbe essere esposto a fumi, gas tossici e fiamme, porta a dover necessariamente studiare la prevenzione e protezione di questi ambienti con particolare attenzione.

Inoltre, sempre per quanto concerne l'utenza, essa è distribuita sui vari livelli dell'ambiente, lungo i percorsi e le aree adibite alla circolazione e alla sosta che si affacciano sullo spazio centrale.

Per questo motivo, in materia di prevenzione incendi, è necessario garantire la completa sicurezza anche ai livelli superiori, per poter permettere l'esodo degli occupanti in modo ordinato e sicuro. Questi spazi per la circolazione e la sosta dovranno essere quindi liberi da arredi e impedimenti, che potrebbero pregiudicare l'esodo degli occupanti in caso di incendio e dovranno avere andamento continuo; eventuali cambiamenti di direzione, ove previsti, dovranno essere ben segnalati.

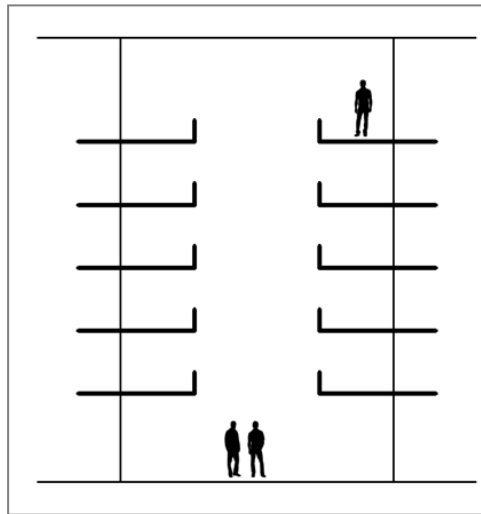


Figura 24: distribuzione utenza su più livelli

Infine, la tipologia di popolazione ospitata all'interno dell'ambiente influenza il comportamento, la risposta nei confronti dell'incendio e i tempi d'esodo: essa può essere descritta tramite i seguenti aspetti:

- numero elevato di presenze;
- imprevedibilità della distribuzione degli occupanti all'interno degli spazi;
- tendenza degli occupanti ad evacuare verso l'ambiente centrale e a considerarlo come punto di riferimento;
- movimento disordinato degli utenti;
- occupanti che non hanno familiarità con l'edificio, in termini distributivi;
- maggior parte degli occupanti non a conoscenza dei sistemi di gestione della sicurezza in caso d'incendio e dei piani di sicurezza.

Anche la protezione dei beni potrebbe essere di rilevante importanza nel caso in cui, per esempio, si stia progettando uno spazio espositivo o museale. Sarà quindi necessario minimizzare il danneggiamento della proprietà e proteggere i contenuti dal fuoco e dall'esposizione ai prodotti della combustione.

Per comprendere ulteriormente l'importanza della sicurezza al fuoco si riportano a seguire alcuni esempi di incendi che hanno interessato questi ambienti, sottolineando come un'inadeguata gestione dell'incendio possa comportare disastri in termini di vite umane e delle proprietà.



## 2.2. Casi significativi d'incendio

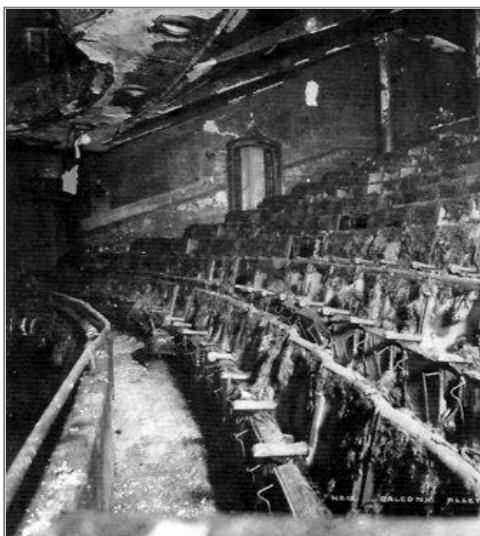
### Incendio al teatro Iroquois Theater Chicago, Illinois USA

**30 Dicembre 1903**

*Vittime:* 605 decessi

*Dinamica:* L'incendio è divampato durante una rappresentazione teatrale e sviluppato velocemente per l'assenza di presidi antincendio e la chiusura delle vie d'uscita.

*Possibili cause:* l'incendio è divampato dal sipario in velluto del palcoscenico al piano terra dei tre livelli che costituivano il teatro.





## Incendio all'Innovation Department Store di Bruxelles, Belgio

**22 Maggio 1967**

*Vittime:* 322 decessi e dispersi<sup>2</sup>.

*Dinamica:* L'incendio è divampato al quarto piano del centro commerciale e si è propagato velocemente a causa della mancanza di allarmi e di un sistema adeguato antincendio.



<sup>2</sup> le cifre variano a seconda delle fonti d'informazione.





## Incendio in un centro commerciale ad Asuncion, Paraguay

**1 Agosto 2004**

*Vittime:* 394 decessi, 4 dispersi e 512 feriti, ustionati e intossicati.

*Dinamica:* L'incendio è divampato quando il centro commerciale era affollato, intrappolando molte delle persone che lo occupavano.

*Possibili cause:* l' incendio preceduto dall' esplosione di una bombola del gas in uno dei numerosi ristoranti del centro.





## Incendio centro commerciale Matalan, UK

**1 Marzo 2006**

*Vittime:* nessuna, evacuate 1000 persone.

*Dinamica:* L'incendio è divampato durante orario di apertura ed ha coinvolto tutto il centro rapidamente poichè era sprovvisto di un sistema di estinzione.

*Possibili cause:* non note.







## Incendio First United Methodist Church Memphis,

**16 Ottobre 2006**

*Vittime:* nessuna.

*Dinamica:* l'incendio sembra essere partito dal seminterrato e si è sviluppato rapidamente nel santuario della chiesa. L'edificio è stato in gran parte distrutto, il tetto ha ceduto ed è sprofondato, il campanile si è rovesciato e alcuni muri sono crollati in strada.

*Possibili cause:* si suppone che l'incendio sia stato provocato da un fulmine





### 2.3. Quadro legislativo italiano

Nel campo della sicurezza antincendio il Ministero dell'Interno, tramite il Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, ha il compito di emanare le norme contenenti le misure di prevenzione e protezione contro gli incendi che devono essere rispettate nelle attività a rischio d'incendio.

In Italia le procedure previste per la verifica delle condizioni di sicurezza antincendio sono state stabilite da diversi anni. Con il D.M. 04/05/1998 è stato esplicitamente prescritto, per le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi da parte dei Vigili del Fuoco, l'obbligo di una valutazione del rischio d'incendio e l'individuazione delle misure tecniche che si ritengono idonee a compensarlo, attraverso:

- individuazione dei pericoli;
- descrizione delle condizioni ambientali;
- valutazione qualitativa del rischio;
- compensazione del rischio;
- gestione dell'emergenza.

Inoltre, con il D.M. 10/03/1998, è stato completato il quadro di informazione e di disposizioni in materia di prevenzione incendi prendendo in considerazione anche le attività non soggette ai controlli dei Vigili del Fuoco, e individuando gli elementi che devono essere presi in esame, per la valutazione e classificazione del rischio di incendio nei luoghi di lavoro:

- identificazione dei pericoli;
- individuazione delle persone esposte al rischio;
- rimozione e/o sostituzione dei pericoli d'incendio;
- classificazione degli ambienti a rischio d'incendio;
- valutazione dell'adeguatezza delle misure adottate;
- redazione della parte documentale relativa alla valutazione effettuata.

Tale approccio di natura prescrittiva è conservativo, poiché viene fissato il livello di sicurezza antincendio che si ritiene accettabile e che resta determinato dal puntuale rispetto della regola tecnica, lasciando esigui margini di discrezionalità ai professionisti e la difficile adattabilità dell'approccio a casi studio più complessi, come quelli ivi analizzati.



Il D.P.R. 01/08/2011 n.151, documento più recente che apporta una semplificazione della disciplina, individua le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi in funzione della destinazione d'uso. Disciplina la verifica delle condizioni di sicurezza antincendio per: il deposito e l'esame dei progetti, le visite tecniche e l'approvazione di deroghe a specifiche normative, che in base alla vigente normativa, sono attribuite alla competenza del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco.

Solo alcune delle attività soggette hanno uno specifico riferimento normativo (normativa verticale), mentre per le attività per cui non sono disponibili norme tecniche specifiche vengono adottate le norme generali (norme orizzontali).

Tra le attività soggette riportate dal D.P.R. 01/08/2011 vi sono, per esempio:

- Attività 65: Locali di spettacolo e di trattenimento: D.M. 19/08/1996
- Attività 69: Locali adibiti ad attività commerciali: D.M. 27/07/2010
- Attività 72: Edifici sottoposti a tutela ai sensi del D.Lgs. 22 Gennaio 2004, n. 42 destinati a contenere biblioteche, archivi, musei, gallerie, esposizioni e mostre: D.M. Beni Culturali e Ambientali 20/05/1992 e D.P.R. 30/06/1995.

Valutando i contenuti dell'apparato normativo con l'obiettivo di identificare se vi siano delle prescrizioni relative agli ambienti di elevata altezza, si è notato come non vi sia alcun riferimento all'altezza dei locali ma la propensione a classificare gli ambienti in funzione dell'estensione superficiale e del numero di presenze.

Unico riferimento a spazi di questo genere viene individuato nel D.M.27/07/2010 in relazione alla definizione di Shopping Mall:

*"galleria interna, coperta, realizzata anche su più piani, su cui si affacciano varie attività commerciali e/o di servizio. Essa deve presentare uscite in posizione contrapposta, altezza (H) minima 7 m e larghezza (L) pari almeno a  $\sqrt{7H}$ , deve essere priva di ingombri che possano essere di ostacolo per l'esodo in emergenza (..)".*

Questo tipo di impostazione, in cui lo Stato impone le regole prescrittive ed i soggetti hanno l'onere di rispettarle sotto il controllo sistematico del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco, è difficilmente applicabile ad ambienti complessi come quelli in esame, data la rigidità delle prescrizioni normative e delle procedure di calcolo.



## 2.4. Ingegneria antincendio e Fire Safety Engineering

L'approccio che è necessario utilizzare per affrontare la problematica degli ambienti ad elevata altezza è quindi quello prestazionale, Fire Safety Engineering.

Con ciò si intende, come definito dal rapporto tecnico ISO TR 13387-1, l'applicazione di principi ingegneristici e giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzati alla:

- tutela della vita umana;
- protezione dei beni e dell'ambiente;
- qualificazione dei rischi d'incendio e dei relativi effetti;
- valutazione analitica nelle misure di prevenzione incendi ottimali necessarie a limitare, entro i livelli previsti, le conseguenze dell'incendio.

In particolare con l'utilizzo di criteri prestazionali, tali obiettivi diventano dei valori di soglia, o intervalli di valori di alcune grandezze, quindi l'analisi del rischio incendi viene svolta in modo quantitativo. Tali limiti vanno individuati attentamente e devono risultare coerenti con le prescrizioni contenute nelle specifiche norme e/o letteratura tecnica nazionale ed internazionale, tra le quali la ISO/TR 13387, la norma BS7974, il decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 09/05/2001.

### **Contesto nazionale**

Un importante contributo all'affermazione dell'approccio ingegneristico nel campo della prevenzione incendi è stato dato dalla direttiva 89/106/CEE del 21/12/1988 sui prodotti da costruzione (recepita in Italia con il D.P.R. 21/04/1993 n. 246).

Essa stabilisce che gli edifici debbono rispondere a determinati requisiti essenziali fra i quali la sicurezza in caso d'incendio:

- stabilità degli elementi portanti per un tempo utile ad assicurare il soccorso agli occupanti;
- limitata propagazione del fuoco e dei fumi, anche riguardo alle opere vicine;
- possibilità che gli occupanti lascino l'opera indenni o che gli stessi siano soccorsi in altro modo;
- possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza.

L'entrata in vigore del D.M. 09/05/2007 "Direttive per l'Attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio" sancisce, anche dal punto di vista normativo, la possibilità del ricorso alle metodologie dell'ingegneria antincendio prestazionale (Fire

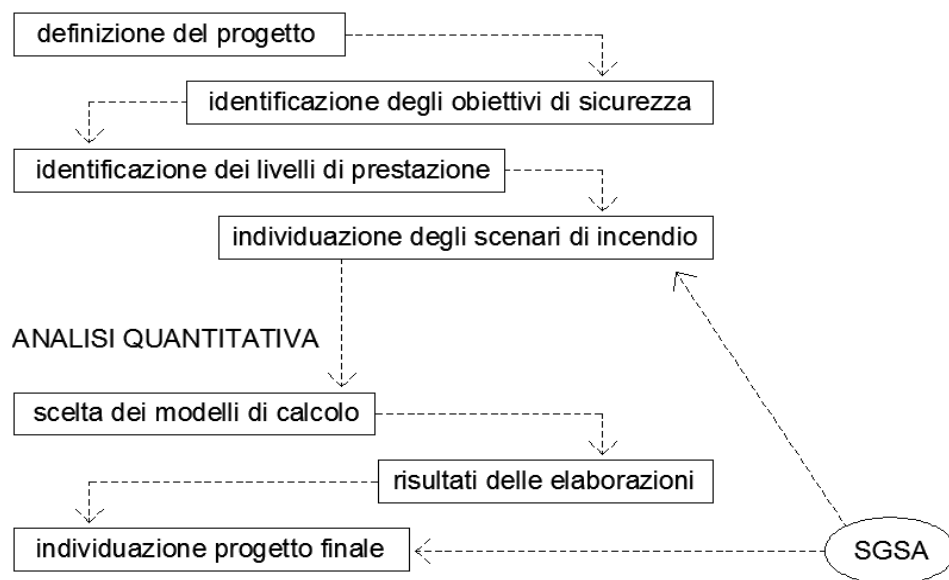


Safety Engineering) come strumento di analisi per la progettazione, nell'ambito della sicurezza antincendio.

Il decreto è costituito da 8 articoli che stabiliscono le procedure da seguire ed i documenti da produrre, e da un allegato tecnico suddiviso in 5 punti che indicano il processo di valutazione e progettazione; non riporta né formule né algoritmi.

Per quanto riguarda il processo di valutazione e progettazione, esso è suddiviso in analisi preliminare e quantitativa e organizzazione della sicurezza antincendio:

#### ANALISI PRELIMINARE



Tale metodologia risulta idonea per l'individuazione delle misure di sicurezza che si ritengono esaustive a compensare il rischio aggiuntivo caratteristico degli ambienti oggetto di studio, nell'ambito del procedimento di deroga.

Infatti l'approccio ingegneristico non deve necessariamente riguardare tutti gli aspetti antincendio, ma può riferirsi, per esempio, alla sola problematica dell'evacuazione delle persone, all'estrazione dei fumi e gas caldi, oppure alla sicurezza strutturale.

Recentemente, il 10 aprile 2014 si è svolto presso l'Istituto Superiore Antincendi un congresso sul tema "Progetto delle Norme di prevenzione incendi generali e semplificate" durante il quale è stato illustrato il "Nuovo Testo Unico di Prevenzione Incendi".

Principi base di questo nuovo documento in fase di approvazione sono:





- semplificazione delle procedure;
- uniformità delle metodologie di progettazione della sicurezza antincendio per tutte le attività;
- standardizzazione del linguaggio adottato, che risulta conformato agli standard internazionali;
- approccio prestazionale: il progettista può individuare autonomamente specifiche soluzioni progettuali alternative a quelle prescritte, ma nel rispetto degli obiettivi di sicurezza prefissati.

Nelle prime tre parti il documento non introduce alcuno strumento innovativo per l'analisi di questi ambienti, ma unifica le norme prescrittive presenti fino ad oggi in materia antincendio, data la difficile interpretazione delle informazioni e la distribuzione in un gran numero di strumenti legislativi, quali decreti e circolari.

Invece nella quarta parte introduce metodologie di progettazione antincendio basate sul metodo prestazionale, rendendo ancora più lecito un approccio che si adatta facilmente allo studio di ambienti non convenzionali e caratterizzati da problematiche che necessitano di uno studio approfondito.

Il documento permette al progettista di definire soluzioni idonee al raggiungimento degli obiettivi antincendio tramite un'analisi quantitativa realizzabile attraverso la metodologia di progettazione FSE, ossia l'ingegneria della sicurezza antincendio.

Vengono descritte anche le fasi di cui si compone tale metodologia, proponendo e rendendo lecito l'uso di modelli di calcolo per descrivere il fenomeno dell'incendio.

In quest'ottica sarà il progettista ad interpretare le condizioni migliori per poter rispondere alle esigenze del singolo utente, assicurando soluzioni specifiche in grado di fornire un elevato grado di sicurezza antincendio.

Con questo nuovo testo unico, la nuova norma di prevenzione incendi che verrà approvata porterà anche alla riduzione degli oneri di prevenzione incendi e all'ammodernamento dei principi regolatori oltre che ad un nuovo approccio metodologico, più adeguato al progresso tecnologico in atto.

Nonostante tutti questi vantaggi, nel panorama italiano, però, non è presente un documento specifico che descriva l'apparato analitico e le formulazioni matematiche per l'applicazione del FSE. Per questo motivo è necessario ricercare tali strumenti in ambito internazionale.



### Contesto internazionale

In sede di normazione volontaria internazionale, l'International Standard Organization (ISO), a cui aderisce anche l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), ha codificato questo approccio verso la protezione degli ambienti dall'incendio tramite l'ingegneria antincendio come Fire Protection Engineering.

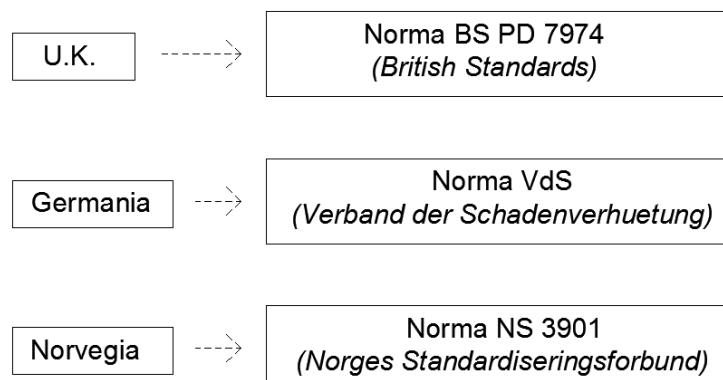
In particolare è stato emanato nel 1999 il rapporto tecnico ISO/TR 13387 "Fire Safety Engineering" che illustra gli aspetti peculiari di tale approccio:

- Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives
- Part 2: Design fire scenarios and design fires
- Part 3: Assessment and verification of mathematical fire models
- Part 4: Initiation and development of fire and generation of fire effluents
- Part 5: Movement of fire effluents
- Part 6: Structural response and fire spread beyond the enclosure of origin
- Part 7: Detection, activation and suppression
- Part 8: Life safety - Occupant behaviour, location and condition.

Questo rapporto però non riporta compiutamente i parametri analitici che risultano necessari per eseguire in modo dettagliato la valutazione del livello di sicurezza antincendio presente in un'attività.

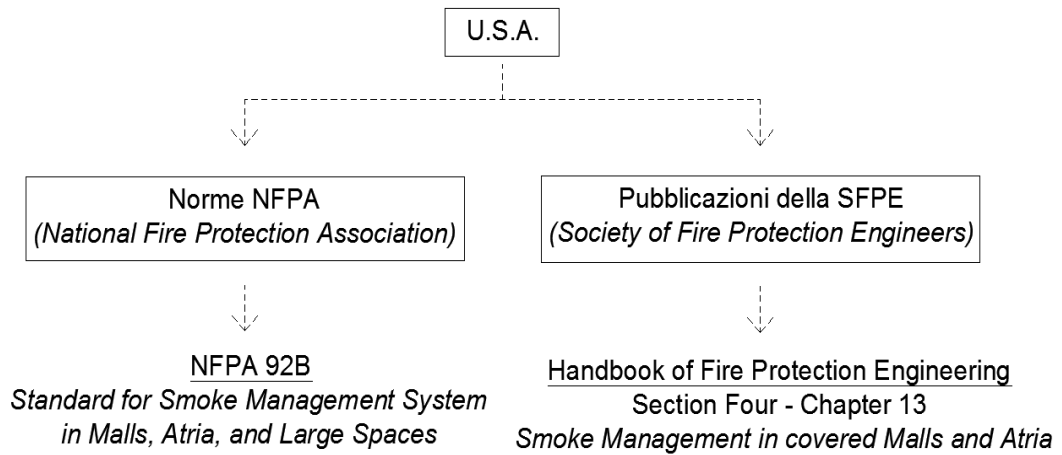
Di conseguenza, a livello internazionale, sono stati pubblicati specifici documenti per la pratica applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio.

In Inghilterra è stata emessa la norma BS 7974 " *Application of fire safety engineering principles to design of buildings* ", in Germania la norma VdS Schadenverhütung " *Design fire for fire simulations and fire protection concepts* " e in Norvegia la NS 3901.





Le tecniche di Fire Safety Engineering vengono anche utilizzate in Giappone, Svezia, Australia, Nuova Zelanda e Canada, mentre negli U.S.A. tale approccio ingegneristico è sviluppato da parecchi anni. Infatti gli unici documenti che descrivono specificatamente l'approccio da adottare nei confronti di ambienti di elevata altezza, con riferimento ad Atri o Mall, sono di matrice Americana.





## Capitolo 3

# Analisi qualitativa del fenomeno incendio

### 3.1. Caratteristiche dell'incendio

Come specificato nel capitolo precedente, al contrario di quanto avviene per l'approccio prescrittivo, l'applicazione dell'approccio prestazionale prevede che venga condotta una descrizione qualitativa dell'evoluzione dell'incendio, che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi.

Lo studio di casi reali ed una consistente campagna di sperimentazione effettuata in vari paesi, hanno permesso di giungere ad alcune schematizzazioni della meccanica dell'incendio. Una delle più significative per gli scopi che qui interessano prende in considerazione un incendio la cui correlazione tra tempo di combustione e temperatura raggiunta dall'ambiente è schematizzata, in maniera qualitativa e meramente indicativa, nella figura che segue:

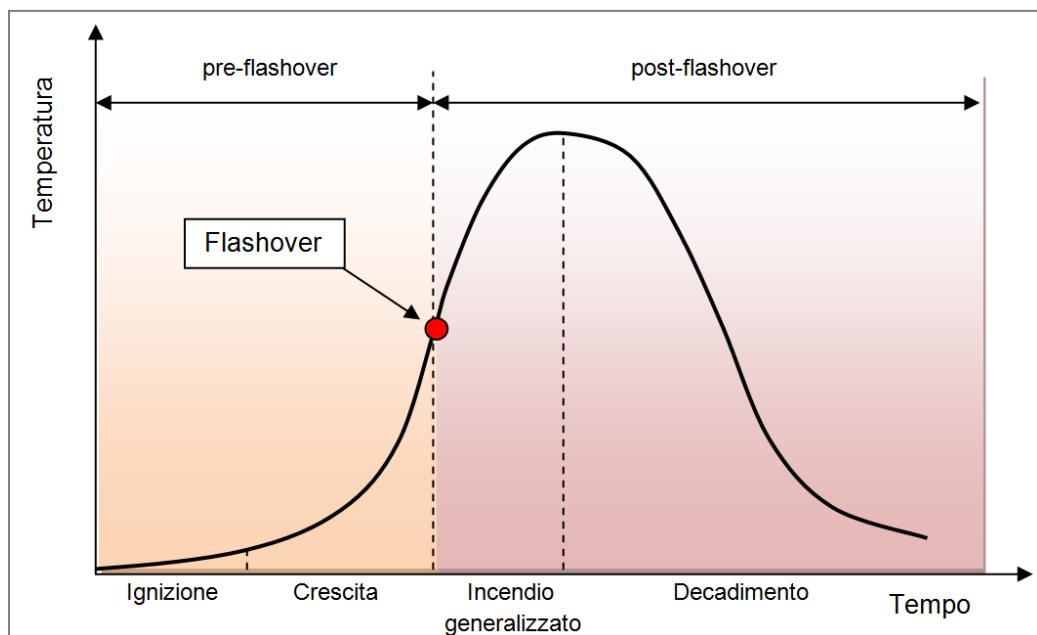


Figura 25: andamento tempo-temperatura dell'incendio





L'evoluzione dell'incendio così rappresentato prevede una fase iniziale di ignizione seguita da una di crescita in cui la temperatura varia di poco in funzione del tempo. Questa fase si conclude al raggiungimento del flashover, che segna il passaggio dalla fase di crescita ad un incendio completamente sviluppato, ossia il limite tra incendio localizzato e generalizzato. Può anche essere definito come la transizione dalla combustione controllata dal combustibile a quella controllata dalla ventilazione.

Convenzionalmente, il flashover segna il momento in cui la temperatura ambientale tende all'uniformità e raggiunge valori compresi fra 500 °C e 600 °C, in dipendenza delle caratteristiche del compartimento e dei materiali combustibili in esso contenuti, oppure quando la potenza radiante raggiunge i 20 kW/m<sup>2</sup> a livello del pavimento.

Nel caso di ambienti di elevata altezza lo studio dell'incendio è limitato alla sola fase che precede il flashover, poiché è improbabile che questo fenomeno avvenga, data la quantità di aria coinvolta e le potenze che caratterizzano questa tipologia di incendio. Non si raggiungono quindi temperature tali per cui tutti i materiali combustibili presenti nell'ambiente siano coinvolti.

Si riporta nel seguito una tabella riassuntiva che sintetizza gli aspetti peculiari della fase di pre-flashover sia per quanto riguarda gli effetti sulle persone e cose, che per le misure impegnate attive e passive.

	<b>Pre-flashover</b>	
	<b><u>Ignizione</u></b>	<b><u>Crescita</u></b>
<b><u>Eventi</u></b>	innesco del primo oggetto, produzione di fumo e gas	produzione di fumo e gas
<b><u>Effetti sulle persone</u></b>	l'aria inizia ad essere contaminata	l'aria diventa progressivamente intollerabile fino ad essere letale
<b><u>Effetti sui materiali</u></b>	effetti trascurabili	i materiali sono contaminati ed anneriti dal fumo
<b><u>Misure attive impegnate</u></b>	monitoraggio ambientale con rilevatori di fumo	impianti sprinkler, intervento VVF, sistemi di controllo del fumo
<b><u>Misure passive impegnate</u></b>	materiali classificati per reazione al fuoco	materiali classificati per reazione al fuoco



Per questo motivo l'interesse nell'affrontare lo studio della sicurezza antincendio in questi ambienti è relativo al monitoraggio, al controllo ed estinzione dell'incendio e alle conseguenze della produzione di gas tossici e riduzione della visibilità causata dai fumi di combustione.

Inoltre, lo stadio iniziale dell'incendio è caratterizzato da un debole aumento della temperatura nel locale e i pericoli principali in questa fase sono costituiti dalla temperatura di innesco e dalla forte emissione di fumo. Di conseguenza, passa in secondo piano l'analisi strutturale, poiché esse non raggiungono temperature tali da pregiudicarne la stabilità.

Gli obiettivi primari possono così essere riassunti:

- mantenere condizioni ambientali tali per cui sia possibile per gli utenti percorrere le vie d'esodo in sicurezza ed evacuare gli ambienti nel tempo previsto;
- limitare la produzione e propagazione del fuoco e dei fumi dall'ambiente centrale a quelli adiacenti e viceversa;
- assicurare il funzionamento delle misure di protezione installate in ambiente;
- permettere al personale di soccorso di compiere le operazioni di salvataggio in sicurezza e localizzare più facilmente la sorgente dell'incendio

### 3.2. Produzione e propagazione dei fumi

Per quanto riguarda la produzione e la propagazione dei fumi, viene descritta nel seguito la dinamica che caratterizza l'incendio localizzato durante la fase di crescita dell'incendio.

Inizialmente, i prodotti della combustione salgono verticalmente dalla sorgente verso il soffitto generando un pennacchio di fumi, detto plume, che richiama aria dallo spazio circostante. Di conseguenza il volume dei gas e dei fumi prodotti aumenta stratificandosi sotto il soffitto e aumentando progressivamente di spessore. L'aumento dei fumi a soffitto provoca l'abbassamento dell'interfaccia tra questa zona e quella libera dai prodotti della combustione.

L'analogia che viene spesso proposta per descrivere in modo elementare tale andamento fa riferimento al processo di riempimento idraulico di un contenitore. Si riporta nel seguito l'esempio .

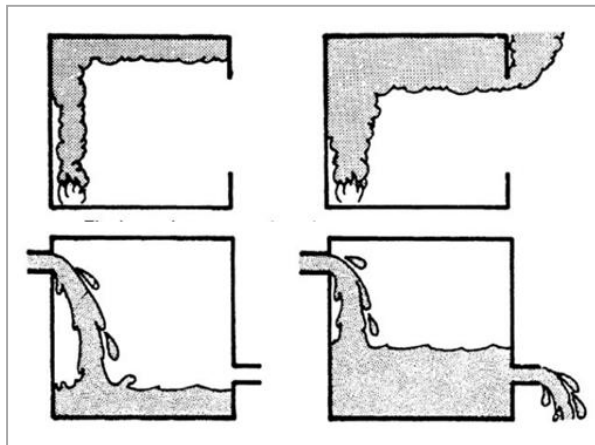


Figura 26: analogia tra riempimento di un locale di fumi e di una vasca d'acqua

Nello specifico la propagazione dei prodotti della combustione è data dalla spinta verso l'alto e dall'aumentare di volume di gas prodotti, più caldi rispetto all'ambiente circostante. La loro temperatura determina quindi la spinta di galleggiamento e dipende dalla potenza termica prodotta e , per calcolarla, è necessario valutare il contributo della quantità di aria che entra nel *plume*.

Questo aspetto è di essenziale importanza nei volumi ivi studiati, poiché l'aria che viene richiamata nel plume ne riduce la concentrazione e la temperatura dei fumi e gas di combustione. Di norma infatti il plume si eleva fino ad arrivare a soffitto e, una volta raggiunto, i prodotti della combustione iniziano a propagarsi orizzontalmente, formando lo strato a soffitto.



Figura 27: esempio di propagazione dei fumi nella fase pre-flashover

Negli spazi ampi e ad elevata altezza, il plume può non raggiungere il soffitto e determinare una dispersione di fumi a bassa temperatura a quote intermedie, a causa della eccessiva quantità di aria inglobata. Tale massa infatti, può essere tale da abbassare la temperatura del plume fino ad annullare le forze di galleggiamento.

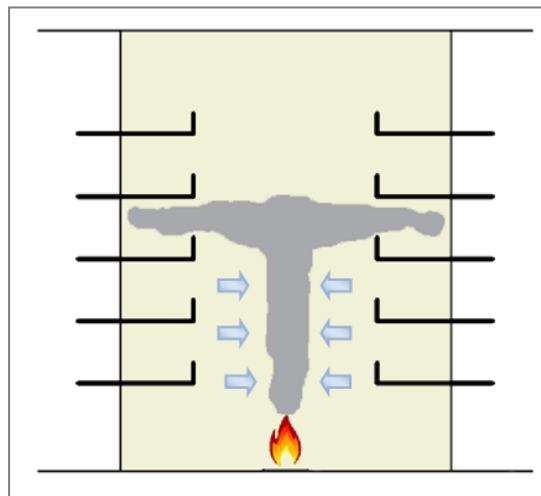


Figura 28: dispersione dei fumi a quota intermedia

L'ambiente oggetto di studio, come già specificato precedentemente, è quindi costituito da un unico volume caratterizzato da una maggiore estensione verticale piuttosto che in lunghezza e profondità, per cui  $b \ll h$ . Spesso però questo spazio si relaziona con altri disposti su più livelli, perciò è necessario valutare le conseguenze sull'andamento dei fumi nel caso in cui l'incendio avvenga negli ambienti laterali. Infatti, la quantità di aria trascinata nel plume dipende anche dalla sua configurazione.

### Axisymmetric plume

Con la tipologia "*axisymmetric plume*" si fa riferimento ad un incendio situato al centro del locale, caratterizzato quindi da un *plume* lontano dalle pareti che richiama a se aria da tutti i lati, trascinandola per tutta l'altezza del locale fino a raggiungere l'interfaccia tra lo stato caldo e freddo dei fumi.

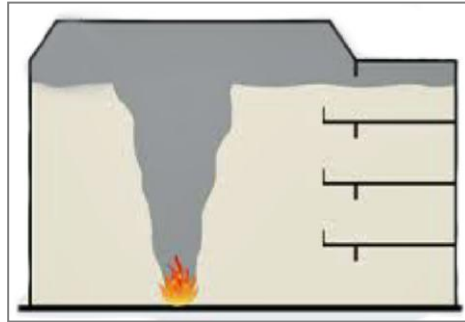


Figura 29: axisymmetric plume

### Spill plume

Con *spill plume* si intende un andamento dei prodotti della combustione che si propagano inizialmente in modo orizzontale per poi salire verso l'alto una volta raggiunto il bordo di un oggetto o un'apertura su uno spazio più ampio.

E' quindi il fenomeno che più si adatta alla tipologia di ambiente oggetto di studio, che verrà analizzata per valutare gli effetti degli incendi degli ambienti confinanti su quello centrale.

Inoltre, è possibile classificare lo spill plume in due gruppi, in funzione del fatto che i fumi aderiranno alle pareti sopra l'angolo (*Adhered spill plume*) o si discosteranno da esse (*Balcony spill plume*), variando il quantitativo di aria trascinato e la massa di fumi prodotti.

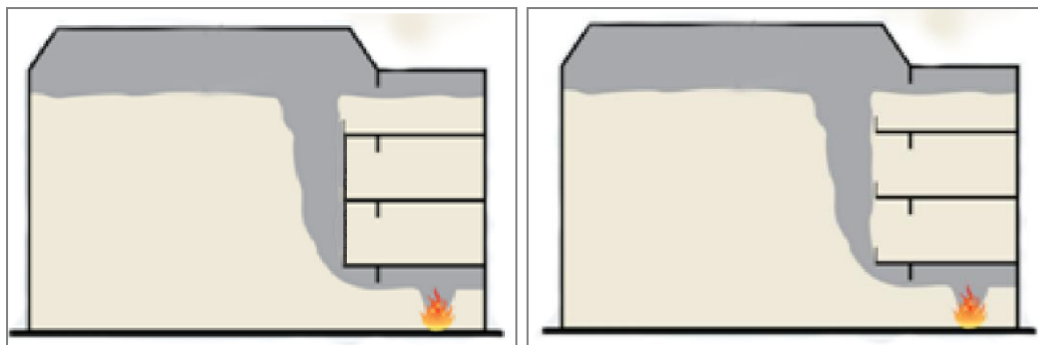


Figura 30: adhered spill plume e balcony spill plume





### 3.3. Effetti sulle persone e vie d'esodo

Occorre il massimo impegno per prevenire l'insorgere di un incendio e la massima attenzione nell'adozione dei più moderni mezzi di rilevazione, segnalazione, controllo e spegnimento di un incendio.

Negli ambienti oggetto di studio tale impegno deve essere finalizzato a garantire l'esodo in sicurezza degli occupanti e ciò diventa essenziale, poiché sono caratterizzati da alto affollamento, concentrato in alcuni momenti di esercizio, non sempre prevedibili.

Inoltre, è noto che la maggior parte degli eventi mortali avvenuti all'interno degli edifici a causa di un incendio è legata alla difficoltà delle persone di raggiungere un luogo sicuro prima che le condizioni divengano insostenibili. La principale causa di insostenibilità delle condizioni in un ambiente è la propagazione di fumi e gas caldi nocivi.

Da una statistica del 2004 risulta infatti che le cause di decesso sono dovute:

- 65% all'inalazione di gas<sup>3</sup> caldi, nocivi ed asfissianti generati dalla combustione dei materiali.
- 25% all'esposizione ad alta temperatura, provocando ustioni ed altre alterazioni fisiche irreversibili
- 10 % a crolli o cedimenti strutturali.<sup>4</sup>

L'inalazione dei prodotti della combustione da parte degli esseri umani comporta una riduzione della capacità di prendere decisioni e un peggioramento delle capacità motorie, che possono portare all'incapacità e alla morte. Inoltre, è molto importante tenere conto del fatto che, anche in caso di sopravvivenza, le vittime possono riportare danni permanenti.

Gli effetti possono variare a seconda della tipologia di occupanti, del tempo di esposizione e dall'aumento del ritmo respiratorio, dovuto a temperature più alte, con conseguente più rapida assunzione di tossici.

Si riportano, nel seguito, facendo riferimento ad una comune combustione in aria, i gas rilasciati e le possibili cause dovute all'inalazione.

---

<sup>3</sup> per gas si indicano i prodotti del processo che rimangono allo stato gassoso anche dopo il raffreddamento ambiente a 15°C.

<sup>4</sup> dati riportati nella UX35: "Sicurezza: evacuatori di fumo e calore. Linee guida per la realizzazione" a cura dell'Ufficio Tecnico Uncsaal - Zenital; Ing. Giuseppe Giuffrida e Ing. Paolo Rigone. 2004.



Monossido di carbonio (CO)	Generato in presenza di poco ossigeno in ambiente chiuso con scarsa ventilazione. L'esposizione a un'atmosfera contenente una percentuale di CO del: <ul style="list-style-type: none"><li>- 0.05% è fatale dopo 3 ore</li><li>- 0.15% è fatale dopo 1 ora</li><li>- 1.3% porta ad incoscienza e morte in pochi minuti</li></ul>
Anidride carbonica (CO <sub>2</sub> )	Deriva in presenza di combustibili organici e si forma sempre in grandi quantità negli incendi generici. E' un gas asfissiante che in una percentuale già del 5% rende l'aria irrespirabile.
Solfuro di idrogeno (H <sub>2</sub> S)	Deriva dalla presenza di combustibili contenenti zolfo (es. lana, gomma, pelli...) e presenta un odore caratteristico di uova marce. In percentuale del: <ul style="list-style-type: none"><li>- 0.05% provoca vomito e vertigini dopo mezz'ora</li><li>- &gt;0.05% è tossico per il sistema nervoso</li></ul>
Anidride solforosa (SO <sub>2</sub> )	Si ha in presenza di combustibili contenenti zolfo ed in ricchezza di aria. In percentuale del: <ul style="list-style-type: none"><li>- &lt;0.05% è irritante per occhi e mucose</li><li>- &gt;0.05% è mortale in tempi brevi</li></ul>
Ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	Si produce dalla combustione di materiali contenenti azoto (es. lana, seta, materiali acrilici e fenolici) ed è inoltre impiegata per impianti di refrigerazione. E' irritante per le vie respiratorie ed in percentuale dello 0.5% conduce alla morte in mezz'ora
Acido cianidrico (HCN)	Deriva da combustione incompleta di resine e materiali plastici. Ha odore caratteristico di mandorle amare ed in percentuale >0.3% è mortale
Acido cloridrico (HCl)	Deriva dalla combustione di tutti quei materiali contenenti cloro, quali la maggior parte delle materie plastiche (es. PVC), ha odore acre ed è irritante per le mucose. In percentuale >0.01% è mortale in tempi brevi
Ossidi di azoto (NO <sub>2</sub> ,...)	Derivano dalla combustione di ammonio, nitroglicerina e altri nitrati organici. Sono fortemente tossici e in percentuali già dello 0.02% risultano mortali
Acroleina (CH <sub>2</sub> =CH-COH)	Deriva dalla combustione di oli e grassi. Altamente tossico e irritante, in percentuale > 0.002% può essere mortale
Fosgene (dicloruro di carbonile COCl <sub>2</sub> )	Si forma dalla combustione di materiali plastici contenenti cloro. E' altamente tossico, in percentuali del: 0.003% è letale in trenta minuti in percentuali del: 0.005%.



Un altro effetto causato dalla propagazione dei prodotti della combustione è la diminuzione di visibilità causata dalla presenza dei fumi che può influire sulla capacità degli occupanti di riuscire a individuare e raggiungere l'esterno di un edificio in sicurezza. I fattori che peggiorano la visibilità includono l'ammontare di particolato nel campo visivo e l'effetto fisiologico sull'occhio. Anche un basso livello di illuminamento può influenzare negativamente la capacità di fuga.

Infine, danni fisici possono derivare da esposizioni alle radiazioni termiche dovute alle fiamme e ai gas caldi ed il calore radiante può anche causare l'innesco dei vestiti.

E' importante quindi prevedere una segnaletica, illuminazione e un sistema di informazione a disposizione delle persone. Negli edifici caratterizzati da luoghi di raccolta e pubblici il sistema di informazione è fondamentale poiché gli utenti non conoscono l'articolazione della struttura, e la presenza di un sistema che indirizzi le persone in caso di emergenza può favorire la velocità e l'efficacia dell'esodo.

Dato il numero elevato di presenze, è necessario fornire un'informazione completa e chiara dell'evento e delle vie d'esodo da seguire e non creare condizioni ambigue, che potrebbero essere soggette ad interpretazioni sbagliate e implicare azioni contrarie al flusso, generando panico e caos in una situazione già di difficile gestione.



### 3.4. Strategie per il controllo dell'incendio e dei fumi

Per raggiungere gli obiettivi stabiliti precedentemente in relazione alle considerazioni sulla propagazione dei fumi appena condotta, è necessario stabilire quali strategie per il controllo dell'incendio e dei fumi siano più idonee per la tipologia di ambiente studiato.

#### Rilevazione

Anzitutto è necessario stabilire quale rilevatore di incendio sia più adeguato tra quelli presenti che vengono classificati in base al fenomeno chimico-fisico rilevato: calore, fumo, gas e fiamma.

La strategia più idonea per rilevare la presenza di un principio d'incendio in ambienti con le caratteristiche descritte sopra prevede pertanto l'utilizzo di rilevatori di fumo. Esistono diversi tipi di dispositivi di rilevamento di questo genere e i più comuni sono i rilevatori di fumo puntiformi come quelli ottici, dotati al loro interno di un trasmettitore e un ricevitore di luce separati da un dispositivo opaco che impedisce alla luce emessa dall'emettitore di raggiungere il ricevitore. In presenza di fumo, le particelle che lo costituiscono permettono alla luce di raggiungere il ricevitore e segnalare l'avvio dell'incendio.

Il limite dell'applicazione di dispositivi puntiformi negli ambienti ad elevata altezza è legato al fatto che sono in grado di rilevare la presenza di fumo in un solo punto e non è detto che questo sia effettivamente raggiunto o che il tempo trascorso tra l'avvio dell'incendio e il raggiungimento da parte del fumo del rilevatore sia accettabile.

Per questo motivo i rilevatori di fumo più idonei per volumi ampi e sviluppati prevalentemente in altezza sono quelli lineari. Questi dispositivi sono anch'essi dotati di un emettitore e un ricevitore ma vengono installati separatamente su pareti contrapposte e durante il loro normale funzionamento l'emettitore invia un fascio infrarosso al ricevitore. Se il segnale viene oscurato dal fumo, viene attivato l'allarme; di conseguenza, è importante che non vi siano ostacoli tra i due dispositivi.

Il vantaggio nell'utilizzo di questo tipo di rilevatore è duplice. Innanzitutto dà la possibilità di segnalare l'incendio prima che i fumi raggiungano il soffitto, potendo essere installato a quote intermedie e non solo a soffitto, rilevando tempestivamente il processo in corso. Il secondo vantaggio è deducibile se si considera, per esempio, il caso in cui i fumi non raggiungano il soffitto per un'insufficiente capacità di galleggiamento.

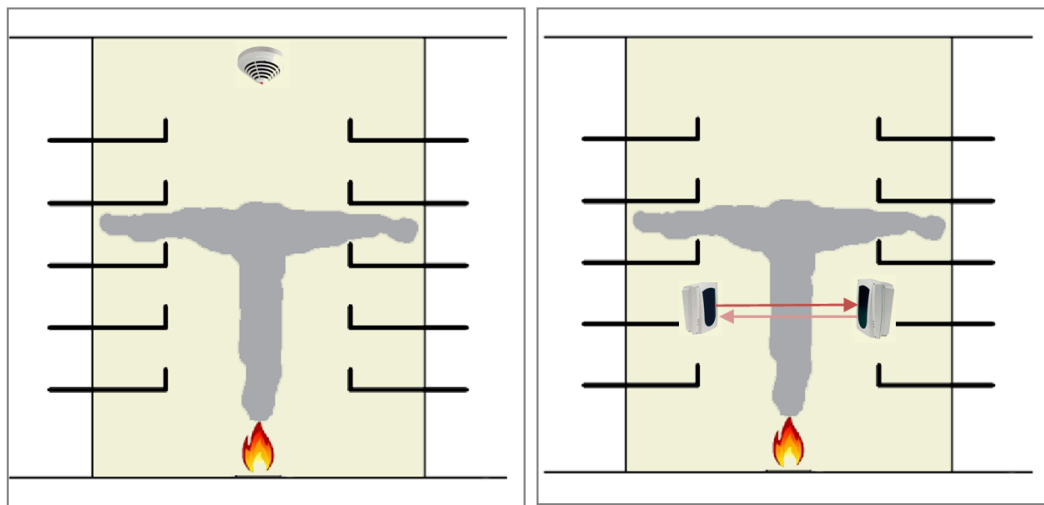


Figura 31: differenza di installazione rilevatore puntiforme e lineare

In questo caso, l'installazione di un rilevatore puntiforme non garantirebbe l'avviso dell'inizio dell'incendio poiché non sarebbe raggiunto dai fumi. Se venisse, invece, installato un rilevatore lineare a quota intermedia, il fascio infrarosso verrebbe interrotto e sarebbe prontamente segnalato l'avvio dell'incendio con l'allarme.

La scelta di un impianto di rilevazione automatica idoneo trova quindi il suo utile impiego nel ridurre il tempo di intervento e consente di avviare un tempestivo sfollamento delle persone e sgombero dei beni, di attivare sia un piano di intervento sia i sistemi di protezione contro l'incendio.

### **Soppressione**

Per quanto riguarda i sistemi di soppressione manuali questi prevedono che alcune azioni siano prese dagli occupanti dell'edificio, dalle squadre di addetti antincendio e dai vigili del fuoco. Alcuni apparati sono intesi per essere usati da chiunque si trovi in presenza di un incendio, come gli estintori, i naspi, i sacchi di sabbia.

In alcuni casi, per questi ambienti può essere necessario garantire che la dimensione del fuoco non diventi eccessiva, per non inficiare il corretto funzionamento degli evacuatori e, per questo motivo, in taluni casi si include l'uso di sistemi di soppressione automatici di estinzione a pioggia per controllarne la dimensione. Inoltre, i sistemi di spegnimento automatico, come gli sprinkler, vengono generalmente installati all'intradosso di passerelle, ballatoi, corridoi per proteggere gli ambienti che si affacciano su quello centrale.



L'erogazione di acqua può essere comandata da un impianto di rilevazione incendi, oppure essere provocata direttamente dalla apertura delle teste erogatrici per fusione di un elemento metallico o per rottura, a determinate temperature, di un elemento termosensibile a bulbo che consente in tal modo la fuoriuscita d'acqua. Data la dimensione dell'ambiente è preferibile prevedere l'erogazione tramite un sistema di rilevazione poiché potrebbero non essere raggiunte le temperature sufficienti per l'attivazione del sistema.

### **Ventilazione**

Come specificato precedentemente, gli obiettivi primari in termini di sicurezza antincendio per gli ambienti pluripiano che si affacciano su un unico ambiente centrale sono evitare la propagazione dei fumi verso i vari piani dell'edificio e fornire le condizioni necessarie a lasciare le vie di fuga libere dai fumi.

Tale scopo può essere raggiunto con l'installazione di un sistema di controllo dei fumi con l'ausilio di evacuatori di fumo e calore (EFC) a funzionamento naturale o con l'utilizzo di estrattori meccanici.

Questo approccio permette l'evacuazione del fumo e dello strato caldo della zona più alta dell'ambiente con la conseguente creazione di uno strato libero dai fumi sopra il pavimento e, per essere efficace, è necessario che lo strato caldo di fumi sia caratterizzato da temperature sufficientemente alte da raggiungere il soffitto. Tali Sistemi di Evacuazione di Fumo e Calore (SEFC), possono essere di tipo naturale (ENFC), che sfruttano la tendenza dei fumi caldi a spostarsi verso l'alto, o ad azionamento meccanico (EFFC).

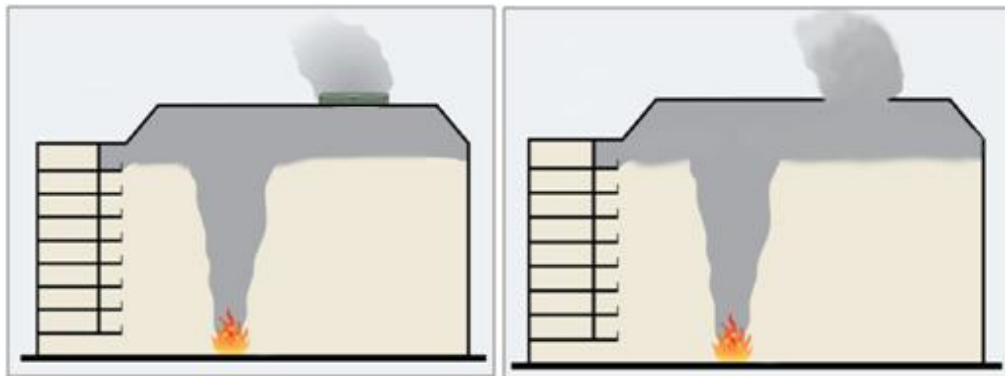


Figura 32: sistemi di ventilazione meccanica e naturale

Questi dispositivi sfruttano la tendenza dei prodotti della combustione a formare uno strato "galleggiante" più caldo a soffitto che viene asportato verso l'esterno tramite

aperture o ventilatori meccanici. Lo strato caldo viene evacuato fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio tra i gas asportati e l'aria di afflusso dalle aperture a parete, che devono essere adeguatamente dimensionate per garantire l'efficacia del sistema. E' importante ricordare come le prestazioni dei sistemi di evacuazione di fumo e calore dipendano da numerosi fattori come la temperatura dello strato caldo di fumo, il flusso di aria pulita in ingresso, la capacità di estrazione del sistema e gli effetti del vento.

Il vento è un aspetto che deve essere considerato se si prevede l'installazione di evacuatori naturali di fumo e calore sulla copertura degli ambienti studiati. La presenza del vento, infatti, può alterare l'efficienza dell'evacuatore, rendendo a volte sconsigliabile l'installazione in certe posizioni o di certi prodotti.

Ciò è dovuto alla presenza di correnti d'aria a basse velocità che impattano direttamente con i gas e i fumi caldi estratti dall'evacuatore, producendo un raffreddamento delle particelle e facendo ricadere, all'interno del fabbricato, gli elementi di combustione.

Per questo motivo questa tipologia di evacuatori deve essere provvista di paravento o altri sistemi che garantiscano il perfetto funzionamento in presenza di vento da qualunque direzione. I deflettori, deviando la direzione del vento, creano così una depressione alla bocca di uscita dell'estrattore, favorendo l'uscita dei gas di combustione.



Figura 33: esempi di evacuatori fumo e calore in copertura

Se, come nel caso dei teatri, non ci fosse la possibilità di intervenire in copertura, è possibile installare dei sistemi di evacuazione a parete. Questa tipologia di installazione presenta alcune problematiche legate alla garanzia di funzionamento in ogni condizione ambientale, soprattutto in presenza di vento.

La complessità del progetto è definita dal sistema di controllo di apertura degli evacuatori che deve garantire che siano aperti solo gli evacuatori sotto vento e questa condizione deve essere mantenuta per tutta la durata di funzionamento del sistema. La scelta degli evacuatori da parete deve essere fatta tenendo conto di questi fattori e che il numero degli evacuatori sia doppio rispetto alla soluzione in copertura.



Figura 34: esempi di evacuatori fumo e calore a parete

Nei volumi di grandi dimensioni è rilevante il fatto che potrebbe non formarsi uno strato a soffitto dei fumi, a causa della eccessiva quantità di aria coinvolta e in alcuni casi, quindi, non è possibile o conveniente prevedere che l'evacuazione del fumo e del calore avvenga attraverso l'ambiente alto. Di conseguenza, può essere utile, attraverso l'installazione di adeguate barriere, evitare che il fumo si propaghi dagli ambienti adiacenti in quello centrale e prevedere l'evacuazione dei prodotti della combustione in ognuno di questi. Inoltre, gli evacuatori posti negli spazi adiacenti a quello centrale devono essere in grado di asportare anche i fumi derivanti da un eventuale incendio nell'ambiente in comune.

### **Pressurizzazione e depressurizzazione**

Un'altra tecnica adottata è quella di indurre dei differenziali di pressione, con il fine di dirigere il movimento del fumo dalle aree ad alta pressione alle aree di bassa pressione. Questa strategia può quindi essere utilizzata per convogliare i prodotti della combustione verso l'ambiente centrale ad altezza elevata, ma ciò implica che questo sia separato dagli spazi adiacenti tramite piccole aperture e quindi risulta essere di difficile applicazione.

L'obiettivo principale di questa strategia è, come già specificato, quello di impedire al fumo di propagarsi negli spazi adiacenti ed è importante sottolineare che non fornisce particolare protezione all'ambiente centrale.

## Contenimento

Il fumo può essere trattenuto usando sistemi di contenimento mobili o fissi, che permettono di proteggere le vie d'esodo e contenere i fumi in determinate porzioni dell'edificio.



Figura 35: applicazione delle barriere mobili al fumo in un centro commerciale

A questo scopo, le barriere al fumo mobili trovano largo impiego negli ambienti di grandi dimensioni e creano una compartimentazione a soffitto o chiudono e dividono ambienti diversi, altrimenti difficilmente separabili.

E' inoltre una tecnologia che facilmente si adatta alle temperature che interessano tali ambienti, poiché sono progettate per raggiungere temperature tipiche della fase pre-flashover, mentre la loro applicazione a temperature più alte, caratteristiche del flashover, 1000°C, è critica.

L'utilizzo di tali barriere in questi ambienti comporta importanti vantaggi, primo tra tutti la capacità di migliorare l'efficacia dell'impianto di evacuazione, grazie ai migliori rapporti tra le superfici di scarico dei gas caldi e gli ingressi d'aria fresca. Inoltre, permettono di evitare che fumi e gas caldi si raffreddino mescolandosi con maggiori volumi d'aria interna, con la conseguenza di restare nell'edificio e di espandersi in basso, mettendo a rischio persone e cose e agevolano lo spegnimento dell'incendio perché intere zone restano libere da fumi, mentre lo strato libero da fumi è maggiore nelle zone dove l'incendio è ben definito.



Le barriere mobili hanno però tempi di funzionamento che in alcuni casi non le rendono utilizzabili, perciò è necessario inserire barriere fisse. Dato che negli ambienti ivi studiati non vengono raggiunte temperature elevate, per rendere gli ambienti adiacenti almeno comunicanti visivamente con quello centrale possono essere installate barriere di vetro senza particolari requisiti per resistere ad alte temperature.

### **Soppressione**

I sistemi di soppressione si differenziano in due categorie: manuali e automatici. Nella prima si prevede che alcune azioni siano prese dagli occupanti dell'edificio, dalle squadre di addetti antincendio, dai vigili del fuoco. I sistemi automatici invece per loro natura non richiedono intervento da parte dell'uomo.

Quelli maggiormente installati sono quelli automatici e sono influenzati dal tempo di attivazione del sistema, che dipende dalle caratteristiche del progetto, in particolare dal suo grado stesso di affidabilità.

Possano essere sfruttati in due modi differenti, da una parte per il semplice controllo dell'incendio oppure per la completa estinzione. Quest'ultima condizione è resa possibile se l'incendio che si sviluppa non raggiunge le condizioni di flashover e quindi di incendio generalizzato; perciò la categoria degli ambienti analizzata rientra in questa particolare situazione.



Figura 36: impianto sprinkler di soppressione

E' utile sottolineare come l'altezza degli spazi può influenzare la progettazione di questi sistemi; essi infatti non devono essere posizionati a soffitti, in quanto la distanza dal focolare potrebbe renderli inefficaci o ridurre comunque l'efficienza. Infine per quanto riguarda la scelta del tipo di sistema e quindi del materiale di spegnimento, essa è legata alla destinazione d'uso.



### 3.5. Modelli di calcolo

Allo stato attuale esistono dei modelli di calcolo di matrice analitica e numerici che permettono la quantificazione effettiva degli aspetti di cui si è discusso fino ad ora. Essi sono riportati in particolare da normative, manuali e linee guida straniere e permettono di descrivere sia la fase di avvio e produzione dei prodotti della combustione, sia la fase di propagazione e controllo dei fumi.

I modelli più frequentemente utilizzati per un approccio di tipo prestazionale alla sicurezza antincendio che permettono di descrivere al meglio anche gli ambienti oggetto di studio sono:

- modelli analitici,
- modelli numerici tra cui:
  - modelli di simulazione dell'incendio a zone per ambienti confinati (codici di calcolo CFAST, Ozone, B-RISK),
  - modelli di simulazione dell'incendio di campo (codici di calcolo CFX, FDS);
  - modelli di simulazione dell'esodo (es. codici di calcolo FDS+EVAC),
  - modelli di analisi termostrutturale.

Nei capitoli a seguire vengono quindi descritti i principali modelli analitici utilizzati per descrivere l'incendio, individuare i parametri da cui dipende la propagazione dei fumi e osservarne le variabili in modo tale da comprenderne i meccanismi.

Questo serve come passaggio fondamentale per la comprensione non solo della dinamica e criticità del fenomeno, aspetto fondamentale se si intende operare secondo un approccio prestazionale, ma anche per la comprensione e un corretto utilizzo di modelli numerici di simulazione, più o meno complessi.







## Capitolo 4

# Analisi quantitativa del fenomeno incendio

### 4.1. Cenni sulla meccanica dei fluidi

Per comprendere il meccanismo di funzionamento del fenomeno degli incendi, dal punto di vista fisico si deve fare riferimento alla teoria della meccanica dei fluidi; la meccanica dei fluidi è il ramo della meccanica del continuo che studia le proprietà dei fluidi, cioè liquidi, vapori e gas, e anche alcune fasi di sostanze che non hanno struttura cristallina come i solidi, pseudocristallina come i liquidi e che non sono aeriformi.

Indipendentemente dal grado di complessità del sistema fluido che si vuole studiare (nel caso in esame si tratta di vapori e gas), il principio base è la conservazione di grandezze come la massa, la quantità di moto, l'energia e anche l'evoluzione nel tempo dell'elemento; ciò consente di determinare senza ambiguità il comportamento dinamico dell'intero sistema. L'unica informazione addizionale richiesta riguarda il tipo di fluido che dipende dal legame costitutivo del materiale stesso.

Di seguito si riportano tutte le formule che sono alla base di questa teoria e che saranno un punto di riferimento di quanto spiegato nei successivi capitoli.

- ✓ Conservazione massa

$$\int_V \left( \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot u \right) dV = 0$$

- ✓ Conservazione quantità di moto

$$\frac{d}{dt} \int_V (\rho \cdot u) dV = \int_V (\rho \cdot f) dV + \int_S F dS$$



- ✓ Stato di tensione di un fluido newtoniano

$$T_{ij} = (-p + \lambda \nabla \cdot u) \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

- ✓ Equazione del moto di Cauchy

$$\rho \cdot \left( f - \frac{du}{dt} \right) + \nabla \cdot T = 0$$

- ✓ Equazione di Navier-Stokes

$$\frac{\partial(p + \rho \cdot g \cdot h)}{\partial x_i} = -\rho \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \mu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

- ✓ Conservazione energia

$$\frac{dE_t}{dt} = \int_V (\rho f \cdot u) dV + \int_S (F \cdot u) dS + \int_S (q_c \cdot n) dS$$

- ✓ Equazione del bilancio termico

$$\frac{dT}{dt} - \frac{\alpha_T \cdot T}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{\phi}{c_p} + k_h \nabla^2 T$$

- ✓ Equazione di stato dell'aria umida

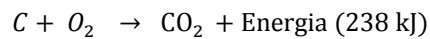
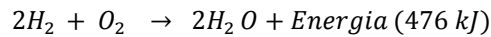
$$\rho = \frac{p}{R_d \cdot T_v}$$

- ✓ Teorema di Bernoulli

$$\frac{u^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = cost$$

## 4.2. Processo di combustione

La combustione è una reazione chimica di una sostanza combustibile con l'ossigeno accompagnata da sviluppo di calore, fiamma, gas, fumo e luce. Per spiegare chimicamente il fenomeno si fa riferimento alle due combustioni semplici, quella dell'idrogeno e del carbonio con l'ossigeno.



All'inizio nelle molecole di idrogeno ed ossigeno gli elettroni di legame sono egualmente condivisi tra gli atomi. Nel prodotto di reazione, invece, gli elettroni di legame sono di fatto completamente spostati verso l'ossigeno, più elettronegativo.

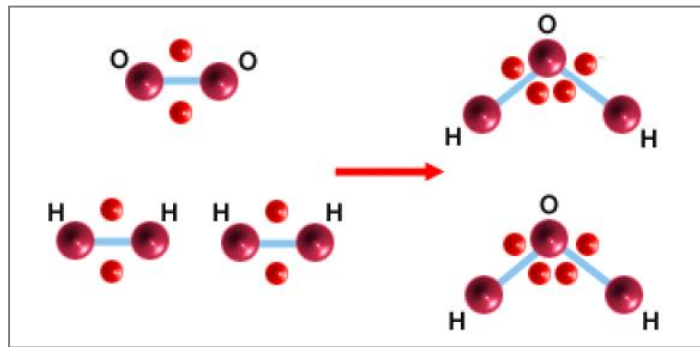


Figura 37: condivisione degli elettroni nella reazione dell'idrogeno

Analogamente, nella combustione del carbonio ogni atomo di carbonio mette in comune all'inizio i suoi elettroni di legame con gli altri atomi di carbonio. Nel prodotto di reazione con l'ossigeno, invece, gli elettroni di legame risultano tutti spostati verso l'ossigeno, più elettronegativo.

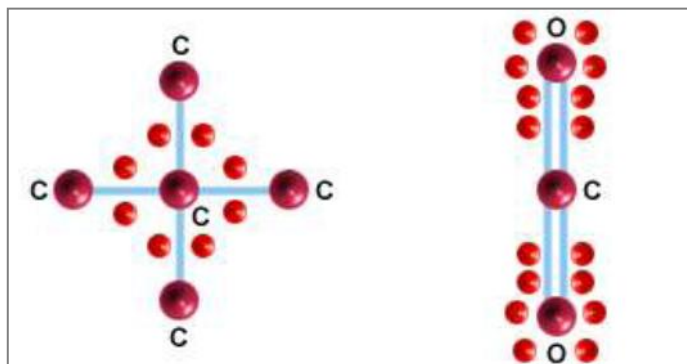


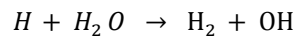
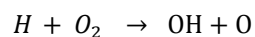
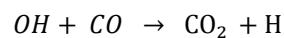
Figura 38: condivisione degli elettroni nella reazione del carbonio



Nelle reazioni di combustione i reagenti hanno quindi più energia dei prodotti di reazione e la differenza di energia tra reagenti e prodotti è pari al calore emesso. Il calore generato, a sua volta, innalza la temperatura dei partecipanti alla reazione e molto spesso la porta a valori tali per cui essi irradiano energia elettromagnetica con lunghezze d'onda comprese nel campo del visibile. Le zone di reazione ci appaiono allora luminose e si parla di fiamme.

Le sostanze combustibili più comuni sono, in larga parte, composte di idrogeno e carbonio. Nelle combustioni in aria si ha quindi formazione di acqua liquida o vaporizzata, e di anidride carbonica. Così, sul lato carburante della fiamma avvengono i processi di decomposizione termica e, a causa della mancanza di ossigeno in questa regione, avviene la formazione di carbonio e la fiamma ha il caratteristico colore giallo.

La temperatura massima viene raggiunta nella zona di reazione a contatto con l'aria, dove il consumo di ossigeno porta alla trasformazione del monossido di carbonio in carbonio. Se però l'aria non è sufficiente ad ossidare completamente il carbonio si ha presenza, più o meno forte, di ossido di carbonio, prodotto tipico delle combustioni in atmosfera povera di ossigeno.



Mescolati ai prodotti di reazione di carbonio e idrogeno si aggiungono di solito i prodotti di reazione dello zolfo presente in quasi tutti i combustibili, gas inerti come l'azoto, gas derivanti dalla decomposizione termica di eventuali sostanze organiche, ed infine incombusti e residui minerali. Tutti questi prodotti insieme vengono chiamati fumi.

Per ottenere il massimo effetto termico dalla combustione di una sostanza è necessario che essa sia completa. In caso contrario si ha che in presenza di carenza di aria si forma monossido di carbonio anziché anidride carbonica e non tutto il calore possibile viene liberato durante il processo; in presenza di eccesso di aria si sviluppa il massimo calore possibile ma si ottengono temperature inferiori in quanto il calore prodotto si distribuisce su una massa d'aria più grande.

In generale si ha:





Nella tabella a seguire viene riportata la quantità  $r_0$  in grammi di ossigeno e  $r_{aria}$  di aria necessari per la combustione completa di 1 g di alcuni combustibili.

Sostanza combustibile	$r_0 = \left[ \frac{g_{O_2}}{g_{comb}} \right]$	$r_{aria} = \left[ \frac{g_{aria}}{g_{comb}} \right]$
Acetone	2,2	9,4
Benzene	3,1	13,3
Carbone	2,7	11,6
Etanolo	2,1	9
Metano	4,0	17,2
Legno	1,3	5,7
Propano	3,6	15,6
Polietilene	3,4	14,6
Polipropilene	3,8	16,3
Acetato di cellulosa	1,33	5,7
Stirene	3,07	13,3
Formaldeide	1,07	4,59
Idrogeno	8,0	34,3
Policloruro di vinile	1,4	6,0
Polistirene	3,1	13,2
Poliuretano	1,7	7,3
Nylon	2,3	9,9
Cellulosa	1,2	5,1
Policarbonato	2,3	9,8

La combustione è quindi una reazione di ossidazione con sviluppo di calore, processo esotermico, che necessita di tre elementi per poter essere avviata, ossia:

- combustibile: materiale in grado di combinarsi chimicamente con l'ossigeno con conseguente emissione di energia termica;
- comburente: sostanza che alimenta la combustione mediante ossidazione del combustibile;

- sorgente: in grado di dare avvio al processo di combustione e permettere il raggiungimento della temperatura di ignizione del combustibile.

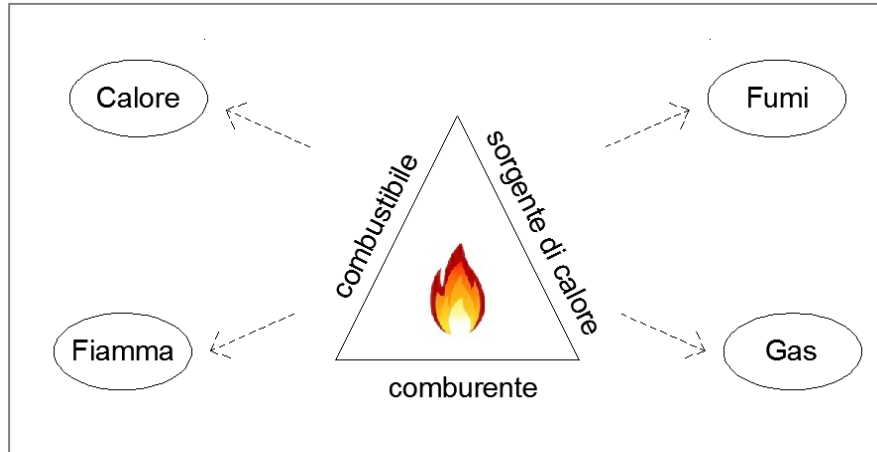


Figura 39: triangolo del fuoco e prodotti

Per quanto riguarda il comburente, data la natura degli ambienti studiati, esso sarà tendenzialmente l'ossigeno.

Il combustibile, invece, ossia la sostanza che presenta nella sua composizione molecolare elementi che hanno sviluppata tendenza a combinarsi con l'ossigeno dell'aria (carbonio, idrogeno, zolfo, ecc) saranno essenzialmente quelli solidi e, in casi più remoti, quelli liquidi.

- I combustibili liquidi subiscono inizialmente una fase di vaporizzazione, in quanto la reazione di ossidazione avviene in fase gassosa ed interessa solo gli aeriformi prodotti. Tale reazione risulta molto influenzata dalla temperatura alla quale si trova il liquido e dalla concentrazione di vapori di combustibile nell'aria. L'indice della maggiore o minore combustibilità di un liquido è fornito dalla temperatura di infiammabilità, descritta a seguire.
- La combustione dei solidi è invece preceduta da un processo che coinvolge la liquefazione e la vaporizzazione, la sublimazione e la pirolisi. Con pirolisi si intende il fenomeno per il quale una sostanza solida portata ad una determinata temperatura emette vapori infiammabili.  
Parte dell'energia rilasciata dalle fiamme sotto forma di irraggiamento termico riscalda il solido stesso favorendo ulteriore pirolisi; così il processo si autoalimenta fino all'esaurimento di tutte le sostanze volatili, per proseguire senza fiamma sotto forma di braci. Le caratteristiche principali dei combustibili



solidi sono solitamente la natura, il grado di porosità del materiale, la pezzatura<sup>5</sup> e forma, il contenuto di umidità e le condizioni di ventilazione.

In ogni caso, indipendentemente dalla tipologia di combustibile, si assume per qualsiasi fenomeno di combustione l'ipotesi che le reazioni chimiche inizino a svilupparsi solamente quando la temperatura della miscela abbia raggiunto un conveniente valore, al di sotto del quale essa si comporta come un inerte.

Si può tuttavia affermare che la velocità di propagazione è tanto maggiore quanto più la quantità di combustibile e quella di comburente risultano tra loro in un rapporto prossimo a quello detto stechiometrico, con cui effettivamente si combinano nella reazione di combustione. La velocità di reazione aumenta a causa dell'aumento della temperatura con conseguente aumento della potenza termica sviluppata che provoca un ulteriore aumento di temperatura, in un circolo virtuoso che presto interessa l'intera massa di combustibile, fino all'esaurimento della miscela formatasi.

Data però la probabilità che negli ambienti oggetto di studio il combustibile sia solido, nella tipologia di incendio che può instaurarsi, normalmente, l'ossidazione non risulta essere particolarmente rapida, perciò si avrà una normale combustione e non una deflagrazione o detonazione.

---

<sup>5</sup> con pezzatura del combustibile solido si intende il rapporto tra il volume e la superficie esterna.



### 4.3. Incendi reali

L'evoluzione di un incendio può essere riassunta schematicamente in quattro fasi principali: ignizione, crescita, flashover o incendio generalizzato e decadimento. Come specificato precedentemente, per questo tipo di ambienti non si raggiungono le condizioni tali al raggiungimento del flashover ed un conseguente incendio generalizzato; per questo motivo l'analisi non verrà approfondita per le suddette fasi ma, per completezza, vengono descritte in seguito nei loro aspetti fondamentali.

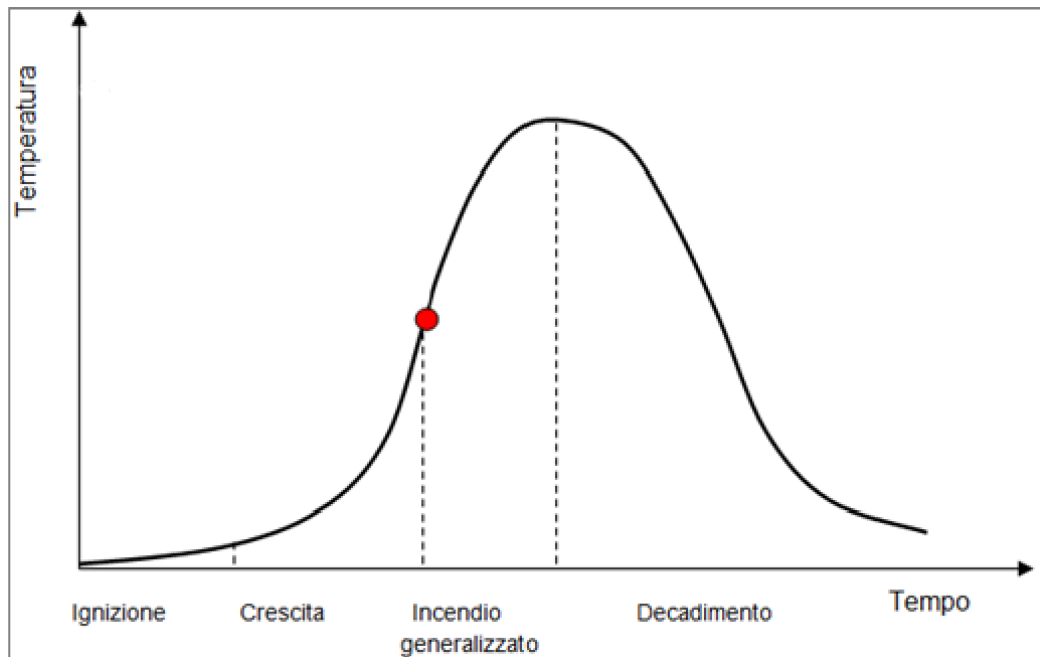


Figura 40: fasi dell'incendio

#### 4.3.1. Ignizione

Nella fase di ignizione ha inizio il processo di combustione: una sorgente termica esterna interessa per un determinato tempo il combustibile e, se rilascia un sufficiente quantitativo di energia, lo riscalda fino al valore della temperatura di ignizione, temperatura minima alla quale la miscela combustibile – comburente inizia localmente a bruciare.

L'energia posseduta dalle molecole è di tipo cinetico, cioè legata al loro moto e quindi alla temperatura. L'energia di attivazione è l'energia minima necessaria ad un sistema per innescare una reazione chimica. Perché una reazione avvenga è necessaria la collisione di due o più molecole opportunamente orientate e dotate di un minimo livello

di energia tale da permettere la collisione malgrado le forze elettriche repulsive generate dalle loro nubi di elettroni esterne. Tale livello minimo di energia costituisce la barriera di potenziale. Se l'energia disponibile è sufficiente, le forze repulsive vengono vinte e le molecole coinvolte vengono a trovarsi ad una distanza tale da poter riorganizzare i legami tra gli atomi che le compongono e dare vita a nuovi composti, prodotti della reazione.

L'energia di attivazione consente alle molecole dei reagenti che collidono di formare il cosiddetto complesso attivato o stato di transizione, la cui esistenza è estremamente breve. Una volta formato lo stato di transizione avviene la rottura dei legami iniziali e la formazione di nuovi che danno origine ai prodotti della reazione.

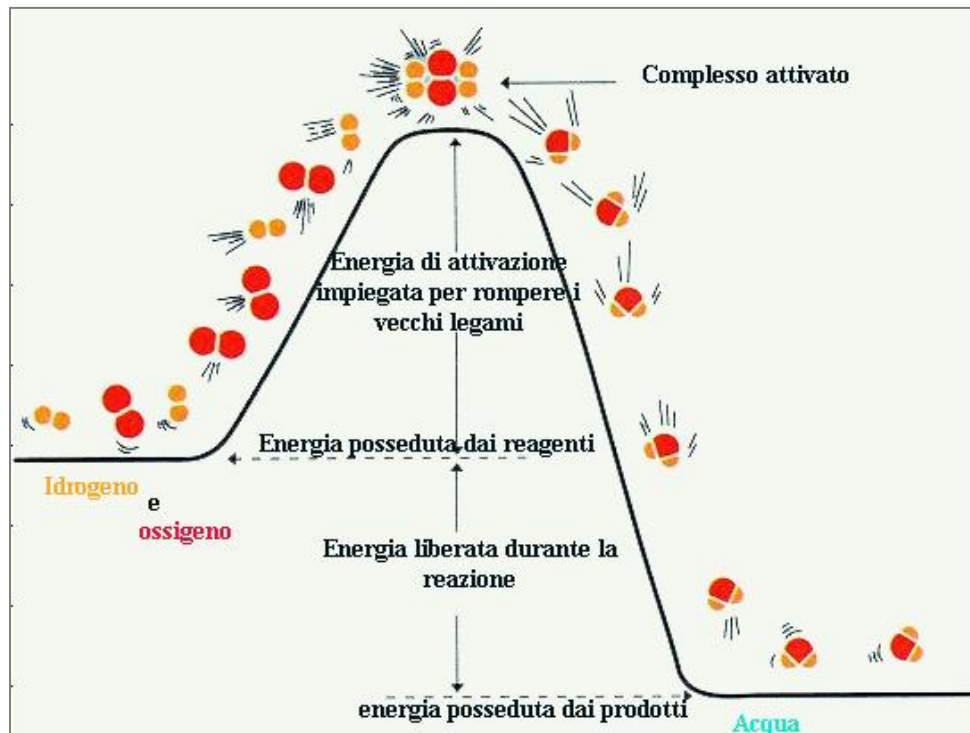


Figura 41: teoria cinetica di reazione

Sotto una certa temperatura, detta appunto temperatura di accensione o temperatura di ignizione, le collisioni molecolari, abbastanza veloci da superare la barriera di attivazione, sono poco probabili e la combustione procede perciò in forma lenta o latente. Sopra la temperatura di accensione, invece, un gran numero di collisioni danno luogo a complessi attivati e perciò la loro concentrazione cresce e la combustione diventa più rapida.

Più alta è la temperatura, più veloci si muovono in media, cioè in senso statistico, le molecole, e quindi più probabile è che sullo slancio superino la barriera. A bassa

temperatura perciò le molecole, in genere, si urtano senza reagire, mentre, ad alta temperatura, reagiscono tra di loro in quanto l'energia d'urto è superiore all'energia di attivazione.

La temperatura è quindi il parametro che più influenza la velocità di reazione. La velocità di reazione dipende anche dalla concentrazione, cioè dal numero per unità di volume, dei complessi attivati che si formano e questa concentrazione, a sua volta, dipende dalla temperatura.

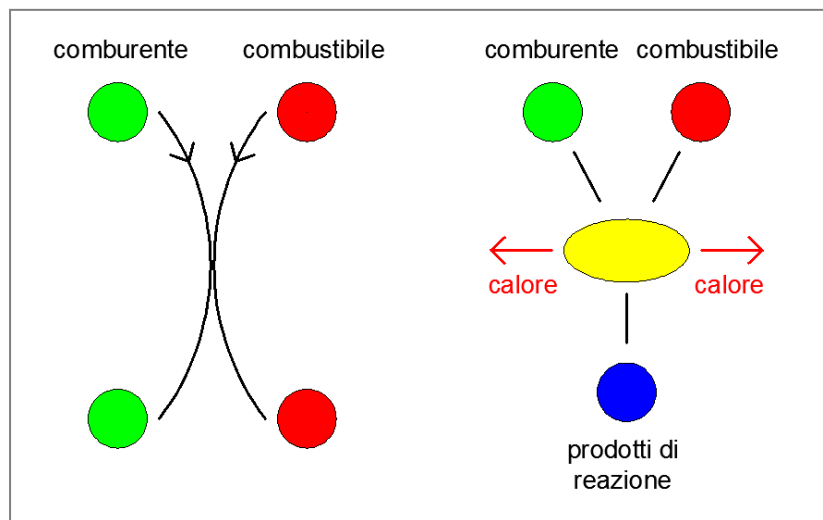


Figura 42: differenza tra reazioni a bassa e alta temperatura

Bisogna a questo punto distinguere la trattazione chimica in base al tipo di combustibile, liquido e solido, anche se è importante sottolineare che nelle tipologie di ambienti analizzate la probabilità che esso sia solido è sicuramente maggiore rispetto a quello liquido.

## Liquidi

Per valutare la pericolosità di un liquido devono essere conosciute le sue proprietà chimico-fisiche ed in particolare, per determinare la sua infiammabilità, è necessario approfondire i seguenti parametri.

- 1) Intervallo di infiammabilità: l'intervallo definisce i limiti inferiore e superiore individuando il campo d'infiammabilità all'intero del quale si ha, in caso d'innesco, l'accensione e la propagazione della fiamma nella miscela.



Se la concentrazione della miscela, espressa in %, si trova sotto il limite inferiore di infiammabilità, anche in presenza di innesco non si avrà accensione in quanto non supportata dalla presenza limitata di solvente per carenza di combustibile;

Se, invece, la concentrazione della miscela, espressa in %, si trova oltre il limite superiore di infiammabilità non si verificherà l'accensione in presenza di innesco per eccesso di combustibile.

I limiti sono reperibili in letteratura e nella tabella sono riportati quelli di alcune sostanze più comuni:

Sostanza	Campo di infiammabilità (% di volume)	
	Limite inferiore	Limite superiore
Acetone	2,5	13
Ammoniaca	15	18
Benzina	1	6,5
Gasolio	0,6	6,5
Idrogeno	4	75,6
Metano	5	15

Le caratteristiche di infiammabilità dei solventi sono influenzate da una serie di parametri come:

- la natura del comburente;
- la temperatura di esercizio: un aumento di tale temperatura allarga considerevolmente l'intervallo di infiammabilità ed in particolare si abbassa il limite inferiore, mentre quello superiore si innalza;
- la pressione: pressioni più elevate tendono ad allargare l'intervallo di infiammabilità mentre pressioni più basse diminuiscono la pericolosità del solvente. Non sempre però è facile prevedere il comportamento di un solvente in funzione della variazione della pressione, in quanto questa ne cambia le caratteristiche chimico fisiche;
- la presenza di eventuali inerti: la loro partecipazione può cambiare le caratteristiche di infiammabilità di una sostanza, in particolare ne abbassa il limite superiore e lascia invariato quello inferiore.



Si può presentare anche la situazione in cui il limite superiore ed inferiore coincidono e perciò l'infiammabilità si ha solo per quelle concentrazioni fissate dai punti di coincidenza dei due limiti stessi.

- 2) Temperatura di infiammabilità (flash point): la temperatura più bassa alla quale il vapore sviluppato dal liquido forma con l'aria una miscela che si infiamma sotto l'azione di un innesco.

In sostanza il punto di infiammabilità è la temperatura alla quale la tensione di vapore del solvente risulta uguale al limite inferiore di infiammabilità in aria.

Sostanze	Temperatura di infiammabilità (°C)
Acetone	-18
Benzina	-20
Gasolio	65
Alcol etilico	13
Alcol metilico	11
Toluolo	4
Olio lubrificante	149

Valori bassi della temperatura di infiammabilità indicano una maggiore pericolosità del combustibile:

- temperature inferiori ai 20°C indicano sostanze esplosive;
- temperature tra 21°C e 65°C indicano sostanze che esplodono solo se riscaldate;
- temperature superiori ai 65°C indicano i normali combustibili (gasolio, olio combustibile e lubrificanti).

- 3) Temperatura di autoaccensione: la temperatura più bassa alla quale una miscela combustibile/comburente in presenza d'aria inizia a bruciare spontaneamente in modo continuo senza ulteriore apporto di calore o di energia dall'esterno.

I dati sperimentali delle temperature di autoaccensione dipendono da alcuni fattori chimico-fisici riferiti al solvente. Infatti, il volume del recipiente, la pressione, i catalizzatori e lo stato fisico del combustibile (nebbie, vapore) possono fare variare la temperatura di autoaccensione di uno stesso solvente.

Sostanze	Temperatura di autoaccensione (°C)
Acetone	540
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Alcol metilico	455
Metano	537

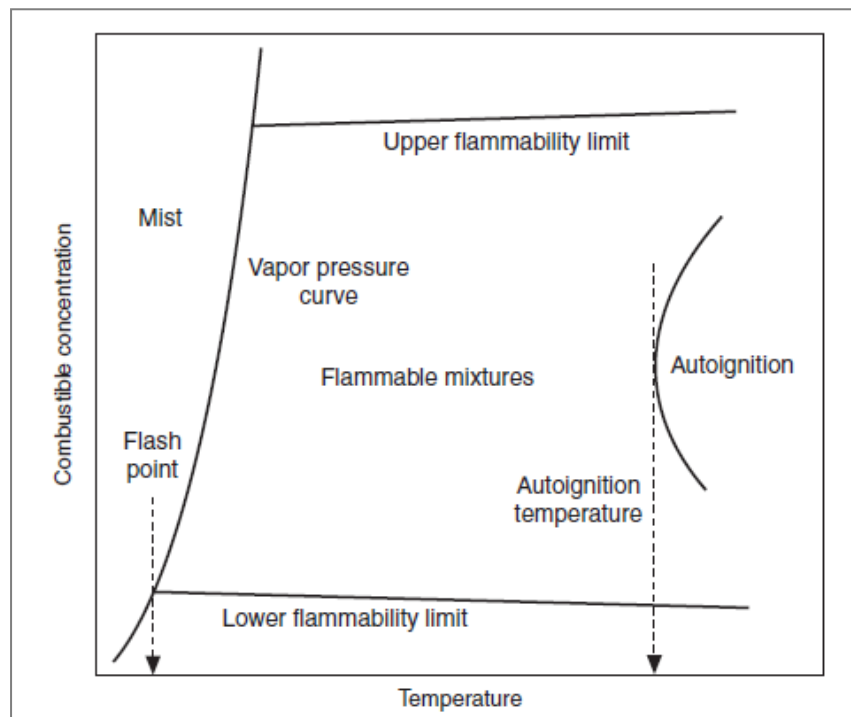


Figura 43: effetti della temperatura e della concentrazione sul limite di infiammabilità



## Solidi

Quando invece una sostanza solida viene sufficientemente riscaldata tende parzialmente a vaporizzare liberando vapori combustibili, denominati prodotti di pirolisi, che reagiscono con l'ossigeno generando calore e producendo nella maggior parte dei casi una fiamma che a sua volta alimenta ancora la combustione e la loro ulteriore formazione. Inoltre la quantità di energia termica necessaria al raggiungimento della temperatura di ignizione per questi tipi di materiali è fortemente influenzata dalla sua pezzatura, cioè dal rapporto tra volume e superficie esterna del combustibile, in quanto a piccoli valori di pezzatura sono associate basse quantità di energia termica in grado di produrre l'innesco del combustibile; anche l'umidità contenuta nel combustibile rallenta l'ignizione, poiché l'energia termica rilasciata dalla sorgente esterna dovrà, prima di innalzare la temperatura, provocare l'evaporazione dell'acqua in esso contenuta.

Sostanze	Temperatura di autoaccensione (°C)
Carta	230
Legno	220-250
Gomma sintetica	300

Non appena una zona della superficie del combustibile raggiunge la temperatura di ignizione e la combustione si avvia, affinché essa possa procedere, è necessario che la fiamma generatasi sia in grado di autosostenersi. Questo è possibile se è presente una sorgente di calore esterna che può innescare prodotti di pirolisi, oppure se la fiamma è in grado di trasmettere alla superficie immediatamente adiacente del combustibile un valore di energia termica sufficiente a produrre un'adeguata quantità di vapori.

La resistenza offerta da un materiale combustibile, sottoposto all'azione di un flusso termico radiante, a creare prodotti di pirolisi e ad iniziare a bruciare, nonché a propagare la combustione, viene individuata con il parametro TRP di risposta termica. Con questo parametro si valuta il tempo di ignizione  $t_{ig}$  dopo il quale il materiale raggiunge la suddetta temperatura.

$$TRP = (T_{ig} - T_s) \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p \cdot \lambda} \quad [kW \cdot s^{0.5}/m^2]$$

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{TRP^2}{(q - q_c)^2} \quad [s]$$





dove i fattori  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $T_{ig}$ ,  $T_s$ ,  $q$ ,  $q_c$ , sono rispettivamente la densità, il calore specifico, la conduttività termica, la temperatura di ignizione, la temperatura iniziale del combustibile, il flusso termico e il flusso termico critico.

E' importante sottolineare come questa fase sia molto lenta e vi sia inoltre la possibilità di invertire con successo un principio di incendio poiché le temperature risultano alquanto ridotte.

#### 4.3.2. Crescita

Dopo l'ignizione, nei primi istanti della fase successiva di crescita, l'incendio cresce in funzione del combustibile e risulta essere del tutto indipendente dalle caratteristiche di ventilazione del locale; la temperatura è ancora relativamente bassa per effetto della diluizione dell'aria presente che è ancora fredda ma si raggiungono localmente, in prossimità della zona che brucia, valori di temperatura elevati. E' importante sottolineare questa situazione (che è quella caratteristica per questi ambienti) in quanto non si raggiunge mai il flashover.

Per studiare questa fase si fa riferimento al fenomeno di propagazione della fiamma da un materiale all'altro; infatti se l'oggetto che brucia è isolato da altro materiale la combustione non si propaga e l'incendio si arresta per esaurimento del combustibile; invece se a contattato, oppure molto vicino, allora esso si sviluppa. Innanzitutto si fa riferimento per semplicità a una fiamma piatta e si analizza il fenomeno attraverso le equazione di continuità per uno sviluppo laminare.

Per questo motivo vi è :

- ✓ conservazione di massa

$$\rho \cdot v \cdot A = \rho_0 \cdot v_0 \cdot A_0 = M$$

in cui  $\rho$  è la densità,  $v$  è la velocità del gas,  $A$  è la sezione trasversale dello sviluppo e  $M$  è la massa che brucia per unità di volume;

- ✓ conservazione di energia

$$\frac{d(k \cdot \frac{dT}{dz})}{dz} + Q \cdot R - \frac{d(c_p \cdot T \cdot \rho \cdot v)}{dz} = 0$$

in cui  $k$  è la conduttività termica della miscela,  $c_p$  è la capacità termica,  $T$  è la temperatura alla distanza  $z$ ,  $Q$  è il calore di reazione e  $R$  è la parte reagente;



- ✓ conservazione della specie atomica, cioè per una data sostanza chimica ci deve essere un equilibrio tra il suo tasso di produzione (o rimozione) in un dato elemento della fiamma e il suo trasporto per diffusione e convezione,

$$R_i + \frac{d(D_i \cdot \frac{dn_i}{dz})}{dz} - \frac{d(n_i \cdot v)}{dz} = 0$$

in cui  $D_i$  è il coefficiente di diffusione e  $n_i$  è la concentrazione.

In linea di principio le prime due equazioni possono essere risolte grazie la velocità di combustione, la composizione e i profili di temperatura attraverso la fiamma, ma questo è possibile dopo un'analisi dettagliata del meccanismo di reazione. Ciò evidenzia come lo studio della fase di crescita di un incendio sia strettamente collegato ai processi chimici che avvengono in una fiamma piatta.

#### 4.3.3. Flashover e incendio generalizzato

Successivamente la temperatura aumenta rapidamente, così come il calore sviluppato, per effetto della maggiore quantità di materiale combustibile coinvolto e per l'aumento della velocità di combustione. In questa fase la velocità di rilascio del calore è maggiore rispetto a quella di dispersione per irraggiamento, conduzione e convezione verso l'esterno. Ne consegue che la temperatura nell'ambiente aumenterà tanto più rapidamente quanto maggiore è la differenza fra il calore sviluppato e quello disperso.

Secondo la norma ISO 13387-2 ("Fire safety engineering – Part 2: Design fire scenarios and design fires") il flashover viene definito come una fase di transizione in corrispondenza della quale la temperatura di gas caldi a soffitto raggiunge il valore di 600 °C e il flusso termico a pavimento è pari a 20 kW / m<sup>2</sup>. Nel momento in cui tutti i materiali partecipano alla combustione e la temperatura raggiunge valori elevati, circa 1000°C e si ha il flashover<sup>6</sup> con conseguente fase di incendio generalizzato.

La fase d'incendio completamente sviluppato è quella in cui è massima la potenza termica dell'incendio; il combustibile subisce la pirolisi, in modo che venga bruciato con l'ossigeno disponibile in ambiente.

---

<sup>6</sup> Il flashover viene generalmente definito come la transizione dalla fase di crescita dell'incendio ad un incendio completamente sviluppato, in cui tutti i materiali combustibili sono coinvolti nell'incendio.



#### 4.3.4. Decadimento

Infine, con la fase di estinzione e raffreddamento, l'incendio si siede per esaurimento del combustibile o soffocamento con il successivo raffreddamento della zona interessata dall'incendio. La velocità di combustione diminuisce essendo il combustibile privato delle sue parti volatili. La fase di decadimento può ritenersi praticamente conclusa quando la temperatura media nell'ambiente è diminuita a valori inferiori a 200 °C in quanto in tale situazione possono ragionevolmente escludersi improvvisi re inneschi dei materiali.

#### 4.4. Rilascio termico

La caratteristica essenziale per descrivere l'entità di un incendio è la curva di rilascio termico, nota come RHR<sup>7</sup> (Rate of Heat Release), che indica l'energia termica rilasciata da un incendio per unità di tempo.

Come descritto precedentemente, quando una sostanza solida viene sufficientemente riscaldata tende a vaporizzare parzialmente liberando vapori combustibili detti prodotti di pirolisi. Questi, reagendo con l'ossigeno, generano calore e producono una fiamma che a sua volta alimenta ancora la combustione e, pertanto, la loro ulteriore formazione. Questo fenomeno è di particolare importanza poiché la presenza di fiamma provoca un aumento repentino della quantità di prodotti della combustione che vengono rilasciati in ambiente e, di conseguenza, può compromettere la sicurezza degli utenti.

In generale la velocità di combustione  $m_s$  per unità di superficie  $A$  coinvolta nell'incendio, se accompagnato dalla presenza di fiamma, può essere così descritto:

$$m_s = \frac{q_f + q_r - q_{rf}}{L_v} \left[ \frac{kg}{m^2s} \right]$$

dove:

- $q_f, q_r$ : flusso termico convettivo e radiante [kW/m<sup>2</sup>];
- $q_{rf}$ : flusso termico disperso per irraggiamento [kW/m<sup>2</sup>];
- $L_v$ : quantità di energia termica necessaria per produrre la pirolisi di 1kg di combustibile [kJ/kg].

I valori dei flussi termici sono influenzati dalla tipologia di combustibile e dalla concentrazione di ossigeno presente nell'ambiente e, a seguito di indagini sperimentali

---

<sup>7</sup> viene indicato con RHR (Rate of Heat Release) oppure, a livello internazionale, con HRR (*Heat Release Rate*). Viene indicato anche con Q, sia in letteratura che nel programma di modellazione B-RISK.



sono stati valutati i valori massimi di  $m_s$  per alcuni combustibili, nelle migliori condizioni ambientali possibili, che consentono di definire il rischio incendio in determinate condizioni.

Vengono riportati nel seguito i valori associati a materiali che possono essere più facilmente presenti negli ambienti oggetto di studio come il legno o le materie plastiche.

Sostanza combustibile	$m_s = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \right]$
Schiuma di poliuretano	0,021 - 0,027
Polipropilene granulare	0,026
Carta corrugata	0,014
Legno	0,011

In generale si può assumere che la potenza rilasciata sia per 2/3 convettiva<sup>8</sup> e un 1/3 irraggiamento. La temperatura massima e la portata di fumo e dei gas nocivi che si liberano durante la combustione sono due grandezze importanti per valutare il rischio incendio presente negli ambienti e il loro valore dipende dalla potenza termica che indica la rapidità con la quale tale energia termica viene rilasciata. Il valore della potenza termica varia nel tempo durante l'evoluzione dell'incendio e il suo valore viene calcolato come segue:

$$RHR(t) = m_c(t) \cdot H \quad [kW]$$

con  $H$  che indica il potere calorifico del combustibile in [kJ/kg] e la velocità di combustione espressa in [kg/s].

Il valore di potenza termica totale massima rilasciata risulta essere, invece:

$$RHR = m_s \cdot A \cdot H \quad [kW]$$

Per avere un ordine di grandezza è noto che la combustione di un'uguale superficie  $A$  di 1 m<sup>2</sup> di legno e di polistirene rilascia in ambiente una potenza termica totale di circa 193 kW nel primo caso e di 1480 kW nel secondo<sup>9</sup>. In ogni caso, il modo più preciso per calcolare l'RHR è quello di eseguire prove sperimentali, ma tale procedura non è

<sup>8</sup> nella specifico si applica, come consigliato dalla BS7974, un coefficiente da 0,4 a 0,9 al valore totale di RHR in funzione del combustibile.

<sup>9</sup> valori calcolati assumendo un potere calorifico del legno pari a 17500 kJ/kg e del polistirene di 40000 kJ/kg.

sempre applicabile se non nel caso di oggetti aventi dimensioni limitata. Per questo motivo vi sono programmi di calcolo in grado di valutare questo parametro immettendo le caratteristiche del combustibile e dell'ambiente.

Si riportano a seguire alcuni esempi di curve RHR ottenute sperimentalmente:

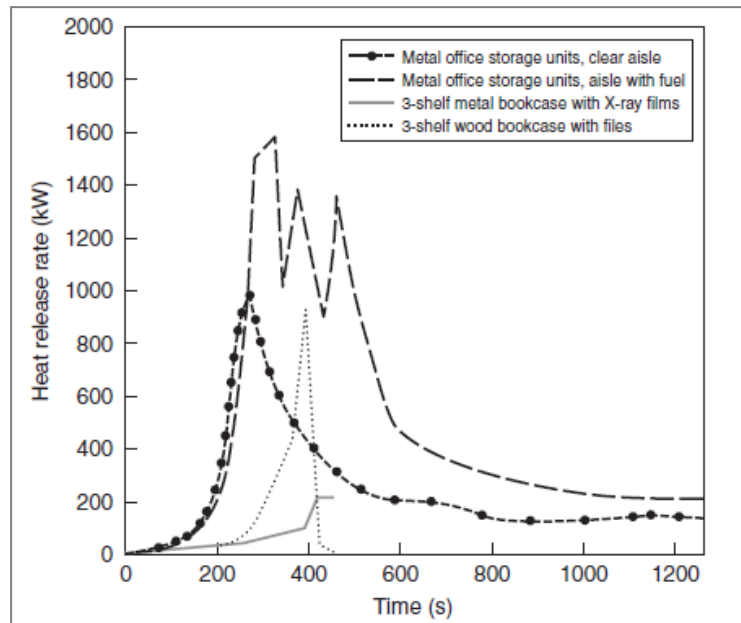


Figura 44: curve di rilascio termico di differenti scaffali a confronto

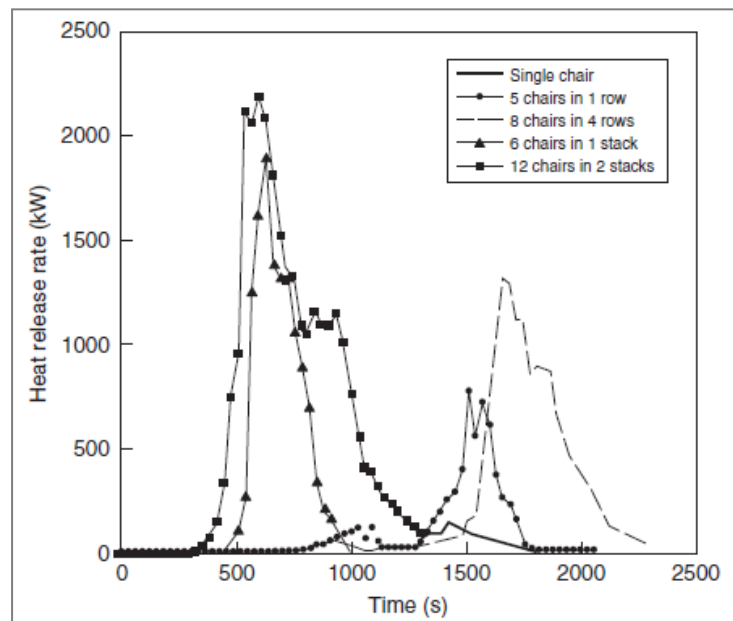


Figura 45: curve di rilascio termico di differenti sedie a confronto

Dato che nella trattazione uno degli obiettivi fondamentali è la sicurezza degli occupanti durante l'esodo, è necessario concentrare la propria attenzione sulla fase pre-flashover, ossia la fase di crescita dell'incendio e la conseguente diffusione dei prodotti della combustione in ambiente. Inoltre, in ambienti con un volume d'aria così rilevante e in cui sono necessariamente presenti superfici di ventilazione per garantire i requisiti essenziali di comfort termo-igrometrico è importante specificare che il regime di combustione dipende in minima parte dalla quantità di aria affluita nell'ambiente dalle aperture poiché in esso vi è già una quantità di ossigeno sufficiente per sostenere efficacemente la combustione.

La fase di crescita dell'incendio può essere descritta da un incremento della potenza termica proporzionale ad un intervallo di tempo:

$$RHR = \alpha \cdot (t - t_0)^2 \quad [kW]$$

in cui  $\alpha$  è una costante di crescita in  $[kJ/s^3]$ , tanto maggiore quanto più facilmente un materiale si lascia coinvolgere nell'incendio e contribuisce ad aumentare la velocità di combustione; mentre  $t$  indica il tempo in secondi dall'ignizione e  $t_0$  quello dell'ignizione.

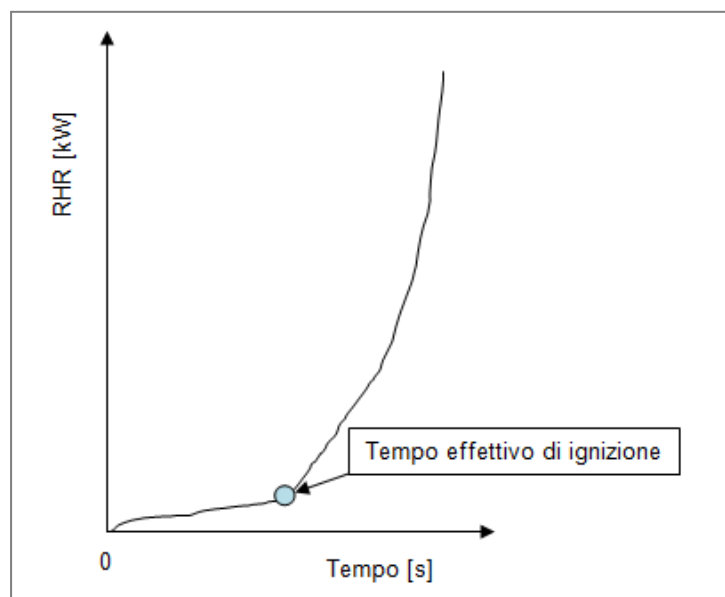


Figura 46: grafico RHR della fase di crescita

Negli ambienti in cui è presente un grande quantitativo di aria, la velocità di combustione e quindi il valore di RHR aumentano nel tempo fino a raggiungere il flashover dopo il quale l'incendio è pienamente sviluppato e la potenza assume valore massimo. In contrapposizione, però, la velocità con cui viene raggiunto il flashover diminuisce all'aumentare delle dimensioni del locale.

Risulta necessario sottolineare come negli ambienti in oggetto è molto difficile arrivare al flashover e alla fase successiva di sviluppo di incendio generalizzato; per questo si pone maggiore importanza alla fase appena analizzata. Infatti le probabilità di raggiungere il flashover sono inversamente proporzionali alle dimensioni in pianta del locale e minime se l'incendio è localizzato.

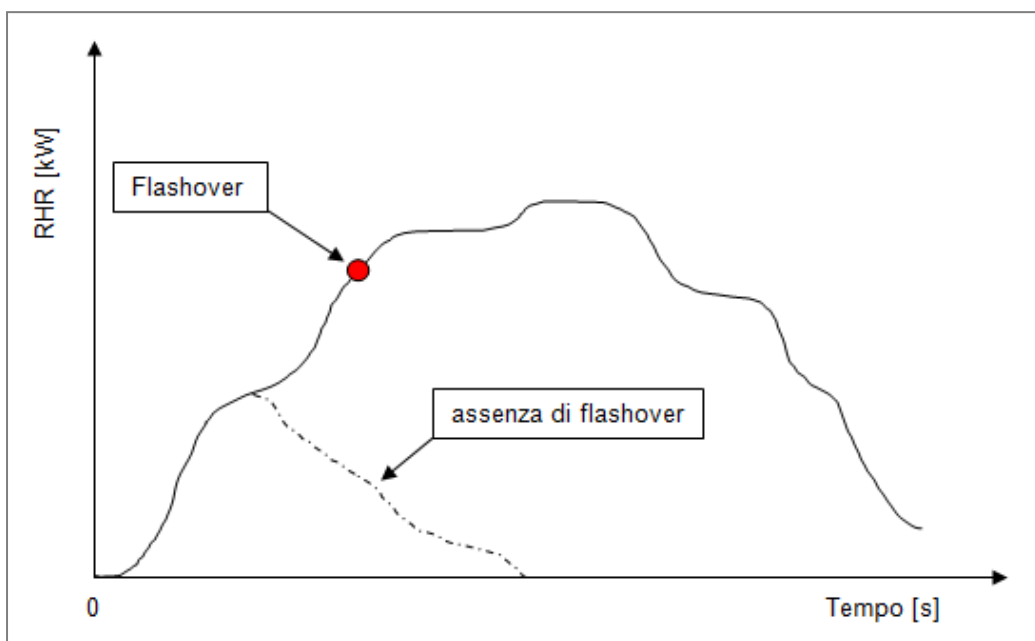


Figura 47: grafici di incendi in assenza e presenza di flashover

Durante le indagini sperimentali è stato verificato che nelle fasi di crescita il valore di RHR aumenta nel tempo in modo pressoché quadratico; per questo motivo all'interno della normativa italiana, per consentire delle valutazioni quantitative, sono state introdotte delle curve predefinite, definite in base ad un tempo caratteristico  $t_g$  e quindi ad una velocità di propagazione. Ad esse viene associato un coefficiente di crescita  $\alpha$ .

Classificazione	$t_g$ [s]	$\alpha$
Lento	600	0,00277
Medio	300	0,01111
Veloce	150	0,04444
Ultraveloce	75	0,1777





La normativa anglosassone, BS7974, in modo simile, in funzione della destinazione d'uso e basandosi su dati sperimentali, fornisce i valori del coefficiente di crescita e associa ad ogni destinazione un tasso di crescita.

Classificazione	$\alpha$	Destinazione d'uso
Slow	0,0029	gallerie d'arte
Medium	0,012	abitazioni, uffici, alberghi
Fast	0,047	attività commerciali
Ultra-fast	0,188	stabilimenti e depositi industriali

Entrambe le normative, inoltre, associano ad ogni destinazione d'uso un valore di potenza termica massima rilasciata per unità di superficie del pavimento interessata dall'incendio,  $RHR_s$  in  $[kW/m^2]$  e che si ipotizza rimanga costante durante la combustione:

$$RHR = RHR_s \cdot A_{inc} [kW]$$

I valori di  $RHR_s$  riportati nella tabella che segue sono quelli raggiunti nella fase di incendio pienamente sviluppato durante prove sperimentali in aria libera.

Destinazione d'uso	$RHR_s$ $[kW/m^2]$
uffici	200
ospedali, alberghi, scuole e appartamenti	250
attività commerciali, biblioteche, cinema e teatri	500

Destinazione d'uso	$RHR_s$ $[kW/m^2]$
uffici	290
alberghi	250
attività commerciali	550
stabilimenti industriali	90-620



La crescita nel tempo di quest'ultima potenza sarà limitata, come già descritto precedentemente, da un valore di  $RHR_{max}$ :

$$RHR_{max} = RHR_s \cdot A [kW]$$

dove  $A$  rappresenta l'intera area del pavimento del locale nel caso che il materiale combustibile sia in esso uniformemente distribuito.

#### 4.5. Produzione fumi

L'emissione di fumo rappresenta un equilibrio tra il processo di crescita nella porzione di fiamma ricca di combustibile e il processo di esaurimento dell'ossigeno.

I fumi sono formati da piccolissime particelle solide (aerosol), liquide (nebbie o vapori condensati) disperse nei gas prodotti durante la combustione. Gli aerosol del fumo variano ampiamente in aspetto e come struttura, dal colore chiaro quando la combustione avviene senza fiamma e senza pirolisi del combustibile, al nero della fuliggine e del composto carbonioso quando la combustione è completa. In particolare le particelle solide dei fumi sono costituite da sostanze incombuste ossia carbonio, catrami e ceneri. Queste, trascinate dai gas prodotti dalla combustione, formano il fumo di colore scuro. Le particelle liquide, invece, sono costituite essenzialmente da vapor d'acqua proveniente dall'umidità dei combustibili, ma soprattutto dalla combustione dell'idrogeno. Al di sotto dei  $100^{\circ}C$ , quando i fumi si raffreddano, il vapor d'acqua condensa dando luogo a fumo di colore bianco.



Figura 48: fumo bianco (combustione di sterpaglia) e fumo nero (combustione di petrolio)



Le principali proprietà che caratterizzano i fumi sono: il coefficiente di estinzione, la densità ottica, la visibilità e la sensibilità di rilevazione.

### **Coefficiente di estinzione della luce K**

Il principio fisico a cui si fa riferimento è la legge di Bouger che lega l'intensità della luce monocromatica incidente di lunghezza d'onda  $\lambda$  con l'intensità della luce trasmessa attraverso il percorso ottico del fumo:

$$\frac{I_\lambda}{I_0^\lambda} = e^{-KL}$$

Il coefficiente di estinzione K può essere espresso come il prodotto di un coefficiente di estinzione per unità di massa  $K_m$ , che a sua volta dipende dalla distribuzione dimensionale e dalle proprietà ottiche del fumo, e la concentrazione di massa del fumo  $m$ .

$$K = K_m \cdot m$$

$$K_m = \frac{3}{2\rho m} \int_{d_{min}}^{d_{max}} \frac{1}{d} \frac{\Delta m}{\Delta d} Q_{ext} \partial d$$

### **Densità ottica**

La densità ottica misura la quantità di fumo visibile prodotto durante un incendio e dimensionalmente viene descritta con la seguente espressione:

$$D_s = \frac{D \cdot V_C}{A}$$

dove  $V_C$  è il volume della stanza e  $A$  è l'area del campione.

Se invece si misura la perdita di massa del campione, allora ci si riferisce alla densità ottica di massa  $D_M$  pari a:

$$D_M = \frac{D \cdot V_C}{\Delta M}$$



Questa tecnica richiede un'accurata valutazione della perdita di massa  $\Delta M$  e misurazioni delle perdite di luce.

### Visibilità S

La visibilità dei segnali, delle porte e delle finestre può essere di grande importanza per un individuo che tenta di sopravvivere al fuoco. Per vedere un oggetto si richiede un certo livello di contrasto con lo sfondo. Per un oggetto isolato, inserito in sfondo esteso, il contrasto C può essere definito come:

$$C = \frac{B}{B_0} - 1$$

dove B è la luminanza dell'oggetto e  $B_0$  quella dello sfondo.

La visibilità dell'oggetto S è la distanza in cui il fattore di contrasto è ridotto ad un valore di 0,02; nella maggior parte delle misurazioni si è fatto affidamento ai soggetti stessi per determinare la distanza alla quale l'oggetto non era più visibile piuttosto che gli effettivi valori del fattore di contrasto. Infatti la visibilità dipende da molti fattori, tra cui la dispersione, il coefficiente di assorbimento del fumo, l'illuminazione della stanza, il tipo di segnale (di emissione o di riflessione) e la lunghezza d'onda della luce stessa. Inoltre essa dipende anche dall'acuità visiva dell'individuo e se i suoi occhi sono abituati al buio. Tuttavia vi è una relativa correlazione tra la visibilità e il coefficiente di estinzione: la visibilità dei segnali di luce emessa è da due a quattro volte maggiore rispetto a quelli di luce riflessa.

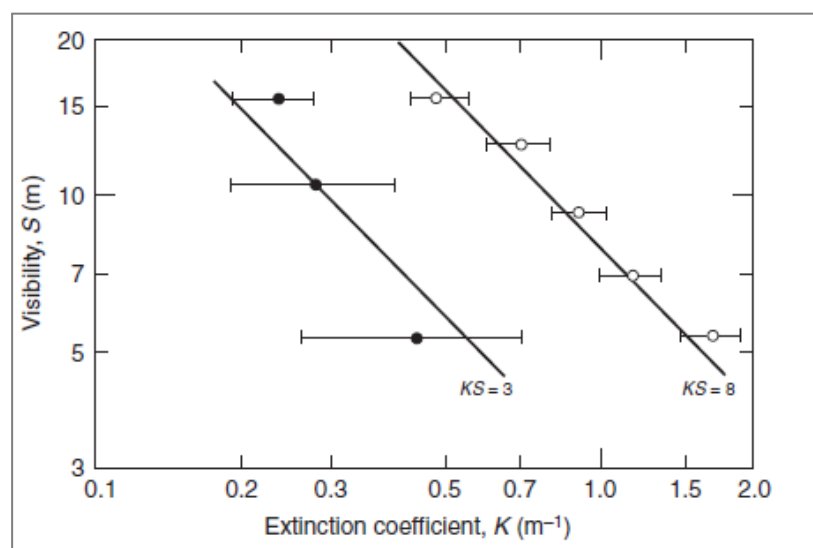


Figura 49: relazione visibilità e coefficiente di estinzione per segnali di luce emessi e riflessi

### Sensibilità di rilevazione

Oltre alla loro utilità per la stima della visibilità, le misurazioni del coefficiente di estinzione della luce vengono utilizzate per la caratterizzazione delle prestazioni dei rilevatori di fumo. Infatti la potenza elettrica  $P$  di un rilevatore, di tipo foto-disperdente o a ionizzazione, può essere rappresentata come prodotto tra la distribuzione dimensionale e la risposta del rilevatore  $R(d)$ .

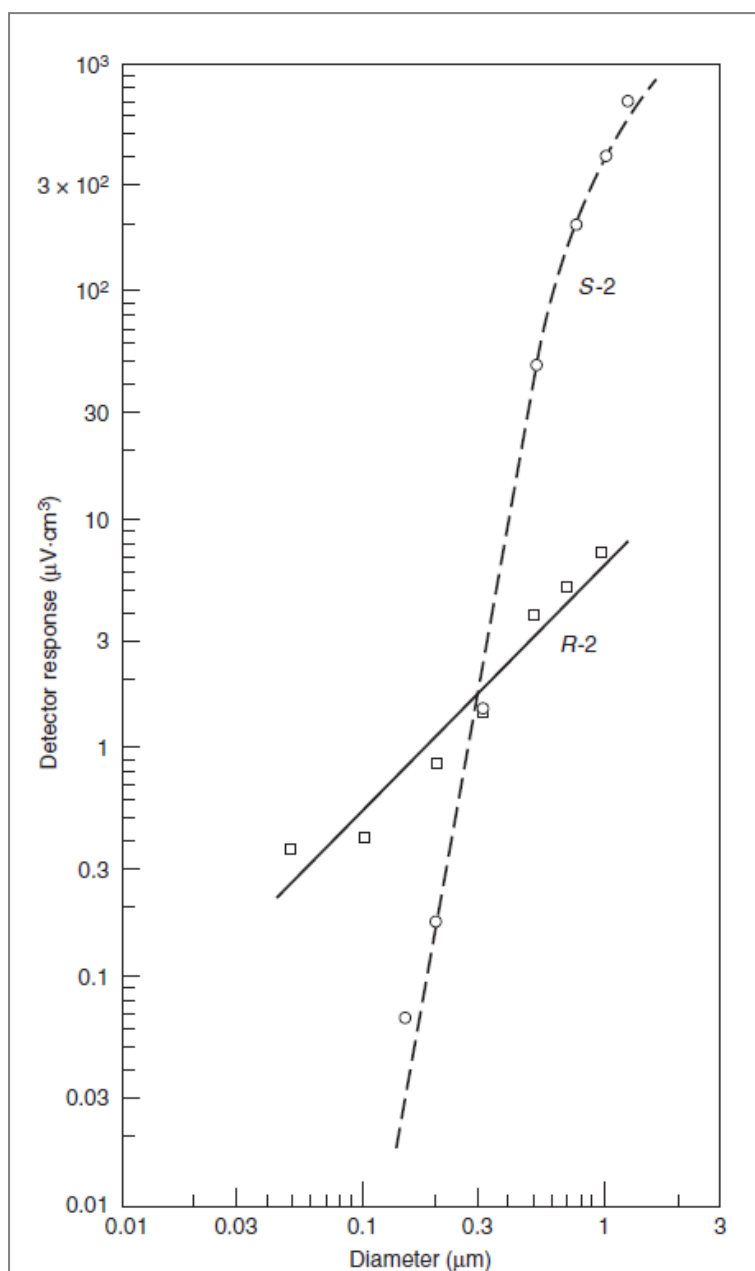


Figura 50: relazione tra risposta del rilevatore di fumo e il diametro delle particelle



Dal grafico è possibile osservare come la ionizzazione è più sensibile per le particelle di fumo con diametri maggiori di  $0,3 \mu\text{m}$  mentre il tipo a diffusione di luce utilizzano particelle di diametro maggiore. Il principio di quelli ad ionizzazione è l'intercettazione di ioni gassosi nelle particelle di fumo riducendo la corrente degli ioni stessi finché si raggiunge un punto di allarme reimpostato; per questo motivo essi tendono ad essere più sensibili alle alte concentrazioni di piccole particelle, come i fumi prodotti dall'incendio di carta o legno, e meno sensibili alle basse concentrazioni. I rilevatori foto-sensibili completano il range di sensibilità non rilevate da quelli appena descritti.





## Capitolo 5

# Propagazione dei prodotti della combustione

### 5.1. Studi ed esperienze

Nell'ambito dello studio della propagazione dei prodotti della combustione vi è una consistente serie di studi ed esperimenti compiuti da diversi ricercatori ed esperti sulla base della dinamica dei fluidi che hanno portato alla definizione completa del fenomeno. Viene riportata in seguito una rassegna delle teorie e studi più significativi che meglio descrivono il comportamento dell'incendio e dei prodotti della combustione in questi ambienti, sulla base delle quali verrà descritta la dinamica degli incendi nel corso del capitolo.

Come già specificato nel paragrafo 3.2., la propagazione dei fumi negli ambienti studiati può avvenire in due modi differenti a seconda della posizione del focolare. Nel caso in cui esso sia posizionato nell'ambiente centrale si verifica il fenomeno dell' *axisymmetric plume* mentre se il focolare si propaga da un ambiente confinato verso quello centrale, di maggiore altezza, si ha lo *spill plume*.

Lo studio di questo fenomeno è di recente interesse ed i primi studi relativi alla dinamica del plume generato da una sorgente puntiforme risalgono al 1956 con la teoria di Morton B R, Taylor G I e Turner J S. "*Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources*".

Successivamente il metodo di calcolo è stato applicato agli ambienti chiusi introducendo il concetto di *axisymmetric plume*, per esempio da McCaffrey B J "*Momentum Implication for Buoyant Diffusion Flames, Combustion and Flame*", 1983; Zukoski 1982; Heskestad 1984. In particolar modo il lavoro di Heskestad è alla base dell'NFPA 92B<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> National Fire Protection Association publication No.92B, aggiornata successivamente nel 2000 e nel 2009.





Un altro dei primi studio sul comportamento del plume generato dalla combustione, fu teorizzato e condotto da Shao-Lin Lee e Emmons H W, nel 1961 in "*A study of natural convection above a line fire*"<sup>11</sup>.

Prendendo spunto da questa teoria, a metà degli anni '70, Morgan H P e Marshall N R affrontarono lo studio dei fumi con particolare riferimento alle Shopping Mall aventi balconate percorse dagli occupanti. ("*Smoke hazards in covered multi-level shopping malls: an experimentally-based theory for smoke production*", BRE1975; "*Smoke control measures in a covered two-storey shopping mall having balconies and pedestrian walk ways*", BRE 1978).

Elaborarono quindi il primo metodo di calcolo, "*The BRE spill plume method*", per i *Balcony spill plume* nell'ambito del Building Research Establishment, nel Regno Unito. Successivamente vennero effettuate delle modifiche per estendere questo metodo anche agli *Adhered spill plume* e valutare l'influenza della ventilazione o di flussi orizzontali provenienti da aperture su questo fenomeno.

Sulla base dei risultati sperimentali e della teoria elaborata da Morgan e Marshall, sia Law M ("*A note on smoke plumes from fires in multi-level shopping malls*". Fire Safety Journal, 1986) che Thomas P H ("*On the upward movement of smoke and related shopping mall problems*". Fire Safety Journal, 1987) elaborarono una semplificazione delle formule relative al fenomeno dello *spill plume*. Heskestad, utilizzando il lavoro di Law elabora nel 1991 la prima versione delle norme USA NFPA 92B relativa alla dinamica degli incendi e dei prodotti della combustione nelle Mall, atri e spazi estesi: "*Smoke management systems in malls, atria and large areas*".

Più recentemente gli studi effettuati da Poreh M "*Entrainment by two dimensional spill plumes in malls and atria*" e quello di Thomas "*The spill plume in smoke control design*", entrambi pubblicati sul Fire Safety Journal nel 1998, hanno implementato gli strumenti per il calcolo dello *spill plume* in riferimento non solo alle mall ma agli atri in genere.

Nell'anno successivo Morgan H P e altri presentarono un documento in cui veniva riportata la rassegna completa delle metodologie di calcolo elaborate fino a quel momento. "*Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation*". In questo documento vengono riportati i limiti delle varie metodologie e quali sono più idonee in funzione della tipologia dell'incendio previsto. La teoria di Morgan e Marshall viene proposta sia per affrontare gli scenari di incendio in cui è previsto il fenomeno del

---

<sup>11</sup> Journal of Fluid Mechanics/Volume 11/Issue 03/November 1961, pp 353-368, Cambridge University Press.



*balcony spill plume* che dell'*adhered spill plume*. Per quanto riguarda il metodo di Thomas, invece, esso può essere applicato per descrivere il *balcony spill plume* e non *adhered spill plume*. L'applicabilità di tali metodi presuppone il calcolo della posizione virtuale della sorgente attraverso il metodo di Poreh.

Milke J. A. nello studio riportato nell'*Handbook of Fire Protection Engineering* del 2002 "*Smoke management in covered malls and atria*"<sup>12</sup> ha effettuato un confronto tra il tasso di produzione di fumo dell'*axysimmetric plume* e del *balcony spill plume* per ambienti di dimensioni diverse dimostrando, per i casi studiati, come lo *spill plume* sia in grado di trascinare un quantitativo maggiore di aria rispetto all'*axysimmetric*.

Sottolinea quindi come sia importante, nel momento in cui si voglia studiare la propagazione dei fumi in un ambiente come quelli analizzati, valutare con attenzione il caso in cui l'incendio si verifichi in un ambiente che si affaccia su quello centrale poiché risulta essere la condizione più gravosa e pericolosa.

Più recentemente, nel 2004, Roger Harrison nello studio "*Smoke control in atrium buildings: a study of thermal spill plume*" ha approfondito la teoria ed effettuato esperimenti pratici sul fenomeno dello *spill plume* all'università di Canterbury.

## 5.2. Axysimmetric plume

Sulla base delle teorie descritte precedentemente e sulle considerazioni fatte da Milke in relazione allo *spill plume* viene descritta analiticamente l'evoluzione di un incendio che si sviluppa al centro dell'ambiente (fenomeno dell'*axysimmetric plume*), per poi approfondire nello specifico le differenze tra questo e il caso più complesso di incendio nell'ambiente adiacente a quello centrale.

In un incendio localizzato caratterizzato dal meccanismo dell'*axysimmetric plume* vi è un accumulo di prodotti di combustione in uno strato (strato superiore) posto a contatto con il soffitto ed al di sopra di un'interfaccia orizzontale che lo separa dallo strato inferiore, dove le temperature dei gas si mantengono più fredde.

---

<sup>12</sup> Sezione 4, Capitolo 13

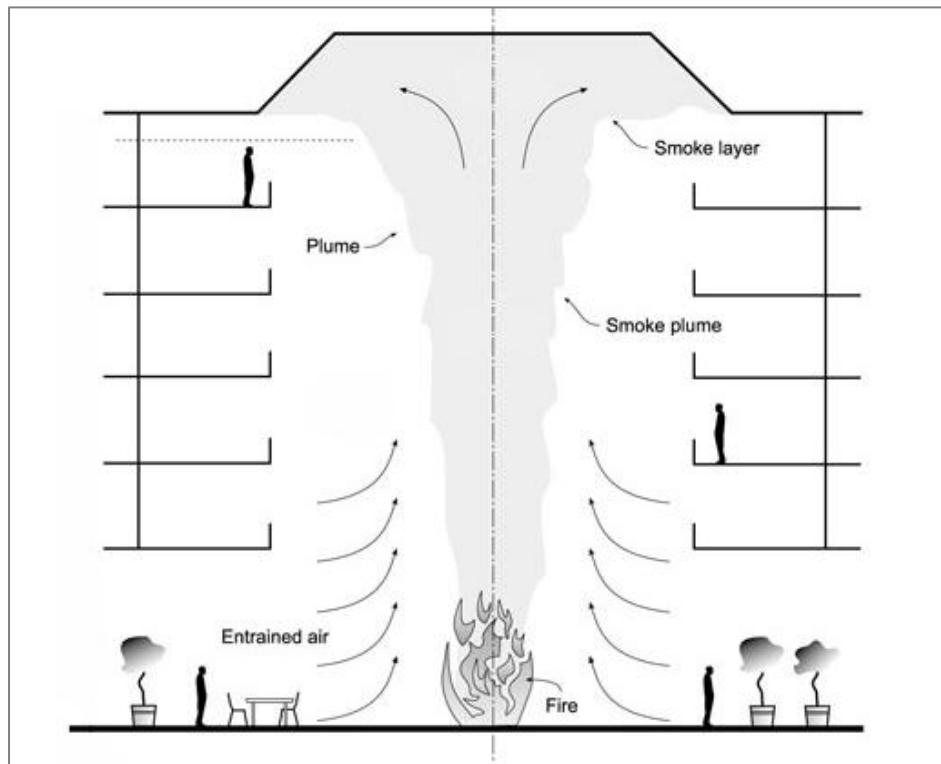


Figura 51: approssimazione funzionamento axisymmetric plume

Un incendio che si sviluppa seguendo questa dinamica e che agisce indisturbato poiché posizionato lontano dalle pareti segue le seguenti fasi:

- inizio della combustione (*flames*)
- formazione del pennacchio (*plume*)
- richiamo di aria incombusta nel plume (*air entrainment*)
- stratificazione dei fumi a soffitto e formazione di moti orizzontali (*ceiling jet*)
- aumento dello spessore dello strato di gas ed abbassamento graduale dell'interfaccia

La produzione e propagazione dei prodotti della combustione derivanti da questa tipologia di incendio possono essere valutate mediante un approccio ingegneristico e, quindi, specifici modelli analitici che verranno descritti nel seguente capitolo.

In particolare, essendo interessati soprattutto all'incolumità delle persone presenti e date le caratteristiche degli ambienti analizzati, lo studio delle grandezze di interesse è limitato principalmente alla fase dell'incendio precedente al flashover. Questo permette di valutare successivamente la compatibilità dei tempi di esodo previsti con le condizioni che si hanno durante le prime fasi di sviluppo dell'incendio.

Nei paragrafi a seguire vengono quindi calcolate alcune grandezze che sono necessarie per descrivere in termini quantitativi l'evoluzione temporale dell'incendio come, per esempio, le caratteristiche della fiamma e le temperature dei gas caldi lungo il soffitto.

E' importante sottolineare che questa situazione è ben rappresentata anche da modelli a due zone basati sull'approccio ingegneristico, validi per tutte le condizioni pre-flashover che, oltre al calcolo dell'evoluzione della temperatura dei gas, possono predire la propagazione dei fumi negli edifici e stimare le condizioni di vivibilità in funzione dell'altezza dello strato dei fumi, della concentrazione dei gas tossici, del flusso radiante e delle condizioni di visibilità.

### 5.2.1. Caratteristiche della fiamma

La struttura della fiamma influenza le caratteristiche di sviluppo dell'incendio ed è suddivisibile in tre parti principali: il pennacchio superiore contenente il flusso dei prodotti della combustione (parte A), la parte centrale in cui la luminosità risulta intermittente (parte B) ed infine la regione inferiore in cui la fiamma è costante (parte C).

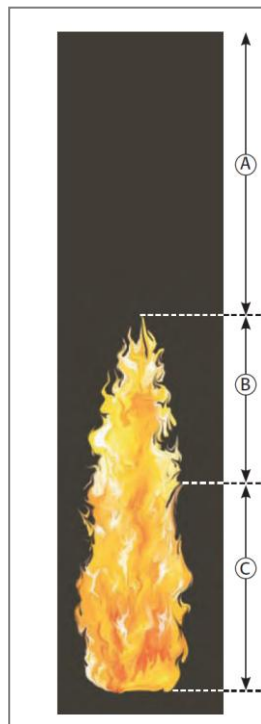


Figura 52: struttura della fiamma

Nel grafico seguente viene descritto tale fenomeno: esso, infatti, mostra sull'asse delle ordinate la variazione di intermittenza della fiamma  $I$ , e sull'asse delle ascisse la distanza  $z$  sopra la sorgente. L'intermittenza decresce all'aumentare della profondità fino a raggiungere, in taluni casi, valori nulli. Inoltre, viene definita un'altezza media  $L$ , ossia la distanza sopra la sorgente alla quale l'intermittenza raggiunge valori di 0,5 che risulta essere una quantità di riferimento particolarmente importante poiché indicativa del livello in cui le reazioni di combustione sono complete e il *plume* può essere considerato inerte.

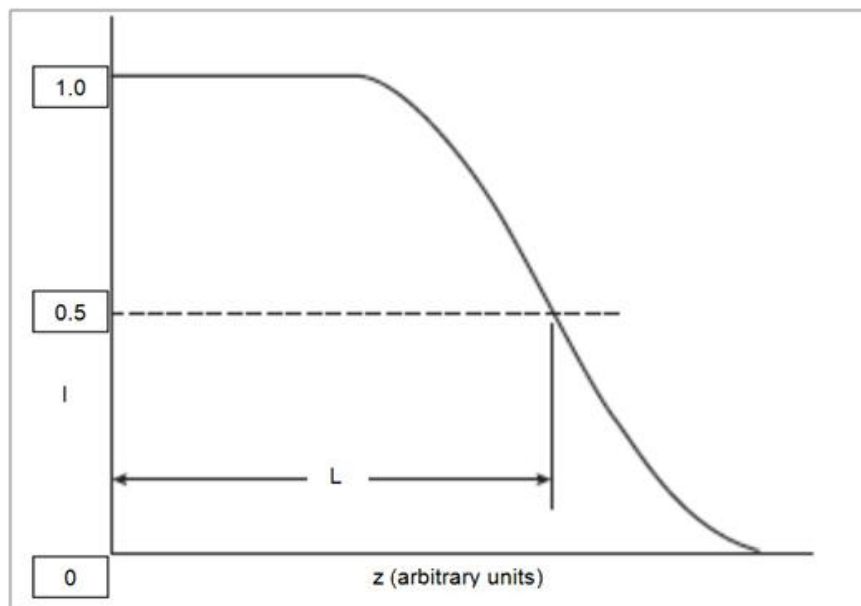


Figura 53: grafico dell'intermittenza della fiamma

L'altezza media visibile della fiamma, nel caso in cui il focolaio dell' incendio si trovi al centro dell'ambiente ed il suo andamento non sia influenzato dalla presenza di pareti nelle vicinanze, è funzione del seguente rapporto adimensionale :

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot T_{\infty} \cdot C_p \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot D^{\frac{5}{2}}} \quad [-]$$

dove:

- $Q$ : quantità di calore rilasciata [kW];
- $\rho_{\infty}$ : densità dell'aria ambiente [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];
- $C_p$ : calore specifico dell'aria a pressione costante [J/kgK];
- $T_{\infty}$ : temperatura dell'aria dell'ambiente [K];
- $g$ : accelerazione di gravità [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];
- $D$ : diametro della fiamma [m].

Grazie all'esecuzione di prove sperimentali e studi specifici in riferimento ad incendi naturali è stata ricavata la seguente relazione che permette di valutare la variazione dell'altezza media visibile della fiamma nel tempo:

$$L(t) = 3,7 \cdot Q^{*2/5} \cdot D - 1,02 \cdot D [m]$$

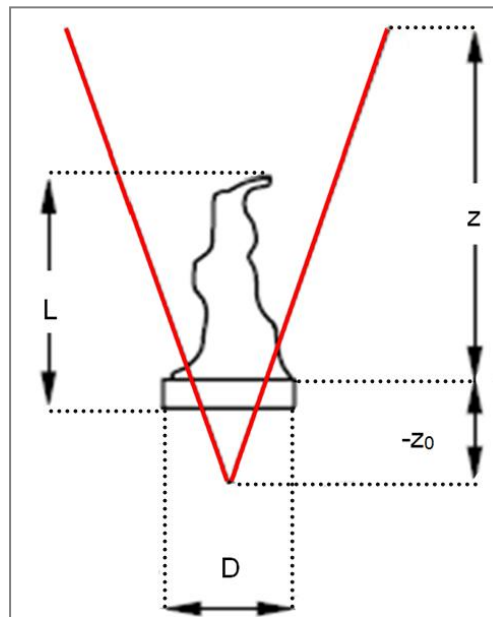


Figura 54: dimensioni di un focolaio indisturbato

Oltre all'estensione verticale della fiamma è possibile ricavare analiticamente la posizione d'origine del focolare.

Analizzando le fasi iniziali, l'incendio può essere schematizzato come una sorgente puntiforme di calore, assunzione che viene seguita anche dalla maggior parte dei modelli di calcolo basati sull'FSE.

L'origine virtuale di un incendio viene determinata attraverso un'analisi della variazione di temperatura al di sopra delle fiamme, lungo l'asse del pennacchio; il risultato porta ad un valore approssimato in quanto possono esserci delle lievi imprecisioni dovute al possibile posizionamento fuori asse di sensori, errori indotti dalle radiazioni del segnale di temperatura, o inadeguata media dei valori del segnale.

L'incendio viene quindi assimilato ad una sorgente puntiforme concentrata in una origine virtuale posta a profondità  $z_0$  sotto il livello del pavimento (distanza negativa), la cui espressione viene determinata a partire dalla relazione precedente:

$$z_0 = F \cdot Q^{*2/5} \cdot D - 1,02 \cdot D [m]$$



F è una funzione complessa che dipende da diverse variabili come  $c_p$ ,  $T_\infty$ ,  $\rho_\infty$ ,  $g$ ,  $H_c/r$  (frazione del calore totale del combustibile trasportato per convezione),  $T_L$  (temperatura all'altezza media della fiamma).

Ultima dimensione per descrivere le caratteristiche del focolare è il valore del diametro equivalente che non è deducibile dell'area poichè, nel caso di una sorgente non confinata e continuamente fluente, essa non è nota a priori e non può essere calcolata facendo solo riferimento ad un rilascio di quantità di calore. La natura transitoria in questione è molto dipendente dalla tempistica di accensione del combustibile e dalla velocità di propagazione della fiamma rispetto alla portata del carburante. Nonostante ciò si considera che un flusso continuo raggiunge uno stato stazionario caratterizzato da un diametro equivalente  $D_{ss}$  (equivalent steady – state diameter); è possibile che la sorgente raggiunga un diametro maggiore al momento dell'innesco, ma successivamente lo sviluppo porterà ad una riduzione fino ad arrivare al valore del diametro equivalente di regime.

L'area  $A_{ss}$  viene calcolata attraverso un equilibrio tra la portata volumetrica rilasciata dal combustibile,  $\dot{V}_L$ , e la velocità della combustione,  $\dot{y}$  :

$$\dot{V}_L = A_{ss} \cdot \dot{y} \quad [m^3 / s]$$

Sostituendo le seguenti espressioni:

$$A_{ss} = \frac{D_{ss} \cdot \pi}{4} \quad [m^2]$$

$$\dot{y} = \frac{\dot{m}''}{\rho} \quad [m/s]$$

In cui  $\dot{m}''$  è la massa di combustibile che viene bruciata per unità di superficie,  $\rho$  è la densità nel plume.

Si ottiene:

$$D_{ss} = \left( \frac{4 \cdot \dot{V}_L \cdot \rho}{\pi \cdot \dot{m}''} \right)^{1/2} \quad [m]$$

### 5.2.2. Caratteristiche del plume

Il termine *plume* o pennacchio è utilizzato per descrivere la colonna di prodotti della combustione, convettiva, che si sviluppa al di sopra della sorgente di calore, solida o liquida.

Il modello matematico è basato su una sorgente puntiforme dalla quale si estende verticalmente una colonna di fumo ideale che richiama aria dall'ambiente circostante, *air entrainment*. Quest'aria mischiata con i prodotti della combustione porta ad un aumento del volume dei fumi ed un conseguente abbassamento dell'interfaccia tra strato di aria pulita e strato di fumi a soffitto.

Nella figura che segue con la linea tratteggiata viene indicato il confine del pennacchio o *plume*, ossia la zona che limita gli scambi tra flusso dei prodotti della combustione e quello di aria ambiente che viene trascinato.

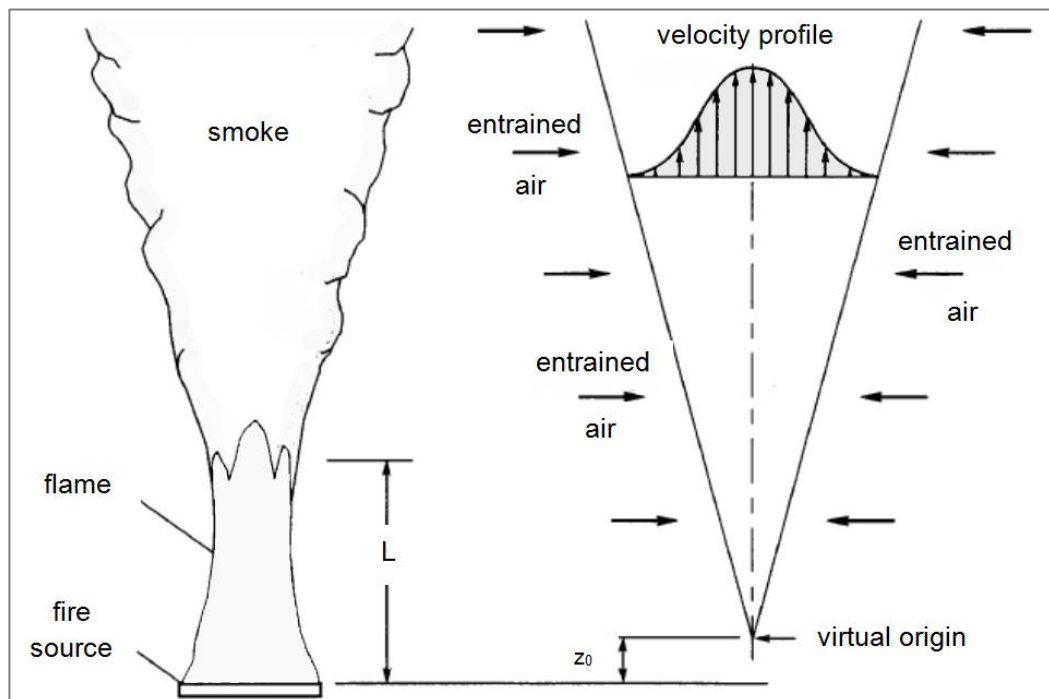


Figura 55: schema fire plume

Lo sviluppo a campana della curva, che indica nella figura la variazione di velocità dei gas all'interno del *plume*, *velocity profile*, descrive anche l'andamento della temperatura media in questa zona e la concentrazione di gas generati dal focolare. Inoltre può essere riportata la variazione della velocità e della temperatura lungo l'asse del *plume*, in funzione dell'altezza,  $u_0$  e  $\Delta T_0$ .





La descrizione del plume ivi condotta si basa su alcune ipotesi:

- sorgente puntiforme;
- variazioni di densità nel campo del moto sono ridotte rispetto a quelle dell'ambiente;
- la velocità di trascinamento dell'aria sul confine del *plume* è proporzionale alla velocità in direzione verticale dello stesso;
- andamento della velocità in direzione verticale del *plume* e le forze di galleggiamento in direzione orizzontale che interessano i fumi sono costanti a tutte le altezze;

Facendo riferimento alle tre equazioni di conservazione della continuità, della quantità di moto e delle forze di galleggiamento, è stata ricavata la prima formulazione integrale del *plume* dalla quale è stato possibile derivare le formule che descrivono l'andamento della velocità e della temperatura.

- ✓ continuità (*continuity*)

$$\frac{d(b^2 \cdot u)}{dz} = 2 \cdot a \cdot b \cdot u$$

- ✓ quantità di moto (*momentum*)

$$\frac{d(b^2 \cdot u^2)}{dz} = b^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho_\infty}$$

- ✓ forze di galleggiamento (*buoyancy*)

$$\frac{d\left(b^2 \cdot u \cdot g \cdot \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho_\infty}\right)}{dz} = 0$$

- ✓ legge dei gas ideali

$$\frac{\rho_\infty^{1/2}}{\rho} = \frac{T^{1/2}}{T_\infty}$$

Nelle espressioni qui sopra  $z$  indica la distanza tra la sorgente e lo strato di gas a soffitto,  $b$  il raggio del *plume*,  $u$  la velocità in direzione verticale del *plume*,  $a$  il coefficiente di trascinamento,  $\rho$  è la densità del *plume* e  $\rho_\infty$  è la densità dell'ambiente,  $T$  la temperatura del *plume* e  $T_\infty$  la temperatura dell'ambiente.

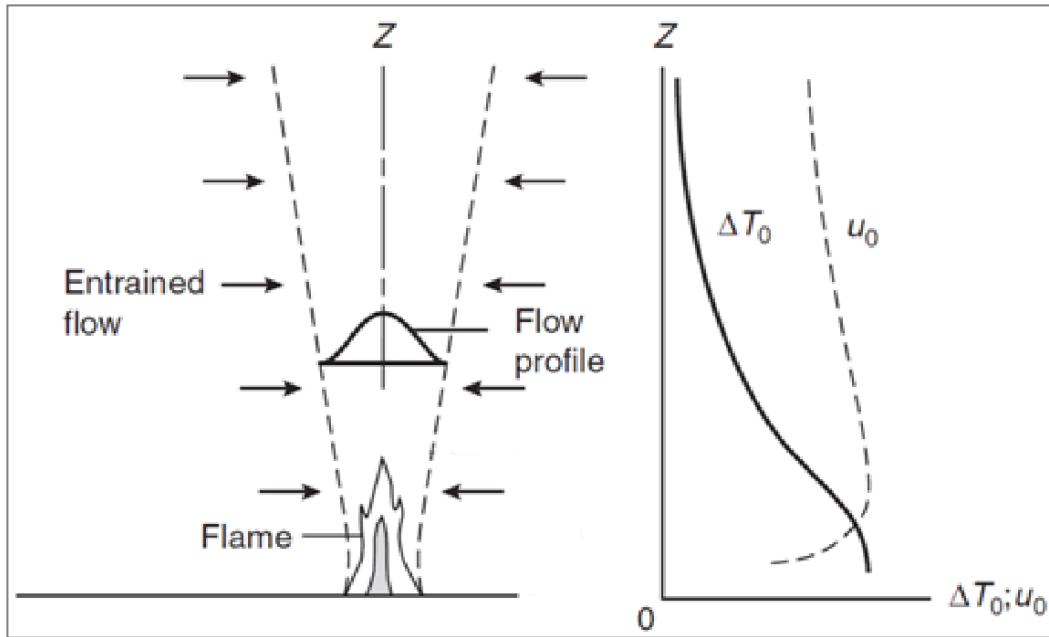


Figura 56: andamento velocità e temperatura nel plume lungo il proprio asse

Il *plume* è rappresentato nella maggior parte dei modelli sotto forma di un elemento del sistema nel quale temperatura e velocità dei gas sono omogenee. In realtà, tali valori differiscono sia in funzione della quota che della distanza radiale dall'asse.

In ogni caso la temperatura media e la velocità media in direzione verticale del *plume* possono essere valutate come segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_0 = 9,1 \cdot \left( \frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_C \cdot (z - z_0)^{-5/3} \\ u_0 = 3,4 \cdot \left( \frac{g}{g \cdot c_p \cdot T_\infty} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_C \cdot (z - z_0)^{-1/3} \end{array} \right.$$

dove con  $\dot{Q}_C$  è indicata la frazione di calore generato dalla combustione rilasciata per convezione.



### 5.2.3. Air entrainment

Nell'approccio ingegneristico la valutazione della quantità di fumo prodotta da una combustione è uno dei punti più importanti per la soluzione dei problemi legati alla valutazione degli effetti dell'incendio sulle persone e cose.

Dopo l'accensione, infatti, il *plume* trasporta i prodotti della combustione verso il soffitto, trascinati dai movimenti di aria dell'ambiente; si crea quindi uno strato al di sotto del soffitto che si addensa e si riscalda con l'avanzamento dell'incendio. Le caratteristiche di questo strato influenzano le condizioni ambientali e per questo motivo risulta importante determinare la quantità di fumi e gas che vengono prodotti in funzione dell'entità dell'aria ambiente trascinata dal *plume*.

Si ricorda che la quantità di fumo prodotta dipende da alcuni fattori. In primo luogo, il fumo prodotto dalla combustione di un determinato materiale è legato al fattore di emissione, definito come la massa di fumo generato per unità di massa di combustibile bruciato. A seconda dei materiali, i valori variano da decimi di punto al venti per cento di massa. Un'ulteriore dipendenza, anche se meno rilevante, è quella della quantità di fumo dalle dimensioni del focolare (all'aumentare della dimensione aumenta la quantità prodotta), mentre si ricorda che in caso di flusso di aria non sufficiente aumenta in misura notevole la quantità di particolato generato.

Stabilita la massa di fumo prodotta dal materiale, si deve osservare l'entità di aria interessata dal fenomeno, alla quale la letteratura scientifica si riferisce con *air entrainment*.

Tale massa d'aria può essere calcolata in funzione delle caratteristiche geometriche e termiche del *plume* e tanto più estesa sarà la superficie del *plume* (diametro, altezza) e tanto maggiore sarà la differenza di temperatura dei gas prodotti dalla combustione rispetto all'aria circostante, tanto maggiore sarà la massa di aria inglobata.

Il calcolo di queste grandezze è complesso, e le relazioni che permettono di rappresentare l'evoluzione dipendono da parametri diversi, di cui non è possibile dare conto in questa trattazione in modo adeguato.

Se si accetta l'ipotesi di conservazione della densità del *plume* formulata da Heskestad<sup>13</sup>, si può utilizzare una relazione sviluppata per *plume* più potenti in cui la

---

<sup>13</sup> G. Heskestad, «Fire plumes, Flame Height, and Air Entrainment,» in *SFPA Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, pp. Section 2, Chapter 1.



portata di massa è proporzionale in funzione della quota alla potenza termica istantanea attraverso E e G:

$$\dot{m}_{ent} = J \dot{Q}_C$$

in cui le unità di misura sono rispettivamente, kg/s e kW, mentre J è un coefficiente che varia con la densità dell'aria e con il rapporto tra il calore di combustione ed il rapporto aria/volatili.

Se si intende studiare la variazione della massa di aria con l'altezza media della fiamma L, si può utilizzare la variazione lineare che è emersa dalle sperimentazioni e che si riassume nella formula:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{ent,L} \cdot z \cdot L$$

L'espressione completa e più generale elaborata da Heskestad risulta essere la seguente:

$$\dot{m}_{ent} = E \cdot \left( \frac{g \cdot \rho_{\infty}^2}{c_p \cdot T_{\infty}} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_C^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} \cdot \left[ 1 + \frac{G \cdot \dot{Q}_C^{2/3}}{(g^2 \cdot c_p \cdot \rho_{\infty} \cdot T_{\infty})^{2/3} \cdot (z - z_0)^{5/3}} \right]$$

In cui E è una costante di proporzionalità adimensionale e G dipende dalla posizione della colonna di fumi rispetto alla punta della fiamma.

Sostituendo ai parametri della formula i valori corrispondenti a combustibili normali in condizioni atmosferiche ordinarie la produzione di fumo (intesa come massa di aria trascinata dal plume) al di sopra della fiamma è pari a:

$$\dot{m}_{ent} = 0,071 \cdot \dot{Q}_C^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} \cdot \left[ 1 + 0,027 \cdot \dot{Q}_C^{2/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} \right]$$

Con queste semplificazioni è evidente come l'equazione risulta essere costituita da due termini che rispettano il principio fisico sopra descritto. Il primo rappresenta la portata massica di fumo e gas di combustione generata dal combustibile che viene convogliato attraverso il plume nello strato caldo che si forma a soffitto, nella letteratura esso prende il nome di  $\dot{m}_{smoke}$ ; il secondo costituisce la portata massica di aria ambiente richiamata, strettamente dipendente dalla regione della fiamma,  $\dot{m}_{air}$ .

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{smoke} + \dot{m}_{air}$$

In combustioni che determinano *plume* deboli invece, la portata è individuabile con la seguente relazione:



$$\dot{m}_{ent} = E \rho_{\infty} u_0 b_u^2$$

dove E è una costante adimensionale mentre gli altri termini rappresentano la densità dell'aria [ $\text{kg/m}^3$ ] la velocità media in direzione verticale sull'asse [m/s] ed il raggio del *plume* nel punto in cui il rapporto tra le velocità è pari a 0,5.

Esplicitando la velocità e il raggio del *plume* può essere espressa come:

$$\dot{m}_{ent} = E \cdot \left( \frac{g \cdot \rho_{\infty}^2}{c_p \cdot T_{\infty}} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3}$$

Dalla formula risulta che, in questo caso:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{smoke}$$

Per questo tipo di incendi, l'aria trascinata dall'ambiente interessata dal fenomeno è secondaria rispetto al flusso di prodotti della combustione generati dal combustibile.

#### 5.2.4. Stratificazione dei fumi

Quando i fumi e i gas generati dal *plume* incontrano il soffitto o un ostacolo che ne blocca la risalita, formano uno strato che aumenta di spessore mano a mano che la combustione continua e contemporaneamente si raffredda a causa del fenomeno di trascinamento dell'aria ambiente. Come tutti i fluidi, il fumo si muove sotto l'influsso di forze che si manifestano come gradienti di pressione e temperatura all'interno del fluido.

Se, come nel caso di ambienti di elevata altezza, la temperatura dell'ambiente aumenta all'aumentare dell'altezza e se la sorgente dell'incendio non è caratterizzata da potenze rilevanti, allora la differenza poco significativa tra la temperatura del *plume* e quella ambiente, che influenza le forze di galleggiamento, può portare il *plume* a cessare di crescere e potrebbe non raggiungere il soffitto poiché perde la propria capacità di galleggiamento.

Deve quindi essere calcolata l'altezza massima che può raggiungere il *plume* all'interno di ambienti caratterizzati da una stratificazione di temperatura che è formulata da Heskestad sulla base degli studi ed esperimenti svolti da Morton:

$$z_m = 3,79 \left[ \frac{T_{a1}}{g \cdot (c_p \cdot \rho_{a1})^2} \right]^{1/8} \cdot \dot{Q}_c^{1/4} \cdot \left( \frac{dT_a}{dz} \right)^{-3/8}$$

In cui  $dT_a/dz$  è il gradiente di temperatura dell'ambiente,  $T_{a1}$  e  $\rho_{a1}$  sono rispettivamente la temperatura e la densità dell'aria in ambiente.

Sono state effettuate numerose sperimentazioni per valutare la variazione dei parametri che caratterizzano il plume lungo il proprio asse in presenza ed assenza di una stratificazione di temperature:

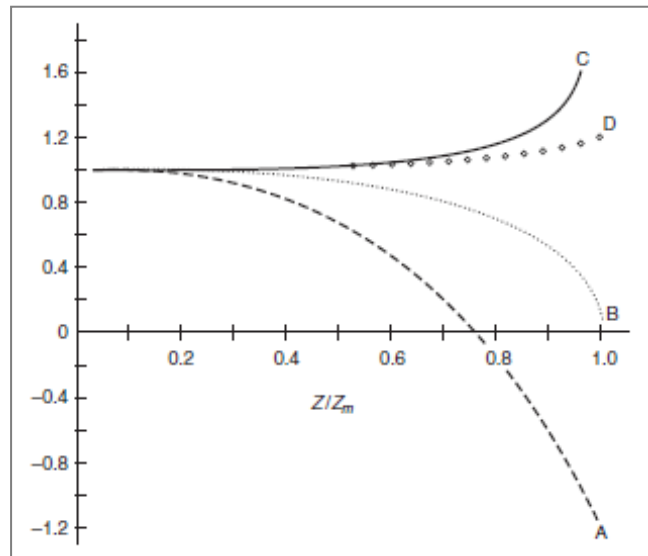


Figura 57: comportamento teorico dei parametri lungo l'asse del plume

- curva A: aumento della temperatura;
- curva B: variazione della velocità assiale;
- curva C: variazione del raggio del *plume*;
- curva D: variazione della concentrazione nel volume dei prodotti della combustione.

La variazione di questi fattori è stata valutata rispetto al rapporto delle altezze massime raggiunte dal *plume*,  $z/z_m$ , nelle due condizioni.

Interpretando i grafici è evidente come la velocità in condizioni stratificate diminuisce fino ad annullarsi per rapporti di  $z/z_m$  pari all'unità. La temperatura in condizioni stratificate invece ha un incremento negativo al di sotto del valore massimo che può raggiungere in altezza. Il raggio del *plume* in condizioni stratificate cresce rapidamente e proporzionalmente con l'estensione del *plume*. Infine vi è un piccolo effetto sulla variazione di concentrazione dei prodotti della combustione.

### 5.2.5. Ceiling jet

Verificato che il *plume* possa raggiungere il soffitto, lo sviluppo dell'incendio procede creando uno strato di fumi e gas che si propaga attraverso moti orizzontali al di sotto di questo; tale fenomeno viene definito come *ceiling jet*.

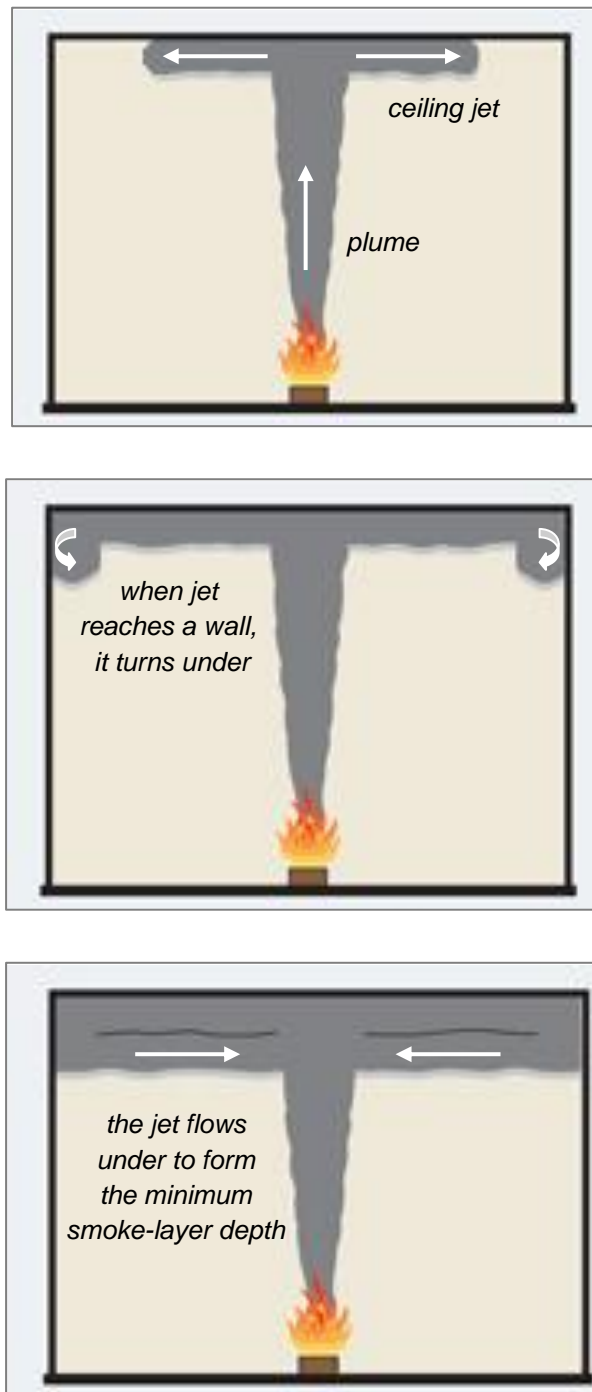


Figura 58: schematizzazione fenomeno del ceiling jet

La colonna di fumi e gas generata dal *plume* raggiunge il soffitto e successivamente scorre radialmente sotto di questo inglobando e trascinando aria che lo raffredda e abbassa la sua velocità. In incendi all'interno degli edifici, le condizioni appena descritte si verificano principalmente nelle fasi iniziali e la presenza di aperture a soffitto o laterali o sistemi di evacuazione forzata possono ritardare l'accumulo di fumi e gas rilasciati.

La velocità e la temperatura di questi moti può essere calcolata, per esempio, per poter valutare il tempo di attivazione dei rilevatori di fumo e degli erogatori sprinkler e per prevedere l'entità dei sistemi di controllo ed e evacuazione dei fumi.

Risulta quindi necessario stimare i valori massimi della temperatura e della velocità dei gas caldi nel ceiling jet nelle zone del soffitto del locale relativamente lontane da quella che viene intersecata dalla verticale passante per il centro della base della fiamma e che viene interessata per prima dal fumo e gas caldi di combustione.

Esistono diverse teorie che forniscono valori ragionevoli se applicate nelle condizioni oggetto di studio, cioè quando l'altezza della fiamma è inferiore rispetto all'altezza dal soffitto sopra il combustibile che brucia.

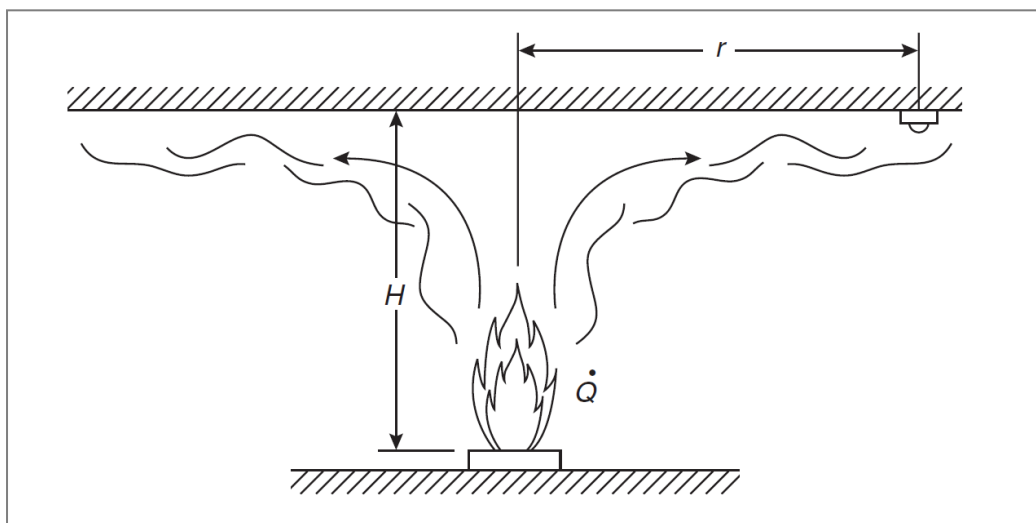


Figura 59: schematizzazione della stratificazione del ceiling jet

Per prima cosa viene definito il seguente rapporto:

$$\frac{r}{H}$$

dove  $r$  è la distanza lungo il soffitto misurata in direzione radiale tra il punto in cui l'asse verticale passante per il centro dell'oggetto incendiato interseca il soffitto e quello nel



quale viene valutata la temperatura, mentre  $H$  è la distanza valutata in direzione verticale, tra il punto più basso dell'oggetto che brucia ed il soffitto del locale.

La temperatura massima dei gas caldi del *ceiling jet*, in [°C], risulta:

$$T_{\max} = T_0 + \begin{cases} \frac{16,9}{H^{\frac{5}{3}}} \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{3}}, & \frac{r}{H} < 0,18 \\ \frac{5,38}{H} \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{r}\right)^{\frac{2}{3}}, & \frac{r}{H} > 0,18 \end{cases}$$

La velocità massima dei gas caldi che fluiscono orizzontalmente lungo il soffitto, in [m/s] risulta essere:

$$u_{\max} = \begin{cases} 0,96 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{\frac{1}{3}}, & \frac{r}{H} < 0,15 \\ 0,195 \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \frac{H^{\frac{1}{2}}}{r^{\frac{5}{6}}}, & \frac{r}{H} > 0,15 \end{cases}$$

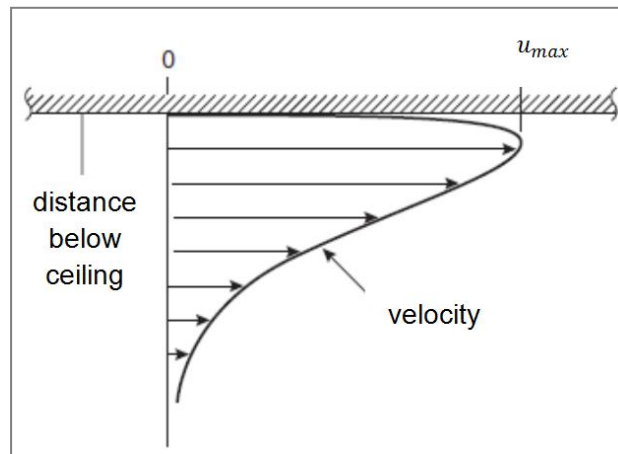


Figura 60: variazione delle velocità nel ceiling jet

In entrambi i casi le prime formule si riferiscono alle misurazioni a soffitto direttamente sopra la sorgente di fuoco e sono indipendenti dalla direzione radiale; mentre le altre correlazioni sono applicabili alla zone al di fuori di questa regione, cioè dove il flusso si allontana dalla zona centrale.

### 5.2.6. Influenza delle aperture

L'incendio può anche interessare un locale adiacente agli ambienti oggetto di studio; risulta quindi interessante osservare il fenomeno della propagazione al di fuori del luogo di accensione. In particolar modo si analizza l'espansione di gas attraverso le aperture che mettono in comunicazione i diversi locali.

Un incendio provoca il movimento di gas attraverso due fenomeni: il riscaldamento dell'aria che porta l'aria ad espandersi, spingendola fuori dalla stanza attraverso ogni apertura e il fenomeno di galleggiamento del flusso. L'aria riscaldata, con i prodotti della combustione crea uno strato a soffitto che aumenta di spessore con il tempo e quando viene in contatto con un'apertura si crea una fuoriuscita nella parte superiore. La pressione della stanza diminuisce e porta all'entrata di aria fredda e ossigeno nella parte inferiore con la conseguente ulteriore alimentazione dell'incendio stesso.

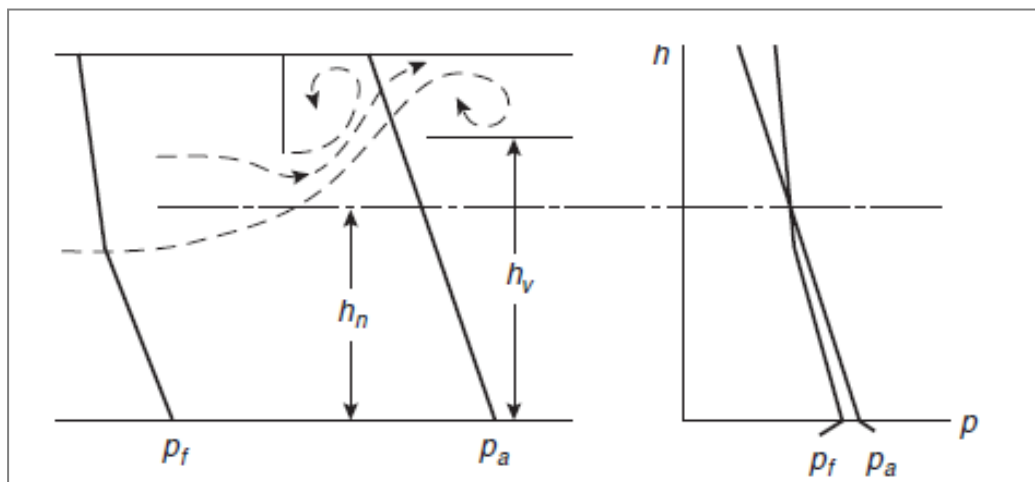


Figura 61: gradiente di pressione tra due ambienti adiacenti

Per creare questo flusso deve essere presente una differenza di pressione tra l'interno e l'esterno dell'ambiente:

$$\Delta p_f = p_f - p_a$$

Sempre considerando che le seguenti proprietà dell'aria intesa come fluido di densità  $\rho$ , definite dalle leggi dell'idraulica.

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

$$\frac{Q}{A} = C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = C \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

Se si considera invece il flusso attraverso una superficie orizzontale, la velocità e la portata sono influenzati dalla caduta di pressione a monte della bocchetta al lato della contrazione della vena.

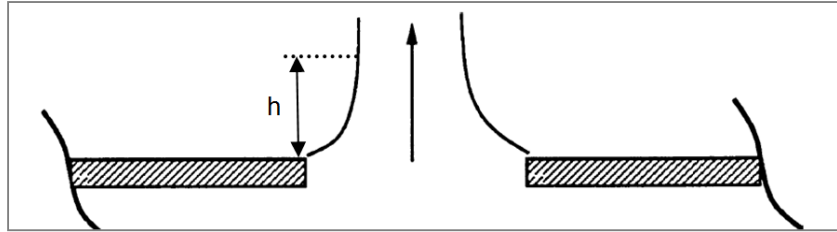


Figura 62: flusso attraverso un'apertura orizzontale

Così la velocità del flusso ascendente diventa:

$$V_h = \sqrt{\frac{2}{\rho_h} \cdot (g \cdot h \cdot \Delta \rho + \Delta p)}$$

in cui le differenze di pressione e di densità sono riferite ai due ambienti comunicanti in verticale e  $h$  è la distanza tra la superficie e il punto di contrazione del flusso.

### 5.3. Spill plume

Il volume del fumo che si genera in un incendio dipende dalla quantità d'aria trascinata e dalla configurazione che assume il *plume*. Fino a questo momento la trattazione ha analizzato solo un tipo di *plume*, *axisymmetric plume*, riferito ad un incendio situato al centro dell'ambiente lontano dalle pareti del compartimento che crea un moto di trascinamento uguale in ogni direzione.

Essenziale, invece, per questo tipo di ambienti è il fenomeno dello *spill plume* che verrà dettagliatamente spiegato a seguire e descrive un incendio che si verifica all'interno di un locale comunicante con l'ambiente di grande altezza.

Come nel caso precedente la fiamma genera il *plume* che crea un primo strato di fumi sotto il soffitto dell'ambiente in cui ha avvio l'incendio. Successivamente il flusso si diffonde lateralmente verso l'apertura di collegamento tra i due spazi fino a incontrare un ostacolo intermedio come un balcone o un angolo. Di conseguenza il fumo ruota intorno al bordo libero di tale ostacolo per poi invertire il proprio moto e propagarsi in direzione verticale: questa zona è nota come *rotation* o *turning region* del *plume*. Si crea quindi un secondo flusso verticale che dall'angolo raggiunge il soffitto dell'ambiente più ampio, inglobando aria ambiente e formando, se sussistono le condizioni sufficienti, un secondo strato di fumi sotto il soffitto dell'ambiente di elevata altezza.

Gli *spill plume* possono essere classificati in due gruppi:

- *adhered spill plume*, in questa situazione il fumo, una volta incontrato il bordo che separa i locali, sale aderendo alla superficie sopra l'apertura; il trascinamento dell'aria si verifica solo da un lato del *plume*: per questo motivo viene chiamato anche *single-sided spill plume*. Se il *plume* dovesse quindi svilupparsi in prossimità di una parete o ad un angolo (*adjacent walls and corner*), la portata prodotta si ridurrebbe rispettivamente di circa 40% e 60%.

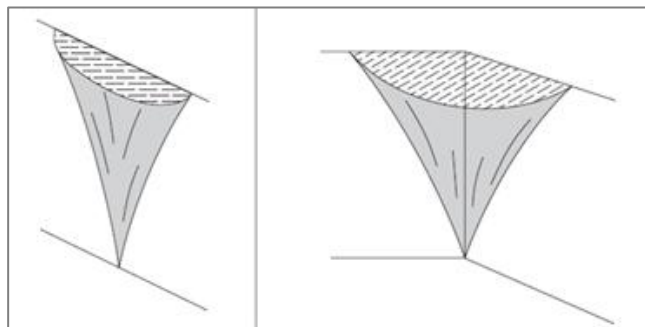


Figura 63: wall and corner plume

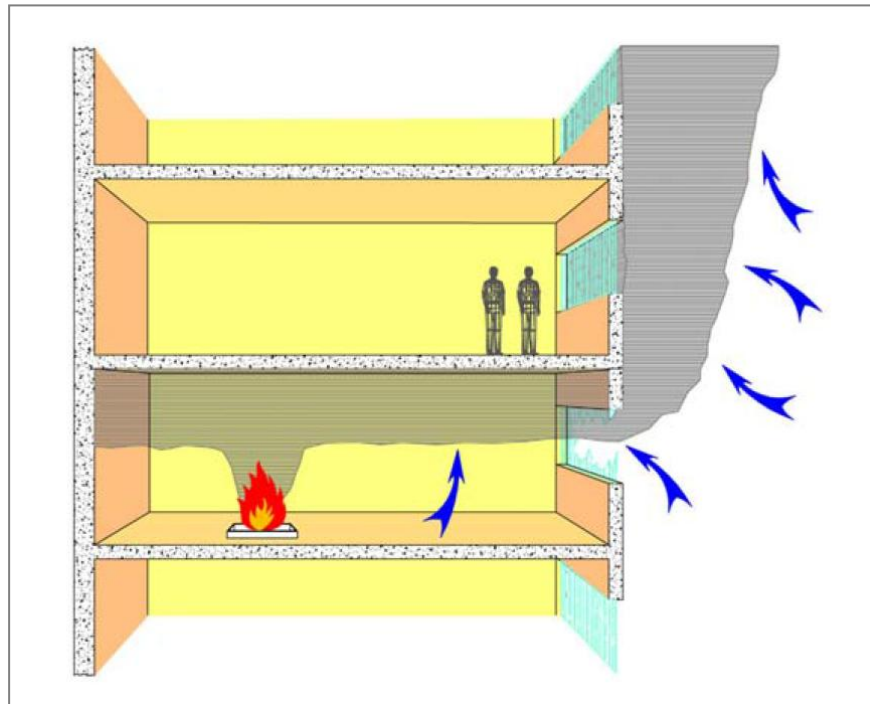


Figura 64: adhered spill plume

- balcony o free spill plume, in questa situazione il fumo una volta incontrato il bordo che separa i locali, sale senza aderire alla superficie sopra l'apertura; il trascinamento dell'aria si verifica da tutti i due lati del *plume*: per questo motivo viene chiamato anche *double sided spill plume*.

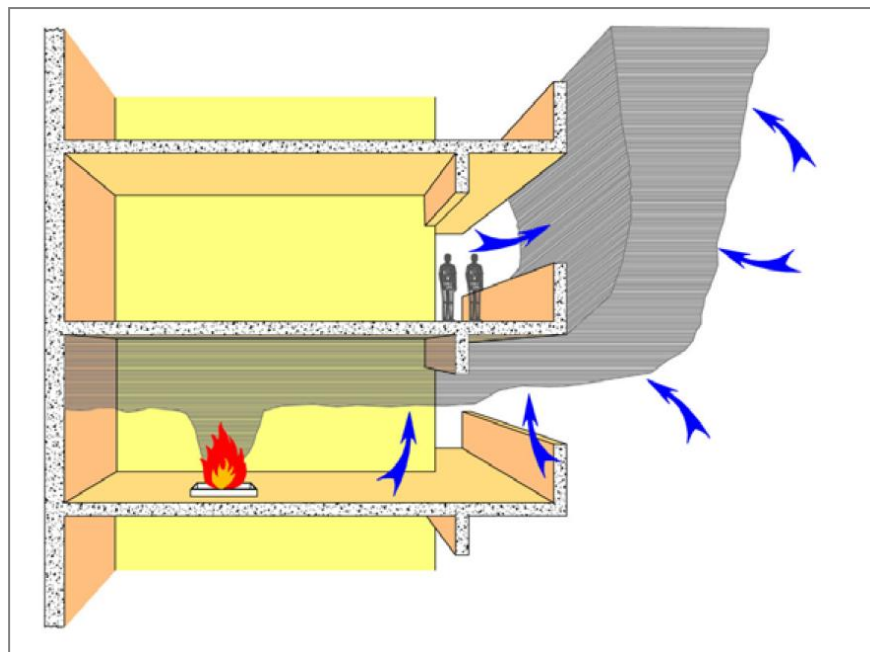


Figura 65: balcony o free spill plume

Un incendio che si sviluppa nell'ambiente più basso che si affaccia su quello principale massimizza il fenomeno dell'*air entrainment*, ossia il fenomeno di trascinamento dell'aria da parte del *plume* con una conseguente elevata produzione di fumi e gas. Nella definizione degli scenari questa è la condizione più pericolosa

Gli aspetti peculiari che governano il fenomeno dell'*air entrainment* e determinano l'entità dello *spill plume* sono riportati da Morgan e Marshall e consistono in:

- il flusso di massa d'aria e la temperatura dei gas nel punto di rotazione del flusso;
- il flusso di calore convettivo dei gas;
- l'estensione laterale del plume che entra nell'ambiente centrale, misurata subito dopo aver sorpassato l'angolo di rotazione;
- l'altezza verticale lungo per quale il plume si estende.

Milke, come riportato precedentemente, ha eseguito degli studi confrontando il tasso di produzione di fumi di diversi *balcony spill plumes* generati da incendi con rilascio termico per convezione crescente: 1000 kW, 5000kW, 10000kW. Ha valutato anche la variazione del tasso in funzione dell'altezza dell'*atrium space* e della lunghezza dello *spill edge*.

Un altro confronto è stato svolto, sempre da Milke, sull'incremento della produzione di fumi dell'*axisymmetric plume* e del *balcony spill plume* per un incendio tipo con una calore rilasciato per convezione pari a 5000 kW. La produzione di fumi derivante dallo *spill plume* è stata calcolata per diverse altezze del *balcony* e lunghezze dello *spill edge*.

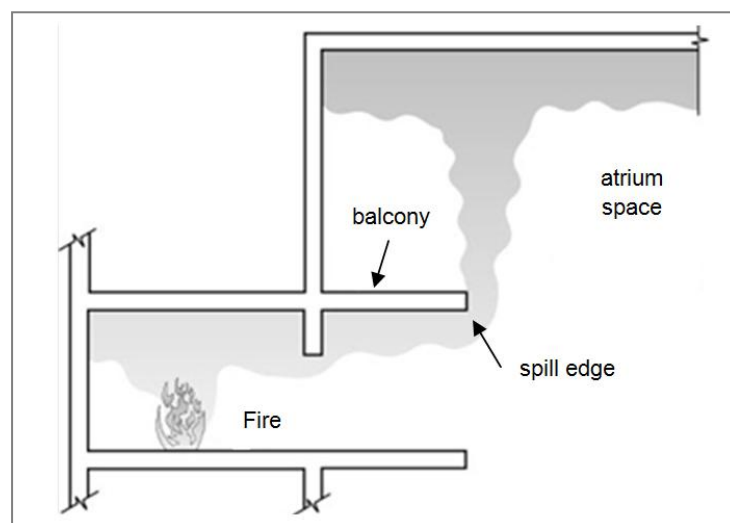


Figura 66: caratteristiche geometriche balcony spill plume

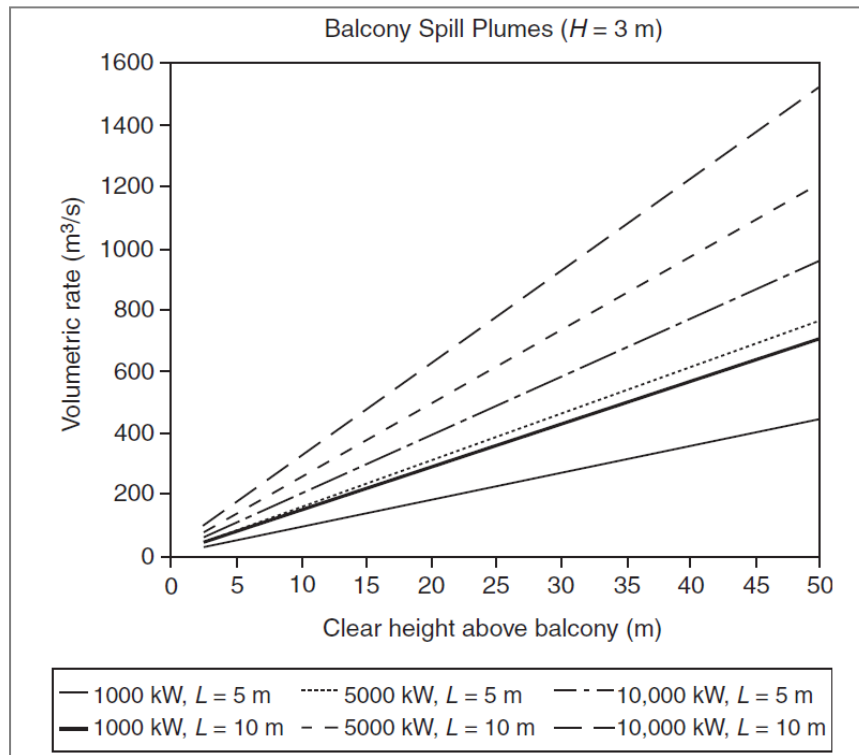


Figura 67: confronto produzione di fumo di diversi spill plumes

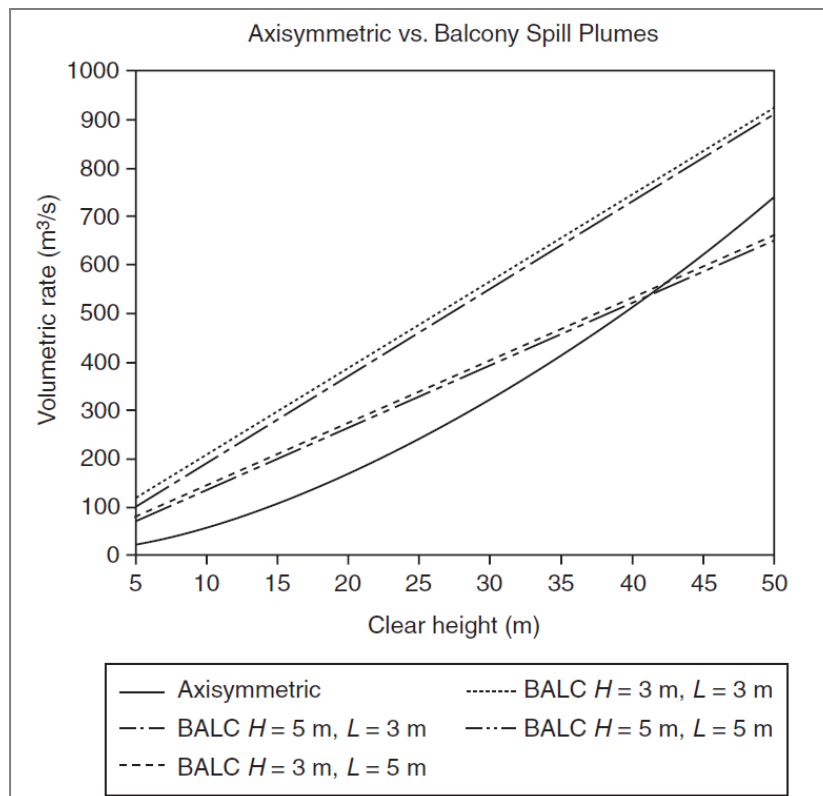


Figura 68: confronto tra produzione di fumi axisymmetric e balcony spill plumes

Milke dimostra così che, per le condizioni studiate, nello *spill plume* è coinvolta una maggior quantità di aria trascinata rispetto a quella dell'*axysimmetric plume* per altezze di risalita fino a 40 metri determinando, di conseguenza, una maggior produzione di fumi. Questa altezza limite ben rispecchia le dimensioni tipiche degli ambienti di elevata altezza e prova che generalmente lo scenario peggiore di incendio è quello in cui si assiste al fenomeno dello *spill plume*. Per altezze superiori a 40 metri i due fenomeni hanno un comportamento simile e non è più necessario fare tale distinzione poiché hanno analoga produzione di fumi e gas.

La formulazione analitica del fenomeno segue quanto riportato nella teoria di Morgan and Marshall successivamente ampliata e semplificata: tale metodo è noto come *BRE*<sup>14</sup> *spill plume method*.

Il flusso dei prodotti della combustione nel caso di *free spill plume* o *balcony* viene suddiviso in tre zone principali:

- 1) regione di flusso dei fumi orizzontali a soffitto, prima di raggiungere l'apertura;
- 2) la zona di rotazione attorno all'ostacolo, in cui si mette in evidenza il passaggio da un movimento in orizzontale a un flusso verticale;
- 3) il flusso verticale bidimensionale.

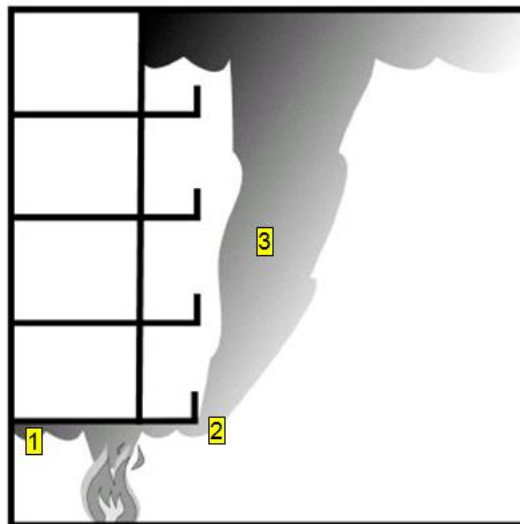


Figura 69: schematizzazione flusso metodo BRE

Per poter determinare il flusso orizzontale di fumi a soffitto che fuoriescono dall'apertura è necessario determinare per prima cosa una delle seguenti combinazioni di parametri:

<sup>14</sup> the Building Research Establishment in the UK.





- portata di massa – flusso di calore
- portata di massa – temperatura media del plume
- portata di massa - temperatura a soffitto
- flusso di calore – temperatura media del plume
- flusso di calore – temperatura a soffitto
- flusso di calore – profondità dello strato
- profondità dello strato – temperatura media del plume
- profondità dello strato – temperatura a soffitto

Determinati questi parametri può essere calcolata la portata massica di gas attraverso un'apertura con la teoria di Morgan e, in particolare con la seguente equazione:

$$m_k = \frac{2}{3} C_d^{3/2} (2g\theta_{c,w}T_1)^{1/2} \left( \frac{W\rho_1}{T_{c,w}} \right) d_w^{3/2} k_m$$

dove:

- $C_d$  = coefficiente di contrazione delle aperture ;
- $d_w$  = profondità dello strato di fumo e gas caldi in prossimità dell'apertura;
- $\theta_{c,w}$  = massimo incremento della temperatura strato di gas in prossimità dell'apertura;
- $T_{c,w}$  = massima temperatura strato di gas caldi in prossimità dell'apertura;
- $T_1$  = temperatura ambiente;
- $\rho_1$  = densità dell'aria ambiente;
- $w$  = larghezza dell'apertura;
- $k_m$  = fattore di correzione pari da 0,95 a 1,3 [-].

Per quanto riguarda i coefficienti di contrazione delle aperture Morgan attribuisce un valore di  $C_d = 1$  per aperture prive di barriere verticali o velette e un valore di  $C_d = 0,6$ , nel caso in cui sia presente un ostacolo, come una veletta, che deve essere superato dal flusso prima di poter propagarsi nell'ambiente più ampio.

Successivamente si calcola la quantità di gas che ruota attorno al bordo dell'apertura:

$$\delta m = \frac{2}{3} \rho_0 w \alpha \left( \frac{2g\vartheta}{T} \right) d^{3/2} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Viene definita quindi la costante di trascinamento  $\alpha$  al quale viene associato un valore compreso tra 1,1 e 0,9. Questo valore elevato di  $\alpha$  è dovuto alla grande quantità di aria trascinata dal flusso in rotazione attorno all'ostacolo.



Infine per descrivere il flusso verticale e l'aumento di massa del pennacchio si combinano le precedenti equazioni:

$$m_y = m_k + \delta m$$

La differenza tra i due tipi di *spill plume* risiede nella costante di trascinamento. Nel *balcony* è stata empiricamente determinata con il valore di 0,16 e al di sopra di una certa altezza dal bordo dell'ostacolo si presuppone che il calcolo della portata massica sia indipendente da essa. Nell'*adhered spill plume* si utilizza un  $\alpha$  pari a 0,077, trovato grazie alle relative sperimentazioni.

#### 5.4. Sistemi di evacuazione fumo e calore

I fumi e il calore prodotti durante il processo di combustione possono essere rimossi dall'ambiente sfruttando diverse strategie come precedentemente specificato; la ventilazione influisce sull'andamento dei flussi dei prodotti della combustione e viene descritto in seguito come queste strategie influenzano il fenomeno, facendo riferimento alle due modalità di ventilazione: naturale e meccanica.

Per valutare l'efficacia del sistema di evacuazione di fumo e calore è necessario fare riferimento alle condizioni d'incendio e alle caratteristiche geometriche che possono influenzare questo fenomeno.

L'incendio all'interno di un ambiente crea in breve tempo una stratificazione dell'aria: lo strato più caldo, con peso specifico più basso, si posiziona in alto, mentre quello più freddo e pesante in basso. Il sistema crea a pavimento uno strato di aria libera al di sopra del quale galleggia lo strato di fumo e gas caldi che vengono convogliati all'esterno, spinti dalla stratificazione termica dei gas caldi.

L'afflusso di aria esterna dal basso alimenta lo strato più freddo, con una separazione netta con lo strato caldo, mantenendolo pulito. La differenza di pressione fra i due strati spinge naturalmente all'esterno gli effluenti attraverso gli evacuatori, oppure si utilizza un sistema di estrazione meccanico che permette l'evacuazione dei fumi dal compartimento a soffitto interessato dall'incendio, in modo indipendente dalla spinta generata dalla differenza di densità dell'aria tra la base e la sommità dell'ambiente stesso.

In base alle modalità di estrazione dei fumi dall'ambiente e di immissione di aria all'interno di esso si possono distinguere due tipologie di impianti di evacuazione, quelli naturali ENFC e quelli forzati EFFC .

### 5.4.1. Ventilazione naturale

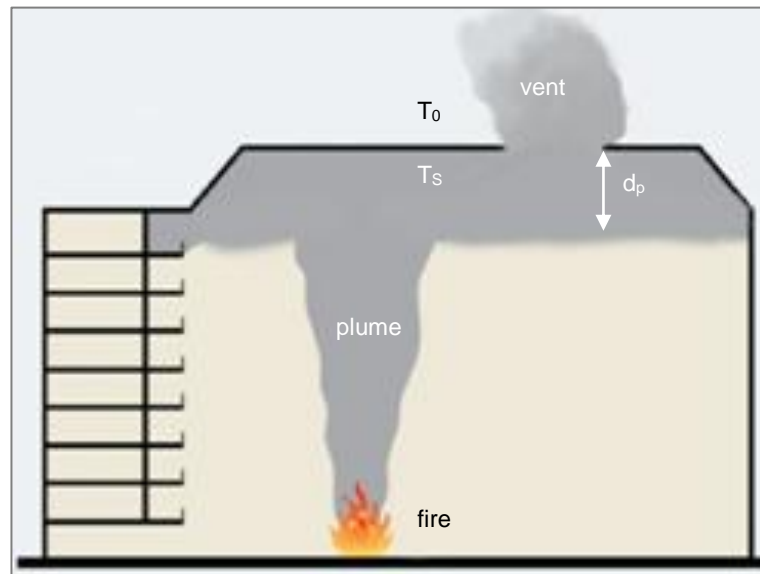


Figura 70: ventilazione naturale

In funzione delle caratteristiche dell'ambiente esterno e dei fumi è possibile determinare la quantità di massa in uscita dall'apertura in copertura<sup>15</sup>, *vent* :

$$\dot{m}_v = \frac{C A_V \rho_0 \sqrt{2 g d_b (T_s - T_0) (T_s / T_0)}}{\sqrt{T_s + (A_V / A_I)^2 T_0}}$$

dove:

- $A_V$  = area apertura di ventilazione [m];
- $A_I$  = area apertura di afflusso [m];
- $d_b$  = altezza dello strato di fumi sotto l'apertura [m] ;
- $T_s$  = temperatura fumi [K];
- $T_0$  = temperatura aria estena [K];
- $\rho_0$  = densità aria esterna [kg/m<sup>3</sup>];
- $C$  = coefficiente di scambio.

Da questa relazione è evidente che si ha una maggior capacità di estrazione all'aumentare della differenza tra la temperatura dei fumi e quella dell'aria esterna.

L'uso di sistemi di ventilazione naturale per la gestione dei fumi in ambienti ad elevata altezza è generalmente una delle strategie migliori; tuttavia, vi sono fenomeni che

<sup>15</sup> valida in condizioni stazionarie

possono influenzare negativamente il loro corretto funzionamento, come sistemi di condizionamento o impianti sprinkler che abbassano la temperatura dei gas e fumi di combustione.

Nella progettazione di un sistema di ventilazione naturale è necessario valutare anche alle condizioni dell'ambiente esterno, tra cui il vento. Se l'ambiente in cui si intende progettare questo sistema è confinante ad un edificio molto alto, il vento può produrre una pressione positiva sulla copertura interferendo con il funzionamento del sistema di ventilazione.

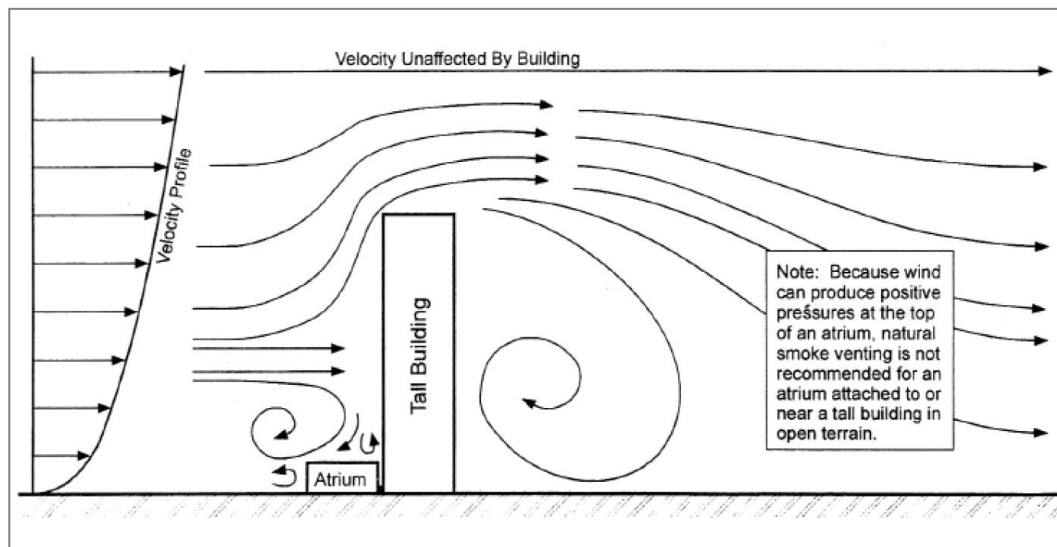


Figura 71: influenza del vento sul sistema di ventilazione naturale in copertura

Un altro aspetto importante per la progettazione è che deve essere considerata con particolare attenzione la regolazione delle temperature dei sensori che permettono l'attivazione dell'intero sistema. E' importante che la discesa dello strato di fumi non impedisca con le sue temperature il corretto funzionamento dei sensori di attivazione.

Il motivo per cui questi sistemi naturali sono generalmente più comuni è legato anche ad aspetti economici infatti risultano essere molto meno costosi rispetto a quelli di ventilazione meccanica in termini di costi dei dispositivi, costi di progettazione, costi di installazione e manutenzione.

### 5.4.2. Ventilazione meccanica

Il sistema di estrazione forzata consiste invece nel posizionare dei ventilatori meccanici nel punto più alto della copertura in modo tale che siano a contatto con lo strato di fumi caldo stratificatosi a soffitto. Gli EFFC, evacuatori forzati di fumo e calore, allontanano i fumi e gas caldi grazie alla depressione che creano in prossimità della bocca di presa e per l'aiuto della pressione interna dovuta allo strato di gas caldi.

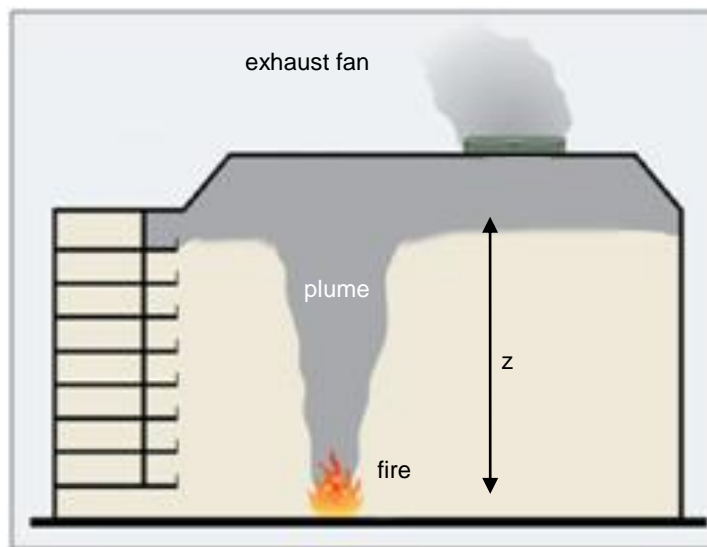


Figura 72: ventilazione meccanica

La portata volumetrica di aspirazione, in condizioni stazionarie, è calcolabile tramite la seguente espressione:

$$\dot{V} = C_{vf} \frac{\dot{m}}{\rho_p}$$

dove:

- $V$  = portata volumetrica in [m<sup>3</sup>/s];
- $m$  = portata massica [kg/s];
- $\rho_p$  = densità dei fumi di estrazione [kg/m<sup>3</sup>];
- $C_{vf} = 60$ .

La portata massica d'aria estratta in [kg/s] è descritta dalla relazione qui sotto:

$$\dot{m} = C_{a1} Q_c^{1/3} z^{5/3} + C_{a9} Q_c$$

dove:

- $Q_c$  = frazione di calore generato per convezione [kW];
- $z$  = altezza dello strato libero dai fumi [m];

- $C_{a1} = 0,071$ ;
- $C_{a9} = 0,0018$ .

La progettazione di un sistema di estrazione di fumi e calore meccanico non consiste solo nel calcolo della portata volumica di aspirazione, ma anche nella determinare il numero di dispositivi da installare. E' provato infatti che l'installazione di un solo dispositivo può costringerlo a lavorare ad alti livelli di efficienza provocando il fenomeno del *Plug-Holing*.

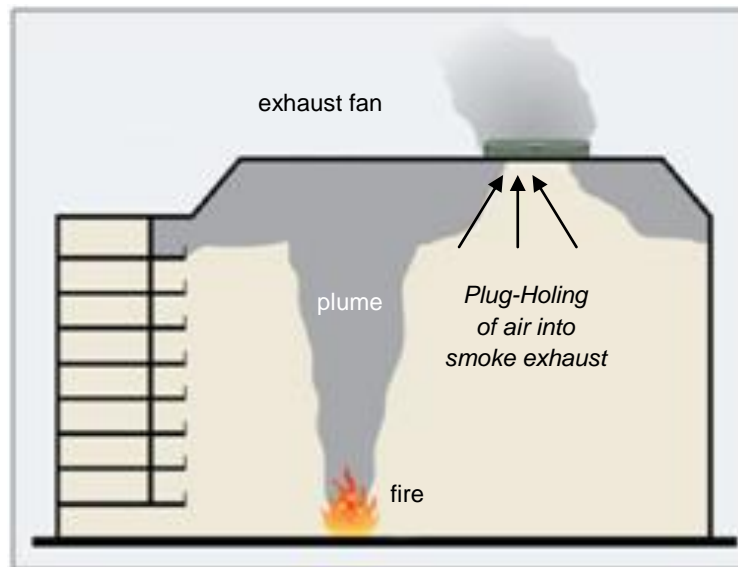


Figura 73: Plug-Holing

Di conseguenza, è necessario verificare il valore massimo di portata massica che può essere estratto da ogni singolo ventilatore, evitando quindi che aria pulita interferisca con l'estrazione dei fumi.

$$m_{max} = C_{ph1} \beta d^{5/2} \left( \frac{T_s - T_0}{T_s} \right)^{1/2} \left( \frac{T_0}{T_s} \right)^{1/2}$$

dove:

- $d$  = profondità strato di fumo sotto il lato inferiore dell'evacuatore [m];
- $\beta$  = fattore dipendente dalla posizione dell'evacuatore;
- $C_{ph1} = 3,13$





## Capitolo 6

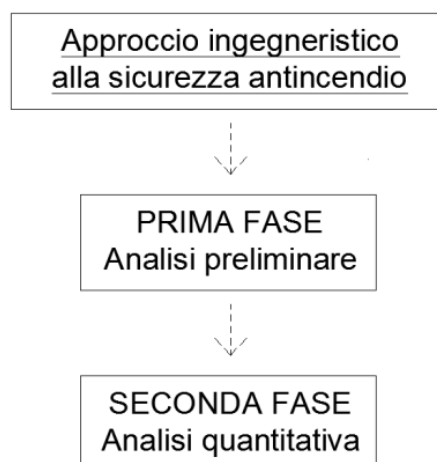
# Modellazione

### 6.1. Approccio procedurale

Per l'applicazione dell'approccio prestazionale e quindi del Fire Safety Engineering agli ambienti ivi studiati è stato necessario stabilire a quali strumenti, normativi e non, fare riferimento.

Come già descritto nel capitolo 2 a livello nazionale non è presente un documento che riporti compiutamente i parametri analitici che risultano necessari per eseguire in modo dettagliato la valutazione del livello di sicurezza antincendio di tali ambienti .

Il D.M. 09/05/2007 "*Directive per l'Attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio*" illustra infatti il solo processo per la valutazione e progettazione nell'ambito dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, ossia l'iter procedurale da svolgere suddividendolo in due parti differenti, ciascuna delle quali deve a sua volta essere approfondita con ulteriori strumenti ricercabili nel panorama internazionale.







### 6.1.1. Analisi preliminare

Nella fase preliminare devono essere formalizzati i passaggi che individuano le condizioni rappresentative del rischio al quale l'attività è esposta in relazione agli obiettivi. Deve quindi essere svolta la redazione degli scenari più caratteristici e rappresentativi del rischio e stabiliti i livelli di prestazione a cui riferirsi in relazione agli obiettivi di sicurezza da perseguire.

1. *DEFINIZIONE DEL PROGETTO*
2. *IDENTIFICAZIONE DEGLI OBIETTIVI DI SICUREZZA*
3. *IDENTIFICAZIONE DEI LIVELLI DI PRESTAZIONE*
4. *INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI DI INCENDIO*

<p>NORMA BS PD 7974 (British Standards)</p>
---

Individuate le caratteristiche principali del progetto si definiscono i capisaldi della sicurezza e cioè gli obiettivi antincendio in relazione alle specifiche esigenze dell'attività in esame. In seguito vengono stabiliti quali siano i parametri che permettono il soddisfacimento degli stessi, ossia i valori numerici di riferimento che possono essere desunti da normative europee e internazionali.

La scelta dello strumento normativo da adottare a tale scopo è ricaduta su quello anglosassone *BS PD 7974 "Application of fire safety engineering principles to design of buildings "* che oltre a riportare le fasi da seguire per realizzare un'analisi prestazionale esaustiva e determinare le strategie più idonee alla protezione antincendio dell'ambiente oggetto di studio, descrive analiticamente il fenomeno e ne stabilisce i livelli prestazionali di riferimento.

Successivamente si procede alla schematizzazione degli eventi che possono verificarsi in relazione alle caratteristiche del focolaio, dell'edificio e degli occupanti sulla base di un'attenta valutazione dei rischi di incendio con particolare attenzione a: combustibile, tasso di crescita del fuoco, RHR, sviluppo dei prodotti della combustione, caratteristiche del locale, condizioni delle persone presenti ecc..

La definizione degli scenari di incendio scaturisce dalla comprensione dei processi chimici e fisici che determinano il verificarsi dell'incendio e la conseguente dinamica di propagazione dei prodotti della combustione, riportati nei Capitoli 4 e 5 della seguente trattazione.



### **Definizione del progetto**

Uno degli aspetti fondamentali dell'ingegneria antincendio è l'importanza di definire in modo oggettivo il contesto di riferimento nel quale la combustione si manifesta. A tale scopo le funzioni, la geometria dell'edificio e le caratteristiche funzionali formano le basi per lo sviluppo di un corretto scenario. Inoltre, oltre alle caratteristiche dell'edificio e dell'utenza, devono essere considerate altre problematiche che potrebbero influenzare le caratteristiche di progetto.

La lista che segue è proposta come esempio ma, necessariamente, non è considerabile esaustiva delle esigenze:

- ubicazione della proprietà;
- destinazione d'uso dell'attività;
- considerazioni ambientali;
- finalità della progettazione antincendio FSE;
- eventuali vincoli progettuali;
- pericoli di incendio connessi con la destinazione d'uso prevista;

### **Identificazione degli obiettivi di sicurezza**

Chiarita quale sia la tipologia di ambiente che si intende studiare è opportuno individuare gli obiettivi di sicurezza da raggiungere che, nello studio di ambienti di elevata altezza, risultano essere generalmente:

- incolumità delle persone;
- mantenere condizioni ambientali tali per cui sia possibile per gli utenti percorrere le vie d'esodo in sicurezza ed evacuare gli ambienti nel tempo previsto;
- permettere al personale di soccorso di compiere le operazioni di salvataggio in sicurezza e localizzare più facilmente la sorgente dell'incendio.

L'incolumità delle persone è prioritaria rispetto alla protezione dei beni e l'analisi deve essere focalizzata sulla loro protezione fino al completo allontanamento dall'ambiente. Questo è dovuto al fatto che gli ambienti studiati sono caratterizzati dalla presenza di un rilevante numero di occupanti che non hanno familiarità con i percorsi e il sistema di vie d'uscita.



Le considerazioni appena espresse, relative agli obiettivi, servono come basi per i capisaldi di riferimento rispetto ai quali è possibile prevedere il comportamento al fuoco dell'ambiente progettato e, pertanto, per soddisfare a livello progettuale questi obiettivi, è necessario che siano quantificati in termini ingegneristici di sicurezza antincendio, attraverso criteri prestazionali specifici.

### **Identificazione dei livelli di prestazione**

I livelli prestazionali sono valori di soglia, intervalli di valori di soglia, o distribuzioni che sono usate per sviluppare e valutare i progetti; essi, in generale, possono essere: temperature dei materiali, dei gas, concentrazioni dei fumi o livelli di visibilità accettabile, flussi di calore radiante ecc..

Non è agevole definire questi valori, poiché le risposte degli esseri umani in termini di tempo di rivelazione, decisione, reazione e movimento possono essere molto variabili. Nonostante ciò, per valutare l'adeguatezza di un sistema di esodo dal punto di vista del rispetto dei criteri di esposizione accettabili per gli esseri umani, si rende necessario adottare dei valori di calcolo adeguatamente documentati.

In un locale con presenza di pubblico risulta quindi necessario assicurare condizioni interne, in caso di incendio, che consentano alle persone di lasciare rapidamente l'edificio ed il criterio di sicurezza è dato dalla evacuazione sicura delle persone e dalla facilitazione dell'intervento dei vigili del fuoco. Questa condizione deve essere raggiunta stabilendo delle soglie di prestazione per salvaguardare non solo la vita degli occupanti ma anche quella dei soccorritori, quando sottoposti agli effetti dell'incendio.

A questo scopo si è scelto di far riferimento alla *BS PD 7974 - 6*<sup>16</sup> che individua i parametri limite per la valutazione delle condizioni di sicurezza antincendio dell'utenza:

- *Altezza dello strato libero dei fumi*
- *Temperatura*
- *Livello di visibilità*
- *Irraggiamento termico*
- *Tempo totale di evacuazione*

---

<sup>16</sup> BS PD 7974 - Part 6: Human factors: Life safety strategies — Occupant evacuation, behaviour and condition.

**1) Altezza dello strato libero dei fumi**

Per quanto riguarda il tempo disponibile per la fuga da un ambiente nel quale siano penetrati e generati i prodotti della combustione è necessario valutare l'effetto dei gas asfissianti e di quelli irritanti.

In questa analisi può essere escluso tra i parametri identificativi degli obiettivi di sicurezza il livello di concentrazione che le specie tossiche raggiungono durante l'incendio; per fare ciò è cautelativo prescrivere che una persona non possa essere esposta, neanche per brevissimi intervalli di tempo all'azione del fumo e dei gas di combustione, imponendo, di conseguenza, un'altezza libera da questi di 2 metri nelle vie di esodo per un tempo sufficiente all'evacuazione degli utenti dall'ambiente.

Prestazione	livello di prestazione	
altezza strato libero dai fumi sopra il piano di calpestio	occupanti	2 m
	soccorritori	1,5 m

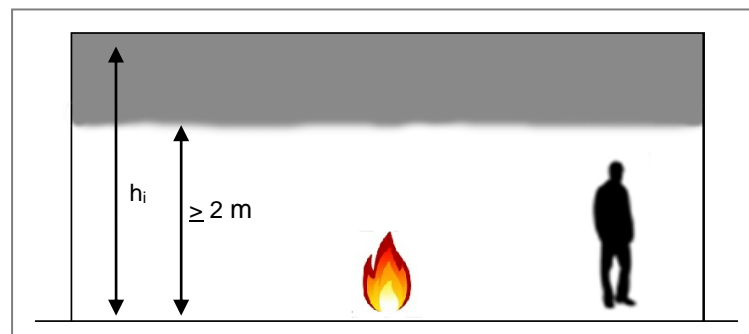


Figura 74: altezza limite dello strato libero dai fumi

Data la possibilità che sia presente l'utenza anche a quote superiori in ambienti non separati da quello centrale, questo parametro deve tener conto del numero di piani e dell'altezza d'interpiano. Stabilita questa altezza pari a  $h_i$ , e z l'altezza dello strato libero dai fumi risulta:

Prestazione	livello di prestazione	
altezza strato libero dai fumi al piano terra	occupanti	$2\text{ m} + h_i$
altezza strato libero dai fumi al primo piano	occupanti	$2\text{ m} + 2h_i$
altezza strato libero dai fumi al secondo piano	occupanti	$2\text{ m} + 3h_i$

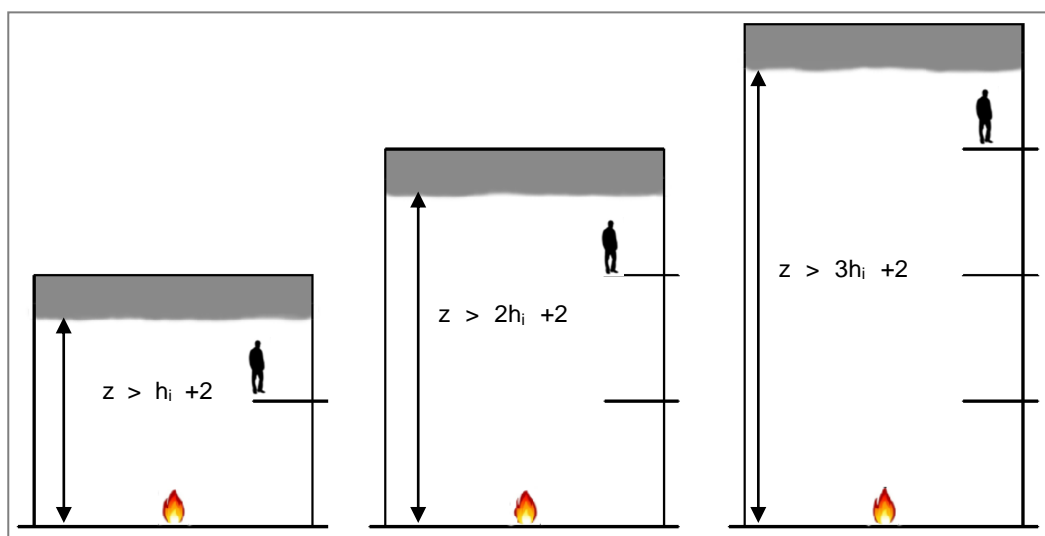


Figura 75: altezza strato libero dai fumi a più livelli

## 2) Temperatura

Per quanto riguarda i livelli di temperatura, il massimo valore ammissibile può variare in funzione degli obiettivi antincendio come, per esempio, la capacità d'esodo degli occupanti, permanenza del personale addetto per il tempo necessario alla messa in sicurezza degli impianti, intervento dei soccorritori ecc..

In ogni caso, per gli occupanti può essere ritenuta ammissibile una esposizione ad una temperatura non superiore a 50-60 °C, mentre per i soccorritori può essere prevista anche una temperatura di 80 °C. La temperatura media dello strato di fumi caldi deve essere, invece, di 200°C per gli occupanti e 250 per i soccorritori.

Prestazione	livello di prestazione	
	temperatura media dello strato di aria libero dai fumi	occupanti
soccorritori		80 °C

La temperatura media dello strato di fumi caldi deve essere, invece, di 200°C per gli occupanti e 250 per i soccorritori.

Prestazione	livello di prestazione	
	temperatura media dello strato di fumi caldi	occupanti
soccorritori		250 °C



### 3) Livello di visibilità

Per il raggiungimento degli obiettivi previsti deve essere determinata la diminuzione della visibilità causata dalla presenza dei fumi che può influire anch'essa sulla capacità degli occupanti di riuscire a raggiungere l'esterno di un edificio in sicurezza. I fattori che peggiorano la visibilità includono l'ammontare di particolato nel campo visivo e l'effetto fisiologico sull'occhio.

La visibilità ammessa lungo le vie di esodo deve essere definita per un certo periodo temporale e relativamente alla quota cui sono posizionate le segnalazioni che indicano il percorso d'esodo. Per gli occupanti può essere in genere ritenuta ammissibile una visibilità di 10 metri per tutto il tempo necessario al completo esodo data l'ampiezza dei locali, mentre per i soccorritori è ammesso anche un valore inferiore di 5 m.

Prestazione	livello di prestazione	
livello di visibilità lungo le vie d'esodo	occupanti	10 m
	soccorritori	5 m

### 4) Irraggiamento termico

Un ulteriore valore che viene considerato per valutare che il percorso d'esodo sia sicuro è quello relativo all'irraggiamento che deve intendersi risultante dal contributo della sorgente di incendio, dei prodotti della combustione (fumi, gas) e delle strutture. Gli effetti termici sono infatti di fondamentale importanza poiché l'esposizione prolungata o ad alti valori di radiazione termica dovuta alle fiamme e ai gas caldi può provocare danni fisici, mentre il calore radiante può causare anche l'innescio dei vestiti.

Come limite può essere preso a riferimento il valore non superiore a 2,5 kW/mq, per un limitato tempo di esposizione degli occupanti. Per i soccorritori il limite viene alzato a 3 kW/mq.

Prestazione	livello di prestazione	
irraggiamento termico	occupanti	2,5 kW/mq
	soccorritori	3 kW/mq

### 5) Tempo totale di evacuazione

Al fine del rispetto degli obiettivi è necessario valutare il tempo totale di evacuazione la cui determinazione viene affrontata con studi specifici, come proposto da norma di letteratura tecnica anglosassone che stabilisce che per la valutazione della sicurezza antincendio debba essere verificato il rispetto della seguente disequazione:

$$RSET < ASET$$

- RSET (*required safety egress time*) = l'intervallo di tempo in cui una persona si porta in un luogo al riparo da qualunque effetto dell'incendio (richiesto)
- ASET (*available safety egress time*). = tempo consentito dall'incendio per garantire le condizioni di sopravvivenza (disponibile).

La differenza tra ASET ed RSET rappresenta il margine di sicurezza della valutazione che viene scelto dal progettista sceglie e giustificato in relazione alle ipotesi assunte ed all'incertezza risultante dei valori calcolati dei tempi di ASET.

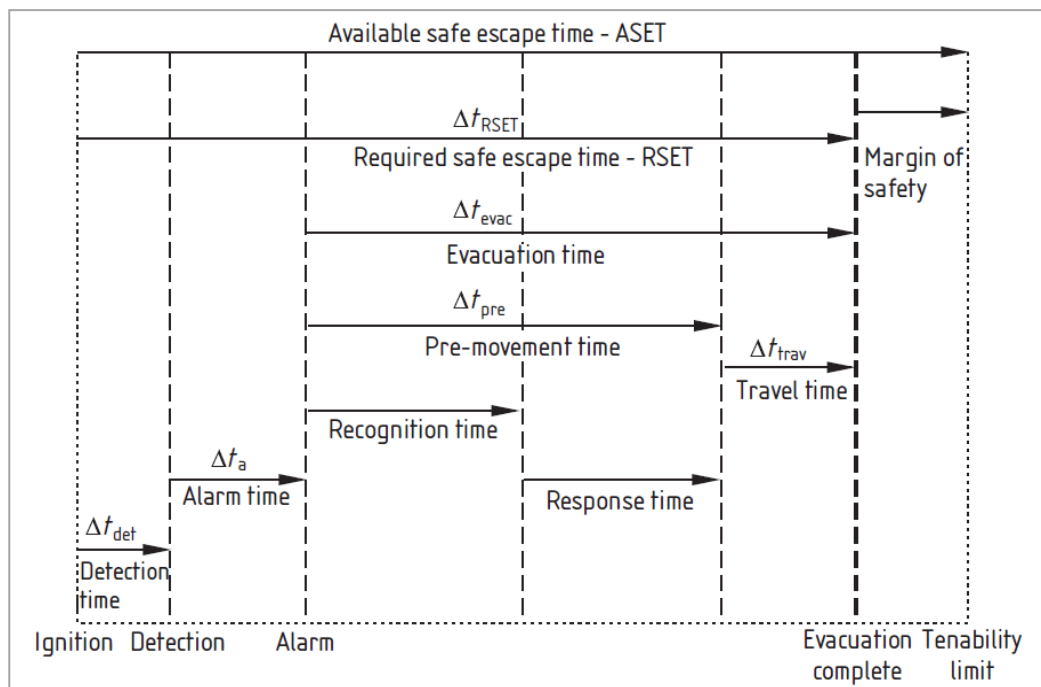


Figura 76: schema dei processi coinvolti nel tempo di esodo rispetto al tempo disponibile per la fuga sicura

Il calcolo del tempo di esodo, RSET, deve essere affrontato tenendo conto di numerosi aspetti, come il comportamento umano, il tipo e dimensione dell'edificio, la geometria dell'ambiente ecc.



$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav})$$

Se si valuta un ambiente di altezza elevata, che ha, per esempio, la funzione di atrio di ingresso o di ambiente libero su cui si affacciano più attività, le tempistiche saranno dedotte attraverso una logica diversa rispetto ad ambienti di altra natura. Se, infatti, l'utenza non ha familiarità con l'edificio è più probabile che questa utilizzi, per allontanarsi in caso di incendio, il percorso utilizzato per l'ingresso o si diriga comunque verso questa tipologia di ambienti, più ampi e spaziosi. La densità di persone potrebbe quindi aumentare influenzando negativamente la velocità d'esodo ed un ulteriore elemento da valutare sarebbe che la presenza di altre persone, di solito, può avere un effetto di inibizione sull'avvio dell'esodo quando gli indizi sono incerti, anche se aumenta la possibilità che l'allarme sia avvertito.

Di conseguenza, queste considerazioni dimostrano come la tipologia di popolazione ospitata all'interno dell'ambiente, influenza il comportamento, la risposta nei confronti dell'incendio e i tempi d'esodo.

L'utenza quindi, essendo l'ambiente studiato riconducibile ad attività come centri commerciali, uffici, musei, esposizioni ecc., si ipotizza che sia descrivibile tramite i seguenti aspetti:

- le persone tenderanno ad evacuare verso l'ambiente centrale e l'affollamento complessivo sarà elevato;
- l'utenza occupa anche i piani più alti e vi è la possibilità di evacuare attraverso connettivi verticali di connessione tra i piani;
- la tipologia degli occupanti è costituita, nel peggiore dei casi, da persone che non hanno familiarità con il sistema di vie d'esodo;
- gli occupanti sono in stato di veglia.

I dati da utilizzare per il calcolo del RSET in base al metodo che stabilisce la norma BS 7974 - 6, presuppongono la catalogazione dell'ambiente in funzione delle caratteristiche degli occupanti e dell'edificio:

Category	Occupant alertness	Occupant familiarity	Occupant density	Enclousures/ complexity
B1	Awake	Unfamiliar	High	One of few
B2	Awake	Unfamiliar	High	One with focal point





Per la determinazione del tempo di pre-movement,  $\Delta t_{pre}$ , devono anche essere ipotizzati i seguenti parametri:

Livello di efficacia del sistema di gestione della sicurezza	
M1 (alto)	<i>the normal occupants (staff or residents) should be trained to a high level of fire safety management with good fire prevention and maintenance practice, floor wardens, a well-developed emergency plan and regular drills.</i>
M2 (medio)	<i>similar to level 1, but have a lower staff ratio and floor wardens may not always be present. There may be no independent audit.</i>
M3 (basso)	<i>representing standard facilities with basic minimum fire safety management. There is no independent audit</i>

Livello di efficacia del sistema di allarme	
A1 (alto)	<i>automatic detection throughout the building, activating an immediate general alarm to occupants of all affected parts of the building</i>
A2 (medio)	<i>automatic detection throughout the building providing a pre-alarm to management or security, with a manually activated general warning system sounding throughout affected occupied areas and a general alarm after a fixed delay if the pre-alarm is not cancelled.</i>
A3 (basso)	<i>local automatic detection and alarm only near the location of the fire or no automatic detection, with a manually activated general warning system sounding throughout all affected occupied areas.</i>

Scenario category and modifier	First occupants $\Delta t_{pre}$ (1st %)	Occupants distribution $\Delta t_{pre}$ (99th %)
M1 A1-A2	0,5 min	2 min
M2 A1-A2	1 min	3 min
M3 A1-A3	>15 min	>15 min

Per determinare il tempo di percorrenza dei percorsi,  $\Delta t_{trav}$ , è necessario stabilire la velocità a cui procedono le persone in fase d'esodo. La norma stabilisce che per densità inferiori a 0,55 pers/m<sup>2</sup> la velocità di ogni individuo non è influenzata dalla presenza di altri utenti mentre si utilizza la formula seguente per densità maggiori di 0,55 pers/m<sup>2</sup>:



$$v = k - akD \left[ \frac{m}{s} \right]$$

dove  $a$  assume un valore pari a 0,266;  $D$  indica la densità del flusso di persone; mentre  $k$  è il fattore di velocità che tiene conto delle caratteristiche del percorso, come riportato nella tabella:

Componenti di esodo		$k \left[ \frac{m}{s} \right]$
Corridoi, rampe, passaggi, porte		2,40
Alzata [mm]	Pedata [mm]	
190	254	1,00
172	279	1,08
165	305	1,16
165	330	1,23

L'aumento della densità di persone rallenta la velocità del gruppo ma innalza il numero di persone che complessivamente si stanno muovendo e, sulla base di questo aspetto, si è notato come, al valore di densità pari a 1,9 persone per metro quadrato, si ha l'efficienza di flusso maggiore. Di conseguenza il tempo di percorrenza totale previsto è calcolabile come segue:

$$\Delta t_{\text{trav}} = \frac{\text{distanza}_{\text{orizz}}}{\text{velocità}_{\text{orizz}}} + \frac{\text{distanza}_{\text{vert}}}{\text{velocità}_{\text{vert}}}$$

Negli ambienti come quelli studiati verranno installati rilevatori di fumo lineari automatici, poiché più adatti per la sorveglianza di locali alti e grandi volumi rispetto a quelli puntiformi<sup>17</sup>. Il tempo di rilevamento,  $\Delta t_{det}$ , e di allarme,  $\Delta t_a$ , da parte di questi sistemi viene dedotto dalla letteratura di circa 60 sec.

<sup>17</sup> vedi capitolo 3, paragrafo 3.4 "Strategie per il controllo dell'incendio e dei fumi".



### **Individuazione degli scenari d'incendio**

Come previsto dall'iter procedurale descritto in precedenza, vengono definiti gli scenari di incendio, intesi quali proiezioni dei possibili eventi di incendio.

Nel processo di individuazione degli scenari, devono essere identificati gli elementi di rischio che caratterizzano l'ambiente e valutati gli incendi realisticamente ipotizzabili nelle condizioni di esercizio previste, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio, la salvaguardia degli occupanti e la sicurezza delle squadre di soccorso.

Vengono quindi riportati i dati relativi alla situazione pre-incendio più plausibile e ipotizzato come caso esemplificativo un volume il più rappresentativo della geometria complessa che si intende analizzare. Queste informazioni influenzano i modi nei quali può svilupparsi e diffondersi l'incendio e sulla sua potenziale possibilità di causare danno agli occupanti. Durante la definizione di questi valori, vengono riportate esplicite e motivate assunzioni derivanti da osservazioni già illustrate nei capitoli precedenti.

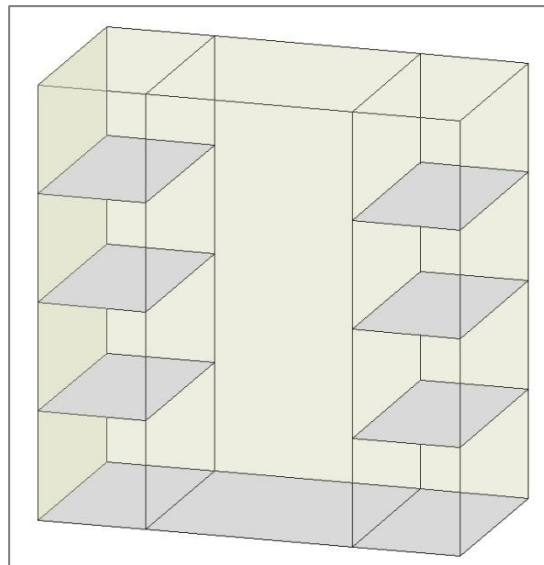
Per ogni singolo scenario devono essere valutati i seguenti aspetti:

- rischio d'incendio, ossia la probabilità o la frequenza con cui si verifica un determinato evento, e l'entità del danno che l'incendio produce;
- caratteristiche dell'edificio (geometria del locale, condizioni di ventilazione interna ed esterna, stato delle porte e delle finestre, ecc.);
- caratteristiche dell'innescò (tasso di crescita, potenza massima raggiunta, posizione ecc.);

Per ricercare quale sia la strategia antincendio più idonea da adottare per la sicurezza antincendio degli utenti è necessario valutare le conseguenze dovute ad un differente posizionamento della sorgente d'incendio. A livello analitico e sperimentale è stato descritto il fenomeno nel capitolo 5 per comprenderne la dinamica e prevederne gli effetti. Tuttavia solo grazie alla modellazione è possibile valutare come negli ambienti studiati questo evento venga influenzato dall'adozione di diverse strategie .

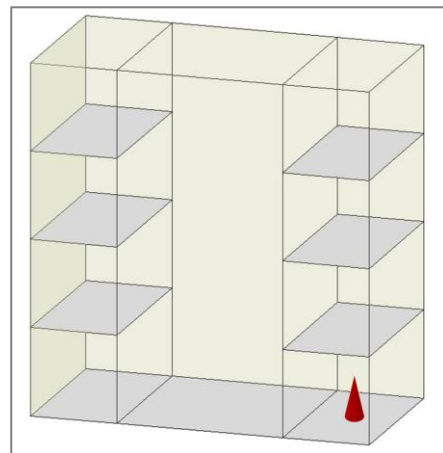
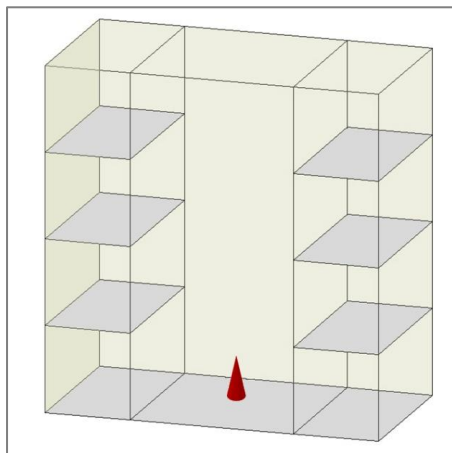
Si riporta nel seguito un esempio semplificato degli scenari che potrebbero essere ipotizzati per un ambiente come quelli oggetto di studio.

**Modello di riferimento**



**Scenario 1**

**Scenario 2**

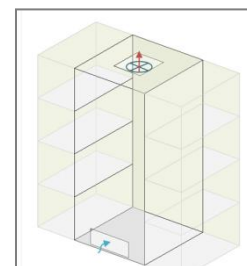
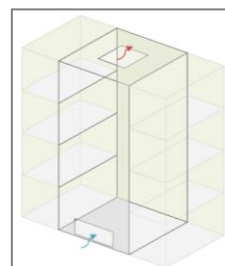
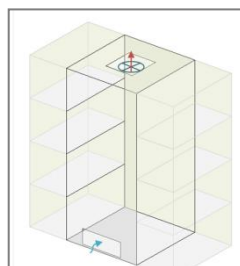
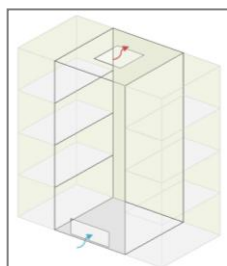


**1A**  
**Ventilazione**  
**naturale**

**1B**  
**Ventilazione**  
**Forzata**

**2A**  
**Ventilazione**  
**naturale**

**2B**  
**Ventilazione**  
**Forzata**





Interessante per questi ambienti è la verifica delle conseguenze causate in un incendio in un ambiente confinato confrontate con quelle derivanti da un incendio avviatosi nell'ambiente centrale. In questo primo scenario, per esempio, si analizza il caso in cui il compartimento sia interessato da un incendio situato al centro del locale più alto, caratterizzato quindi da una dinamica di propagazione dei fumi e dei gas identificata con *axysymmetric plume*<sup>18</sup>, ossia non influenzata dalla vicinanza di pareti.

Secondariamente il focolare d'innescò dell'incendio viene posizionato nell'ambiente al piano terra per cui si ha come fenomeno di propagazione dei prodotti della combustione lo *spill plume*. Questo è il caso più pericoloso, poiché è massimizzato il fenomeno di *air entrainment* nel *plume* con conseguente elevato tasso di produzione di fumi e gas.<sup>19</sup>

---

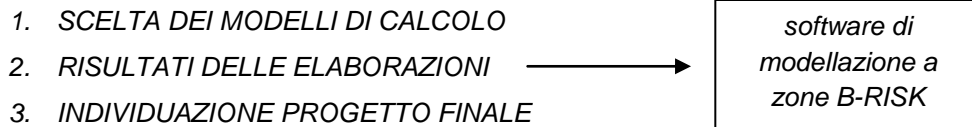
<sup>18</sup> vedi capitolo 5, paragrafo 5.2 "*Axysymmetric plume*".

<sup>19</sup> vedi capitolo 5, paragrafo 5.3 "*Spill plume*".



### 6.1.2. Analisi quantitativa

Nella seconda fase, quella quantitativa, si passa al calcolo ed alle analisi che permettono di definire il progetto e determinare le strategie di protezione più idonee.



Di conseguenza, sviluppata un'ipotesi progettuale, il passo successivo consiste nella scelta dei modelli di calcolo da applicare al caso in esame per la valutazione dello sviluppo dell'incendio e delle sue possibili conseguenze. I modelli di calcolo che le attuali conoscenze tecniche di settore mettono a disposizione per la valutazione specifica della propagazione e produzione di fumi e gas sono modelli a zone per ambienti confinati (Cfast, Ozone, Branz Fire, B-Risk) o modelli degli incendi di campo (FDS, CFX, Fluent).

In questa trattazione si è scelto di utilizzare come codice di calcolo il programma di modellazione B-RISK che propone un calcolo a due zone, ovvero è in grado di determinare le condizioni che si determinano nell'ambiente suddividendo il compartimento in due aree macroscopiche all'interno delle quali si riscontrano grandezze termodinamiche e concentrazioni di specie chimiche uniformi.

I modelli di simulazione di campo invece dividono l'ambiente in un elevato numero d'elementi tridimensionali e, all'interno di essi, risolvono le equazioni differenziali di conservazione, tenendo in conto anche le variazioni che in ogni elemento intervengono a seguito delle modificazioni negli elementi limitrofi. Si tratta di calcoli agli elementi finiti, certamente più complessi dei modelli a zone ed in grado di fornire risultati di maggior dettaglio, ma attualmente orientati prevalentemente all'attività di ricerca perchè molto complessi.

La decisione di impiegare un modellatore a due zone piuttosto che quello di campo è derivata dalla necessità di analizzare il movimento dei fumi e dei gas caldi di combustione all'interno di edifici con geometria anche complessa.

### Scelta del modello di calcolo

La normativa italiana non affronta in modo organico la problematica dei fumi in caso di incendio; esiste invece a livello internazionale un alto interesse di studio in questo campo. Questo ha portato allo sviluppo di diversi programmi di calcolo tendenti a simulare e verificare la propagazione delle fiamme, la diffusione dei fumi, l'efficienza dei sistemi di spegnimento automatici, l'intervento dei sistemi di rilevazione ed allarme.

A questo scopo, l'University of Canterbury e BRANZ hanno lavorato insieme per sviluppare il programma di simulazione del tipo "zone models" chiamato B-RISK. Il programma trova i suoi fondamenti sull'analisi o giudizi basati sulla chimica, sulla fisica e correlazioni sviluppate da prove sperimentali per prevedere le conseguenze di un incendio. In particolare, utilizza i principi di conservazione di massa e energia per predire fenomeni associati ad un preciso incendio nella fase di pre-flashover, ossia quando le temperature all'interno dell'ambiente non sono uniformi.

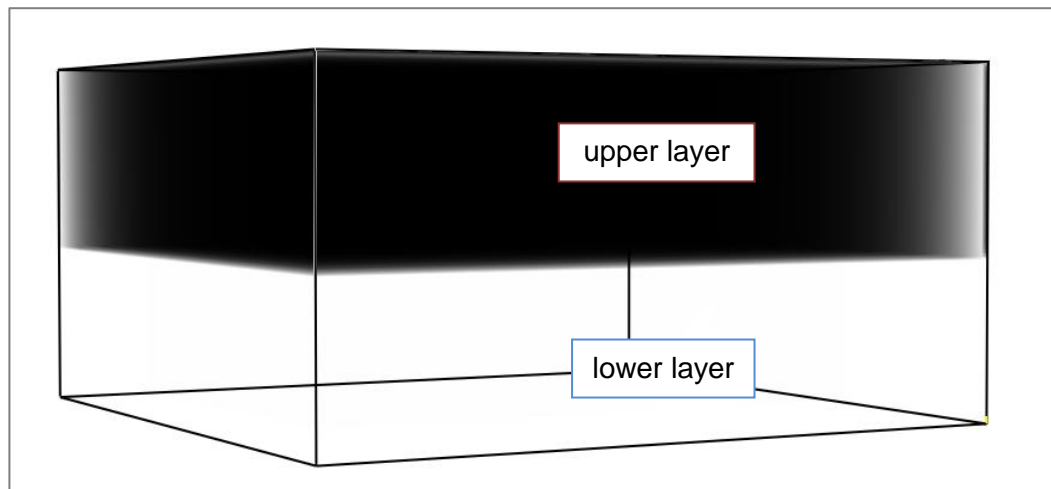


Figura 77: modello a due zone

Si tratta, quindi, di un modellatore del tipo in grado di simulare lo sviluppo di un incendio in ambienti confinati risolvendo separatamente le equazioni differenziali di conservazione dell'energia termica, della massa e della quantità di moto in due diverse zone ipotizzando che l'ambiente in cui progredisce la combustione sia diviso in regioni distinte (zone) all'interno delle quali la temperatura e le altre grandezze di interesse siano spazialmente uniformi ma variabili nel tempo; pertanto, si assume che vi sarà ad una determinata altezza dal pavimento la presenza di un'interfaccia con una variazione a gradino della temperatura in corrispondenza di esse.



I locali in cui si sviluppa l'incendio vengono appunto divisi in due zone:

- zona superiore interessata dai fumi, ossia strato di gas caldi che si forma a soffitto *upper layer*,
- zona inferiore non inquinata, ossia strato di aria fredda presente nella parte bassa del locale *lower layer*.

A causa della differenza di densità fra i gas caldi a soffitto e l'aria fredda sottostante non vi è una significativa miscelazione e, quindi, nella parte inferiore del locale può ritenersi che l'atmosfera non sia contaminata dal fumo e dai gas di combustione. In questo modello quindi vi è una curva temperatura-tempo per ogni zona in cui il locale viene suddiviso.

La semplificazione introdotta suddividendo in zone l'ambiente interessato da un incendio è lecita soltanto fino a quando lo sviluppo dell'incendio non sia ancora prossimo al flashover e, quindi, ben si presta allo studio ivi condotto. Nel modello a zone è infatti possibile analizzare il movimento del fumo e dei gas caldi di combustione nel tempo all'interno di edifici aventi anche struttura complessa e, pertanto, è possibile valutare come cambiano nel tempo all'interno dei vari ambienti le condizioni di sicurezza degli occupanti attraverso l'evoluzione verso il pavimento dello spessore dello strato caldo.

Le varie zone in cui vengono divisi i locali sono interessate da scambi di flussi di massa e energia che avvengono anche, nel caso di geometrie più complesse, tra il locale di origine dell'incendio e l'esterno o i locali confinanti.

Le equazioni riferite ai flussi di scambio di massa dell'*upper layer* e del *lower layer* utilizzate sono :

$$\frac{dM_{upper}}{dt} = \dot{m}_p + \dot{m}_f - \dot{m}_d - \dot{m}_o + \dot{m}_w$$

$$\frac{dM_{lower}}{dt} = \dot{m}_i + \dot{m}_d - \dot{m}_p - \dot{m}_w$$



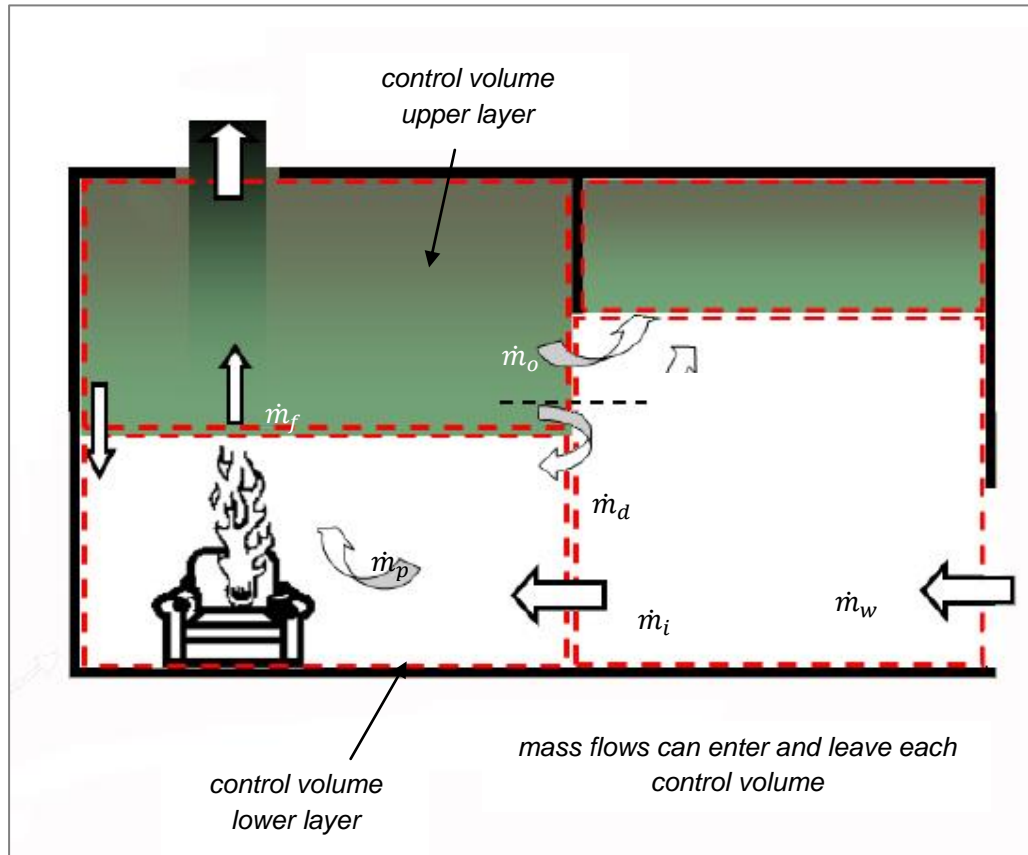


Figura 78: flussi di massa scambiati tra volumi di controllo nel modello a due zone

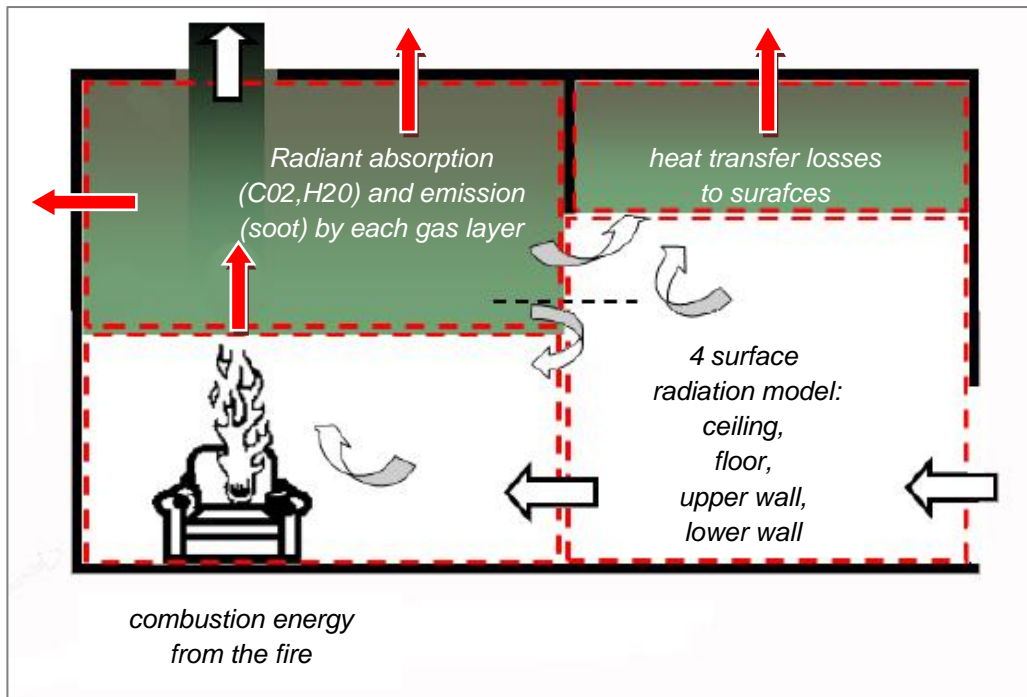


Figura 79: flussi di energia scambiati tra volumi di controllo nel modello a due zone

Il modello a zone a partire da questa semplificazione calcola automaticamente i flussi di massa sulla base delle formule riportate nel capitolo precedente. Tale modellazione è quindi in grado di gestire sistemi complessi composti da più ambienti, con più fuochi presenti anche in posizioni diverse, valutando la composizione chimica dell'aria, considerando le aperture presenti, l'effetto di aperture a soffitto, a parete e a pavimento, la presenza di sistemi di spegnimento automatico e di rivelazione e l'azione di sistemi di ventilazione meccanica.

Queste assunzioni semplificano anche il fenomeno legato alla presenza di aperture all'interno dell'ambiente. Come esplicitato nel capitolo precedente, in corrispondenza dell'apertura si ha una variazione di pressione: nella parte inferiore la pressione interna è più bassa rispetto a quella dell'ambiente esterno e spinge l'aria ad entrare nel locale; mentre in prossimità della parte superiore essa è più elevata e costringe i gas e i fumi a fluire verso l'esterno. I bilanci delle varie grandezze fanno sì che questo andamento sia rettilineo e lineare e che si formi un piano neutro in corrispondenza del quale la pressione all'interno del locale uguaglia quella esterna. La posizione dell'asse neutro viene determinata mediante un bilancio tra le masse.

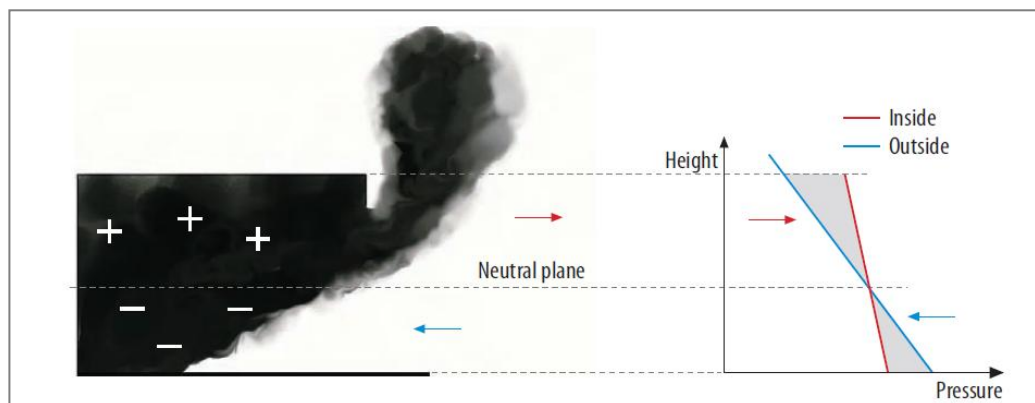


Figura 80: asse neutro e andamento delle pressioni

### Immissione degli Input

In primo luogo vengono inseriti nel programma i dati relativi agli ambienti che si intendono modellare i quali vengono rappresentati attraverso parallelepipedi dei quali l'utente stabilisce larghezza, lunghezza e altezza. Per semplificare il modello, essendo questo simmetrico la geometria modellata con il programma di calcolo è la seguente:

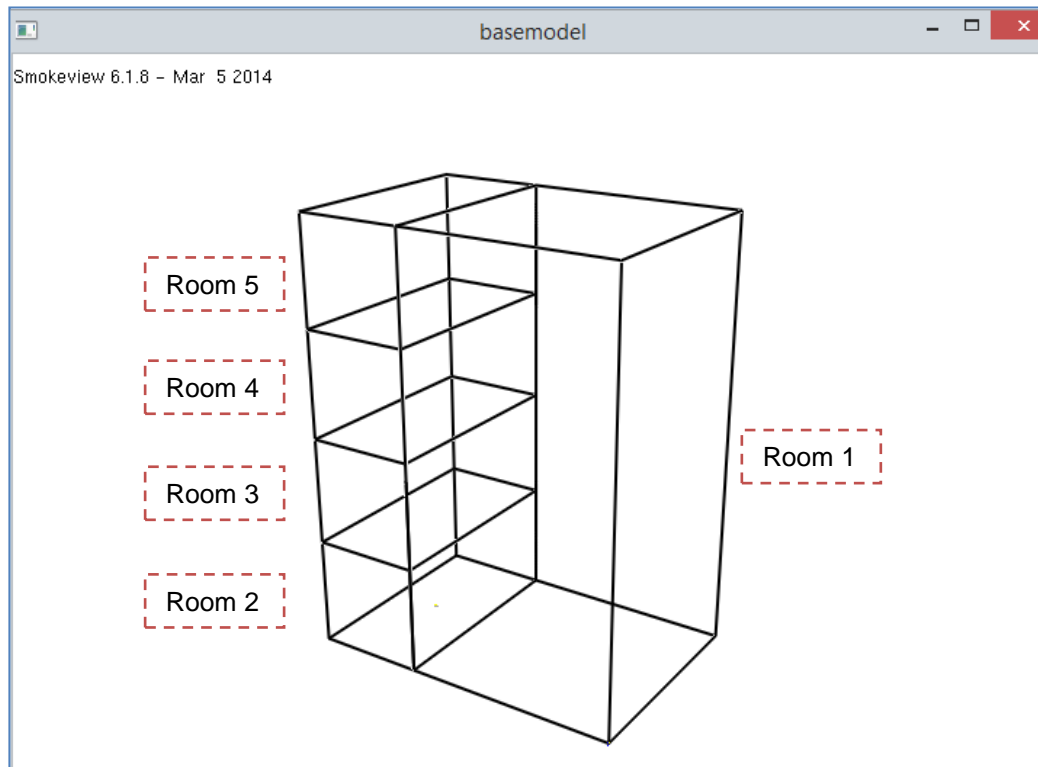


Figura 81: modello elaborato con B-RISK

Il programma successivamente permette di individuare la stanza nella quale l'incendio avrà origine e definirne la posizione specifica, l'altezza da terra della sorgente, il tasso di crescita e il valore del RHR massimo.

Il programma permette di creare delle aperture tali da mettere in comunicazione i vari ambienti. A seconda di dove vengono previste, in accordo con quanto descritto analiticamente in precedenza, B-risk consente di assegnare diverse caratteristiche alle aperture di comunicazione tra ambienti a seconda della propagazione dei prodotti della combustione distinguendo quindi diverse tipologie di aperture.

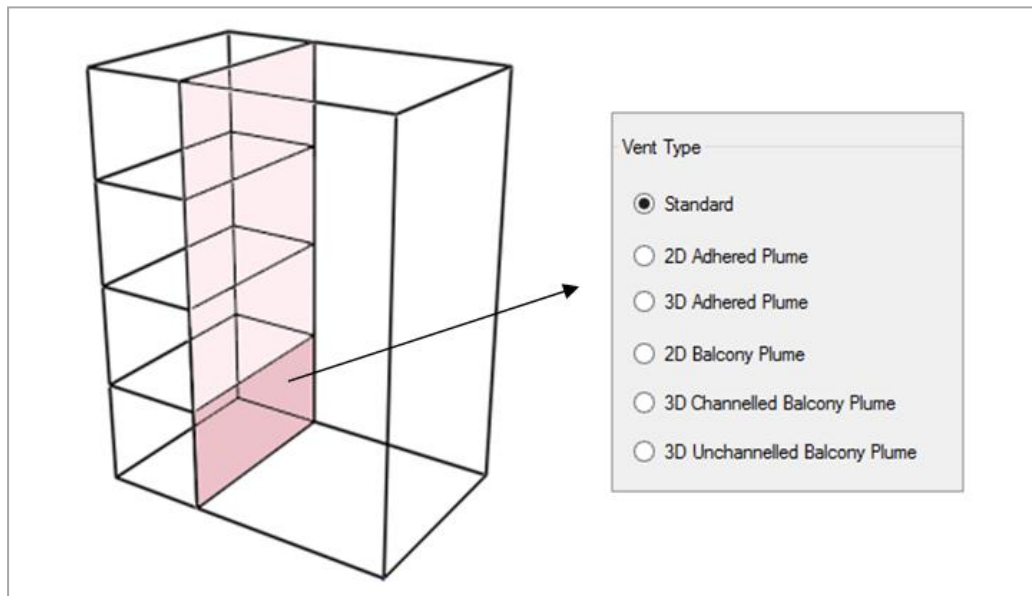


Figura 82: definizione delle aperture tra ambienti

Con la tipologia Standard si intende una normale apertura. Quello dello *spill plume* viene differenziato in più categorie poiché il flusso totale dei fumi coinvolti dipendono non solo dalla dimensione delle aperture e dalle caratteristiche dei fumi prodotti, ma anche dalla presenza e posizione di eventuali barriere (*downstand*) e dalle caratteristiche del bordo (*spill edge*).

Inoltre, è possibile stabilire se i fumi aderiranno alle pareti sopra l'angolo (*Adhered spill plume*) o si discosteranno da esse (*Balcony spill plume*) e se il flusso prima di entrare nell'ambiente più elevato viene incanalato attraverso ulteriori aggetti (*channeled*) oppure è libero di immettersi (*unchanneled*).

Per quanto riguarda i sistemi di gestione e controllo dei prodotti della combustione in questo ambiente consistono in aperture a parete o a soffitto o sistemi forzati di evacuazione di fumo e calore. La severità e la capacità di controllare l'incendio che si sviluppa dipende dalla loro quantità e posizione.

Con la stessa procedura utilizzata per determinare le aperture tra i locali è possibile posizionare le aperture all'interno delle pareti orizzontali, definire altezza, larghezza, la superficie di appartenenza, l'offset dall'origine e altre caratteristiche come il tempo di apertura e il coefficiente di scambio. In questo caso la tipologia è quella *Standard*, poiché collegano l'ambiente interno con l'esterno.

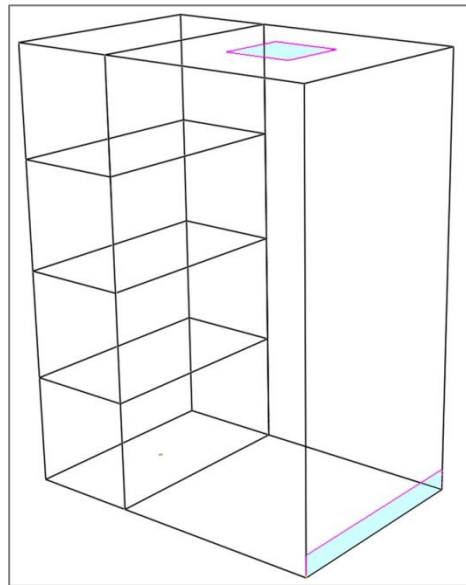


Figura 83: definizione delle strategie di ventilazione

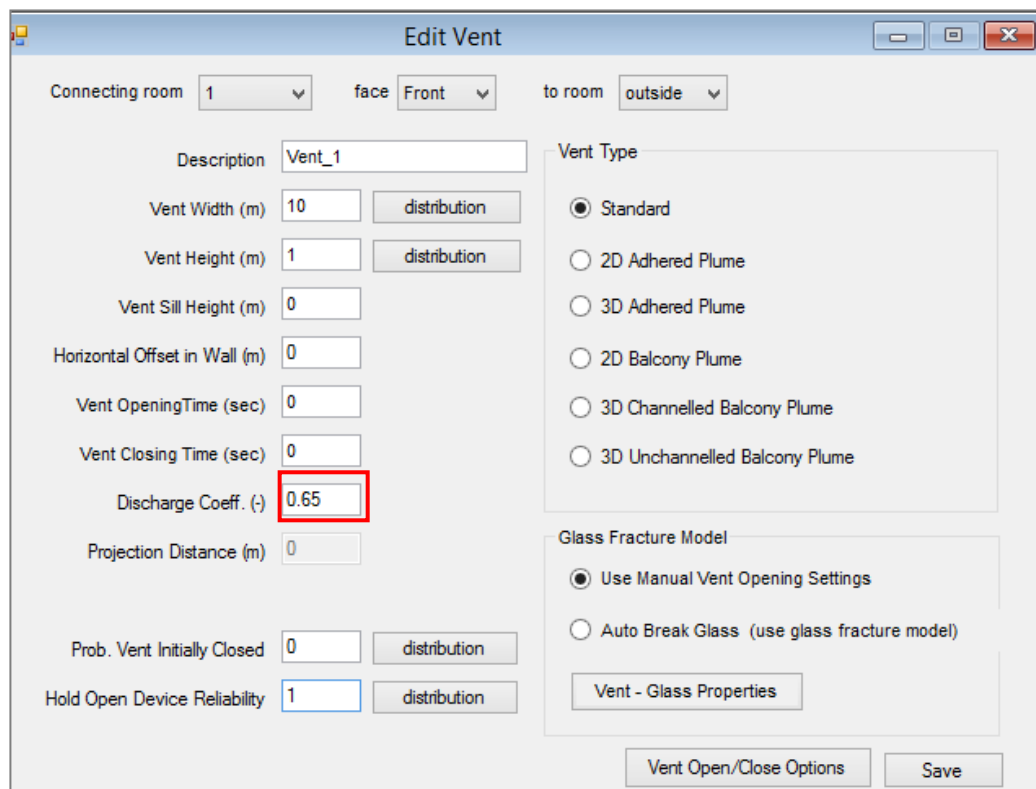


Figura 84: definizione aperture verticali

Il programma considera, come consigliato dalla norma, un coefficiente di scambio di 0,65, riferito a porte o finestre, per considerare l'effettivo flusso di aria fresca entrante dalle aperture verticali.

Allo stesso modo il programma consente di prevedere aperture in copertura che vengono posizionate al centro del soffitto del locale che viene scelto essere quello predisposto all'evacuazione dei fumi .

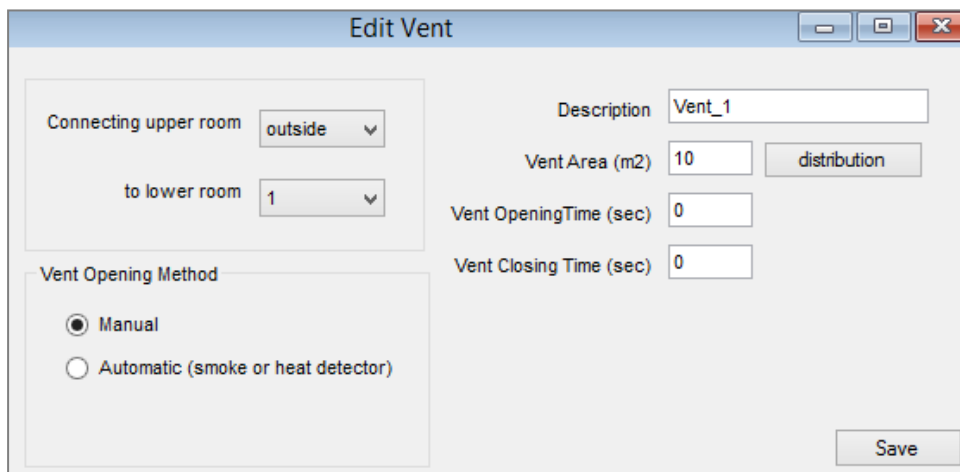


Figura 85: definizione aperture a soffitto

Nel caso in cui si decida di inserire un sistema di evacuazione di fumo e calore forzato alle dimensioni, superficie di appartenenza, coefficiente di scambio deve essere aggiunta la portata volumetrica.

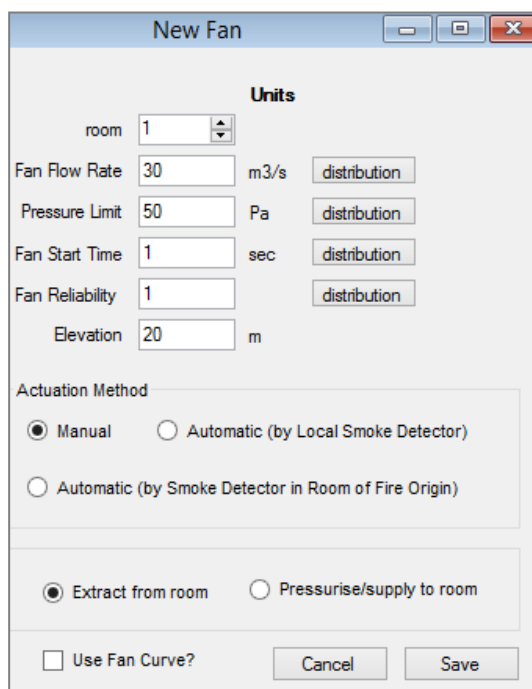


Figura 86: definizione degli EFFC

**Dimensionamento ENFC e EFFC secondo norma UNI 9494 - 1/2**

Per un dimensionamento preliminare delle aperture del caso studio e per stabilire un valore di partenza a cui fare riferimento è necessario seguire quanto riportato nella norma UNI 9494 Part1 e Part2, unico strumento normativo italiano in merito al dimensionamento di ENFC e EFFC.

La Superficie Utile Totale di Apertura (SUT) di evacuazione e quella di afflusso (SCT) dipendono dalla scelta del gruppo di funzionamento definito in funzione della potenza termica totale dell'incendio e la durata convenzionale di sviluppo (tempo di allarme sommato al tempo di intervento). Devono essere determinati il tempo di allarme ( $t_1$ ) e il tempo di intervento ( $t_2$ ) tra l'allarme e l'inizio delle operazioni di estinzione che, per generalmente si assume pari a 10 minuti, valutando i valori medi dei tempi di intervento dei VVF forniti dalla normativa stessa. Si avrà quindi:

$$t = t_1 + t_2$$

Il gruppo di dimensionamento che più si avvicina alle condizioni incendio ipotizzate è:

Parametro		Unità di misura	Gruppo di dimensionamento				
			1	2	3	4	5
Dimensione convenzionale	Superficie	m <sup>2</sup>	5	10	20	40	80
	Lato	m	2,236	3,162	4,472	6,325	8,944
	Diametro	m	2,523	3,568	5,046	7,136	10,093
	Perimetro	m	7,927	11,210	15,853	22,420	31,7
Potenza termica totale		kW	1 500	3 000	6 000	12 000	24 000
Potenza convettiva		kW	1 200	2 400	4 800	9 600	19 200

$t$ (min) Vedere punto 6.6.2	Gruppo di dimensionamento (GD)		
	Velocità di propagazione dell'incendio		
	bassa	media <sup>a)</sup>	alta
≤5	1	2	3
≤10	2	3	4
≤15	3	4	5
≤20 <sup>a)</sup>	4	5 <sup>a)</sup>	5 <sup>b)</sup>
>20	5	5 <sup>b)</sup>	5 <sup>b)</sup>

In funzione di questo dato, dell'altezza del locale e dell'altezza libera da fumo viene determinata la SUT. (esempio per un'altezza del locale di 12 metri)



Altezza del locale <sup>a)</sup> (m)	Altezza dello strato di fumo (m)	Altezza dello strato libero da fumo (m)	SUT(m <sup>2</sup> )				
			Gruppo di dimensionamento				
<i>h</i>	<i>z</i>	<i>y</i>	1	2	3	4	5
12,0 <sup>b)</sup>	9,5	2,5	1,1	1,4	1,9	2,5	3,5
	9,0	3,0	1,6	2,1	2,7	3,5	4,8
	8,5	3,5	2,0	2,9	3,7	4,8	6,4
	8,0	4,0	2,5	3,7	4,9	6,3	8,3
	7,5	4,5	3,0	4,5	6,4	8,1	10,5
	7,0	5,0	3,5	5,3	7,8	10,3	13,2
	6,5	5,5	4,0	6,2	9,2	12,8	16,4
	6,0	6,0	4,9	7,1	10,7	15,7	20,2
	5,5	6,5	6,1	8,0	12,3	18,4	24,6
	5,0	7,0	7,6	8,9	14,1	21,3	29,9
	4,5	7,5	9,5	10,4	15,6	24,5	36,1
	4,0	8,0	11,7	12,7	17,8	28,1	42,0
	3,5	8,5	14,4	15,6	20,0	32,1	48,7
	3,0	9,0	17,8	19,2	22,3	36,8	56,7
	2,5	9,5	22,2	23,8	26,4	42,3	66,4
	2,0	10,0	28,1	30,0	33,0	49,2	78,8
1,5	10,5	36,5	38,8	42,5	58,7	95,4	
1,0	11,0	49,9	53,0	57,8	73,7	123,0	

La normativa, interessandosi maggiormente all'estensione del compartimento longitudinalmente e non verticalmente, fornisce dati fino ad un'altezza del locale di 12 metri, ma per quelli più elevati consiglia al progettista di utilizzare i valori relativi ai locali alti 12 metri considerando ogni volta l'altezza dello strato libero da fumo.

Per quanto riguarda l'apertura di afflusso, SCT, la sua superficie viene definita in riferimento a quella di apertura SUT attraverso un coefficiente correttivo.

$$R_s = \frac{SCT}{SUT} = 1,5$$

Inoltre la sezione di passaggio d'aria deve essere corretta con il fattore  $c_z$ , in funzione del tipo di apertura:

Tipo di apertura	Angolo di apertura	Fattore di correzione $c_z$
Porte o portoni, finestre incernierate su un lato verticale	$\geq 90^\circ$	0,65
Gelosie apribili	$90^\circ$	0,65
Finestre incernierate su un lato orizzontale	$\geq 90^\circ$	0,65
	Da $60^\circ$ a $90^\circ$	0,5
	Da $45^\circ$ a $60^\circ$	0,4
	Da $30^\circ$ a $45^\circ$	0,3

In alcune situazioni risulta necessario utilizzare una ventilazione meccanica e il dimensionamento preliminare segue lo stesso iter di quelli naturali; una volta scelto il





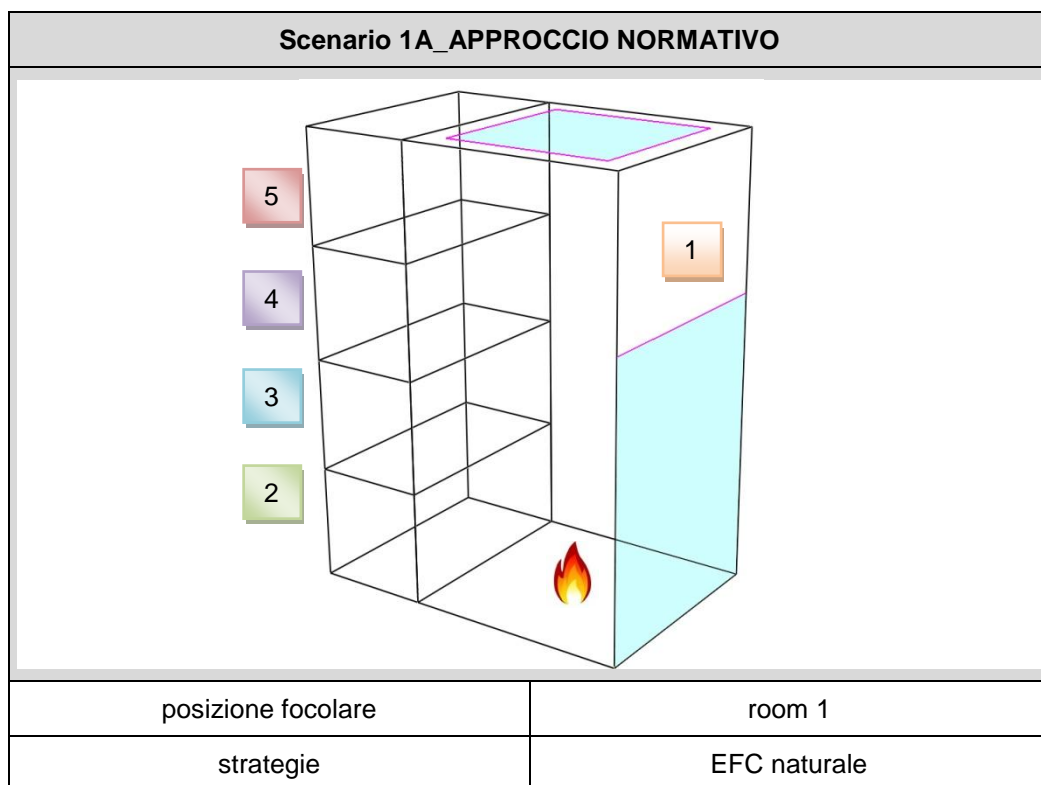
gruppo di dimensionamento e l'altezza libera dal fumo, una tabella fornisce il valore della portata volumetrica di aspirazione in  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Riga	Altezza dello strato libero da fumo (m)	Gruppo di dimensionamento				
		1	2	3	4	5
1	2,5	29 000	46 000	75 000	128 000	223 000 <sup>1)</sup>
2	3	34 000	55 000	88 000	145 000	248 000
3	4	43 000	72 000	115 000	184 000	303 000
4	5	50 000	85 000	143 000	229 000	366 000
5	6	59 000	96 000	165 000	276 000	436 000
6	7	73 000	105 000	183 000	311 000	512 000
7	8	88 000	121 000	197 000	342 000	580 000
8	9	105 000	143 000	206 000	368 000	633 000
9	10	123 000	166 000	231 000	387 000	681 000

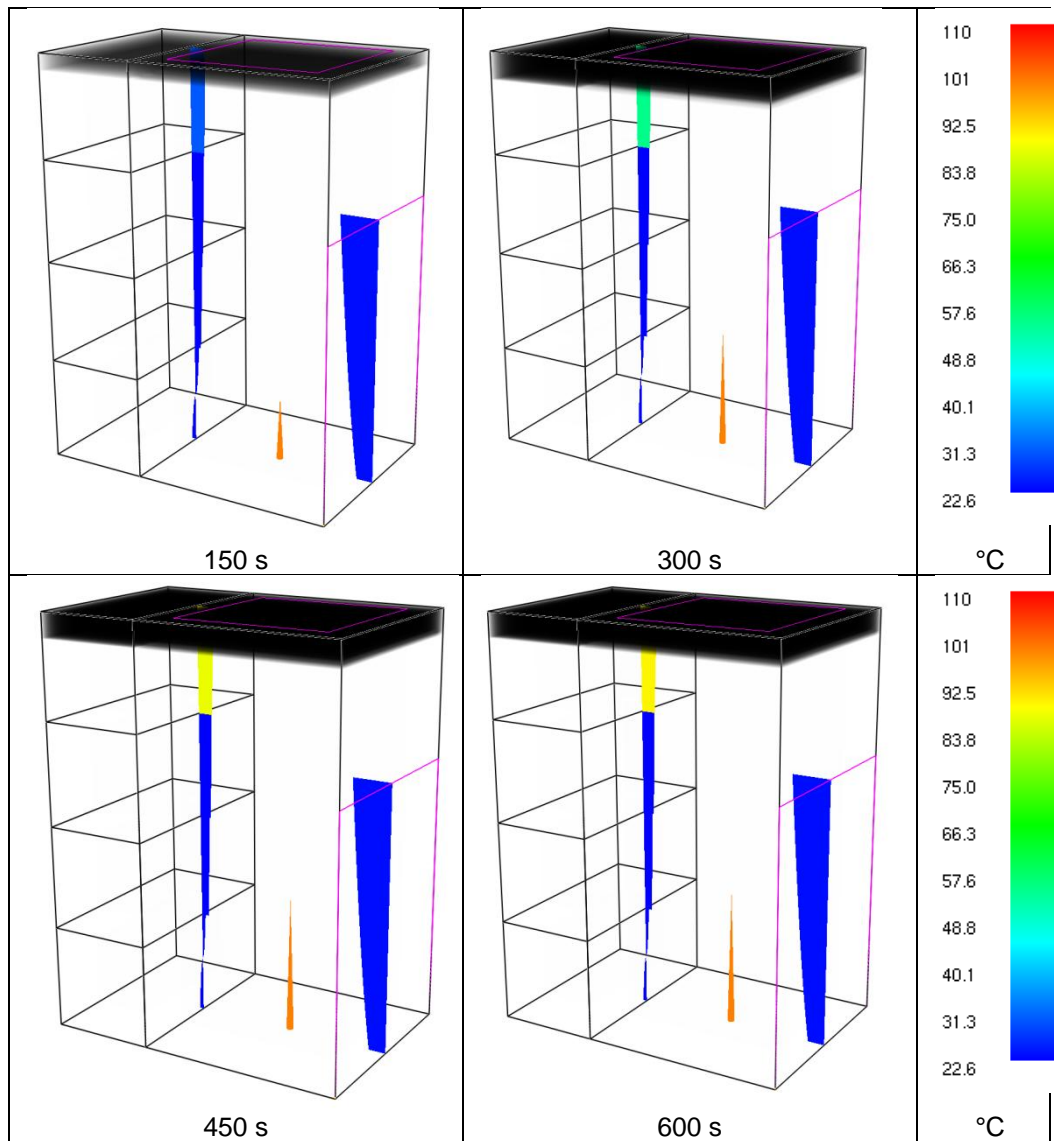
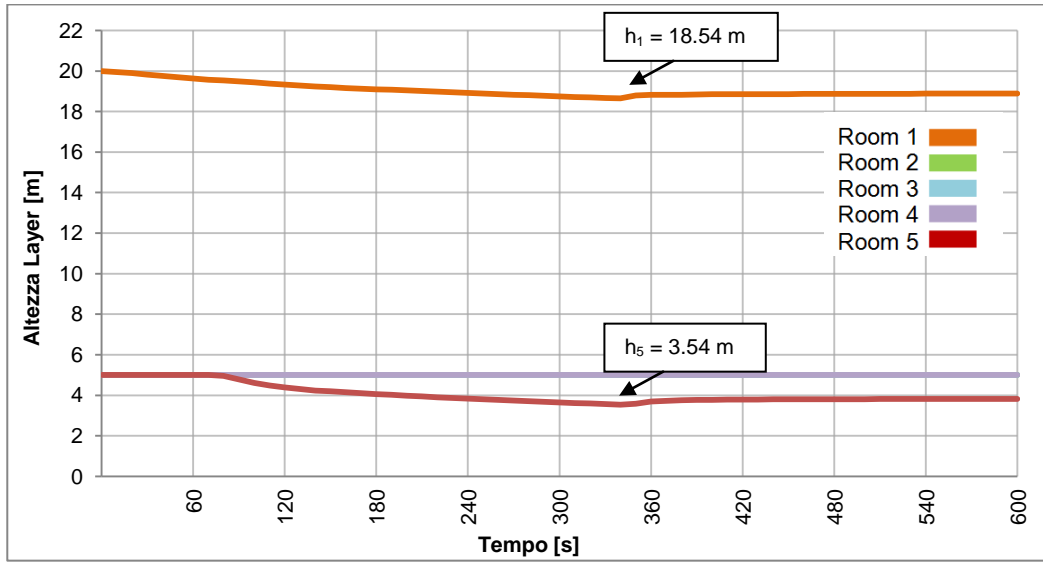
Per quanto riguarda invece le aperture di afflusso, la minima superficie efficace AEF si calcola dividendo la portata aspirata dal compartimento a soffitto calcolata in  $\text{m}^3/\text{s}$  per la velocità massima ammissibile per l'ingresso dell'aria di ricambio, pari a 1,5 - 2 m/s. Come nel caso precedentemente la superficie geometrica di passaggio di aria deve essere corretta con il fattore  $c_z$ , in funzione del tipo di apertura, sempre posto pari a 0,65.

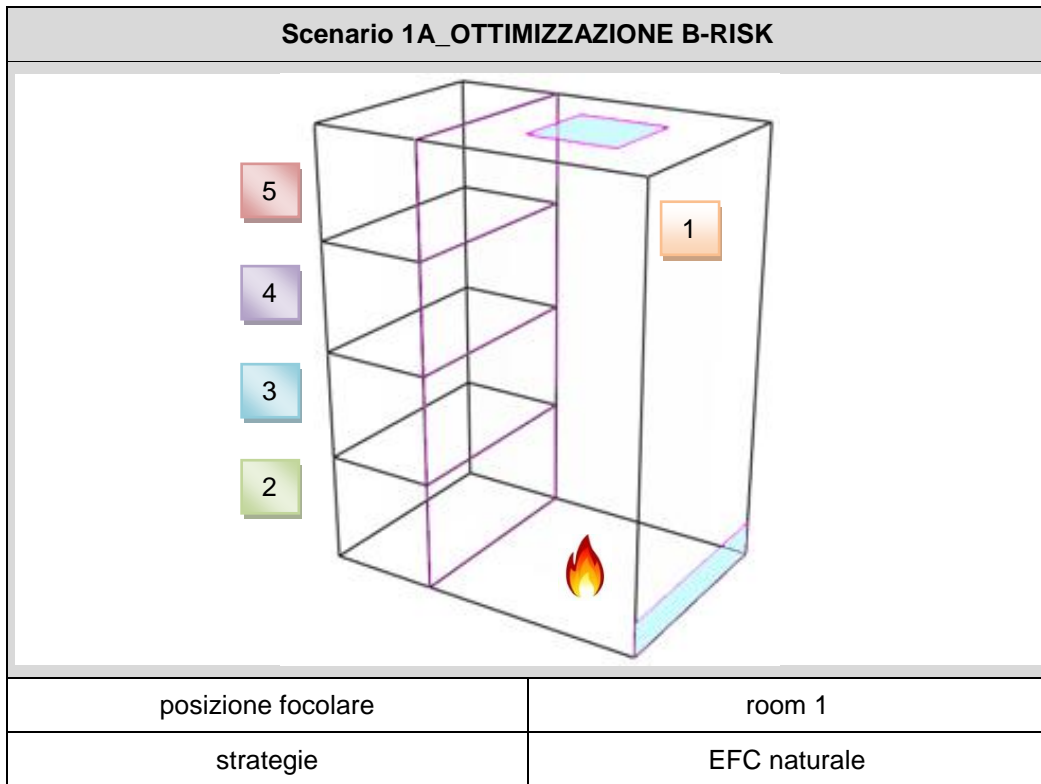
### Risultati delle elaborazioni

Si propone un esempio pratico di come sia possibile ottimizzare l'intervento su un modello semplificato di un ambiente di elevata altezza in cui si sceglie come strategia antincendio un sistema di evacuazione naturale. Si analizzano entrambi gli scenari sopra descritti in cui la posizione del focolare viene variata, mentre le caratteristiche dell'incendio vengono mantenute costanti. Inoltre è possibile in questo modo verificare come il fenomeno dello *spill plume* costituisca lo scenario peggiore e debba essere necessariamente tenuto in considerazione.

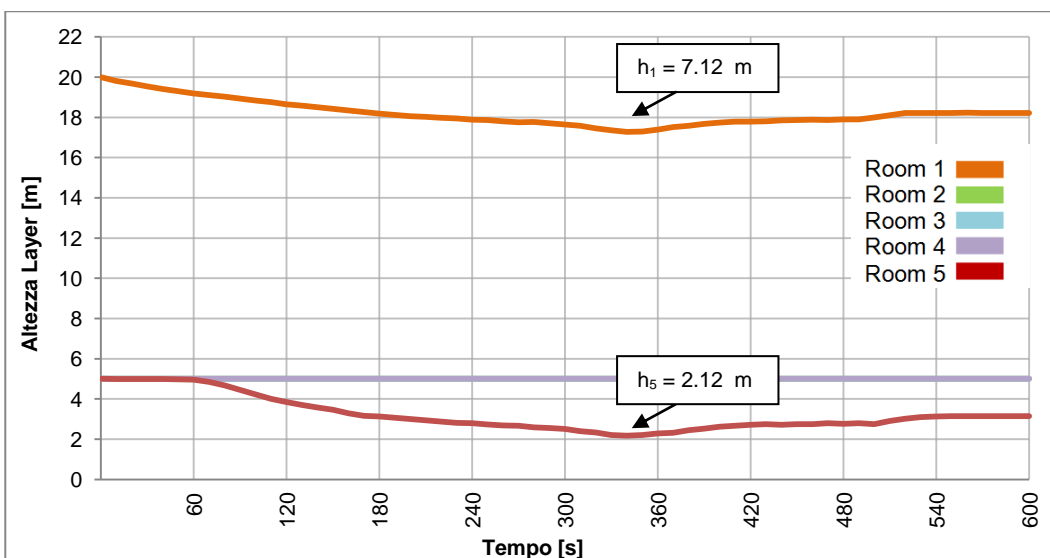


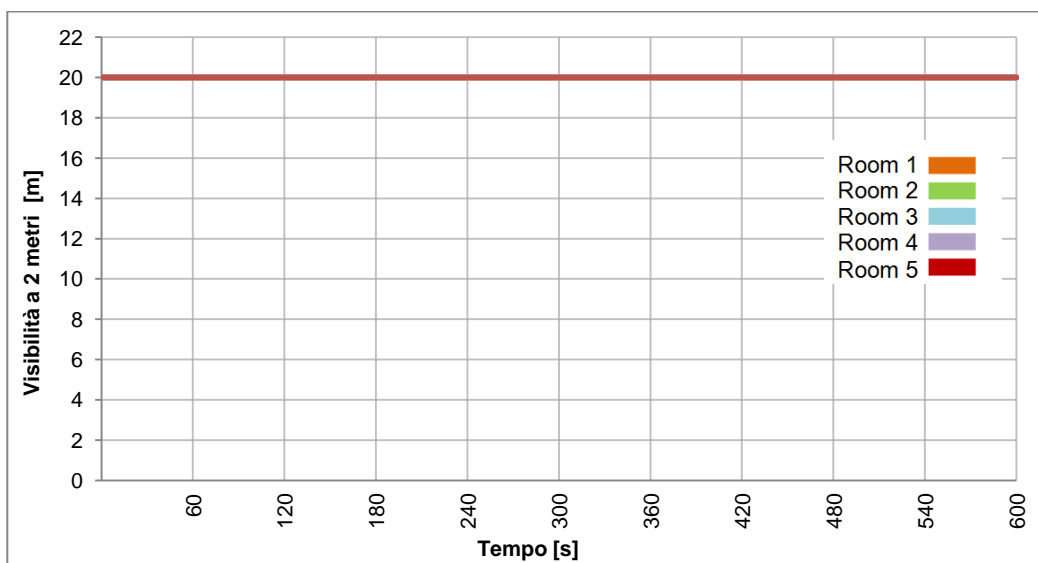
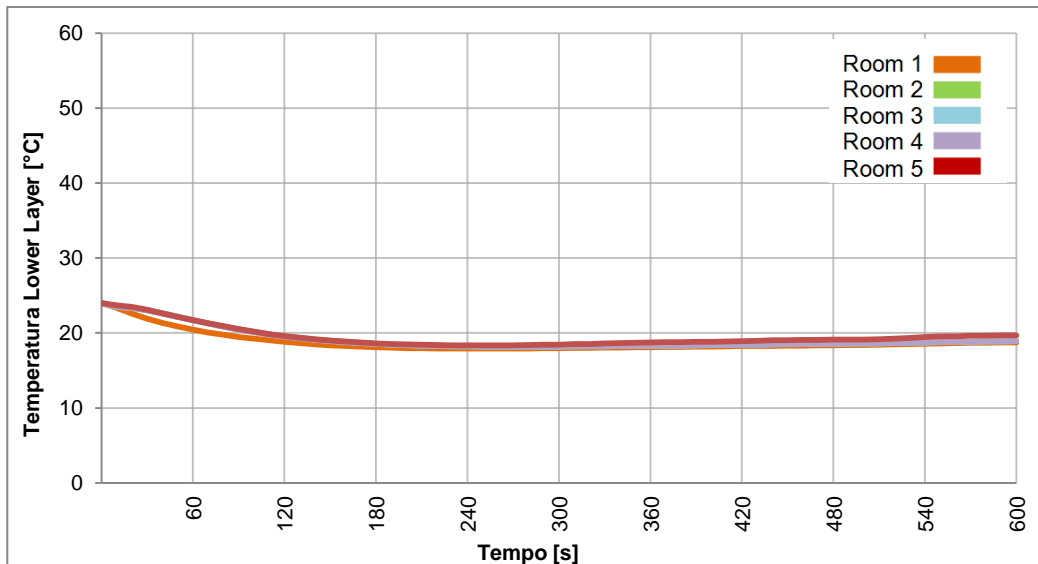
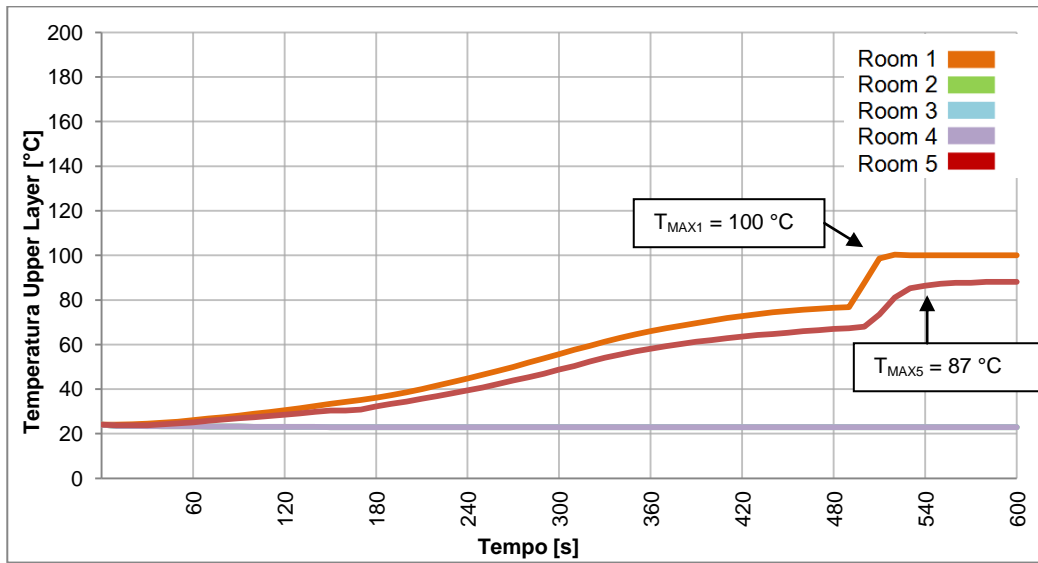
Caratteristiche sistema		
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>	
posizione	room 1	
superficie out	$A_{OUT} = 57,8 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 133,38 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$

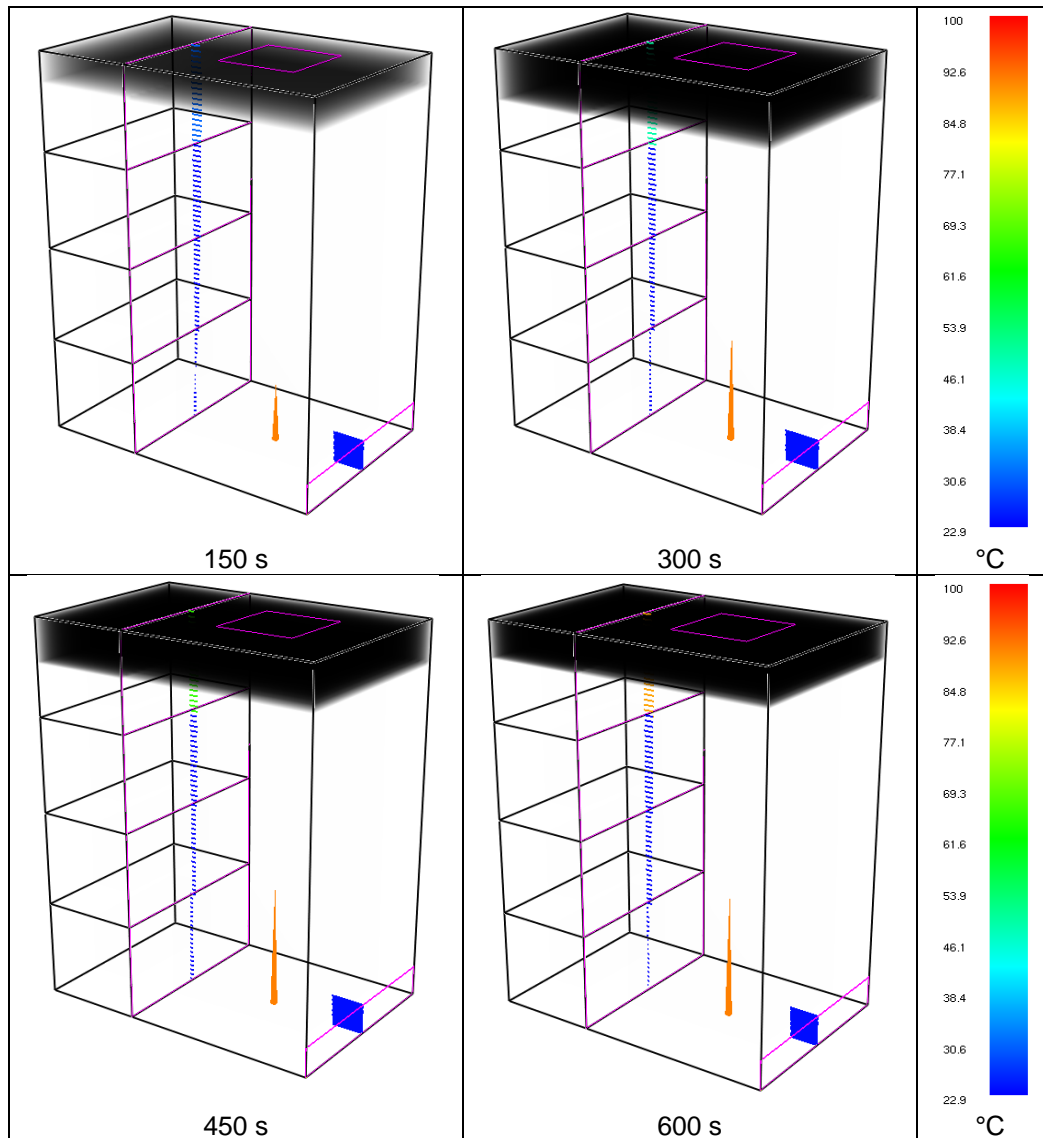
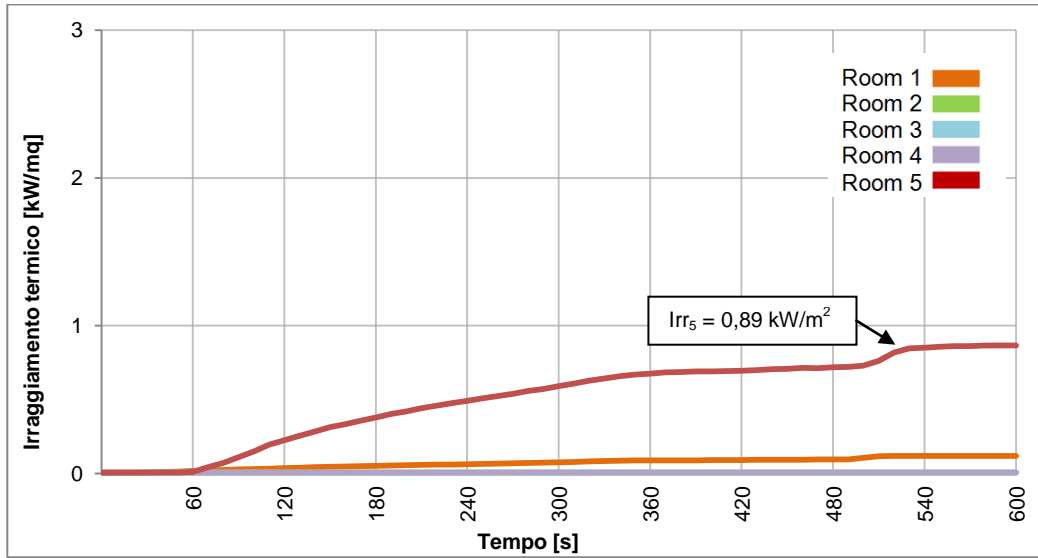


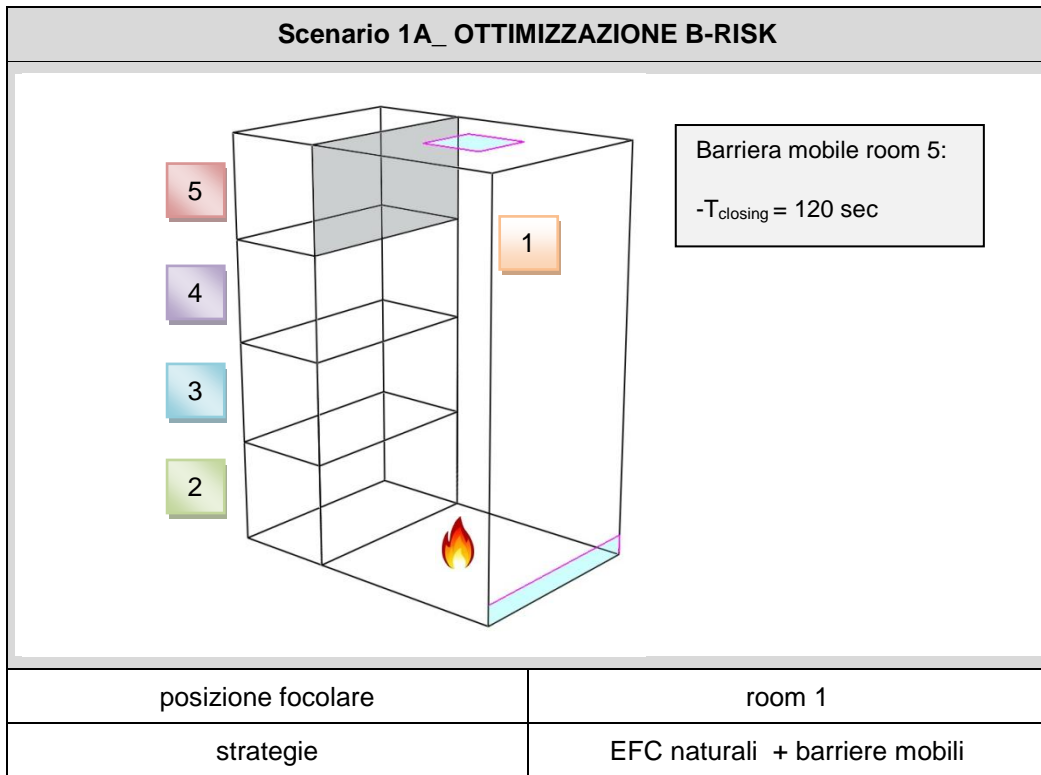


Caratteristiche sistema		
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>	
posizione	room 1	
superficie out	$A_{OUT} = 16 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 24,6 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$

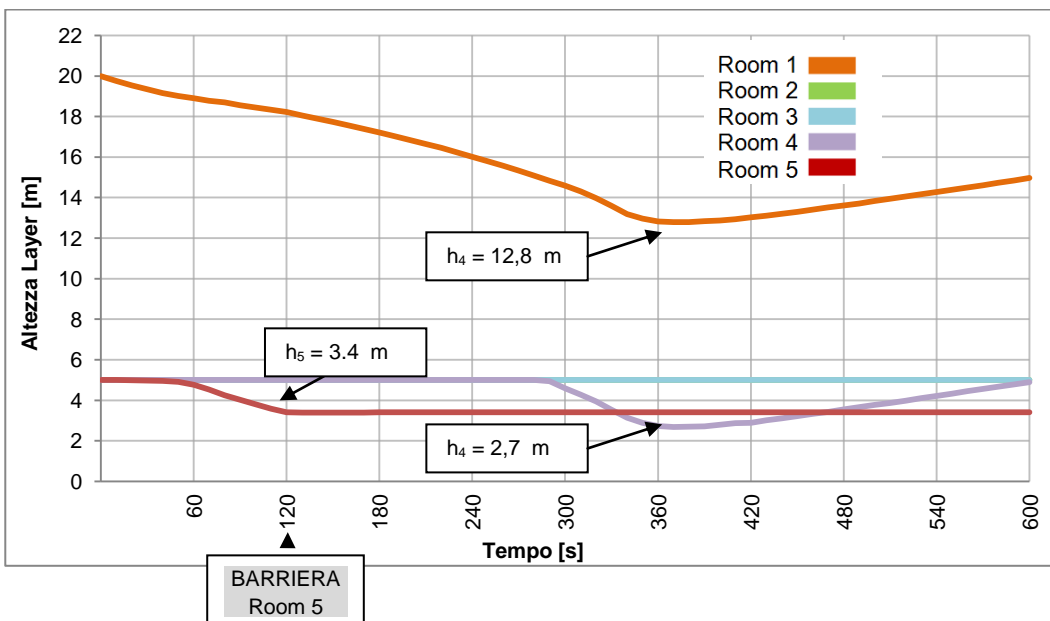


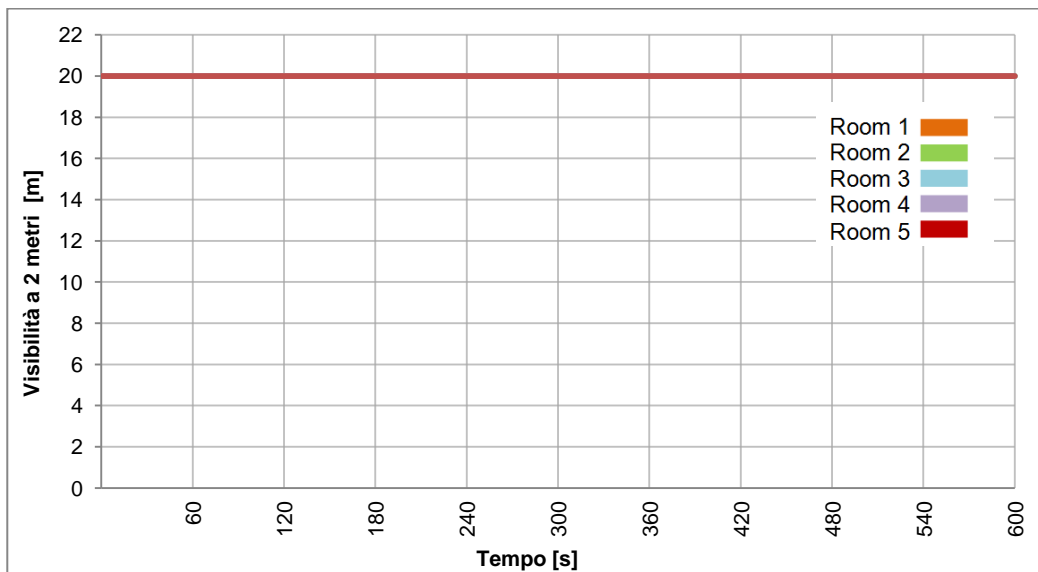
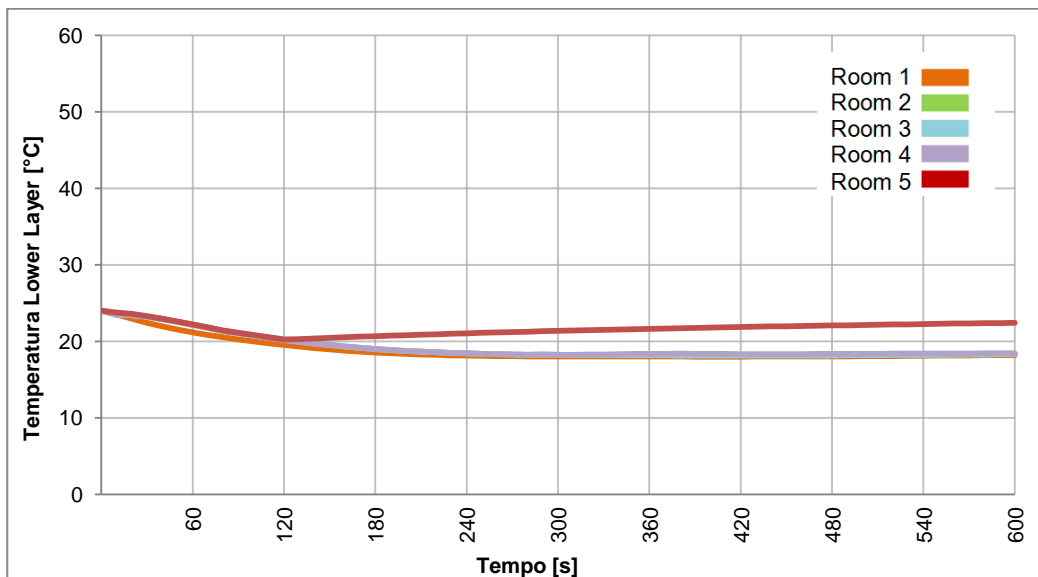
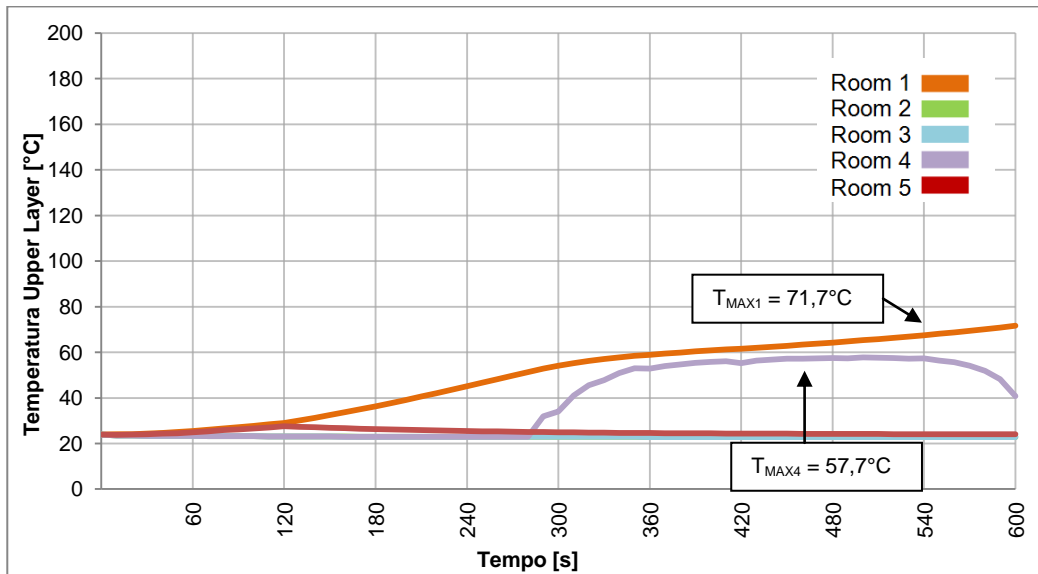




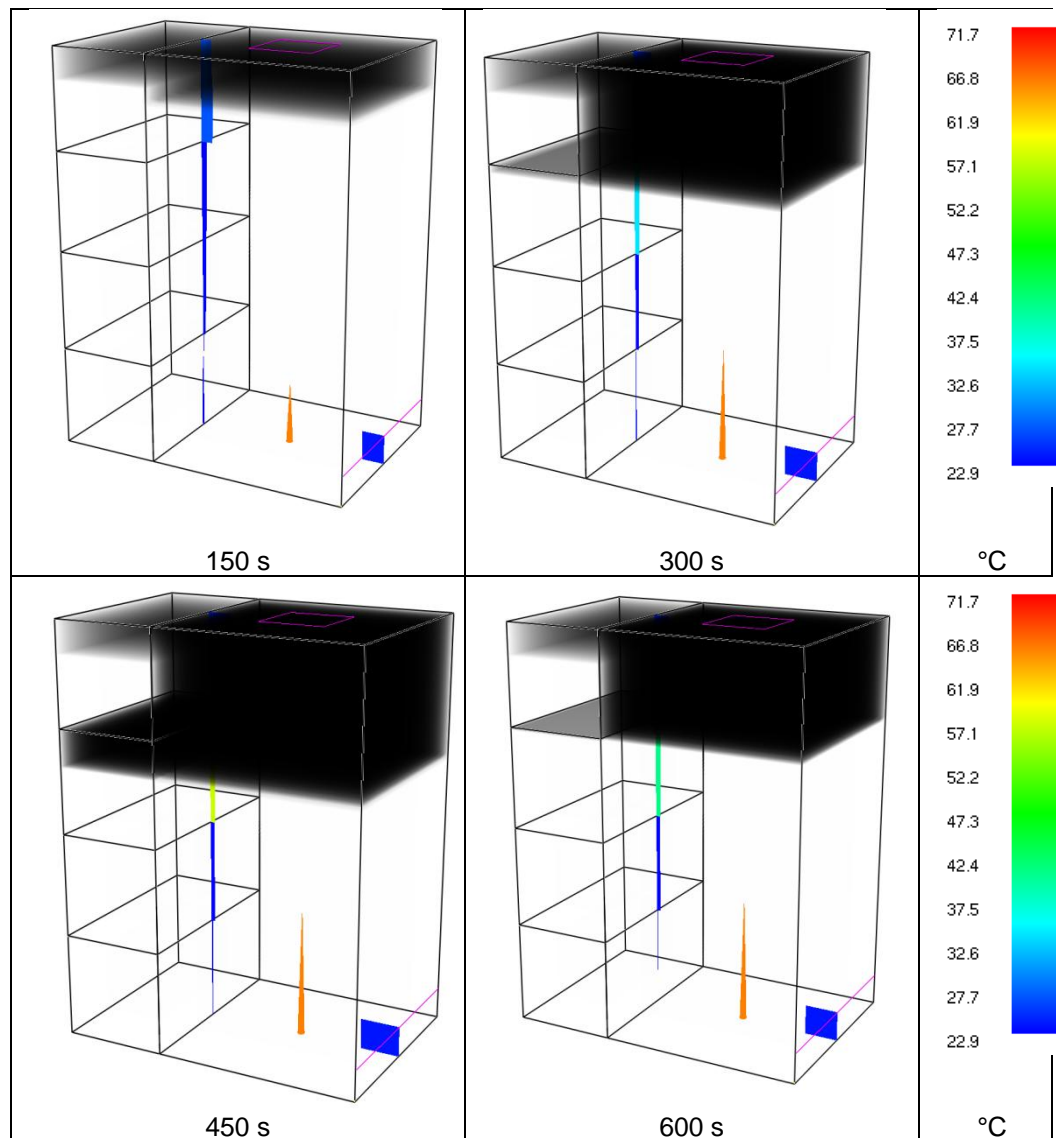
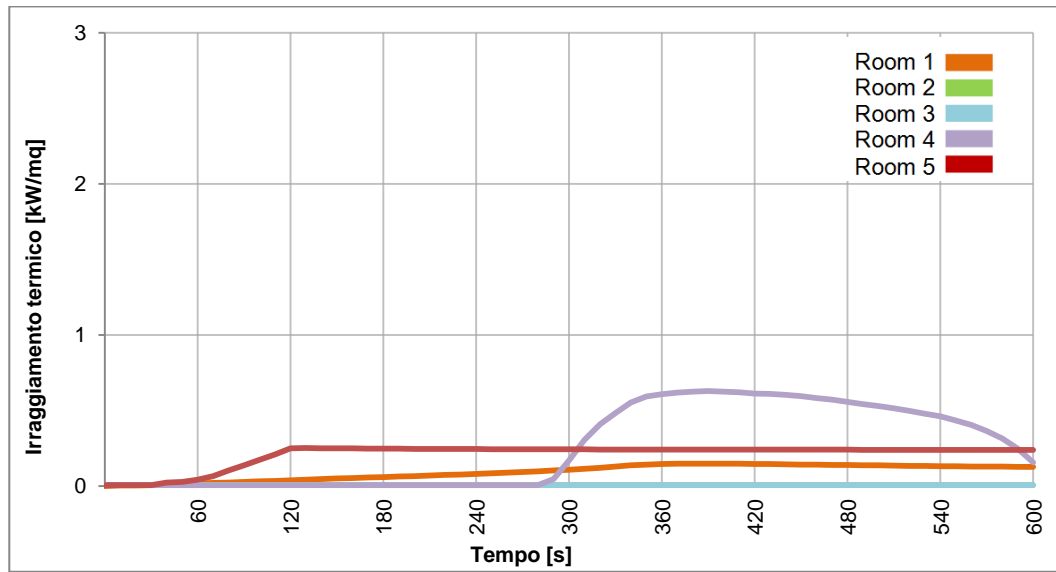


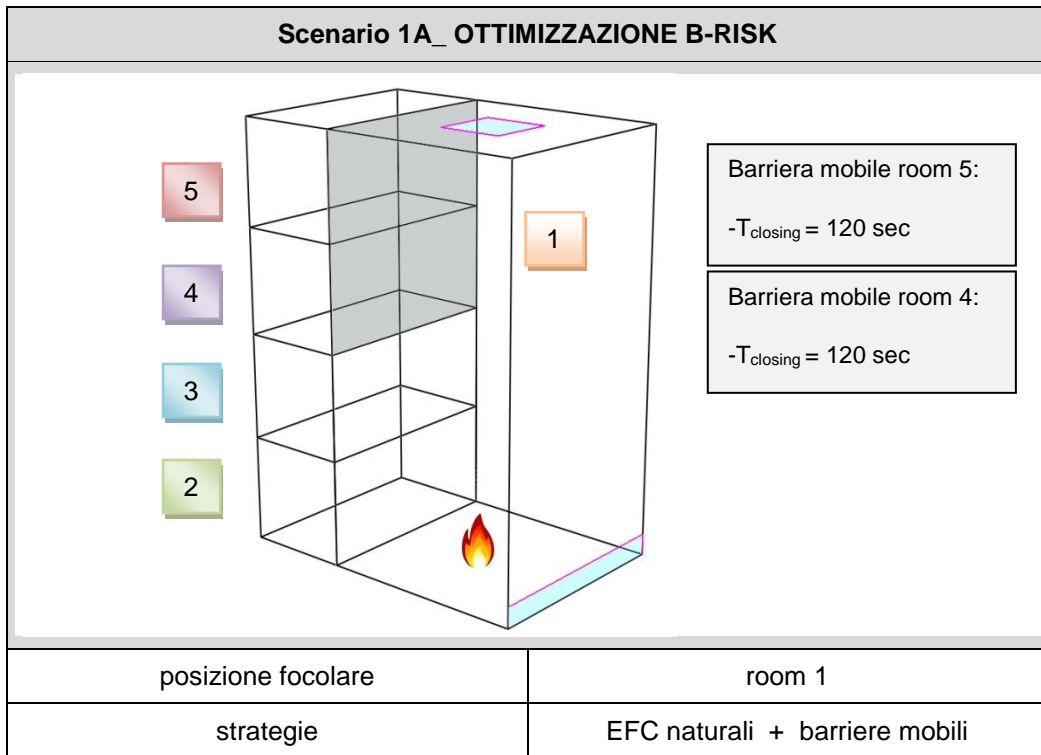
Caratteristiche sistema		
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>	
posizione	room 1	
superficie out	$A_{\text{OUT}} = 10 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{\text{IN}} = 15,3 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$



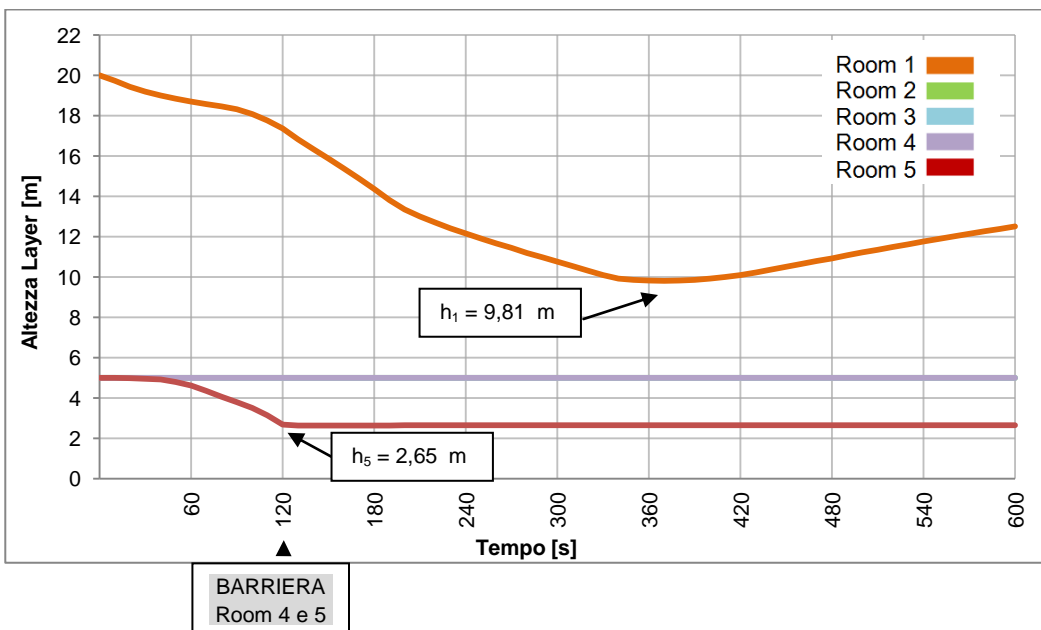


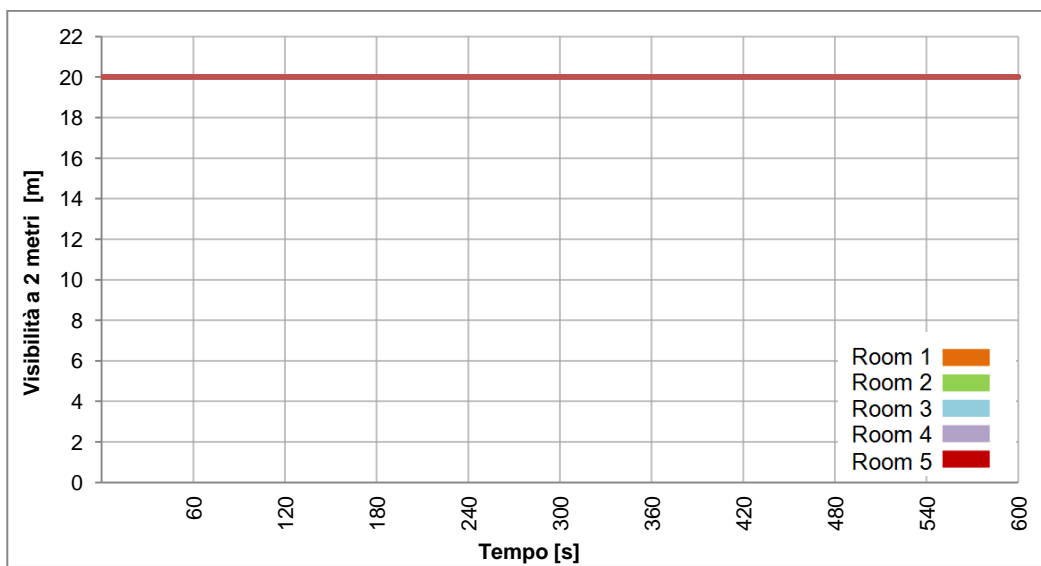
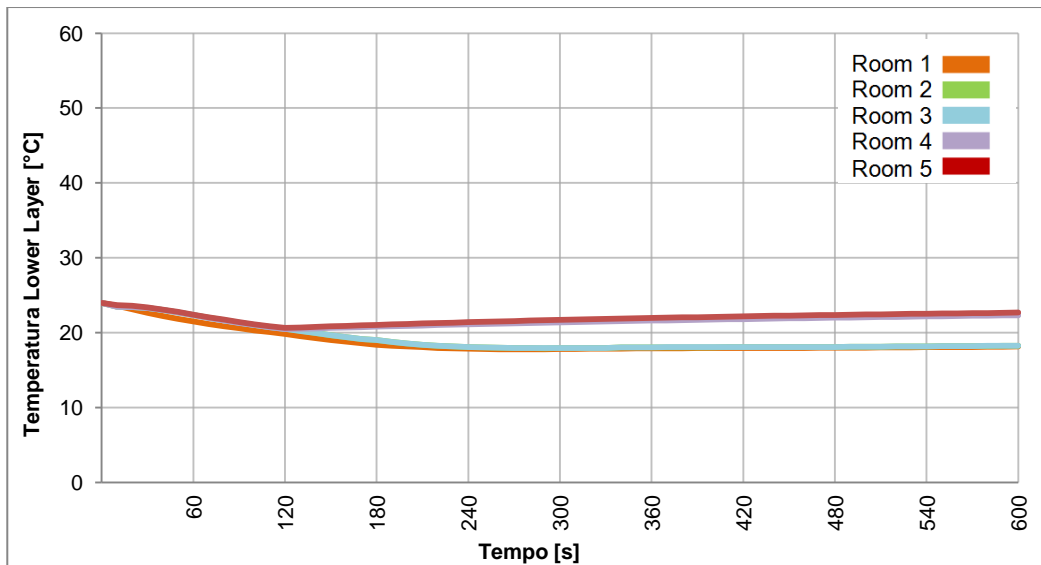
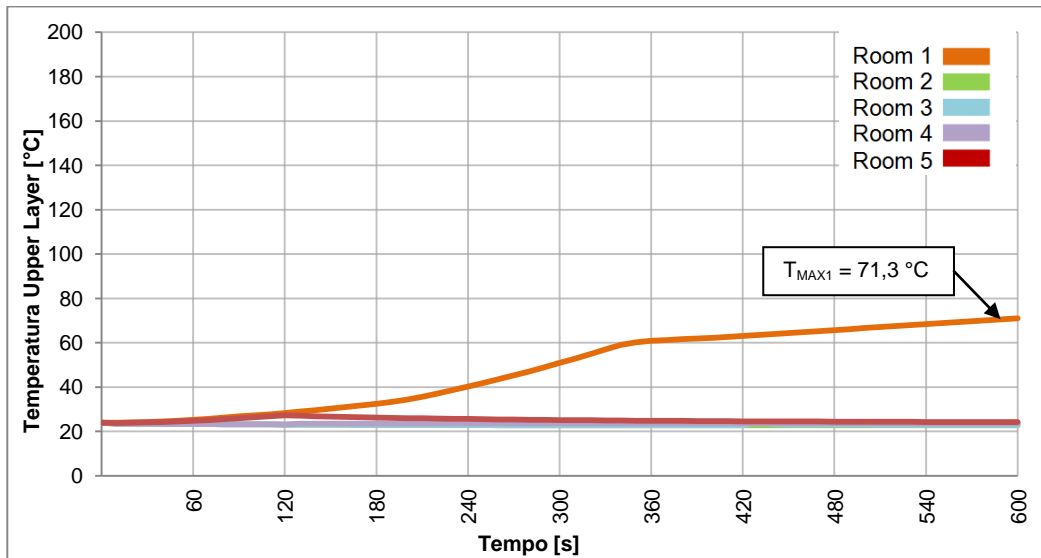


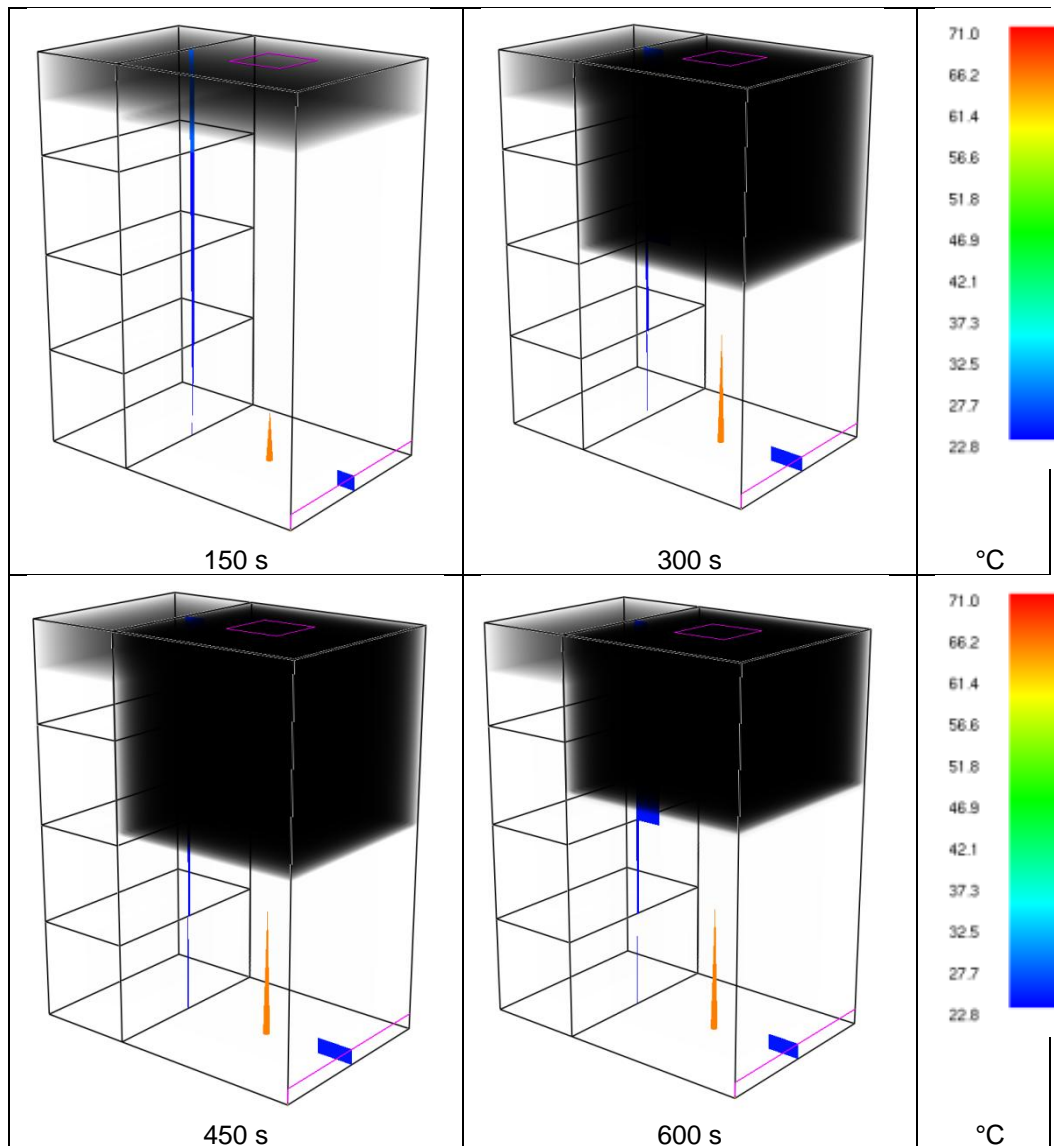
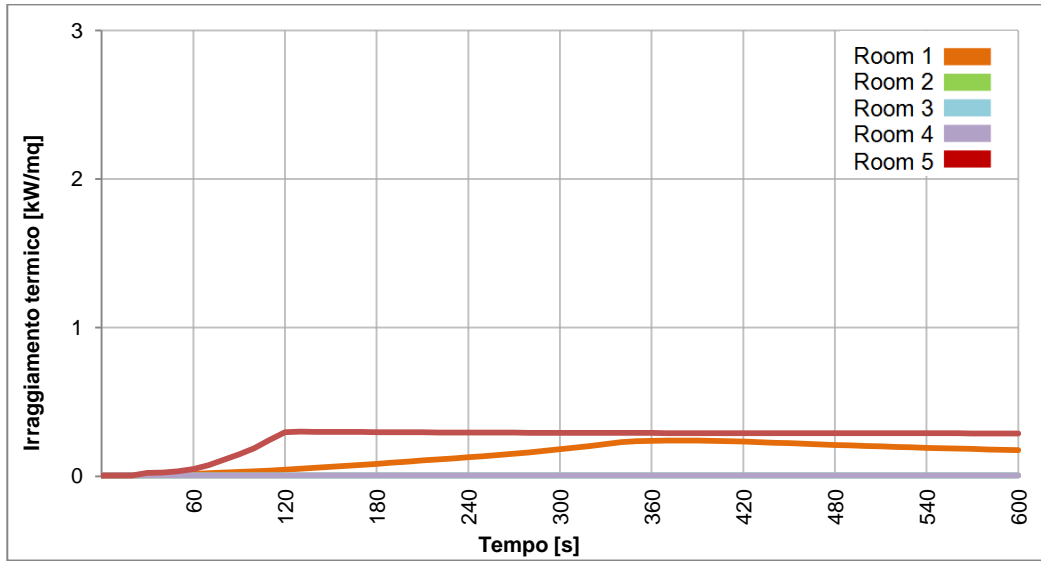


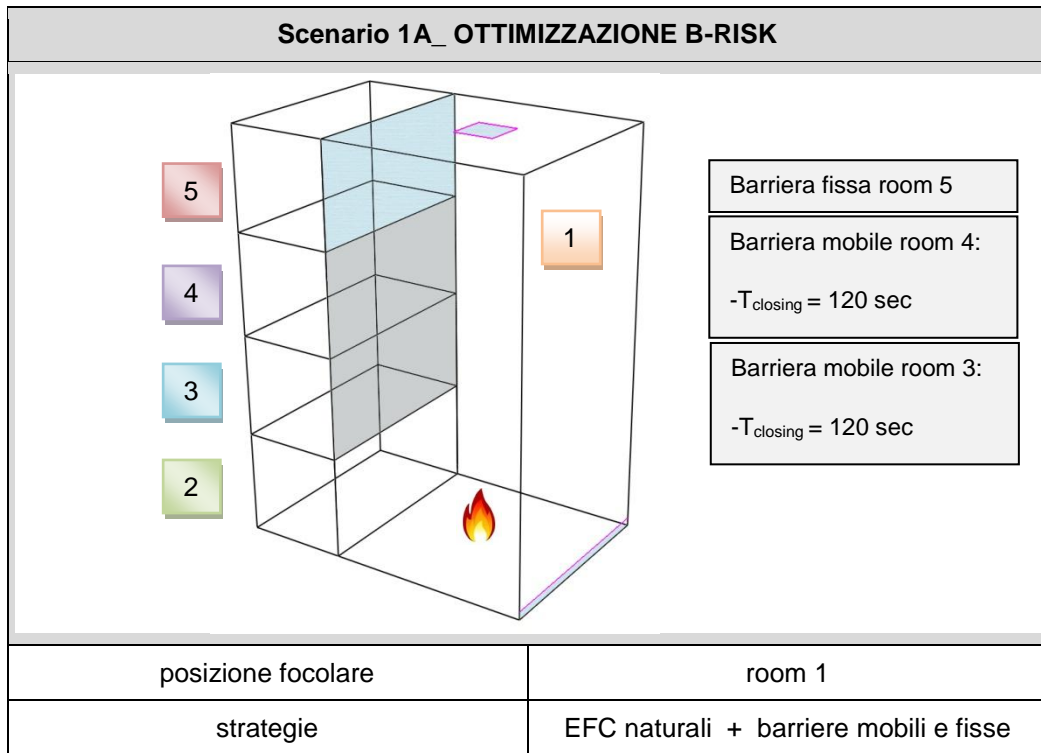


Caratteristiche sistema		
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>	
posizione	room 1	
superficie out	$A_{OUT} = 8 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 12,3 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$

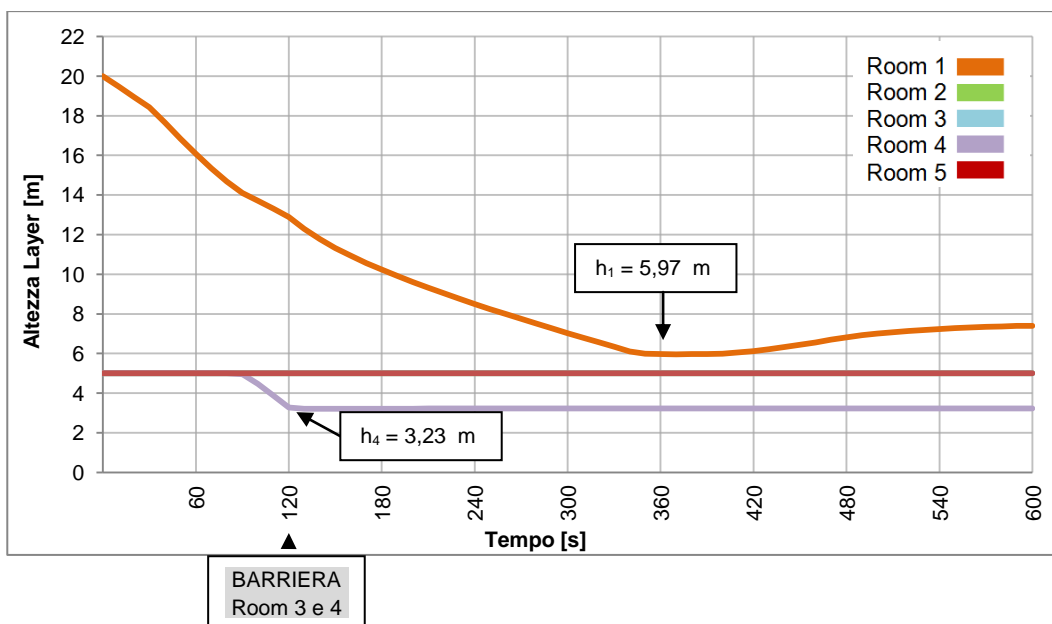


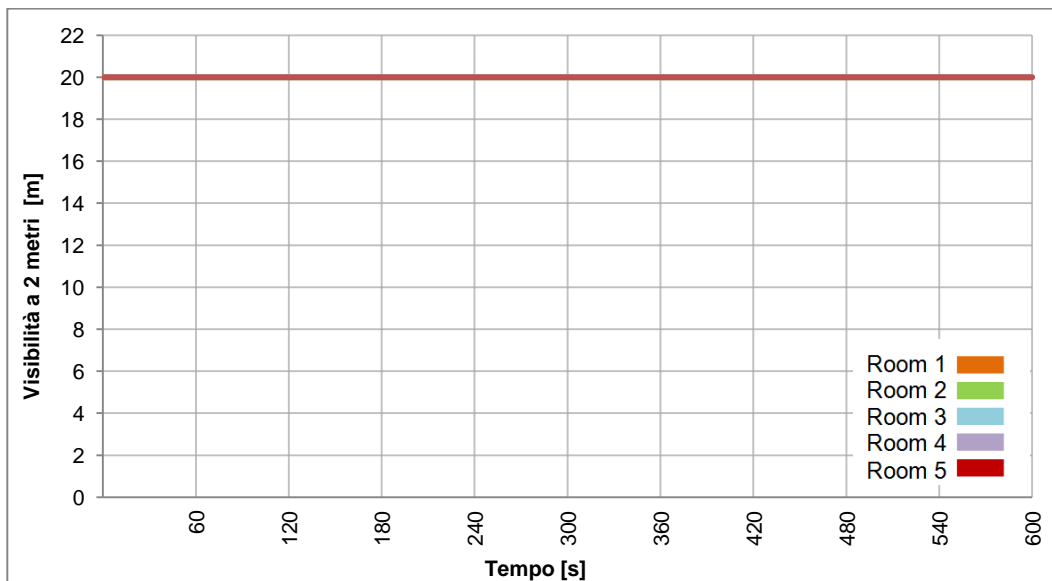
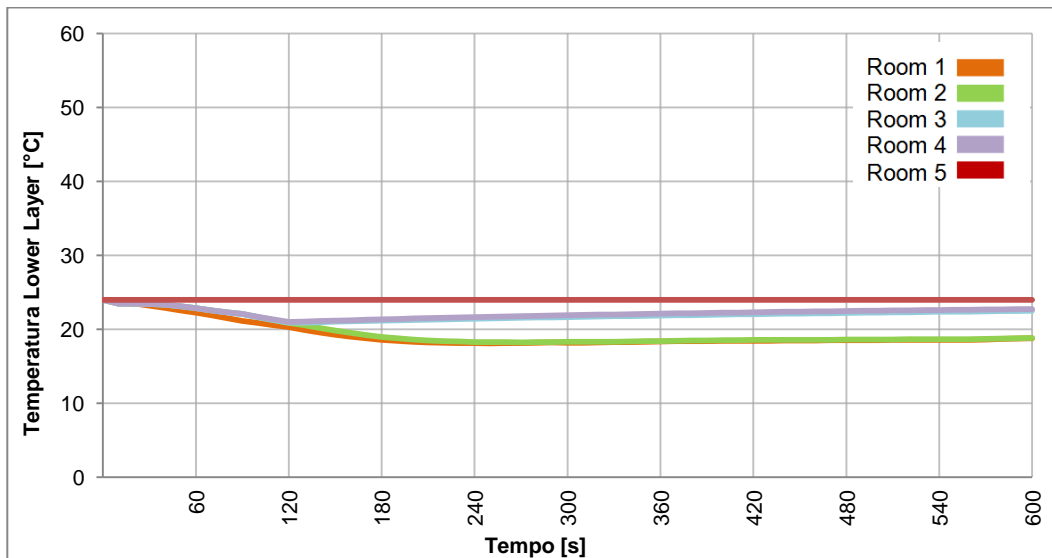
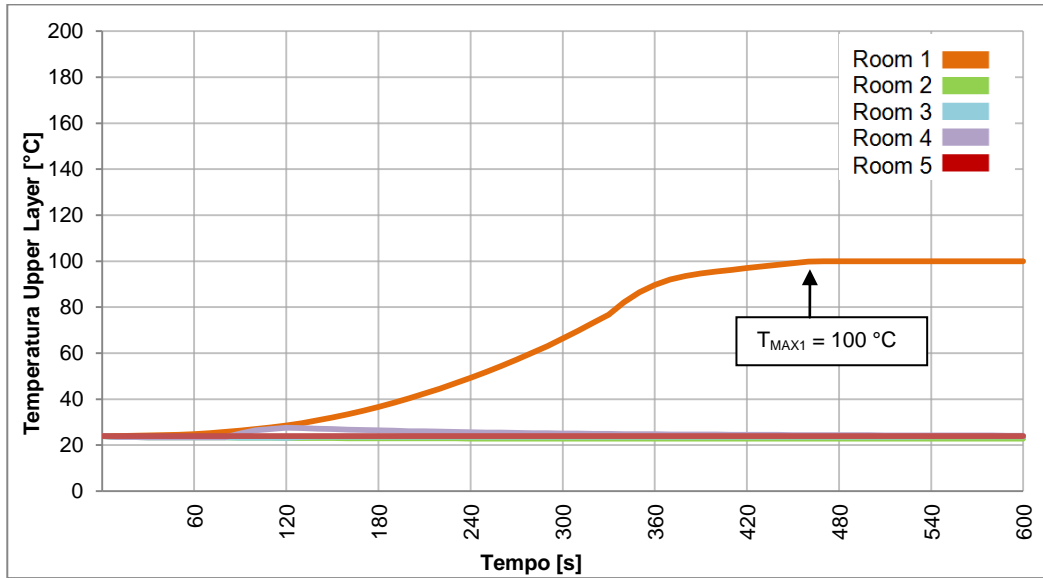


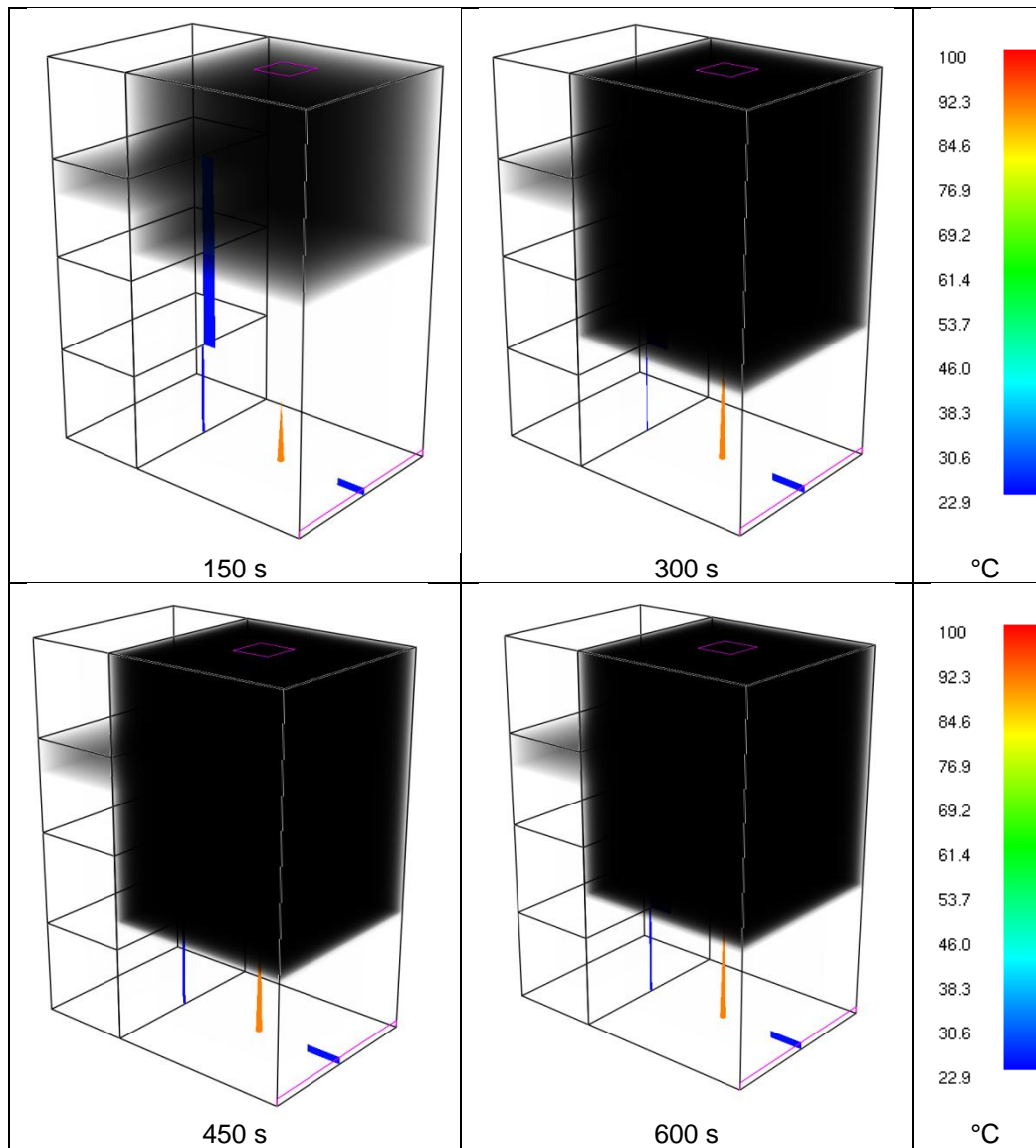
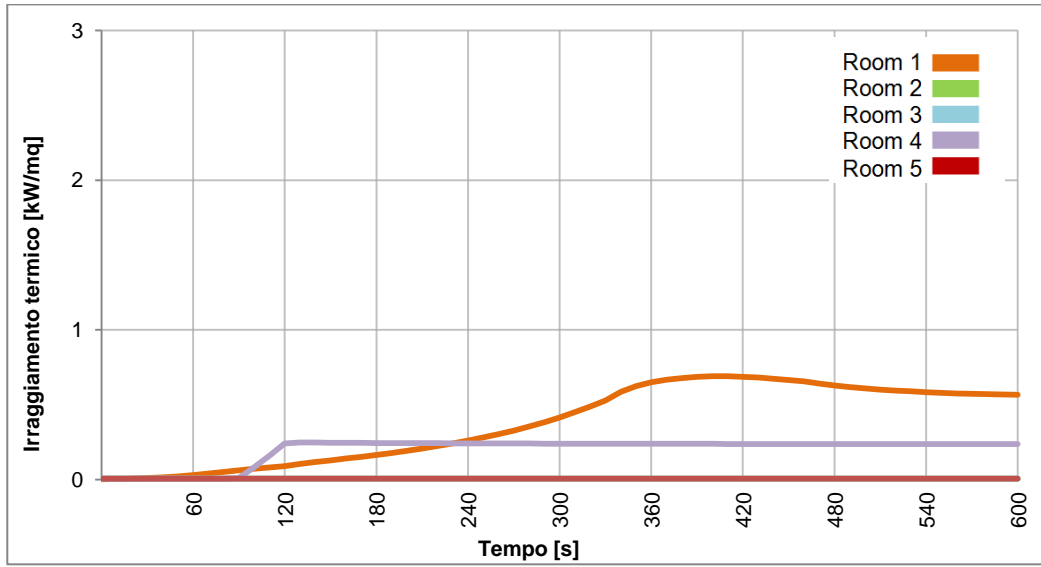


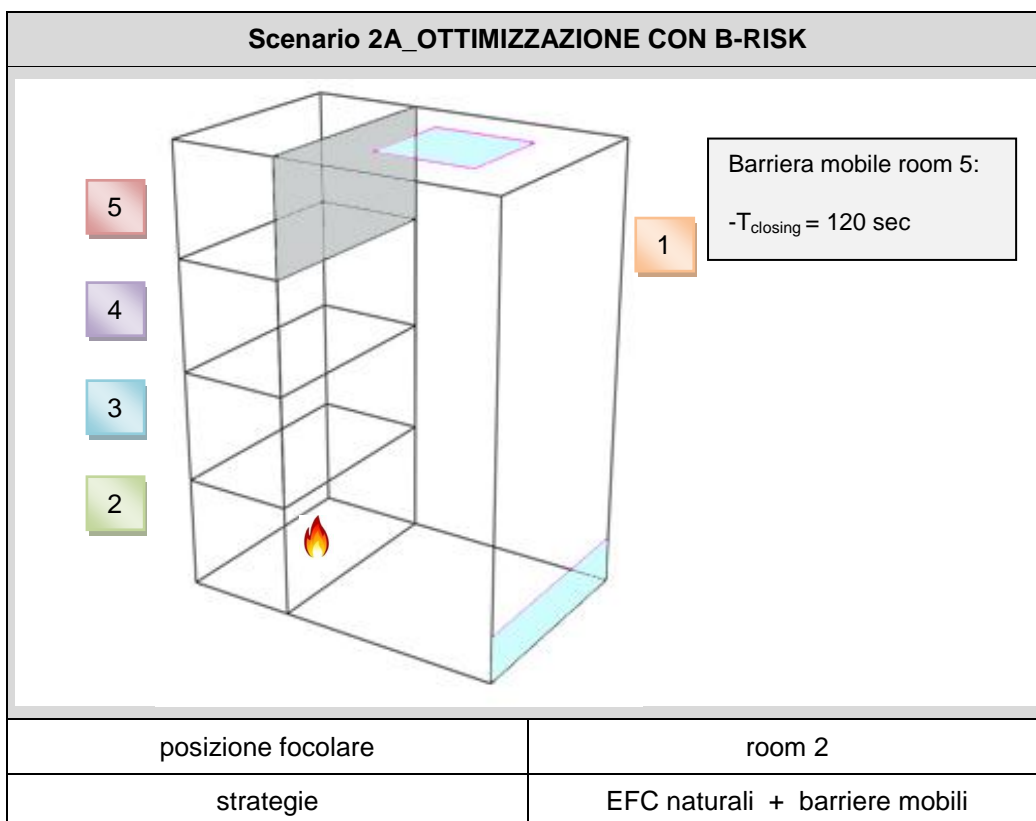


Caratteristiche sistema	
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>
posizione	room 1
superficie out	$A_{OUT} = 4 \text{ m}^2$ $C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 6,2 \text{ m}^2$ $C_v = 0,65$

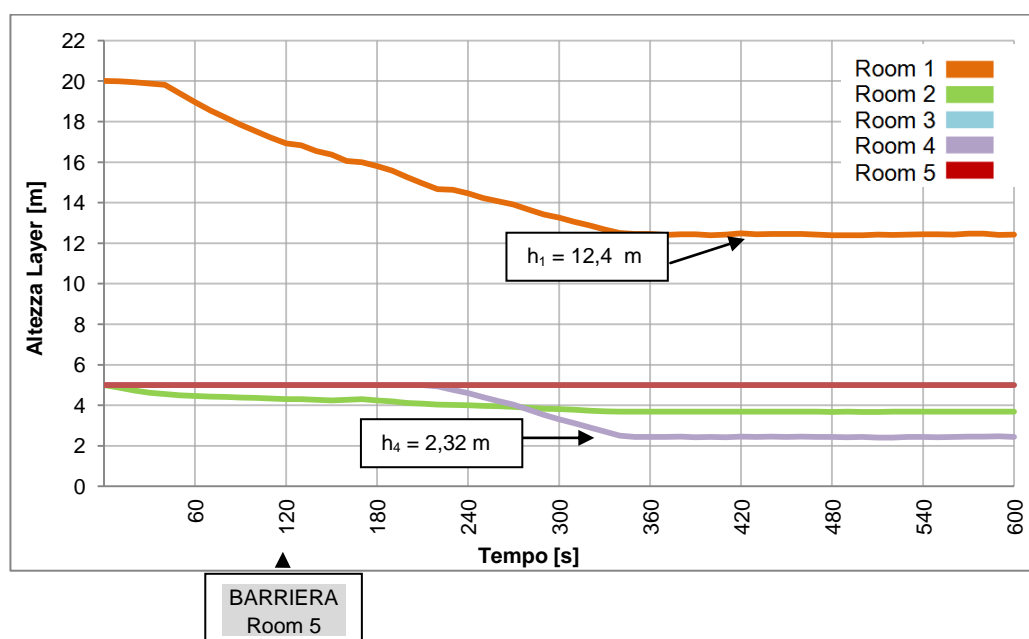




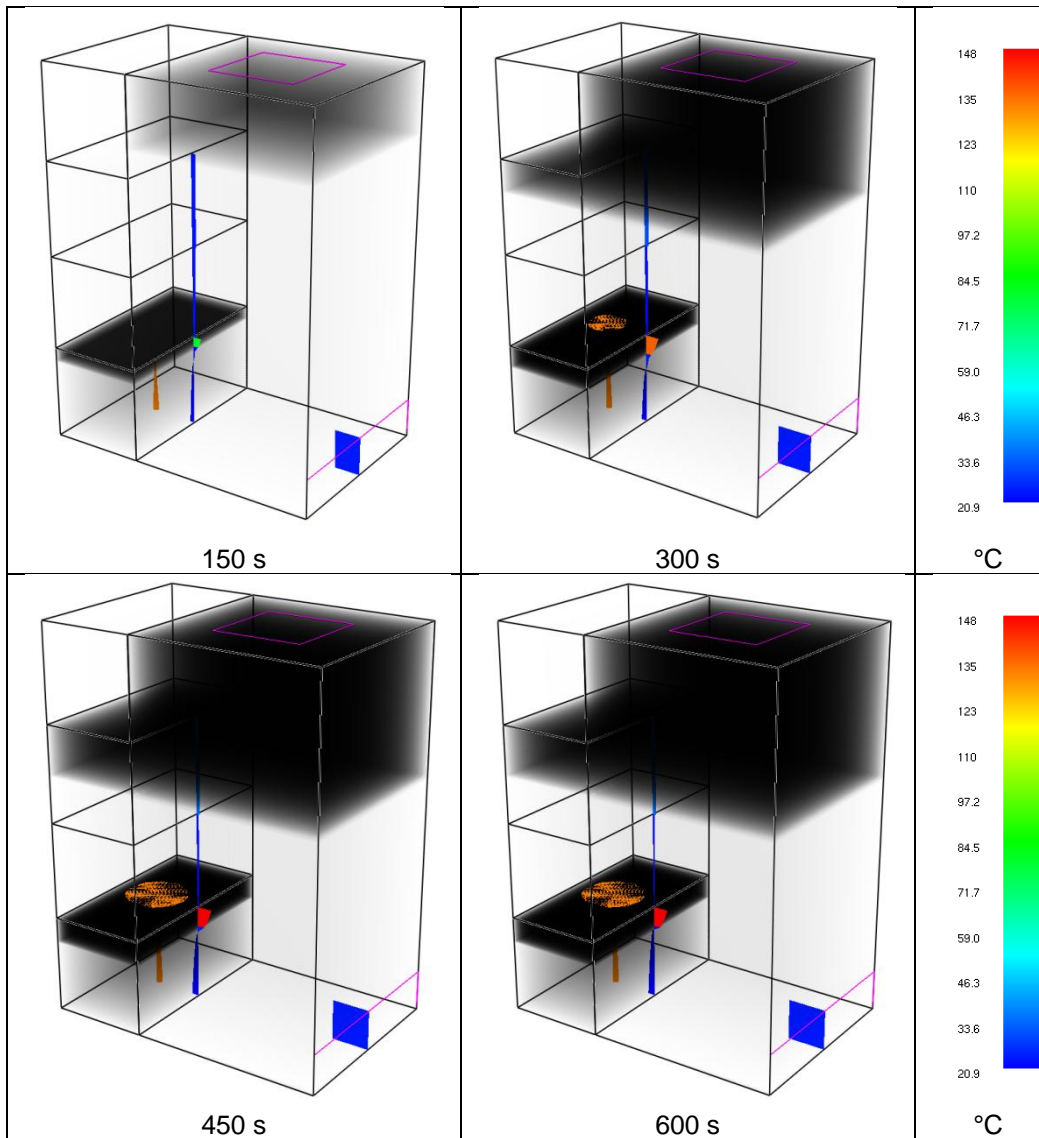
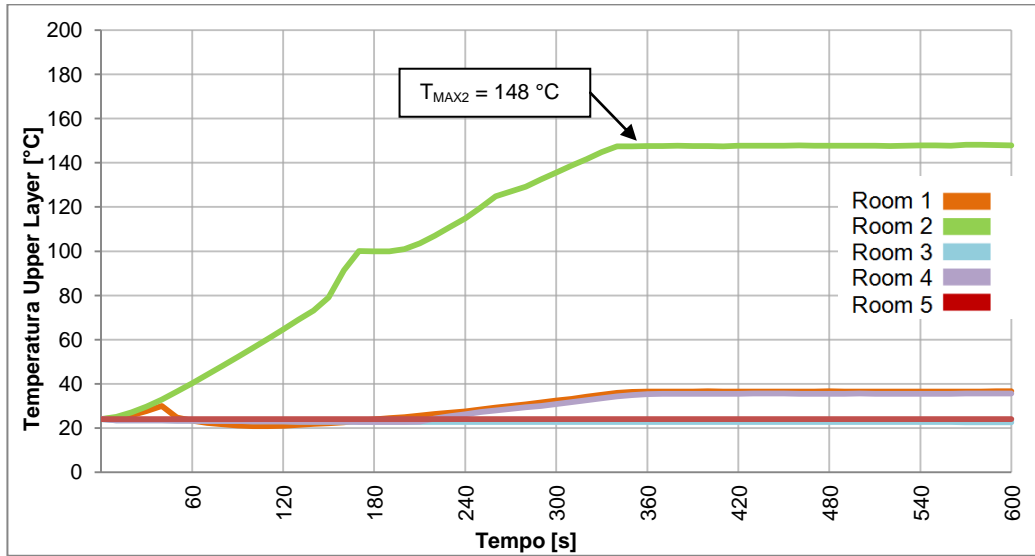


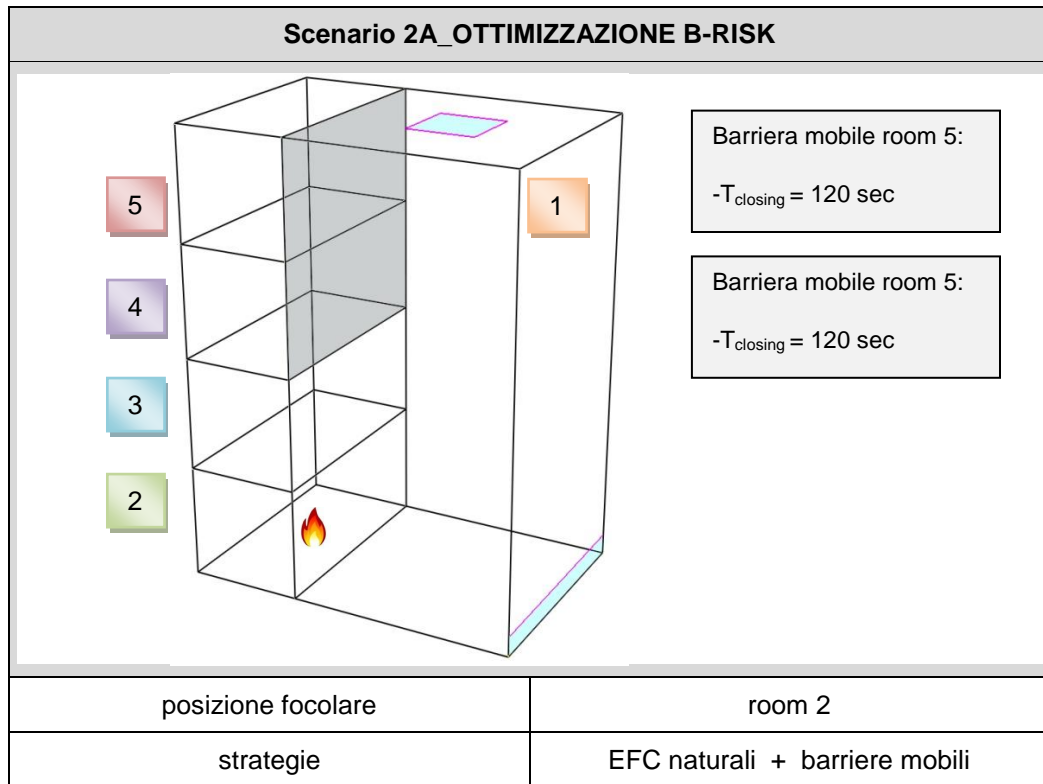


Caratteristiche SEFC		
tipologia	<b>evacuatore naturale in copertura</b>	
posizione	room 2	
superficie out	$A_{OUT} = 16 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 24,6 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$

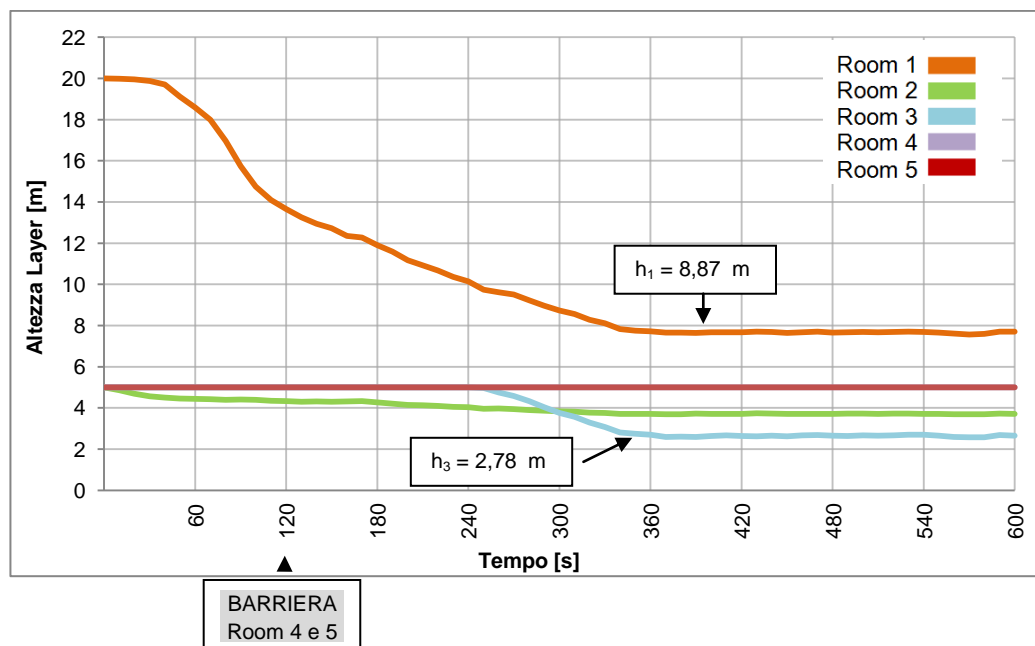


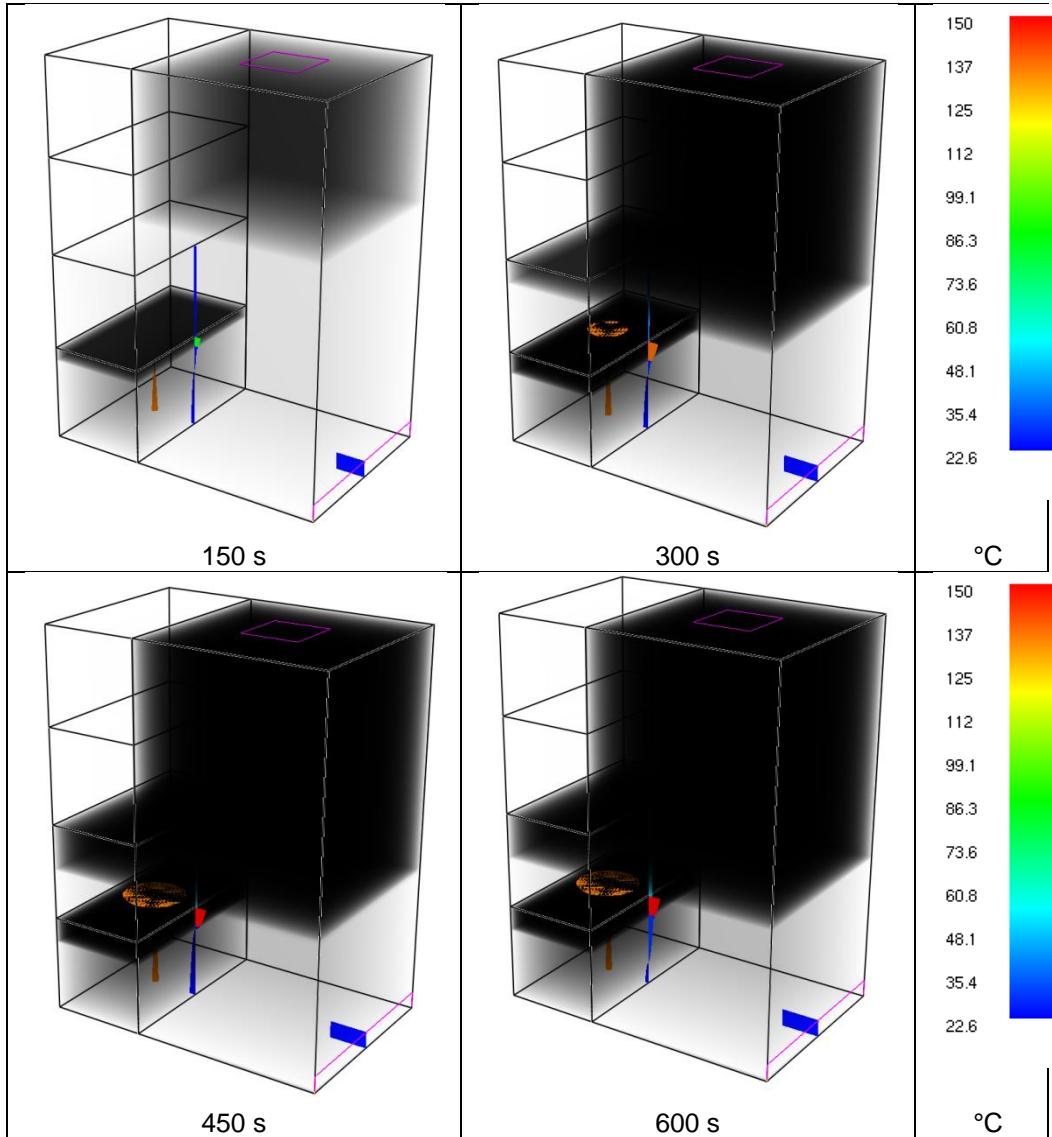
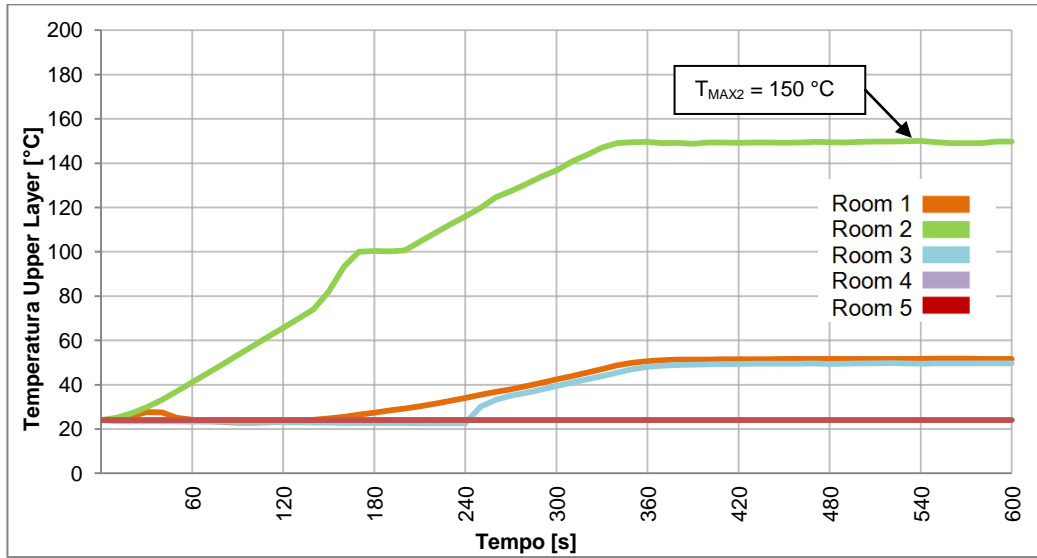






Caratteristiche SEFC		
tipologia	<b><u>evacuatore naturale in copertura</u></b>	
posizione	room 2	
superficie out	$A_{OUT} = 10 \text{ m}^2$	$C_v = 1$
superficie in	$A_{IN} = 15,3 \text{ m}^2$	$C_v = 0,65$







Si nota come, il dimensionamento degli evacuatori naturali condotto seguendo quanto riportato dalla normativa di riferimento non possa essere considerato accettabile, poichè propone un sistema di aperture di afflusso e di evacuatori sovrastimato. Questo determina la necessità di iterare con il programma i valori delle aperture e verificare fino a che valori vengono rispettati i livelli prestazionali.

Si ipotizzano inoltre delle soluzioni alternative proponendo sistemi combinati di evacuatori e barriere fisse o mobili, in grado di garantire i requisiti anche nei piani più alti dell'ambiente, in cui il fenomeno risulta particolarmente critico.

Infine, si è mostrato come questi modelli consentano di valutare il fenomeno dello *spill plume*, sottolineando nuovamente l'influenza negativa dello stesso, ragione per cui deve essere tenuto sotto controllo soprattutto negli ambienti studiati.



## 6.2. Caso studio: Museo MAGA di Gallarate

Il MAGA è un complesso architettonico che ospita il museo di arte contemporanea di Gallarate, in provincia di Varese, inaugurato nel 2010 e costituito da due corpi edilizi attigui: il primo è un fabbricato industriale degli anni Trenta del Novecento appositamente ristrutturato e il secondo è un edificio progettato e costruito ex novo in laterizio che per la sua forma curvilinea abbraccia la piazza circolare antistante.



Figura 87: museo MAGA di Gallarate, 2010

All'incrocio dei due corpi di fabbrica sono collocati la biglietteria, il bookshop, il guardaroba, la caffetteria e gli uffici. Dalla biglietteria si accede allo spazio espositivo dedicato alle mostre temporanee, che si sviluppa tra il piano terra, a doppia altezza e il primo piano attraverso un collegamento che permette al pubblico di seguire un percorso lineare e consequenziale. Dal secondo piano è collocata l'esposizione della collezione permanente e lo spazio è articolato da particolari sistemi espositivi a pannelli estraibili.

La parte del museo che accoglie oggi l'area espositiva è stata coinvolta da un incendio il 14 Febbraio del 2013 senza provocare vittime ma causando ingenti danni all'edificio e alle opere ospitate.



Figura 88: incendio del MAGA: vista dei fumi in copertura

L'incendio propagatosi ha coinvolto interamente il suddetto corpo di fabbrica, con rilevate produzione e propagazione di fumo che ha reso difficoltoso l'intervento dei vigili del fuoco nelle fasi di spegnimento e il tentativo di evacuare il più gran numero di opere presenti nell'ala del museo.



Figura 89: incendio del MAGA: danni provocati alla copertura

Lo studio del Maga è particolarmente interessante poichè l'ambiente coinvolto dall'incendio è costituito da tre volumi, ossia una zona espositiva a doppia altezza sulla quale si affaccia un'altra zona espositiva a quota più elevata e uno spazio non accessibile al pubblico adibito alla movimentazione dei materiali e delle opere, a quota più bassa. Perciò ha tutte le caratteristiche geometriche e funzionali per rientrare nella tipologia di ambienti fino ad ora analizzata.





Figura 90: incendio del MAGA: zona espositiva a doppia altezza.

L'altra motivazione che ha influenzato la scelta è l'incendio avvenuto: il fenomeno di propagazione dei prodotti della combustione è stato rilevante e tale da aver reso l'evento particolarmente critico. Infine l'incendio ha provocato numerosi danni all'edificio facendo ipotizzare un'assenza o una carenza di una corretta progettazione della sicurezza antincendio e dimostrando come sia necessaria la corretta progettazione di un adeguato ed efficace sistema di evacuazione e gestione dell'incendio per prevenire questo evento, poiché è evidente come possa causare danni rilevanti e mettere in pericolo l'utenza.



Figura 91: incendio del MAGA: particolare dei danni alla copertura

### 6.2.1. Caratteristiche geometriche

Come già descritto il museo è costituito da due compartimenti: il primo di nuova realizzazione e il secondo nato dalla ristrutturazione di un edificio industriale esistente. Come caso di studio viene valutata la realizzazione di un sistema di gestione dei fumi del secondo di questi, ma devono essere considerati i vincoli di contesto dovuti alla vicinanza dei due corpi di fabbrica.

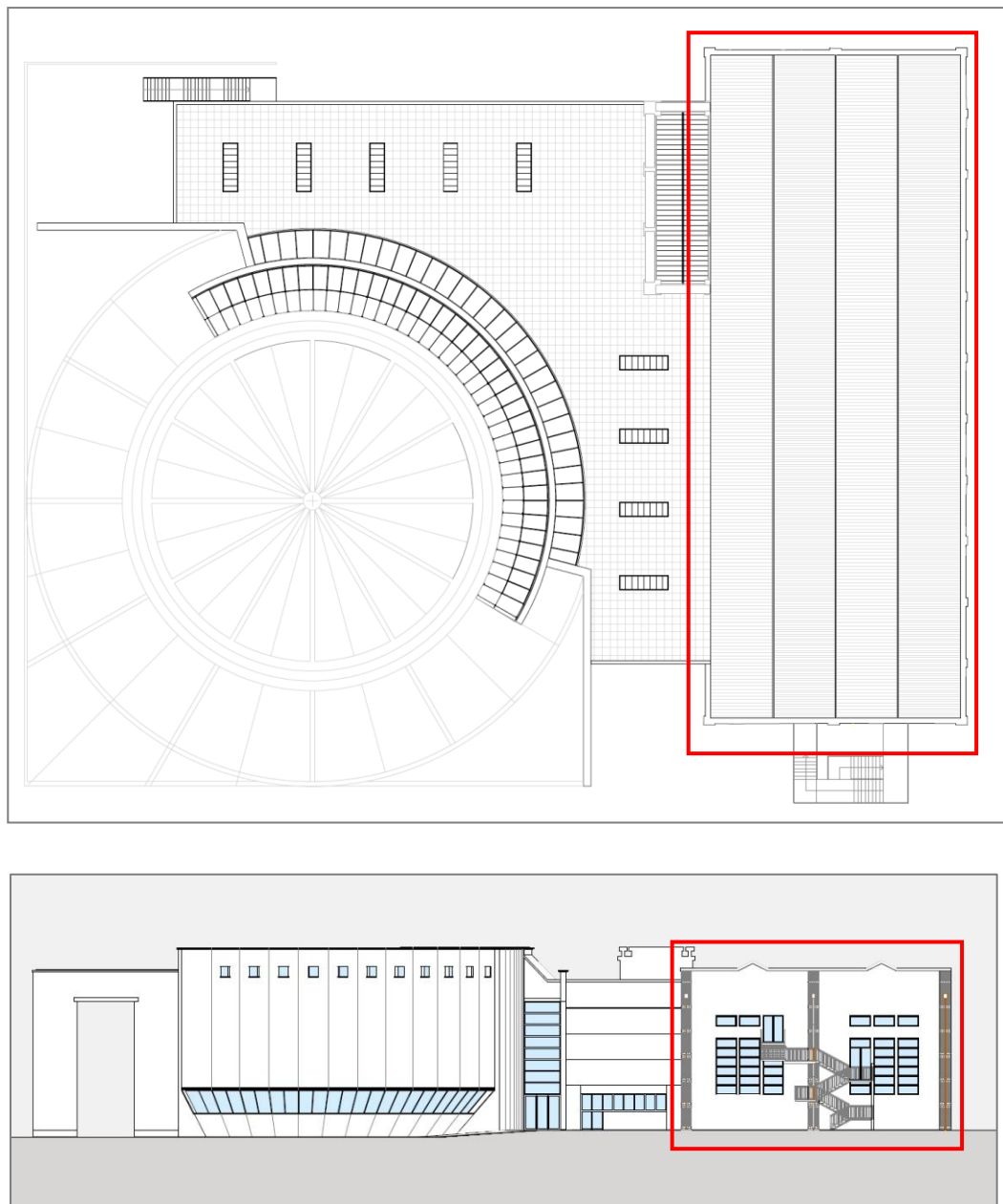


Figura 92: MAGA: pianta copertura e prospetto Nord-Ovest

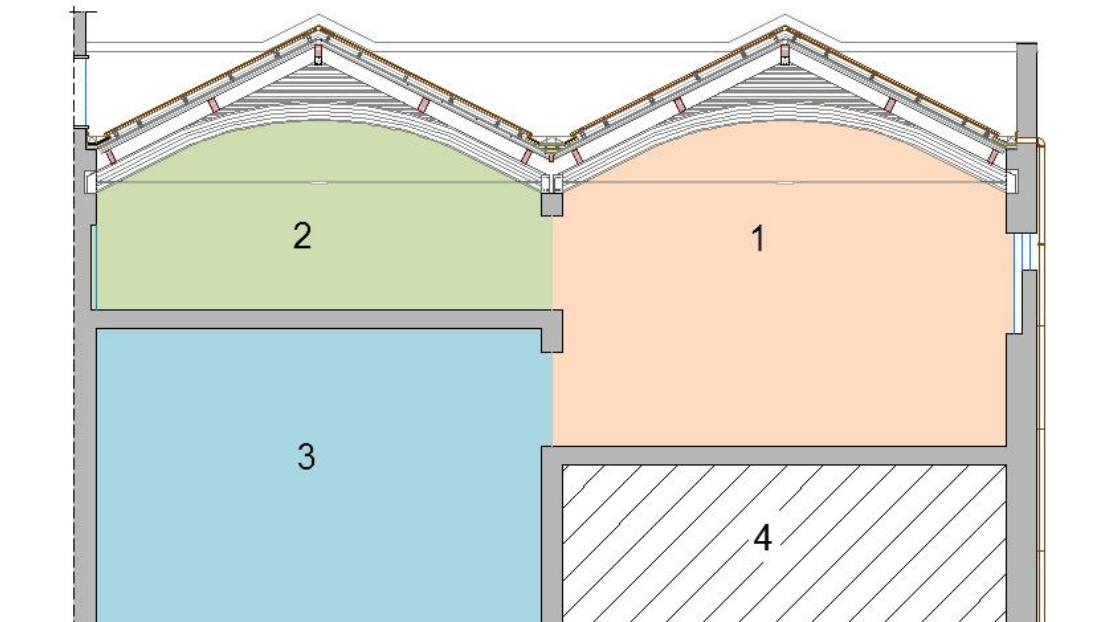


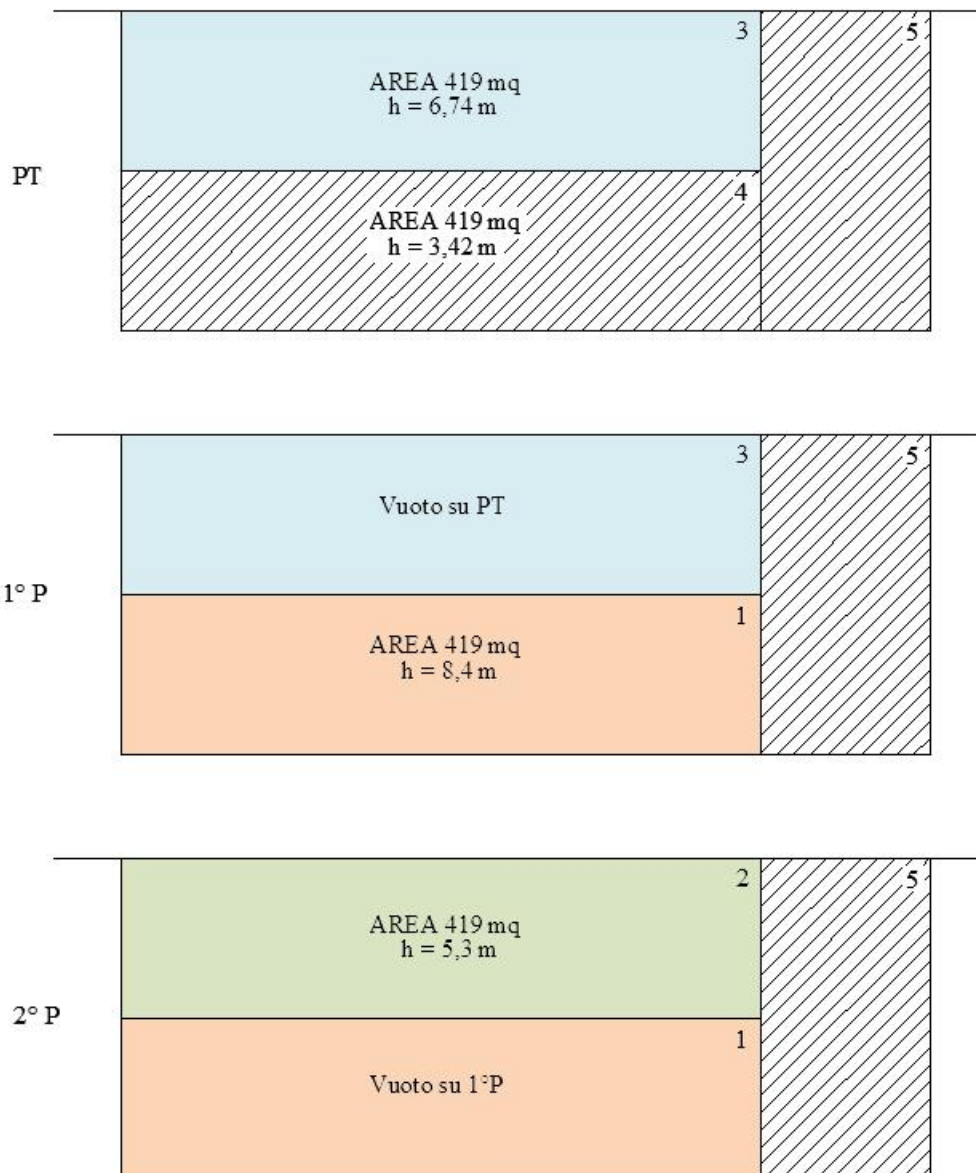
Nella progettazione di prevenzione incendi le due parti di museo sono considerate come due compartimenti antincendio separati. Per questo motivo nella progettazione del sistema di evacuazione fumi dovrà essere esclusa la possibilità di realizzare aperture sulla partizione che divide queste due aree.

Valutando il singolo compartimento esso è suddiviso in cinque zone.

1. zona espositiva a doppia altezza
2. zona espositiva rialzata
3. area movimentazione materiale
4. magazzino
5. servizi vari del museo

Mentre la zona del magazzino e quella dei servizi sono compartimentate rispetto agli ambienti circostanti, le zone espositive e quella adibita alla movimentazione dei materiali del museo costituiscono un unico compartimento al fuoco. Sono questi quindi i volumi che vengono presi in analisi, considerando il fatto che la presenza di ambienti circostanti comporta ulteriori vincoli. I servizi nella zona sud-est escludono infatti la possibilità di prevedere anche su questo lato aperture per la ventilazione.





Per quanto riguarda la connessione tra questi tre ambienti, gli spazi espositivi comunicano tra loro attraverso aperture alte 2,2 metri distribuite per tutta la lunghezza dell'edificio. Tra lo spazio non aperto al pubblico, adibito alla movimentazione dei materiali, e quello espositivo a doppia altezza vi sono altrettante aperture che, per ragioni funzionali e di sicurezza risultano allo stato dell'arte grigliate.

Per una completa valutazione preliminare degli aspetti che devono essere considerati prima di procedere alla valutazione quantitativa del fenomeno e all'individuazione della strategia più idonea, non è da trascurare l'elemento architettonico (sottotrave) che divide a soffitto gli ambienti espositivi. E' di particolare importanza stabilire se in

condizioni di incendio questo elemento sia in grado di costituire una barriera al fumo e resistere alle temperature che verranno raggiunte.



Figura 93: MAGA: vista interna area espositiva a doppia altezza<sup>20</sup>

Per quanto riguarda le aperture a parete è stato appena esclusa la possibilità di intervento sia nella parete a sud-est che quella a nord-est. E' necessario quindi individuare quelle già presenti per avere un quadro completo di tutte le caratteristiche dell'edificio al fine di una corretta progettazione.

Tutte le finestre del fabbricato hanno le stesse dimensioni, ossia un'altezza di 0,8 cm e una larghezza di 1,35 e i serramenti non sono dotati di alcun dispositivo automatico di apertura con rilevazione incendi.

Per quanto riguarda il locale a doppia altezza, esso è illuminato naturalmente grazie a finestre disposte sulla facciata sud-ovest e a nord-ovest.

<sup>20</sup> la foto si riferisce alla ristrutturazione di quest'ala avvenuta nel 2010. Si nota la presenza di lucernari che nello studio non vengono considerati dato che l'evento incendio del 2013 richiede la necessità del rifacimento della copertura.

AMBIENTE 1				
Posizione	Codice	h	l	A
Prospetto Sud-Ovest	F1	0,8	1,65	1,32
	F2	0,8	1,65	1,32
	F3	0,8	1,65	1,32
	F4	0,8	1,65	1,32
	F5	0,8	1,65	1,32
	F6	0,8	1,65	1,32
	F7	0,8	1,65	1,32
	F8	0,8	1,65	1,32
	F9	0,8	1,65	1,32
$A_{1-9} = 11,88 \text{ m}^2$				
Prospetto Nord-Ovest	F10	0,8	1,65	1,32
	F11	0,8	1,65	1,32
	F12	0,8	1,65	1,32
	F13	0,8	1,65	1,32
	F14	0,8	1,65	1,32
	F15	0,8	1,65	1,32
	F16	0,8	1,65	1,32
	F17	0,8	1,65	1,32
	F18	0,8	1,65	1,32
	F19	0,8	1,65	1,32
	F20	0,8	1,65	1,32
	F21	0,8	1,65	1,32
$A_{10-21} = 15,84 \text{ m}^2$				

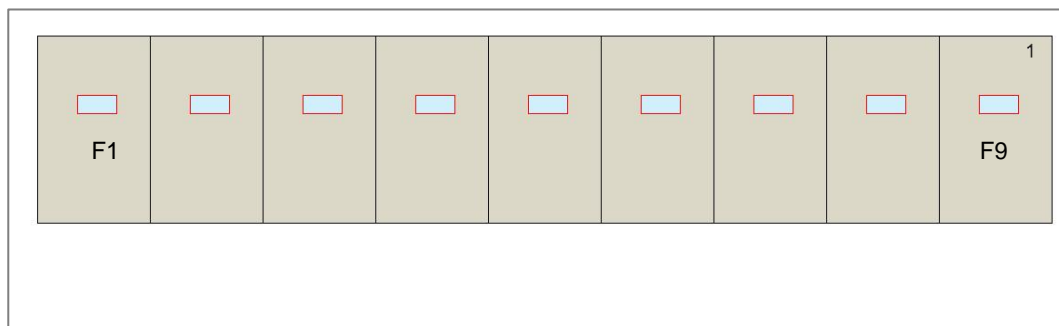


Figura 94: MAGA: aperture prospetto Sud - Ovest

Gli ambienti comunicanti con l'ala nuova, invece, dispongono di finestre solo sulla facciata a nord-ovest.

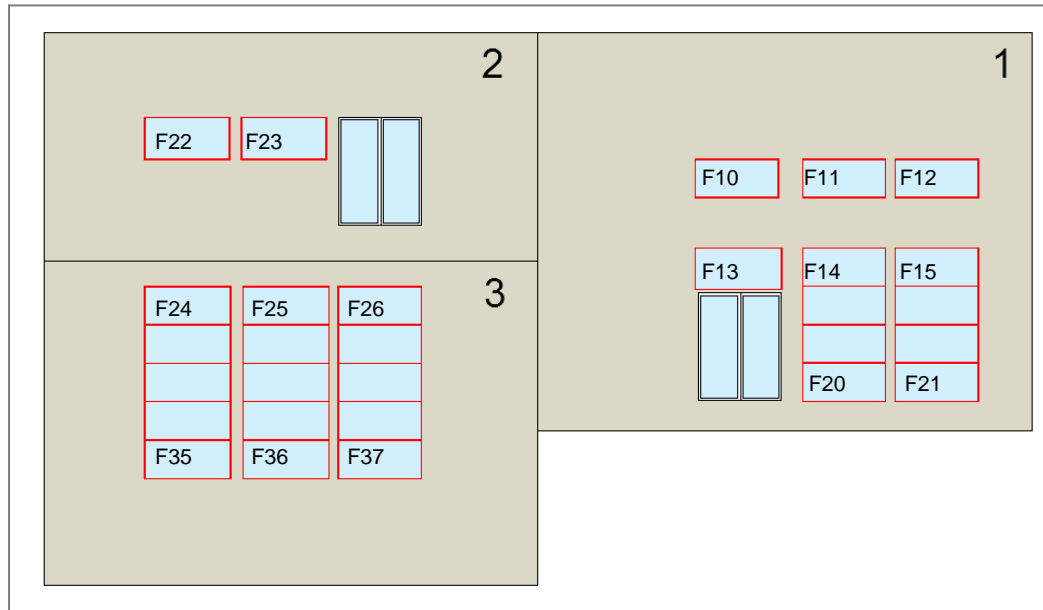


Figura 95: MAGA: aperture prospetto Nord - Ovest

AMBIENTE 2				
Posizione	Codice	h	l	A
Prospetto Nord-Ovest	F22	0,8	1,65	1,32
	F23	0,8	1,65	1,32
	$A_{22-23} = 2,64 \text{ m}^2$			

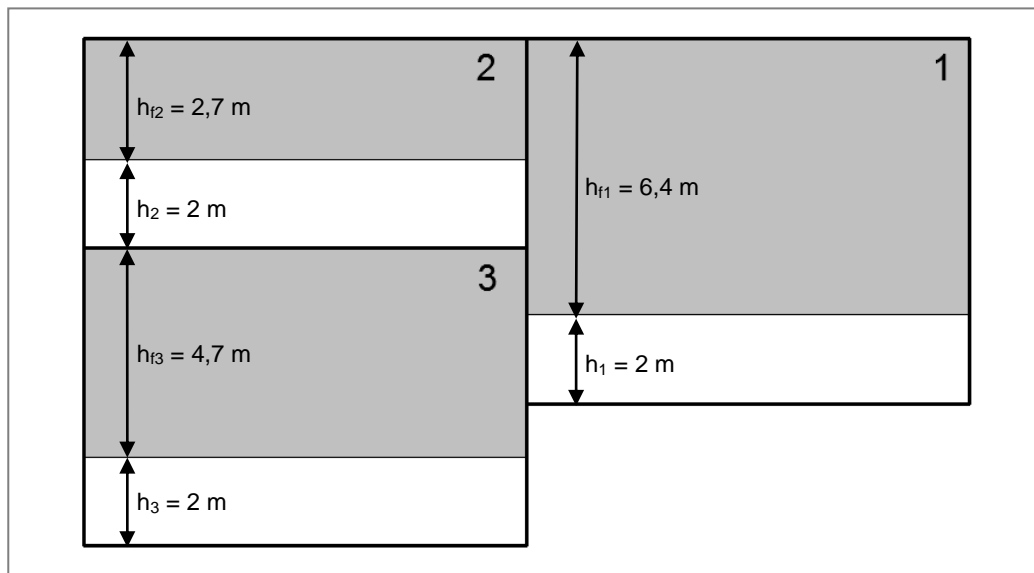
AMBIENTE 3				
Posizione	Codice	h	l	A
Prospetto Nord-Ovest	F24	0,8	1,65	1,32
	F25	0,8	1,65	1,32
	F26	0,8	1,65	1,32
	F27	0,8	1,65	1,32
	F28	0,8	1,65	1,32
	F29	0,8	1,65	1,32
	F30	0,8	1,65	1,32
	F31	0,8	1,65	1,32
	F32	0,8	1,65	1,32
	F33	0,8	1,65	1,32
	F34	0,8	1,65	1,32
	F35	0,8	1,65	1,32
	F36	0,8	1,65	1,32
	F37	0,8	1,65	1,32
	F38	0,8	1,65	1,32
$A_{24-38} = 19,80 \text{ m}^2$				

### 6.2.2. Livelli di prestazione

I livelli di prestazione vengono stabiliti come seguono. Si prevede che il parametro più limitativo risulterà essere l'altezza dello strato libero dei fumi, poiché, dati i volumi d'aria coinvolti, le temperature dei layer saranno limitate, come anche l'irraggiamento termico.

altezza strato libero fumi	2	m
$T_{\max}$ upper layer	200	°C
$T_{\max}$ lower layer	60	°C
visibilità	10	m
irraggiamento termico	2,5	kW/m <sup>2</sup>

Come già specificato i volumi degli ambienti vengono semplificati in parallelepipedi; in funzione dell'altezza media dei locali viene valutata la profondità massima che lo strato dei fumi può assumere, oltre la quale non vengono più garantiti i limiti di sicurezza per la salvaguardia degli utenti.

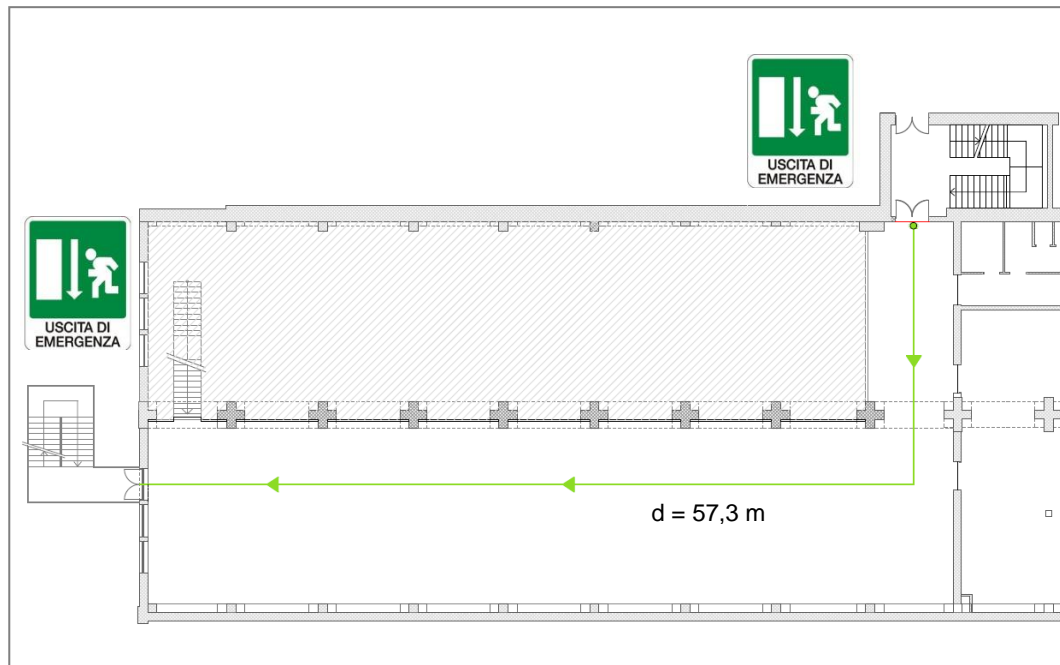


ambiente	1	2	3
altezza media totale	8,4 m	4,7 m	6,7 m
altezza strato libero fumi	2 m	2 m	2 m
altezza strato di fumi	2,7 m	2,7 m	5,7 m

### Tempo totale di evacuazione

Il calcolo del tempo di esodo, RSET, deve essere affrontato tenendo conto di numerosi aspetti, come il comportamento umano, il tipo e dimensione dell'edificio, la geometria dell'ambiente ecc..

Per quest'area del fabbricato, per lavorare a favore di sicurezza, viene calcolato ipotizzando che una delle due porte previste per piano come vie d'esodo sia bloccata durante l'evento. Di conseguenza, l'utenza deve percorrere una distanza doppia rispetto a quella prevista dal piano di evacuazione ordinario . Si considera il percorso più lungo che interessa il primo piano dell'are espositiva.



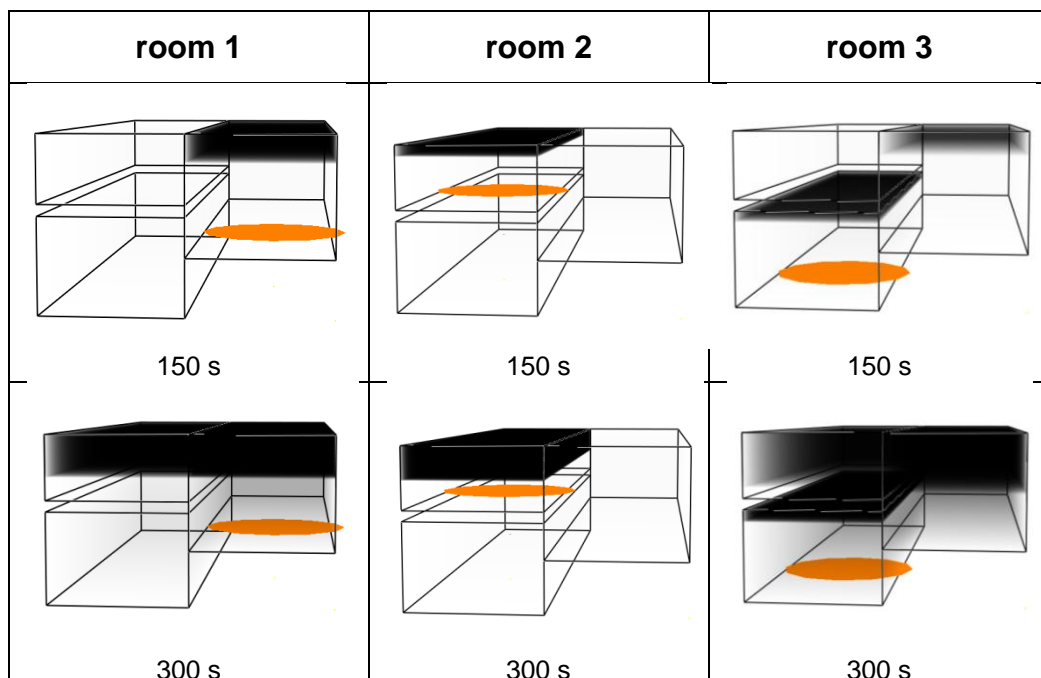
Sulla base delle ipotesi e considerazioni relative agli spazi con queste caratteristiche riportate nella prima parte di questo capitolo risulta:

- $\Delta t_{det} = 0 \text{ s}$
- $\Delta t_a = 60 \text{ s}$
- $\Delta t_{pre} = 180 \text{ s}$
- $\Delta t_{trav} = \text{distanza}_{orizz}/\text{velocità}_{orizz} = 57,3/2,24 = 25,6 \text{ s}$
- $v_{orizz} = k - akD = 2,4 - (2,4 \cdot 0,266 \cdot 0,25) = 2,24 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
- $t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}) = 60\text{s} + 0\text{s} + 180\text{s} + 25,6\text{s} = \boxed{265 \text{ s ca.}}$

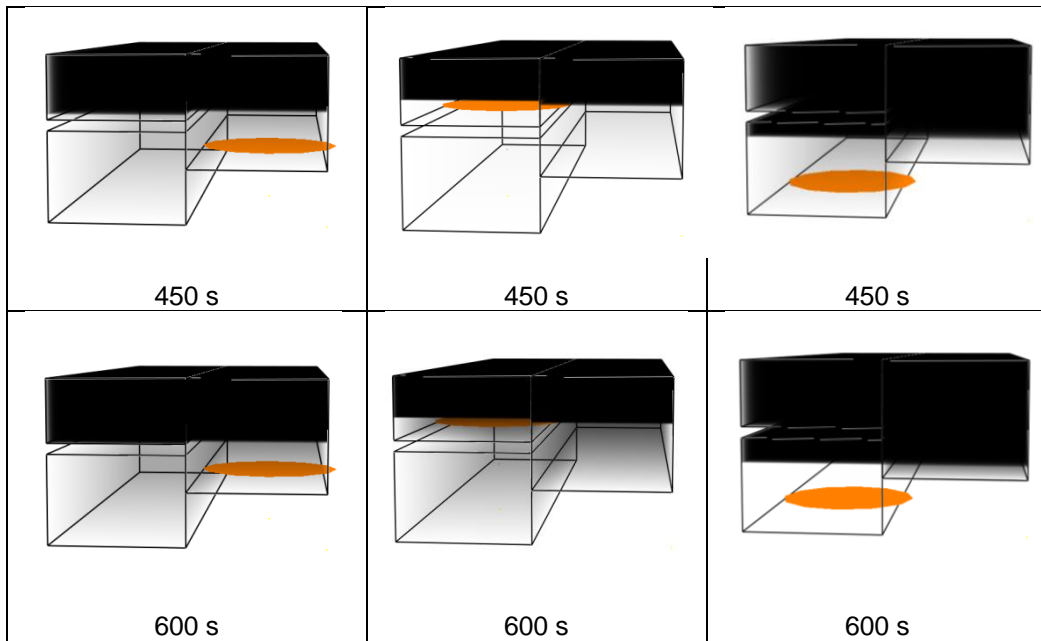
### 6.2.3. Scenari d'incendio

L'iter procedurale continua andando a definire tre scenari d'incendio, valutando il possibile sviluppo nei tre ambienti individuati e identificando per ognuno le caratteristiche plausibili dell'innesco e i relativi elementi di rischio per oggetti e persone. L'esito della ricerca porterà a una scelta di due tra essi, poichè più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio, la salvaguardia degli occupanti e la sicurezza delle squadre di soccorso. All'interno di questi due scenari si andrà ad effettuare la successiva analisi quantitativa.

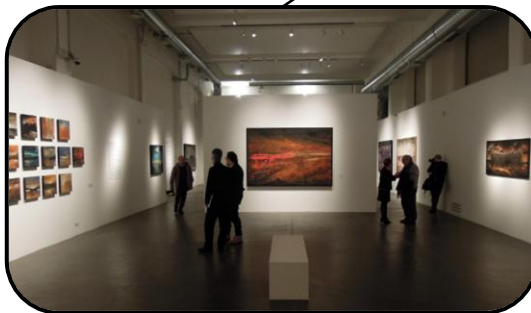
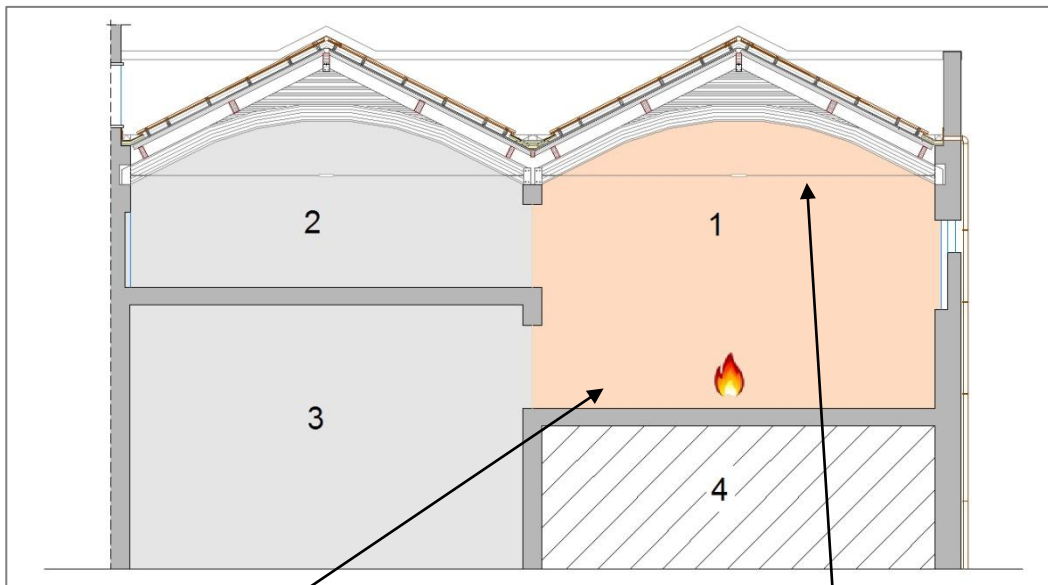
Innanzitutto si considera la propagazione del fumo posizionando l'origine dell'incendio in ciascuna delle stanze. Si evidenzia come, indipendentemente dalle aperture e dal tipo di incendio, che sono considerati costanti, i prodotti della combustione si propagano in modo differente e coinvolgono in maniera diversa i vari volumi. Le condizioni più pericolose, nell'ottica di considerare sempre la situazione peggiorativa, si verificano quando l'incendio avviene nelle room 1 e 3: come si vede nella figura sottostante, i fumi coinvolgono in ciascun intervallo di tempo un volume di aria maggiore. Per questa ragione viene escluso lo scenario della room 2 poichè la sicurezza antincendio sarà necessariamente garantita con un dimensionamento nelle altre due situazioni.







**Scenario con incendio ambiente 1**



L'ambiente considerato è adibito ad area espositiva e perciò si può valutare quali possano essere le possibili cause dell'innescò e i materiali coinvolti, per poter successivamente ipotizzare un valore di potenza termica totale rilasciata dall'incendio plausibile per questo scenario.

Gli oggetti presenti che possono ipoteticamente costituire l'innescò dell'incendio sono per esempio le tende fonoassorbenti presenti a soffitto e i divisori o scaffali in legno verniciato o in materiale plastico.



Figura 96: MAGA: strutture espositive estraibili



Figura 97: MAGA: danni alle tende

Si analizzano le curve RHR di rilascio termico ottenute sperimentalmente per questi materiali e si osserva come i valori per le tende siano ridotti rispetto a quelli delle

scaffalature. Il confronto porta ad assumere l'ipotesi di una potenza termica totale rilasciata pari a 5 MW.

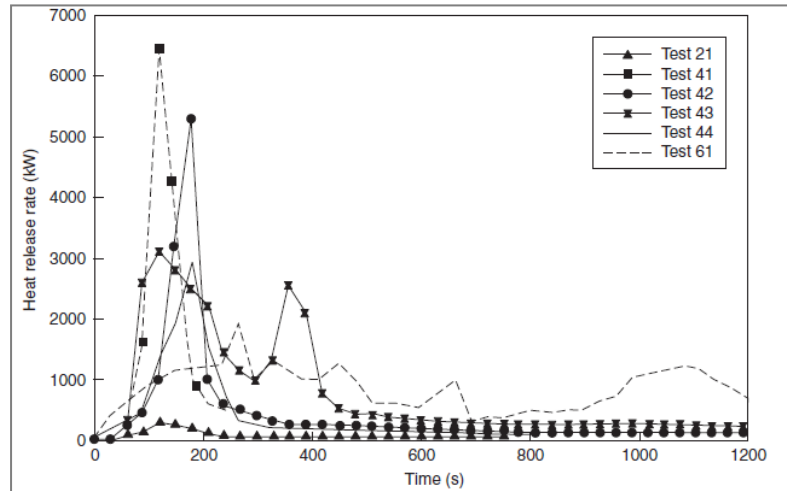


Figura 98: curve RHR delle scaffalature

Type of Fiber	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Configuration	Peak HRR (kW)	Number of Wall and Ceiling Panels Ignited <sup>a</sup>
Cotton	124	Closed	188	1
Cotton	260	Closed	130	7
Cotton	124	Open	157	0
Cotton	260	Open	152	7
Cotton	313	Closed	600	3
Rayon/cotton	126	Closed	214	0
Rayon/cotton	288	Closed	133	6
Rayon/cotton	126	Open	176	0
Rayon/cotton	288	Open	191	2
Rayon/cotton	310	Closed	177	8
Rayon/acetate	296	Closed	105	4
Acetate	116	Closed	155	0
Cotton/polyester	117	Closed	267	1
Cotton/polyester	328	Closed	338	5
Cotton/polyester	117	Open	303	0
Rayon/polyester	367	Closed	658	2
Rayon/polyester	268	Closed	329	7
Rayon/polyester	53	Closed	219	0
Cotton/polyester	328	Open	236	7
Polyester	108	Closed	202	0
Acrylic	99	Closed	231	0
Acrylic	354	Closed	1177	8
Acrylic	99	Open	360	0
Acrylic	354	Open	NA	7
Cotton/polyester/ foam	305	Closed	385	1
Rayon/polyester/ foam	284	Closed	326	0
Rayon/fiberglass	371	Closed	129	5
Rayon/fiberglass	371	Closed	106	5

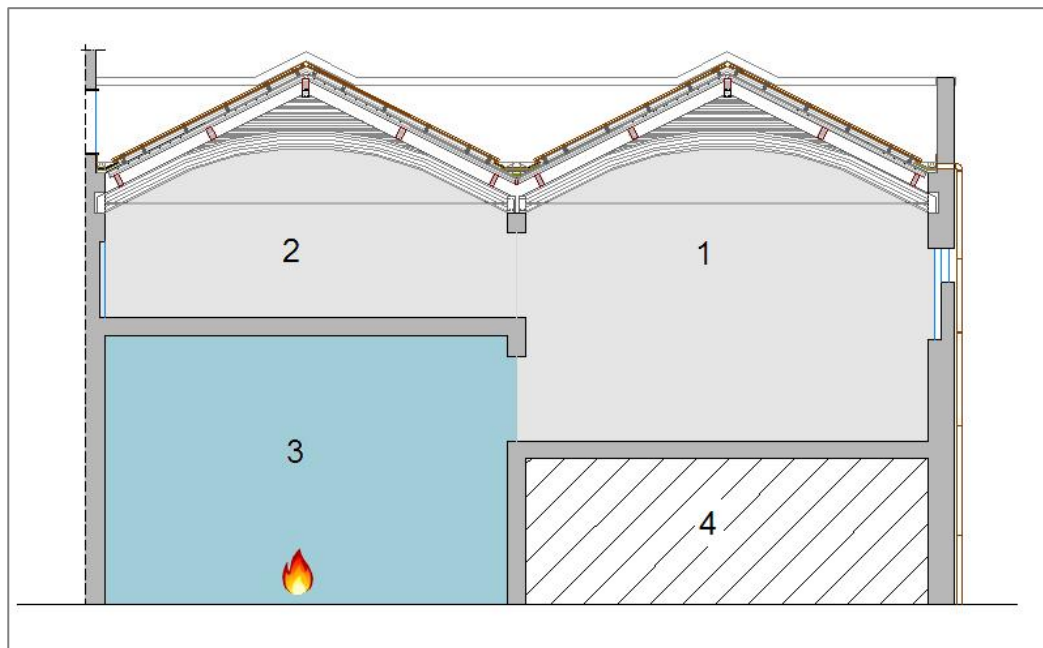
Figura 99: tabella dei valori di RHR per i tendaggi

Infine si considera quest'area particolarmente critica dal punto di vista della sicurezza antincendio per l'elevato tasso di affollamento dovuto alla sua destinazione d'uso.



Figura 100: MAGA. area espositiva a doppia altezza

### Scenario con incendio ambiente 3





L'ambiente considerato è adibito ad area per la movimentazione del materiale del museo e laboratorio ed è comunicante con il restante volume tramite un'apertura grigliata; l'incendio che si può sviluppare è maggiormente pericoloso della situazione precedente poiché coinvolge tutti le stanze e si crea il fenomeno dello *spill plume*.

Gli oggetti presenti che possono ipoteticamente essere la causa dell'incendio sono gli stessi descritti precedentemente, essendo questa l'area in cui vengono depositati. Per questo motivo si continua ad assumere una potenza termica pari a 5 MW come nello scenario precedente.

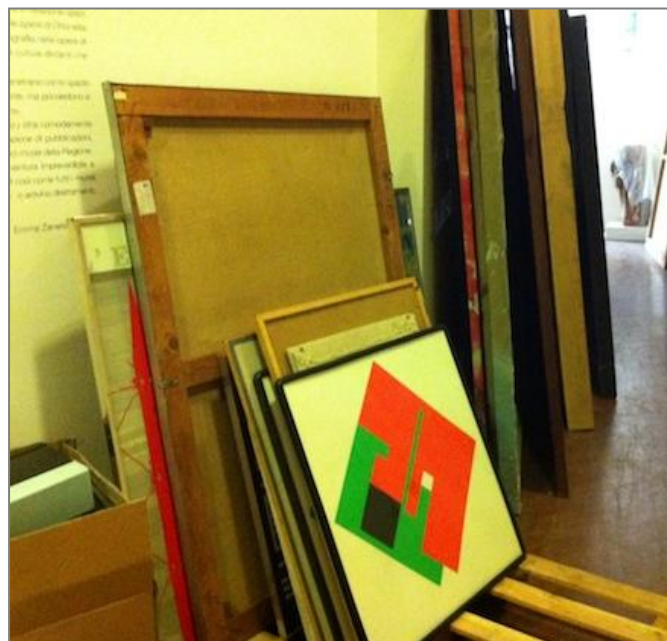
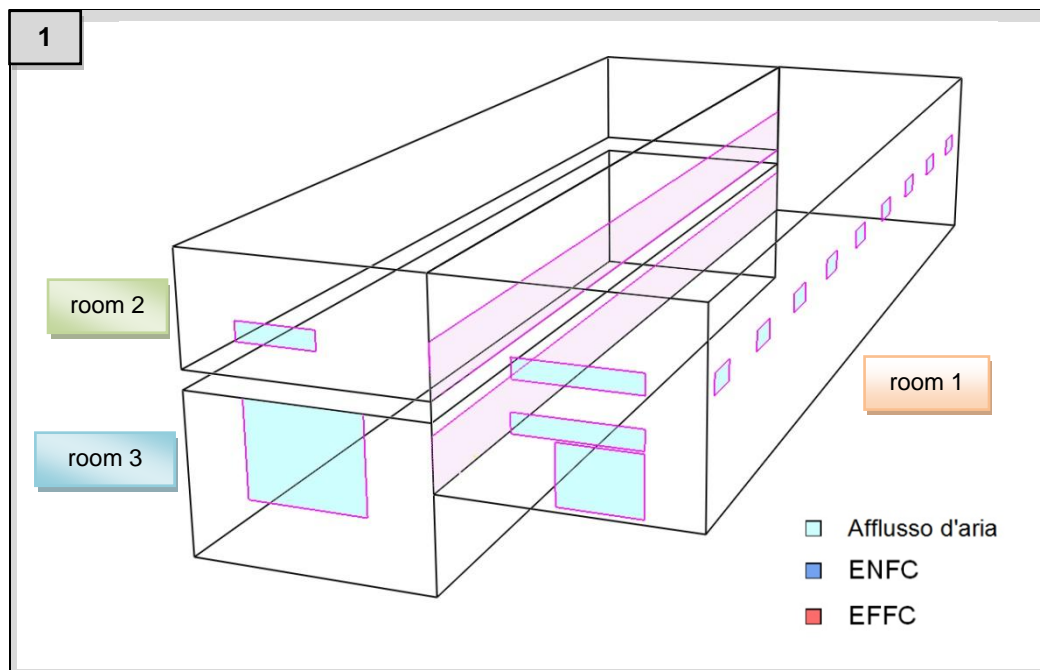


Figura 101: MAGA: materiale del museo

Dal punto di vista dell'incendio risulta più pericolosa dello scenario precedente ma contemporaneamente, non essendo aperta al pubblico, è caratterizzata da un ridotto rischio per l'incolumità e la sicurezza delle persone all'interno di essa.

### 6.2.4. Iter di progettazione e ottimizzazione del sistema di evacuazione

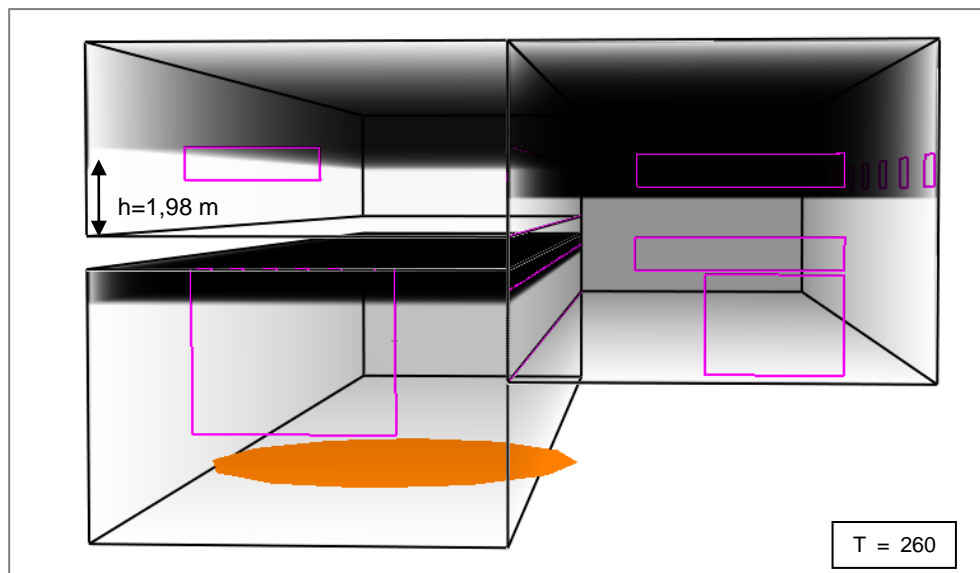
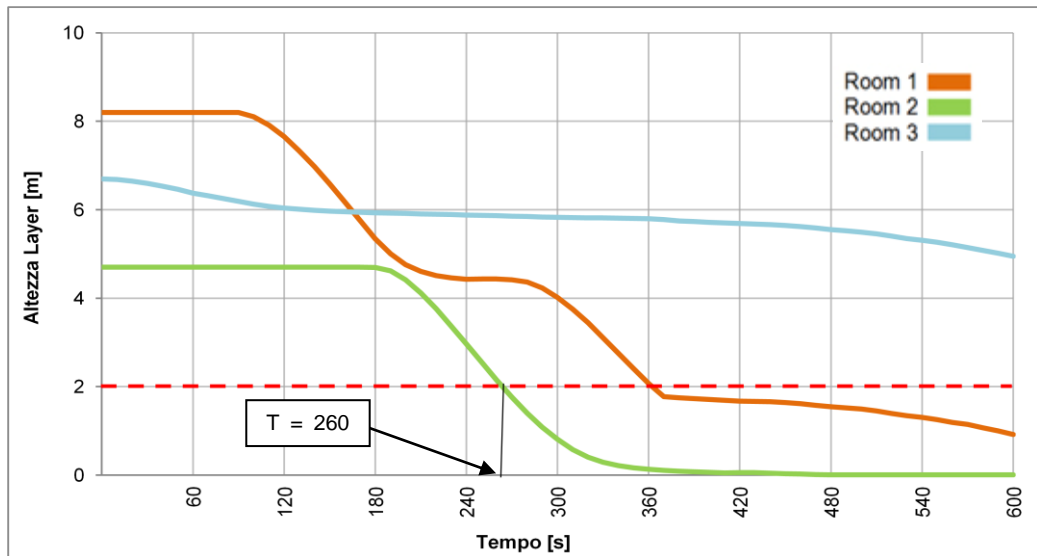
Inizialmente si sceglie lo scenario d'incendio caratterizzato dalla posizione del focolare all'interno della stanza 3 e con potenza termica totale rilasciata pari a 5 MW, che corrisponde alla condizione più sfavorevole come specificato precedentemente. Inoltre si considera l'assenza di un sistema di evacuazione fumi e la sola presenza di una ventilazione naturale, garantita dalle sole aperture esistenti.



posizione focolare	room 3
caratteristiche focolare	RHRmax = 5 MW
strategie	assente

Ventilazione naturale	
superficie	$A = 50,16 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$

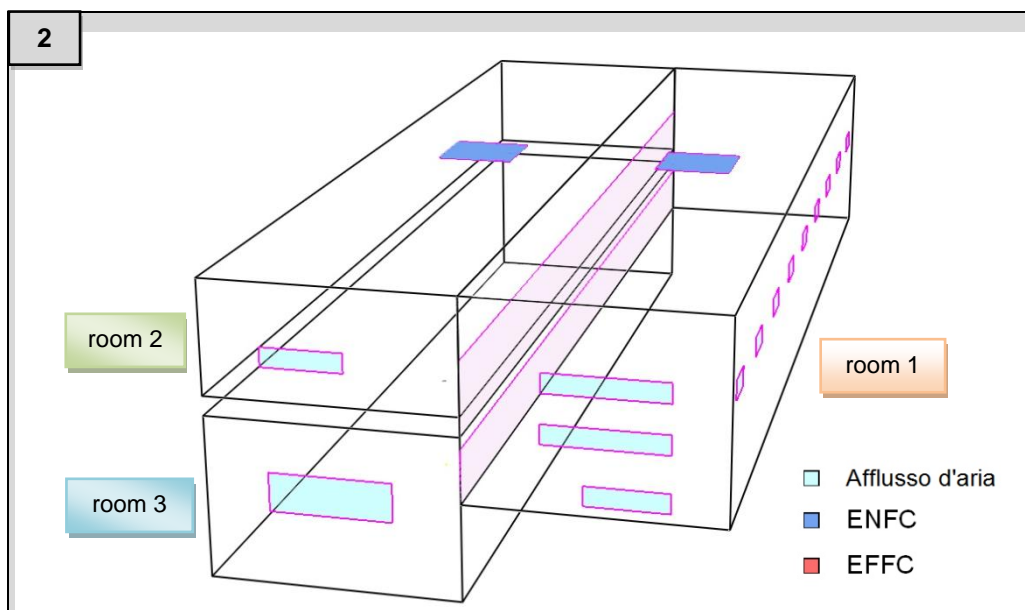




Nonostante siano previste le condizioni più favorevoli possibili, cioè in quelle in cui tutte le aperture permettano lo scambio di flussi d'aria con l'esterno, dai risultati è evidente come a 260 secondi dall'inizio dell'incendio i livelli di prestazione antincendio non siano garantiti.

Risulta quindi necessario introdurre un sistema di evacuazione fumo e calore: la scelta ricade su quello naturale e il dimensionamento avviene seguendo la normativa di riferimento, la norma UNI 9494 – parte 1.

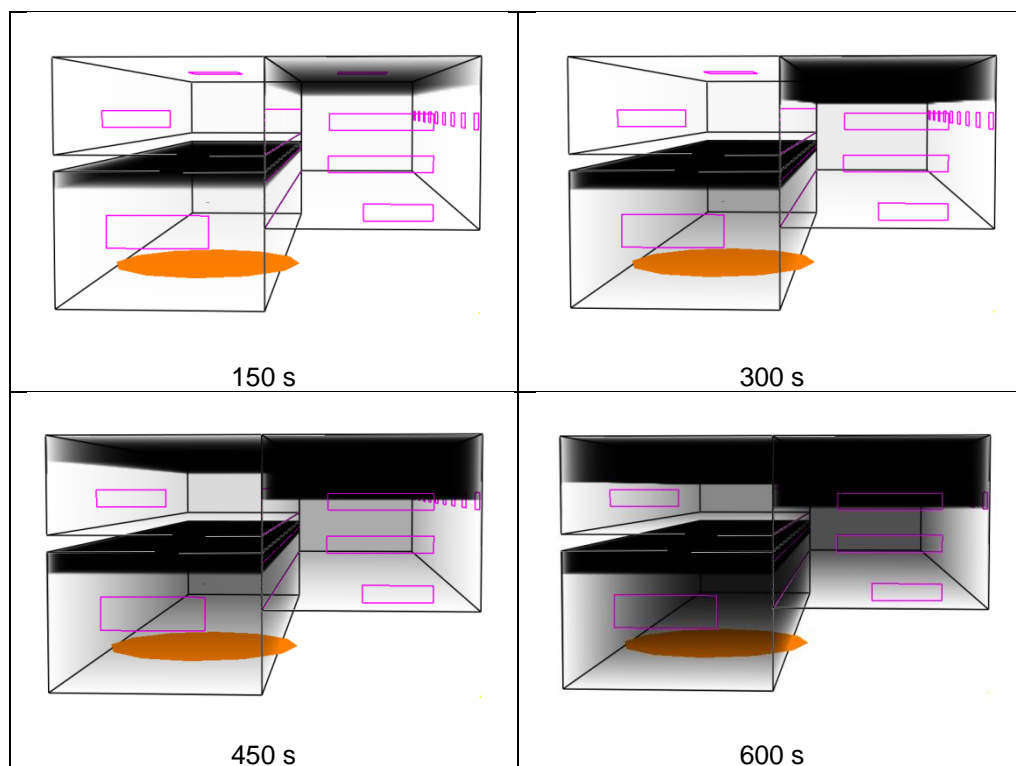
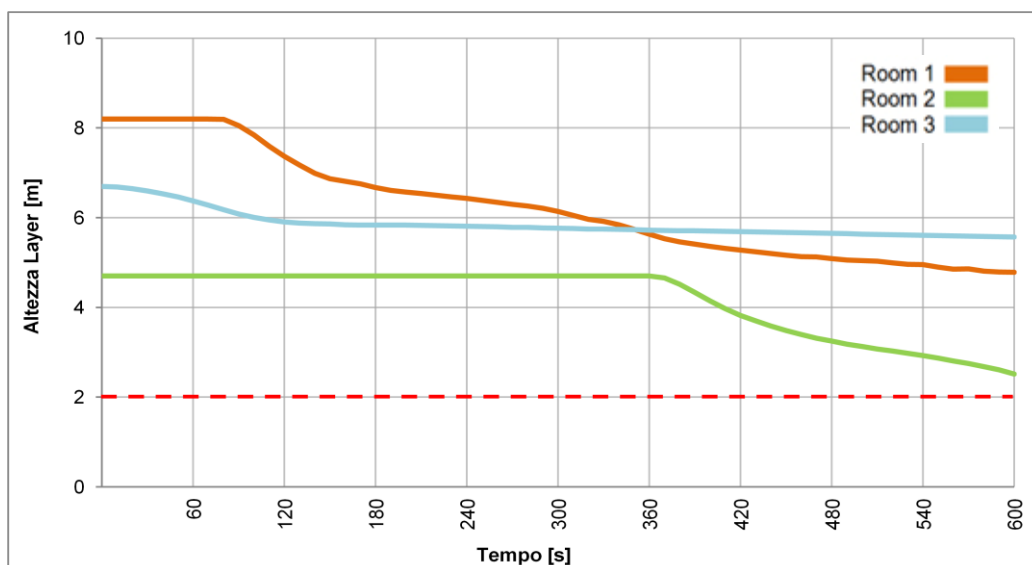
Inserire questi elementi porta a dei vantaggi anche dal punto di vista progettuale: gli ambienti 1 e 2, destinati ad accogliere le diverse aree espositive, sono caratterizzati da una ridotta illuminazione, quindi gli evacuatori possono essere sfruttati come lucernari e portare quindi ad un miglioramento delle prestazioni illuminotecniche dell'edificio.



posizione focolare	room 3
caratteristiche focolare	RHRmax = 5 MW
strategie	ENFC in copertura

Caratteristiche ENFC	
altezza dell'ambiente	$h = 12 \text{ m}$
altezza minima libera dal fumo	$y = 9,5 \text{ m}$
altezza massima dello strato di fumo	$z = 2,5 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	$GD = 3$
superficie utile	$A_{OUT} = 22,3 \text{ m}^2$
Room 1	
superficie utile	$A_{OUT} = 11,5 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 17,8 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 22$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Room 2	
superficie utile	$A_{OUT} = 11,5 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 17,8 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 22$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Afflusso	
rapporto di superficie	$R_S = 1,5$
superficie di afflusso	$A_{IN} = 33 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$





Dall'analisi risultano verificati tutti i requisiti antincendio all'interno di ogni ambiente.

Data la conformazione del tetto a doppia falda, l'installazione dei dispositivi avviene su una superficie inclinata e per questa ragione risulta una scelta complessa dal punto di vista progettuale. Bisogna considerare due aspetti; in primo luogo l'efficienza effettiva di funzionamento deve essere ridotta considerando un coefficiente pari a 0,65 che aumenta la superficie necessaria ad un valore pari a 35,4 m<sup>2</sup>.

Inoltre bisogna valutare l'azione del vento su un tetto a doppia falda: nelle zone sottovento correnti d'aria di basse velocità che impattano direttamente con i gas e fumi caldi estratti dall'evacuatore, producono un raffreddamento delle particelle facendo ricadere, all'interno del fabbricato, gli elementi di combustione ostruendo così l'uscita dei fumi e gas caldi. Ipotizzando che il vento possa agire in una direzione o in quella opposta, si raddoppia il numero degli elementi installandoli in ogni falda, evitando quindi che l'efficienza del sistema venga alterata.

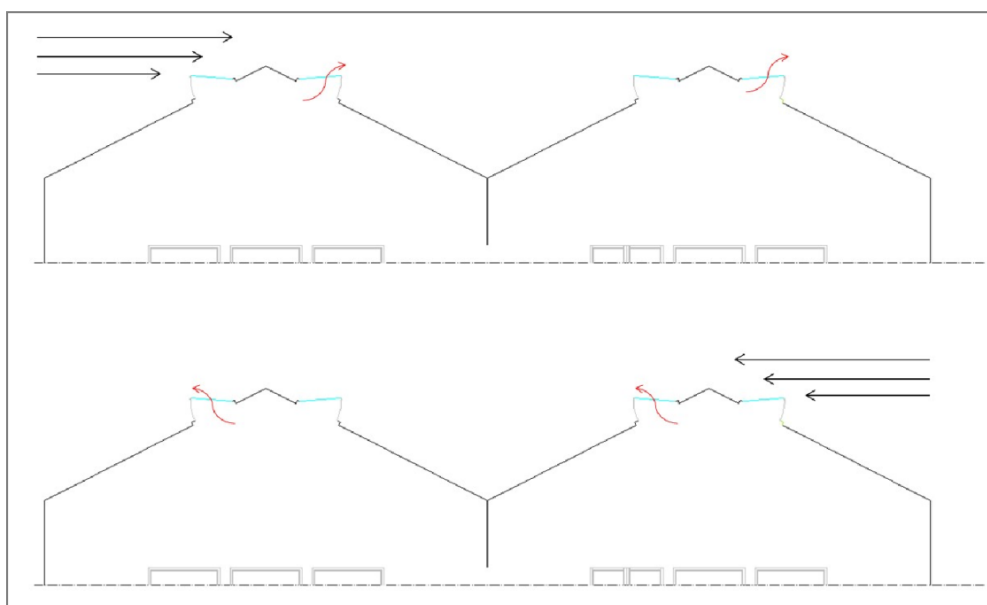



Figura 102: influenza del vento su una copertura inclinata

Si scelgono e si verificano, sulla base della scheda tecnica, il seguente modello di evacuatore.

Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	Essertop
superficie utile singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 0,79 \text{ m}^2$
superficie geometrica singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 1,18 \text{ m}^2$
superficie utile richiesta	$A_A = 34,5 \text{ m}^2$
numero previsti	$n = 44$
superficie utile totale	$A_A = 34,76 \text{ m}^2$
superficie geometrica totale	$A_V = 52,16 \text{ m}^2$



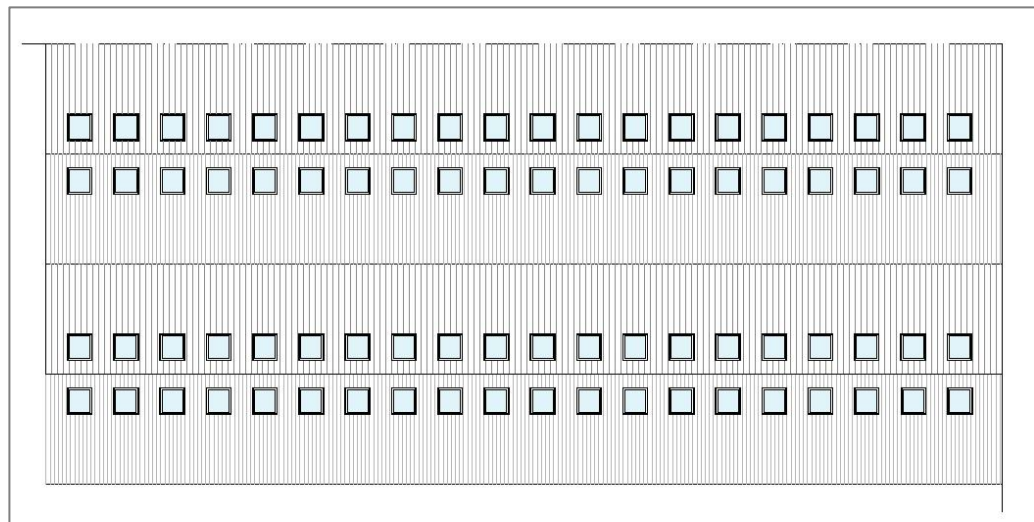
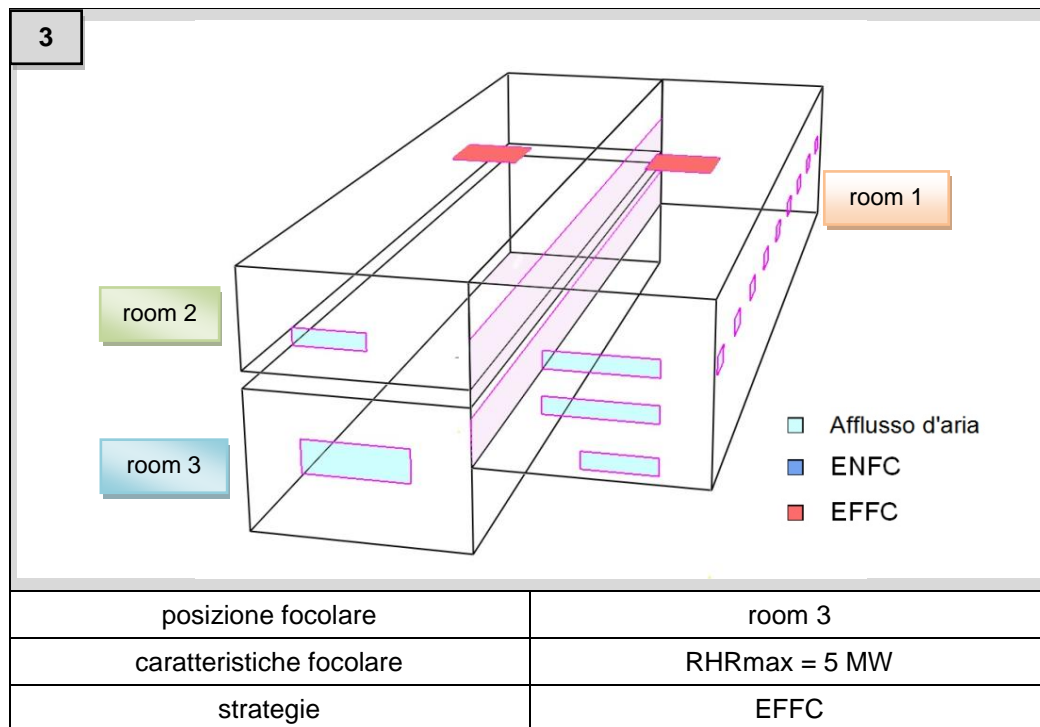


Figura 103: installazione in copertura di evacuatori naturali secondo UNI9494

Risulta evidente come questa possibile soluzione non sia accettabile dal punto di vista progettuale ed inoltre richiederebbe una spesa troppo elevata da renderla realizzabile o ottimale dal punto di vista economico.

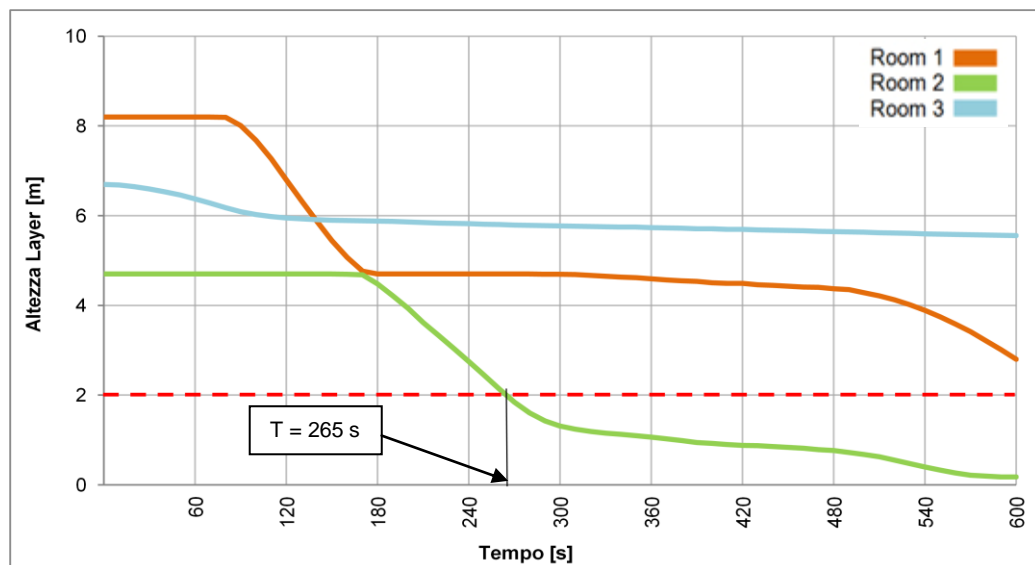
Si procede con l'analisi della tipologia di sistema di evacuazione fumo e calore alternativa, quella dei forzati; si dimensiona l'impianto con la normativa di riferimento considerando l'altezza totale del corpo di fabbrica, la norma UNI 9494 – parte 2.

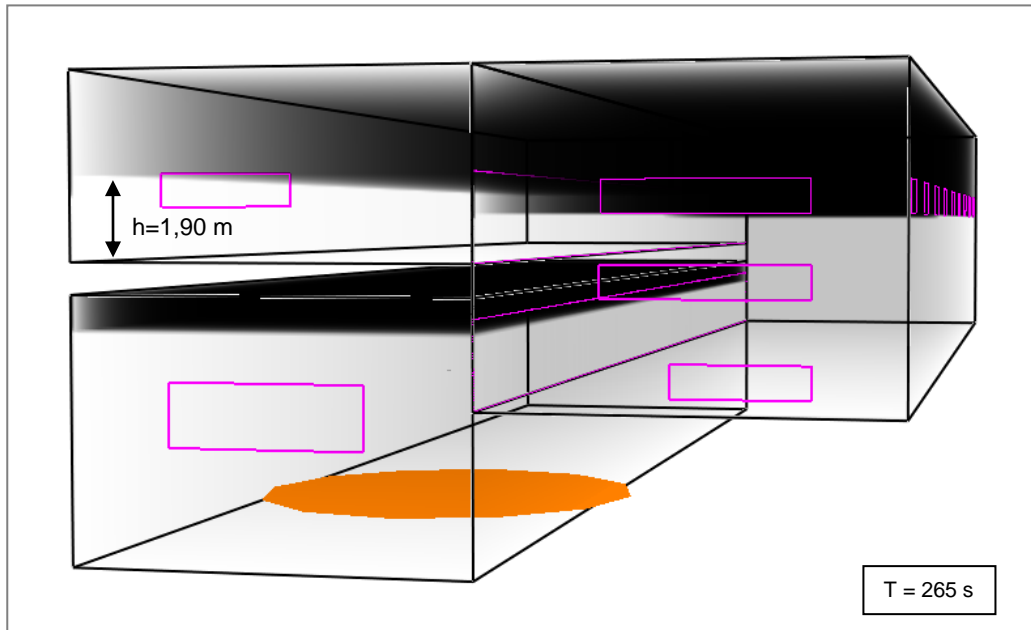




Caratteristiche EFFC	
altezza libera dai fumi	$h = 10 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	$GD = 3$
portata di estrazione	$P_{OUT} = 64 \text{ m}^3/\text{s}$
Room 1	
portata di estrazione	$P_{OUT} = 32 \text{ m}^3/\text{s}$
numero EFFC previsti	$n = 7$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Room 2	
portata di estrazione	$P_{OUT} = 32 \text{ m}^3/\text{s}$
numero EFFC previsti	$n = 7$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$

Afflusso	
rapporto di superficie	$R_S = 1,5$
superficie di afflusso	$A_{IN} = 33 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$





Dalla simulazione risulta che con questo sistema a 265 secondi dall'inizio dell'incendio i livelli di sicurezza non sono garantiti. L'altezza del layer dei fumi caldi dell'ambiente 2 infatti scende al di sotto del limite dei 2 metri.

Il sistema scelto non è in grado di garantire i requisiti richiesti poiché la portata di aria estratta non è sufficiente; risulta quindi necessario verificare se questa soluzione possa essere ottimizzare. Per prima cosa si effettua un dimensionamento ipotizzando il seguente modello di evacuatore, sulla base della scheda tecnica fornita dal produttore.

Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	EFFC assiale per tetto
Portata di estrazione singolo elemento	$P_{\text{unità}} = 4,72 \text{ m}^3/\text{s}$
portata di estrazione richiesta	$P_{\text{OUT}} = 64 \text{ m}^3/\text{s}$
numero previsti	$n = 14$
portata di estrazione totale	$P_{\text{OUT}} = 66,08 \text{ m}^3/\text{s}$

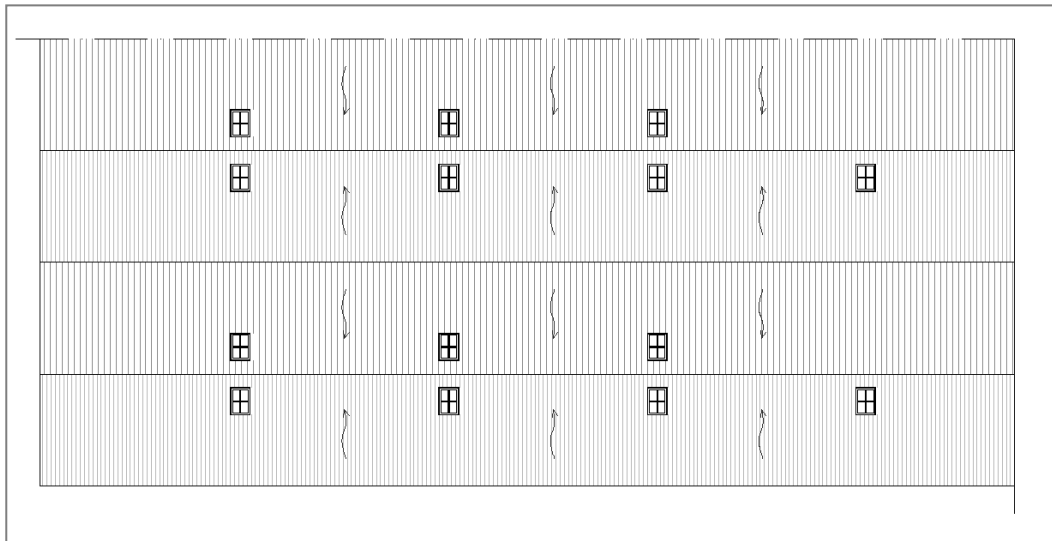


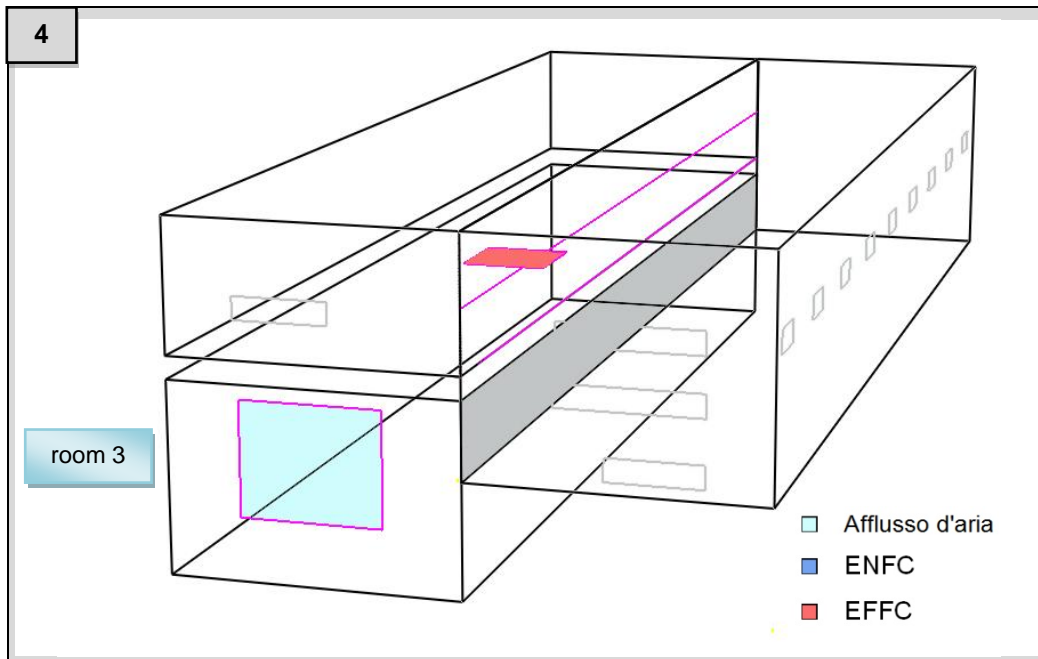
Figura 104: installazione in copertura di evacuatori forzati secondo UNI9494

Ottimizzare significherebbe aumentare il numero degli elementi e quindi il costo dell'intervento, che risulta già rilevante. Si ricercano quindi altre possibili alternative.

Si sono quindi analizzate tutte le possibili soluzioni per lo scenario d'incendio all'interno della room 3 comunicante con gli altri ambienti, ma nessuna ha portato a un risultato accettabile sia dal punto di vista antincendio sia di effettiva fattibilità. Bisogna quindi dividere questa stanza dal restante volume inserendo una barriera o un elemento di tenuta al fumo; si vanno quindi a garantire le prestazioni in questo ambiente preso singolarmente e successivamente si considerano gli altri due ambienti nel nuovo scenario d'incendio.

Si isola la room 3 attraverso una barriera o un elemento fisso che impedisce la propagazione dei fumi: non si attua una vera e propria compartimentazione antincendio, ma una compartimentazione al fumo. L'elemento scelto deve impedire la propagazione dei fumi all'ambiente adiacente e risulta necessario verificare le temperature che raggiunge dallo strato dei fumi per poterne stabilire le caratteristiche tecniche.

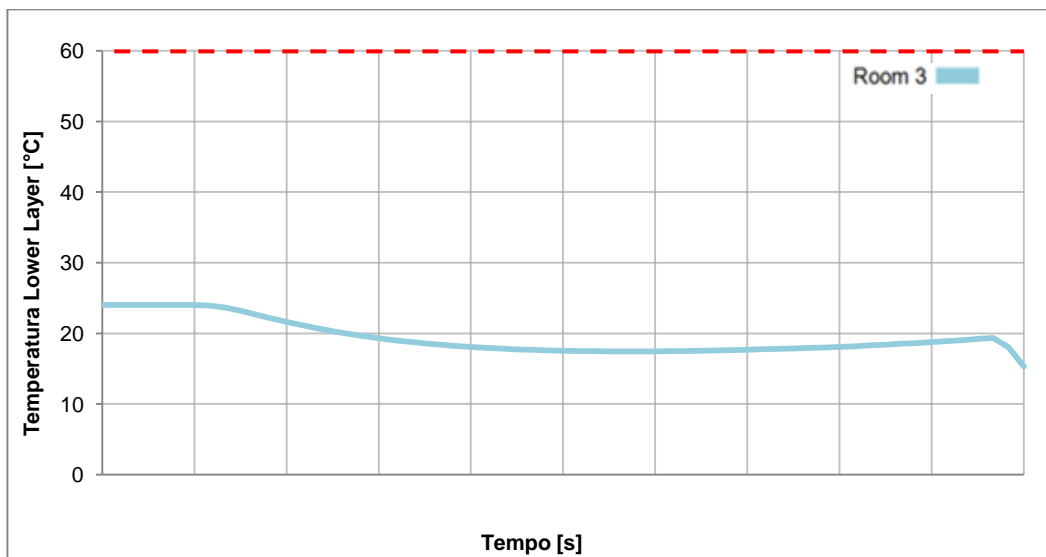
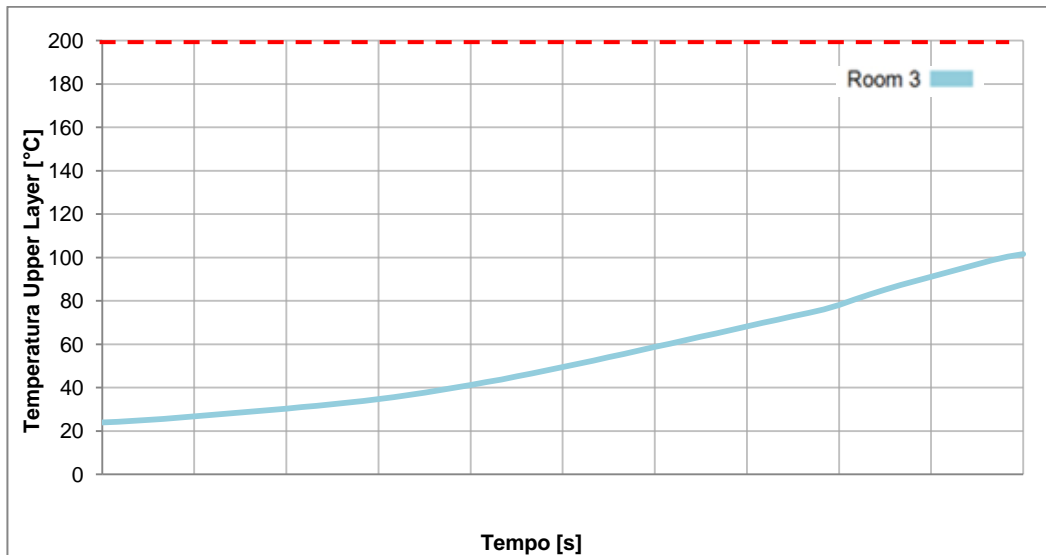
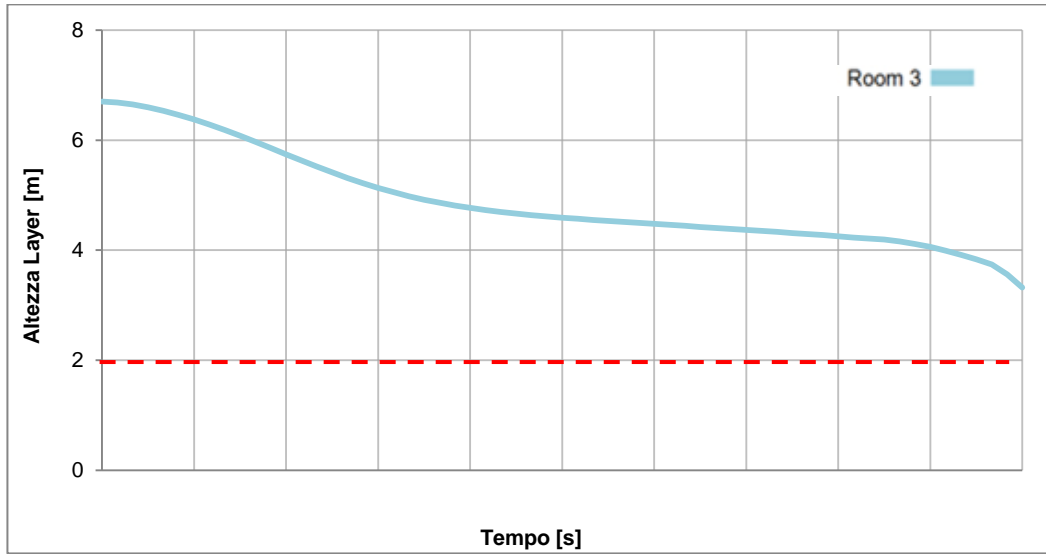
Si esclude l'installazione di un sistema di evacuazione naturale poiché l'ambiente è dotato solamente di una parete in cui è possibile installare degli evacuatori in cui sono già presenti le aperture di immissione, quindi risulterebbe poco ottimale non solo dal punto di vista progettuale ma anche di efficienza del sistema. La scelta ricade sul sistema di evacuazione forzato, sempre attraverso un dimensionamento normativo.



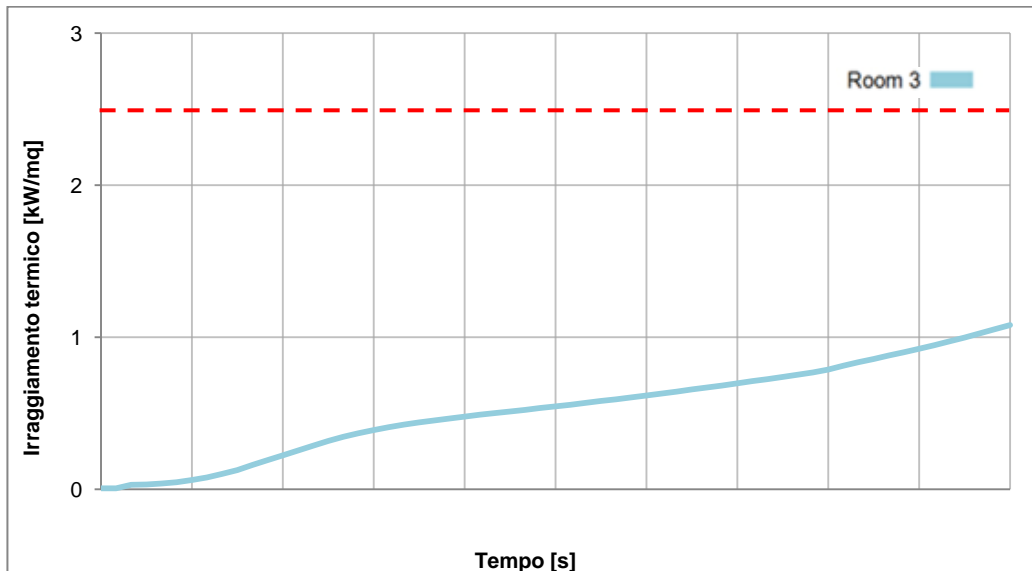
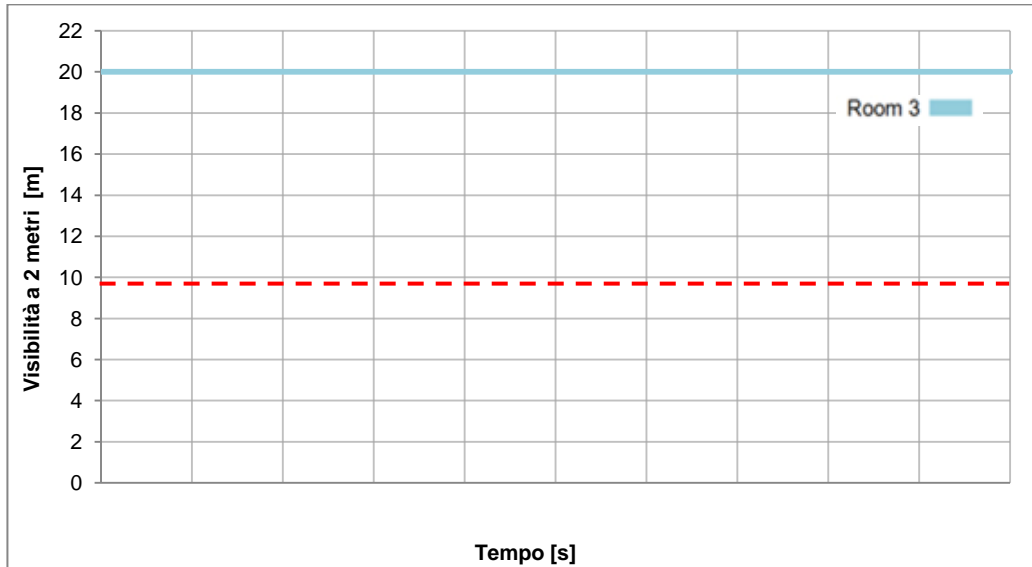
posizione focolare	room 3
caratteristiche focolare	RHRmax = 5 MW
strategie	EFFC

Caratteristiche EFFC Room 3	
altezza libera dal fumo	$y = 2,5 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	GD = 3
portata di estrazione	$P_{OUT} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$
numero EFFC previsti	$n = 3$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$

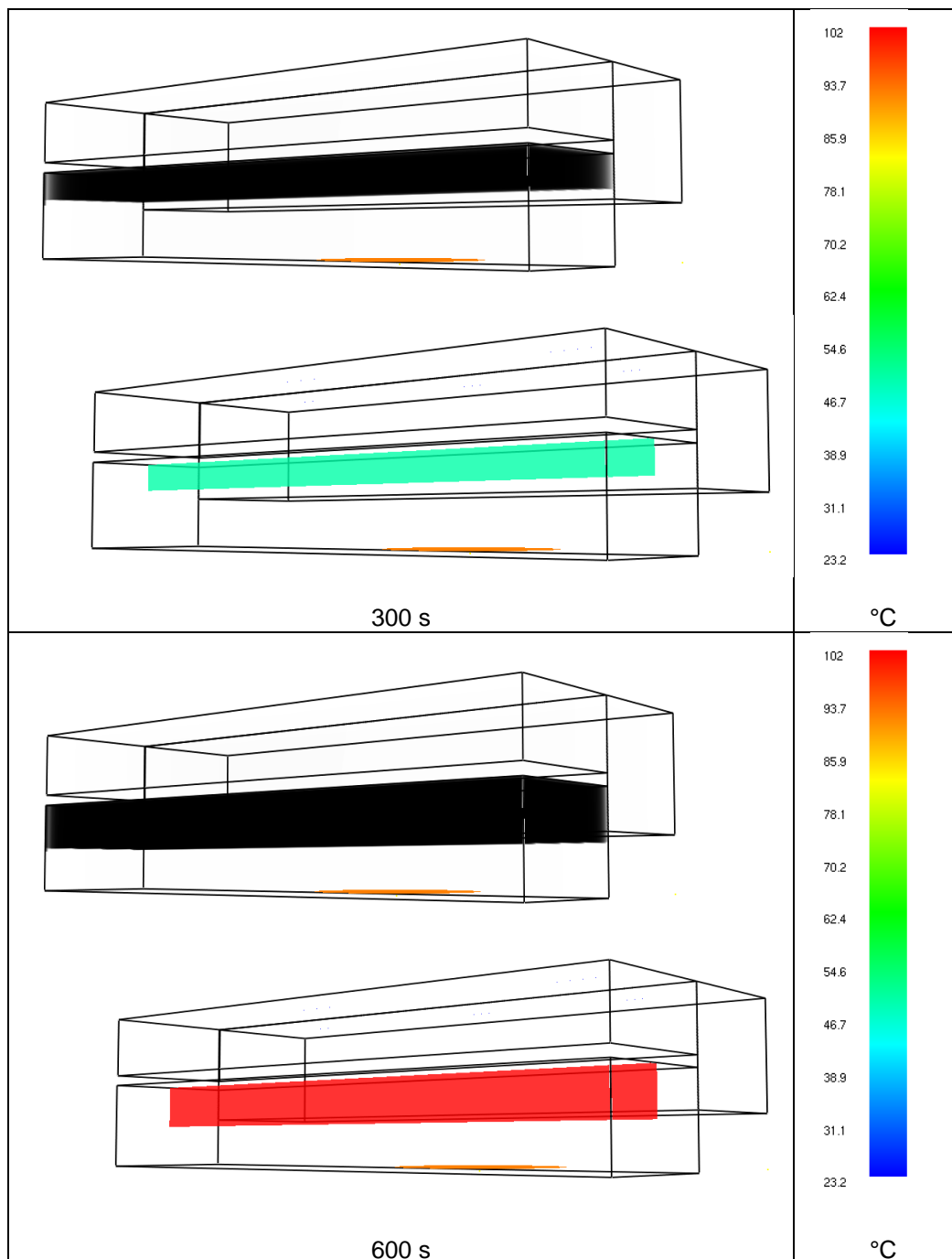
Afflusso	
superficie di afflusso	$A_{IN} = 12 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$







altezza strato libero fumi	2 m	✓
$T_{max}$ upper layer	200 °C	✓
$T_{max}$ lower layer	60°C	✓
visibilità	10 m	✓
irraggiamento termico	2,5 kW/m <sup>2</sup>	✓

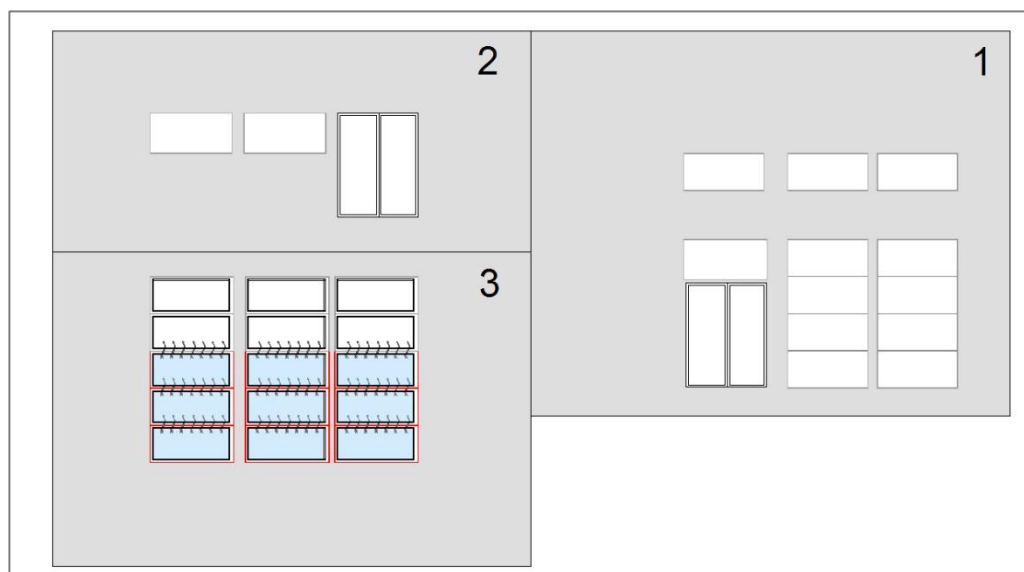


I parametri sono verificati. Il sistema potrebbe essere ottimizzato con B-RISK, ma si è notato che portando l'evacuazione ad un valore di  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  i livelli di prestazione non sono garantiti. Si assumono quindi questi valori come utilizzabili per il dimensionamento del sistema, riferimento ad una specifica tecnologia.

Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	EFFC assiale per parate
Portata di estrazione singolo elemento	$P_{\text{unità}} = 7,97 \text{ m}^3/\text{s}$
portata di estrazione richiesta	$P_{\text{OUT}} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$
numero previsti	$n = 3$
portata di estrazione totale	$P_{\text{OUT}} = 23,91 \text{ m}^3/\text{s}$



Bisogna sottolineare la presenza di una criticità che riguarda la progettazione del sistema di evacuazione forzato in questa particolare situazione. L'ambiente è posizionato al piano terra e confina su tre lati con gli altri ambienti; inoltre l'unica parete libera è caratterizzata dalla presenza di serramenti dotati di un sistema di apertura automatico per garantire l'ingresso di aria pulita.



Per questo motivo si prevede l'installazione di esse in copertura o su una facciata che non confini con la room 3, grazie all'utilizzo a un sistema di condotte che convogliano i prodotti nelle zone di espulsione. Si scelgono questi sistemi poiché sono flessibili e possono essere sfruttati sia in parete, sia in copertura.

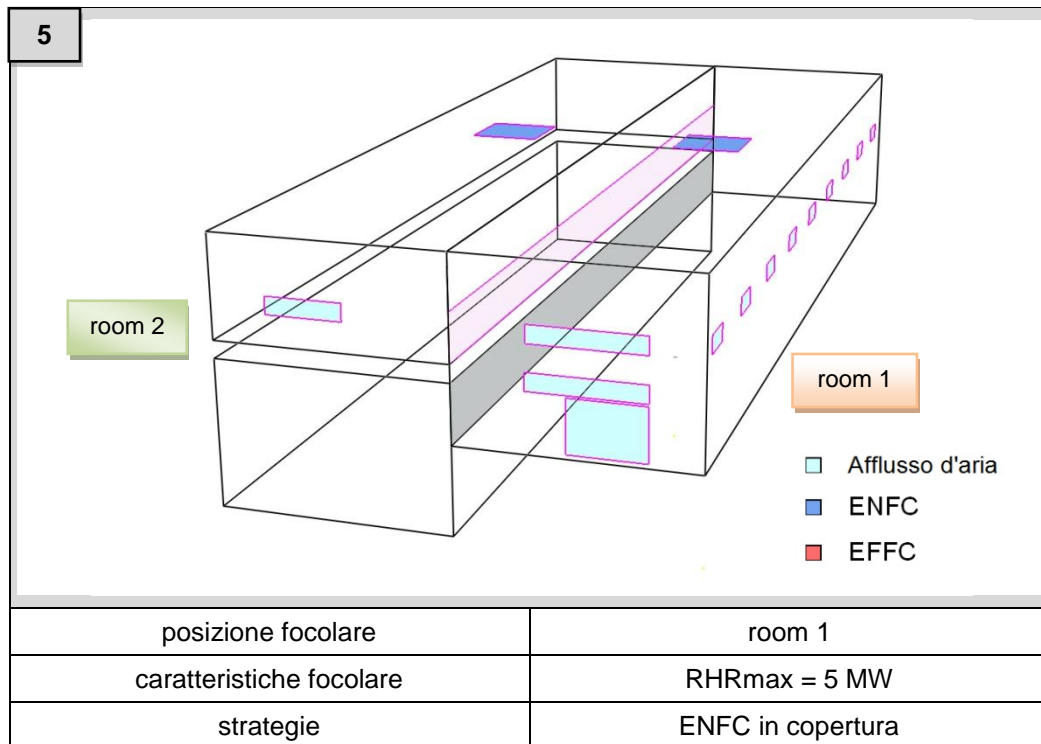
Infine l'elemento divisorio tra i due ambienti deve impedire la propagazione dei fumi, senza avere particolari caratteristiche di resistenza al fuoco; quindi si può ipotizzare una lastra in cartongesso o anche in vetro. L'importante è che il materiale sia ignifugo e che resista alle temperature previste di circa 100 °C, quindi non particolarmente critiche.

Una volta messa in sicurezza la room 3 si prosegue andando ad analizzare lo scenario successivo in cui l'incendio è situato all'interno della stanza di elevata altezza ed è caratterizzato da una potenza termica rilasciata pari a 5 MW.

All'interno del suddetto scenario bisogna analizzare una particolare situazione: la partizione interna tra i due ambienti è dotata di aperture e crea un elemento sottotrave continuo per tutta la lunghezza del fabbricato: esso può essere considerato come una sorta di barriera al fumo. Le barriere al fumo sono elementi che delimitano il perimetro del compartimento a soffitto, inserite con lo scopo di diminuire la propagazione di fumo che può invadere i compartimenti circostanti e inquinare lo strato libero.

Risulta necessario verificare che questo elemento sia effettivamente in grado di garantire questi requisiti e quindi valutare le temperature a cui viene esposto.

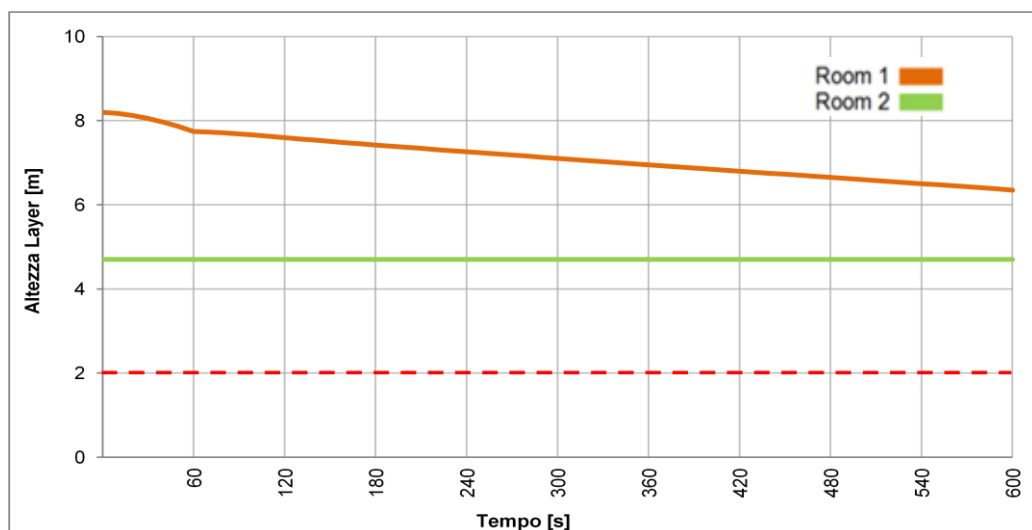
Per un predimensionamento si fa riferimento, anche in questo caso, alla norma UNI9494.

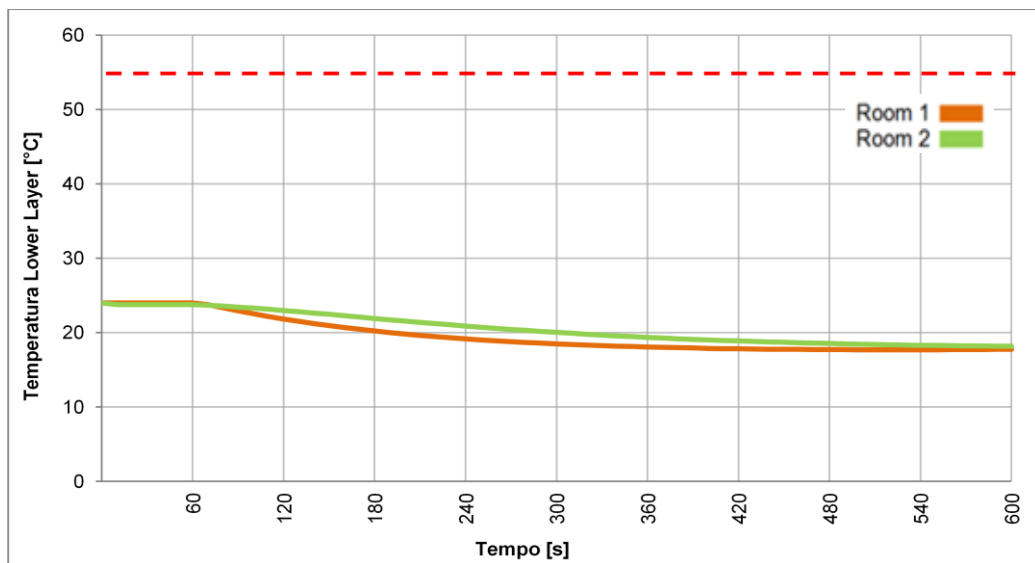
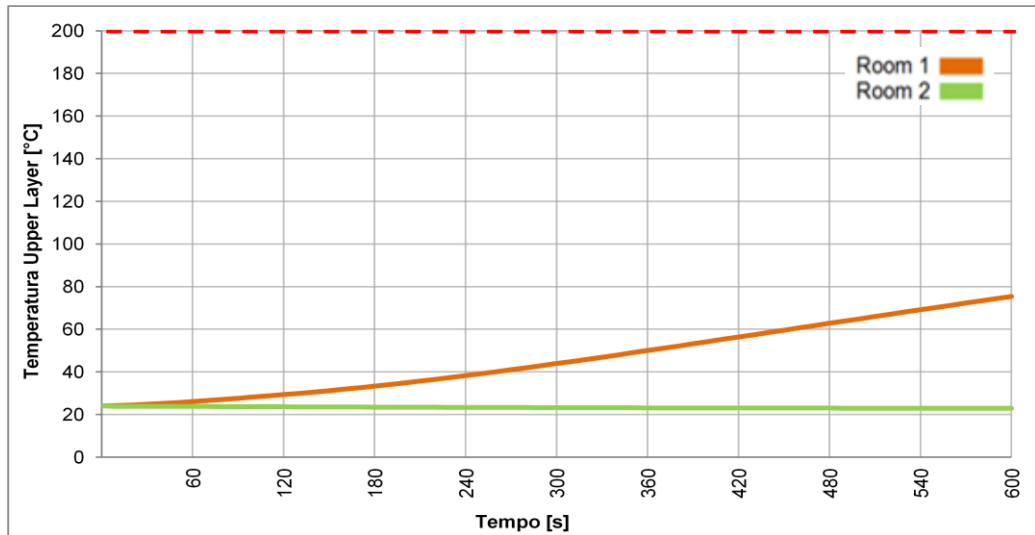
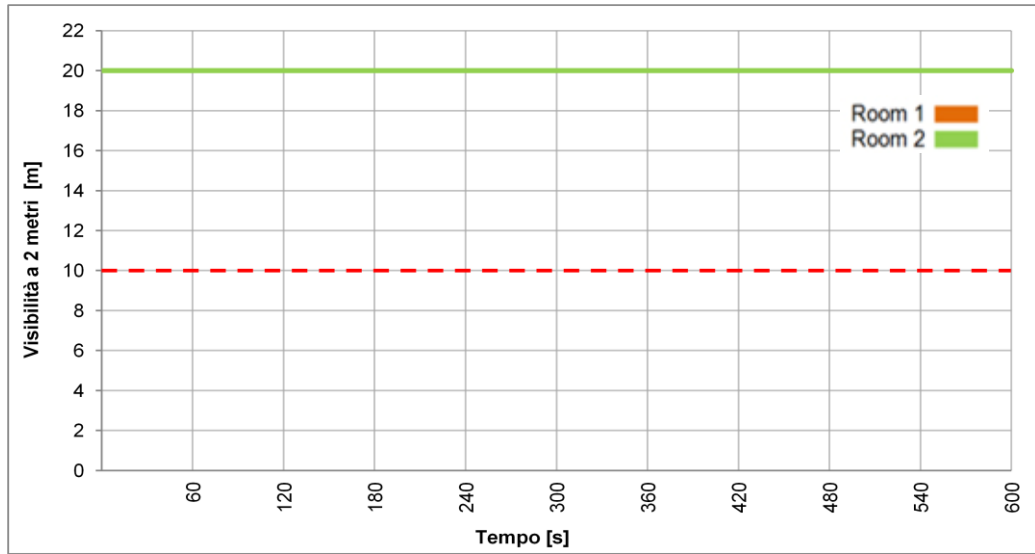


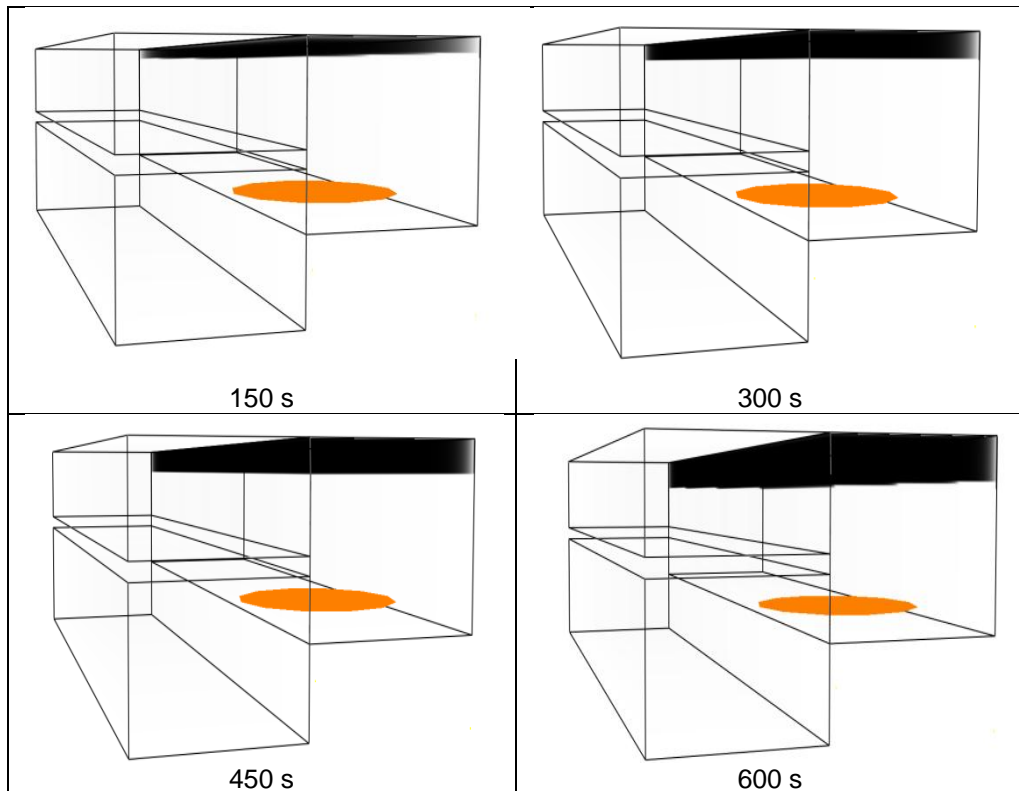
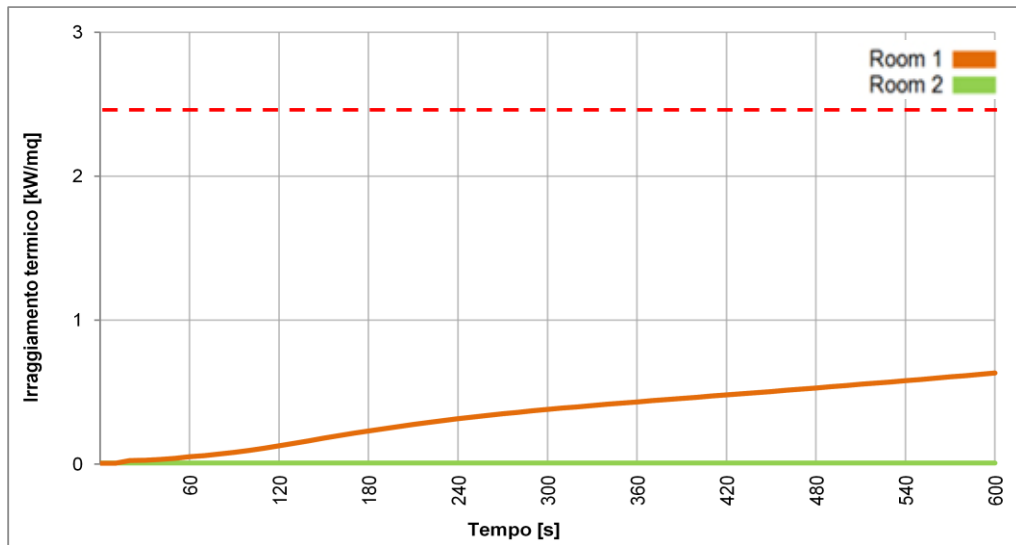


Caratteristiche ENFC	
altezza dell'ambiente	$h = 8,5 \text{ m}$
altezza minima libera dal fumo	$y = 6,5 \text{ m}$
altezza massima dello strato di fumo	$z = 2 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	$GD = 3$
superficie utile	$A_{OUT} = 20,5 \text{ m}^2$
Room 1	
superficie utile	$A_{OUT} = 10,5 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 16,2 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 13$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Room 2	
superficie utile	$A_{OUT} = 10,5 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 16,2 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 13$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$


Afflusso	
rapporto di superficie	$R_S = 1,5$
superficie di afflusso	$A_{IN} = 30,75 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$







Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	Essertop
superficie utile singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 0,79 \text{ m}^2$
superficie geometrica singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 1,18 \text{ m}^2$
superficie utile richiesta	$A_A = 20,5 \text{ m}^2$
numero previsti	$n = 26$
superficie utile totale	$A_A = 20,54 \text{ m}^2$
superficie geometrica totale	$A_V = 30,68 \text{ m}^2$

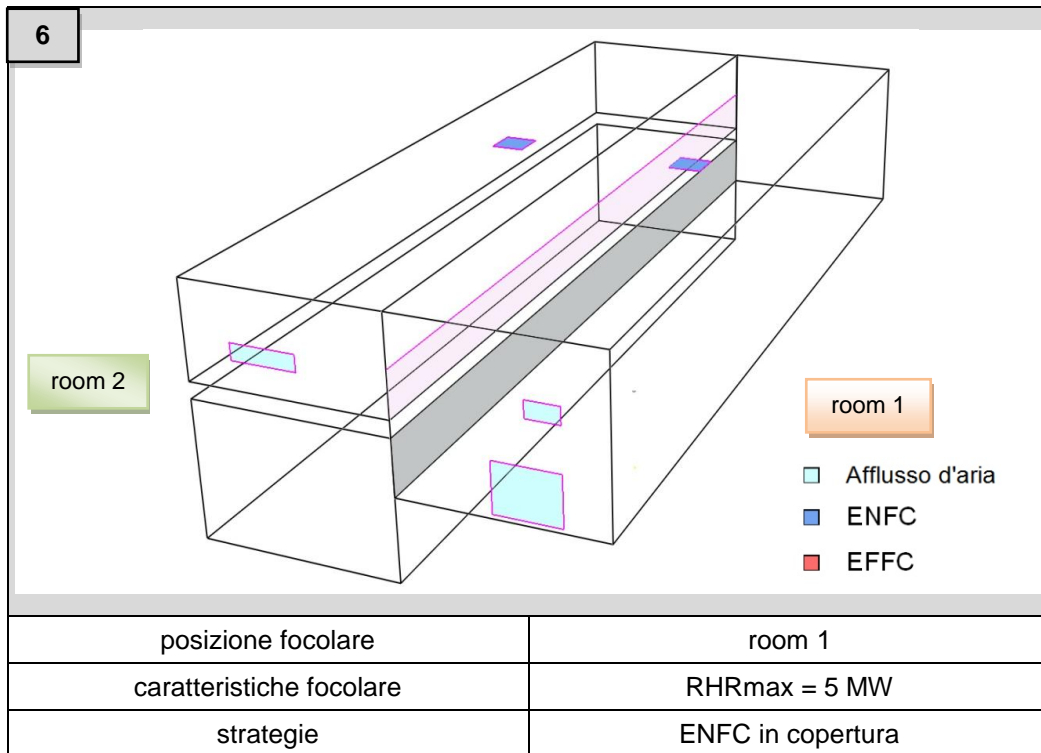


Il risultato appena ottenuto porterebbe a un sovradimensionamento dei dispositivi di evacuazione naturale in copertura, con conseguenti spese aggiuntive superflue. Si nota come il fumo rimanga all'interno della room 1 e non si propaghi nell'ambiente adiacente. La temperatura media dello strato di fumi caldi ( $80^{\circ}\text{C}$ ) a contatto con l'elemento sottotrave, inoltre, è tale che questa situazione si verifichi nella realtà poiché il setto può comportarsi come una vera e propria barriera al fumo.

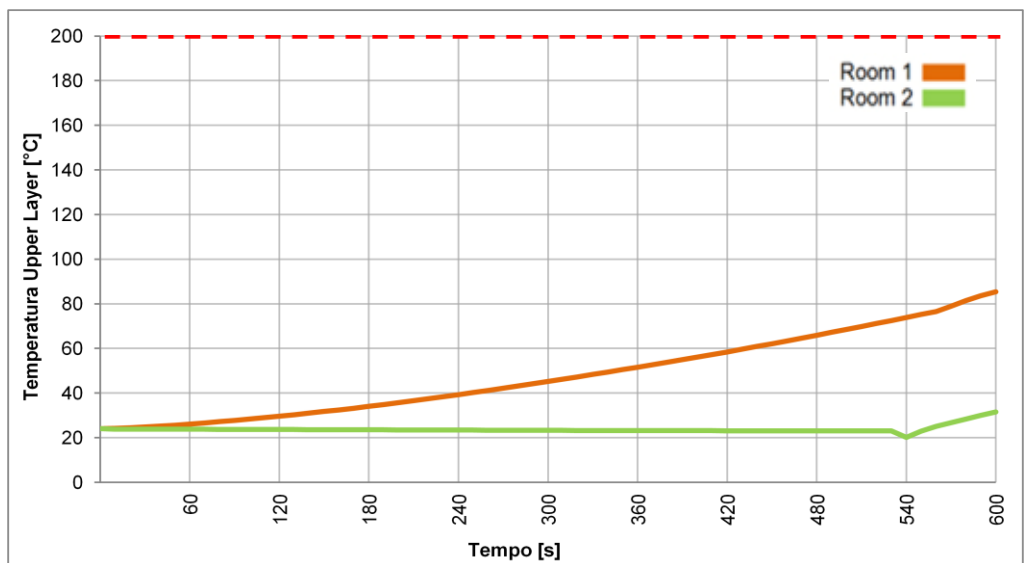
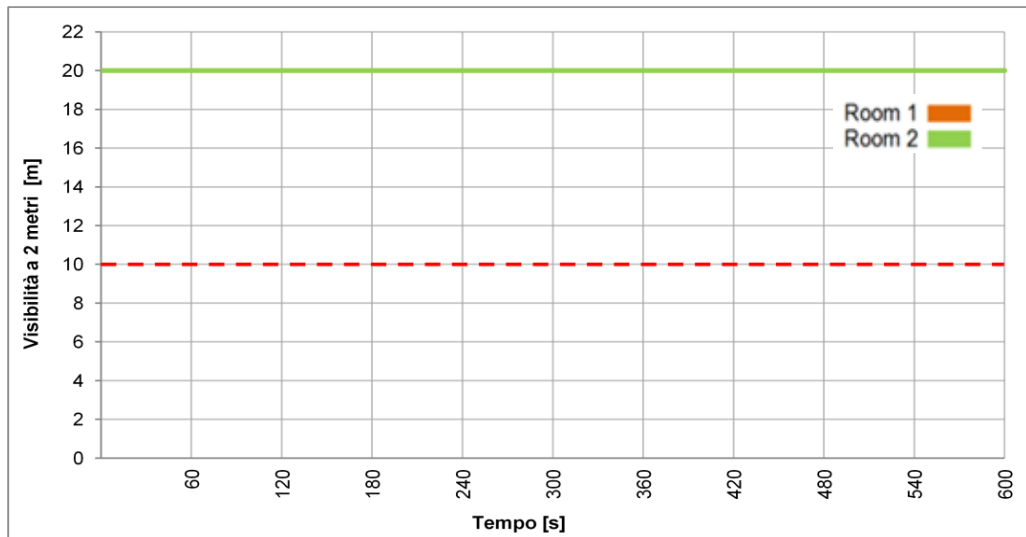
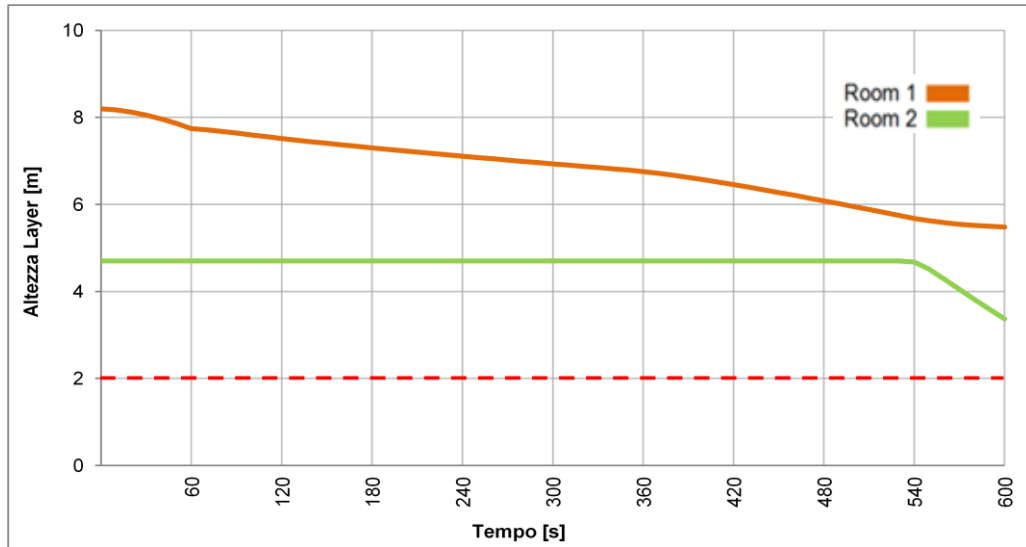
Da queste considerazioni si cerca di ottimizzare il sistema di evacuatori naturali sfruttando la possibilità di effettuare diverse prove grazie al software. Il rapporto di 1,5 tra la dimensione della superficie degli evacuatori e quella delle aperture di afflusso viene mantenuto costante e l'iterazione viene svolta a partire dai valori di normativa fino ad individuare dimensioni del sistema in grado di rispondere ai requisiti richiesti.

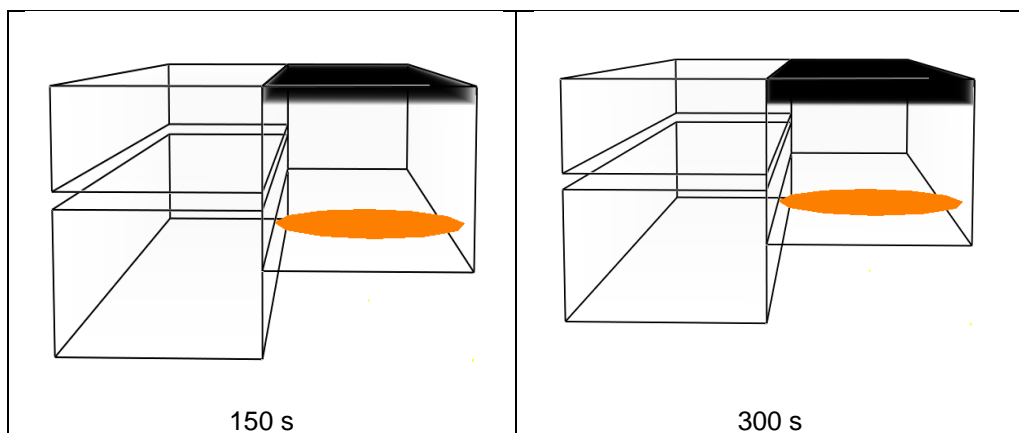
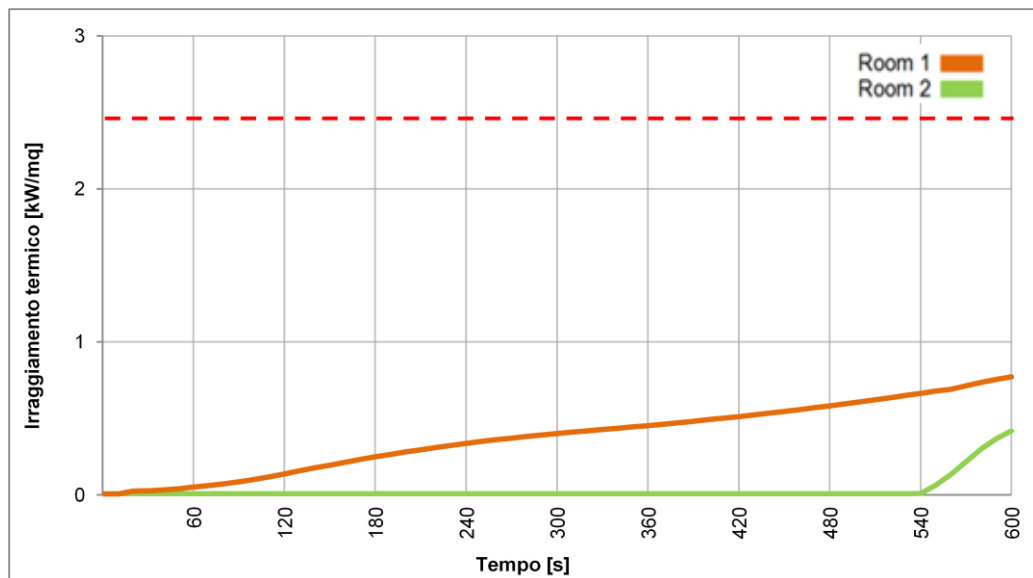
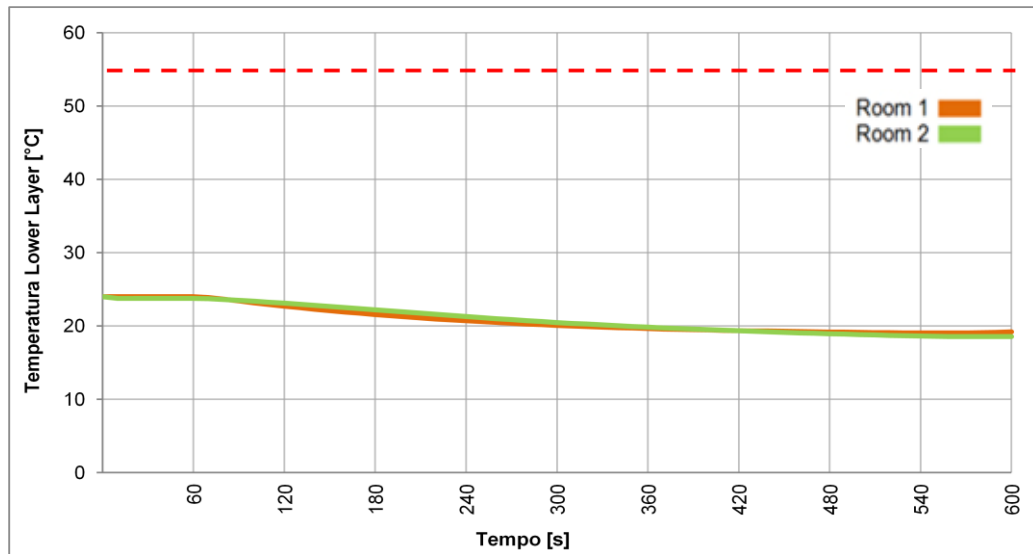
L'ottimizzazione del sistema ha portato ad una riduzione non solo della superficie destinata all'evacuazione, ma anche di quella di immissione. Per un corretto funzionamento dell'impianto è fondamentale prevedere delle aperture di afflusso con dimensioni e numero tale da garantire l'effetto camino di questo sistema di ventilazione naturale. E' di particolare importanza la scelta della posizione di queste aperture, le quali devono essere ubicate possibilmente nella parte più bassa dell'edificio (e comunque totalmente al di sotto dello strato di fumo) e distribuite in modo omogeneo sul perimetro. Per questo motivo si è deciso di chiudere le aperture di afflusso a partire da quelle posizionate a quote più elevate.

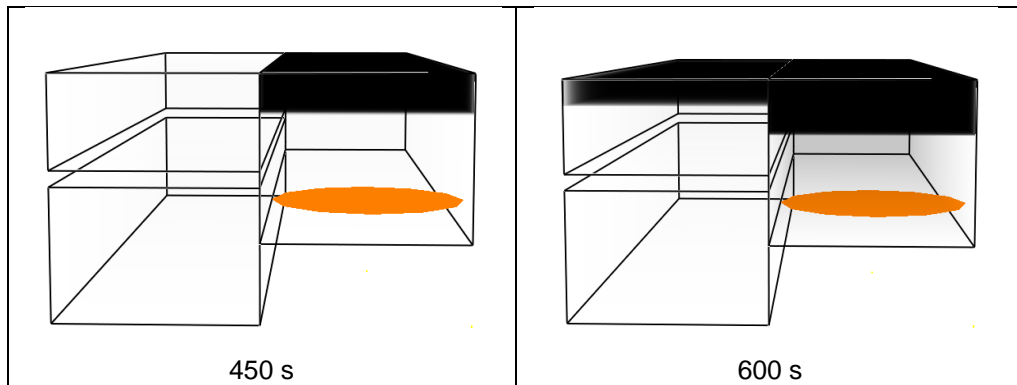




Caratteristiche ENFC	
altezza dell'ambiente	$h = 8,5 \text{ m}$
altezza minima libera dal fumo	$y = 6,5 \text{ m}$
altezza massima dello strato di fumo	$z = 2 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	$GD = 3$
superficie utile	$A_{OUT} = 7,92 \text{ m}^2$
Room 1	
superficie utile	$A_{OUT} = 6,16 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 9,48 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 7$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Room 2	
superficie utile	$A_{OUT} = 1,76 \text{ m}^2$
superficie geometrica	$A_{OUT} = 2,7 \text{ m}^2$
numero ENFC previsti	$n = 3$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Afflusso	
rapporto di superficie	$R_S = 1,5$
superficie di afflusso	$A_{IN} = 11,88 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$








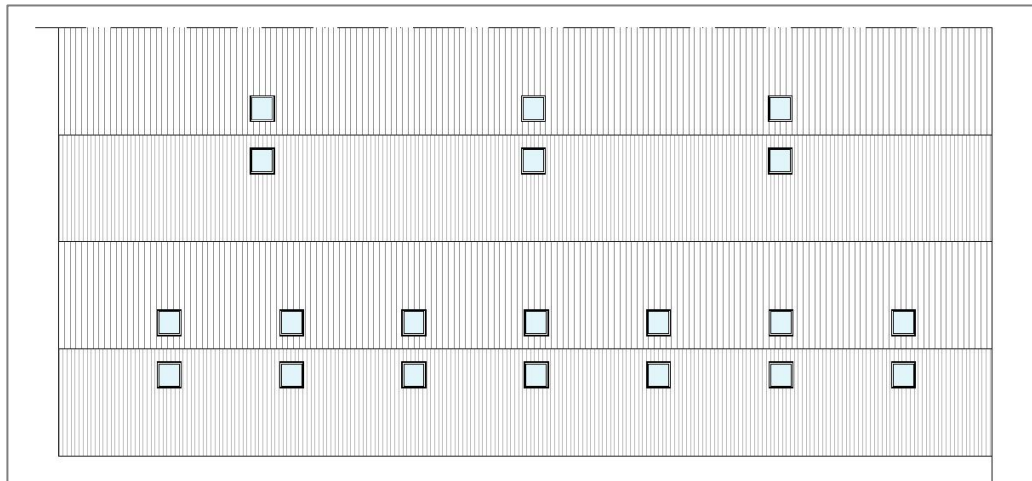
Si può osservare come i requisiti antincendio siano rispettati e si procede come nei casi precedenti al dimensionamento del sistema.

altezza strato libero fumi	2 m	✓
$T_{\max}$ upper layer	200 °C	✓
$T_{\max}$ lower layer	60°C	✓
visibilità	10 m	✓
irraggiamento termico	2,5 kW/m <sup>2</sup>	✓

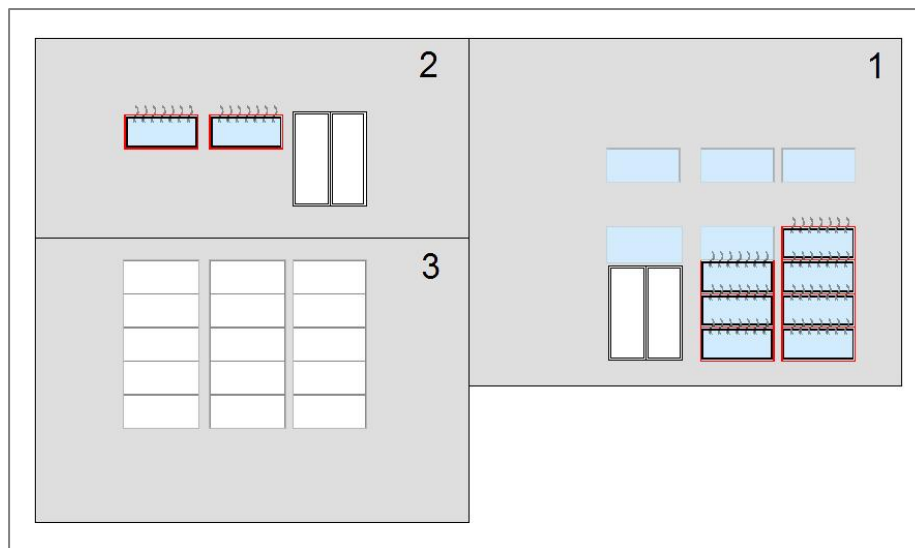
Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	Essertop
superficie utile singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 0,79 \text{ m}^2$
superficie geometrica singolo elemento	$A_{\text{unità}} = 1,18 \text{ m}^2$
superficie utile richiesta	$A_A = 7,9 \text{ m}^2$
numero previsti	$n = 10$
superficie utile totale	$A_A = 7,9 \text{ m}^2$
superficie geometrica totale	$A_V = 11,8 \text{ m}^2$



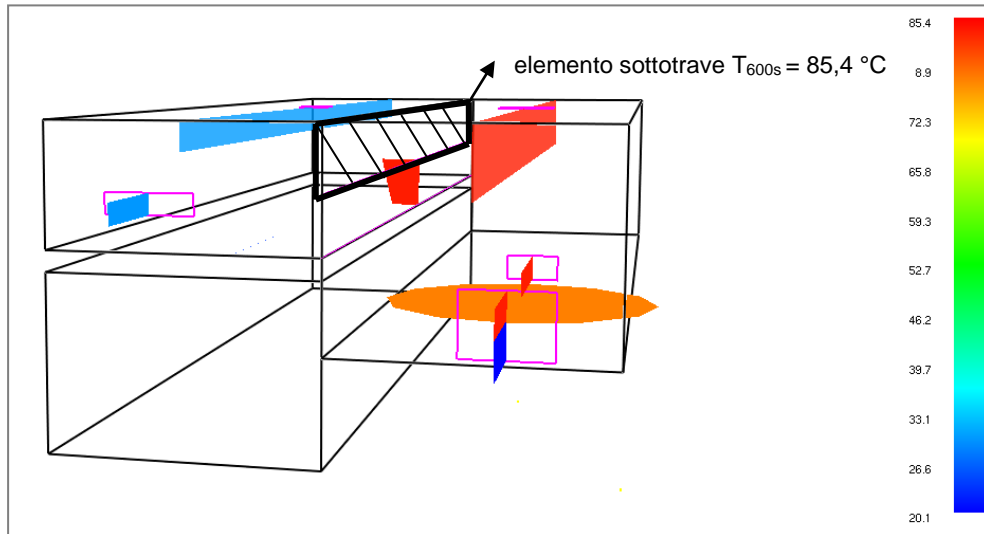
Volendo mantenere le aperture preesistenti i due ambienti risultano essere caratterizzati da due diverse superfici di immissione. Di conseguenza, quella di evacuazione viene dimensionata in rapporto ad esse, ottenendo un differente numero di evacuatori per ciascuna room.



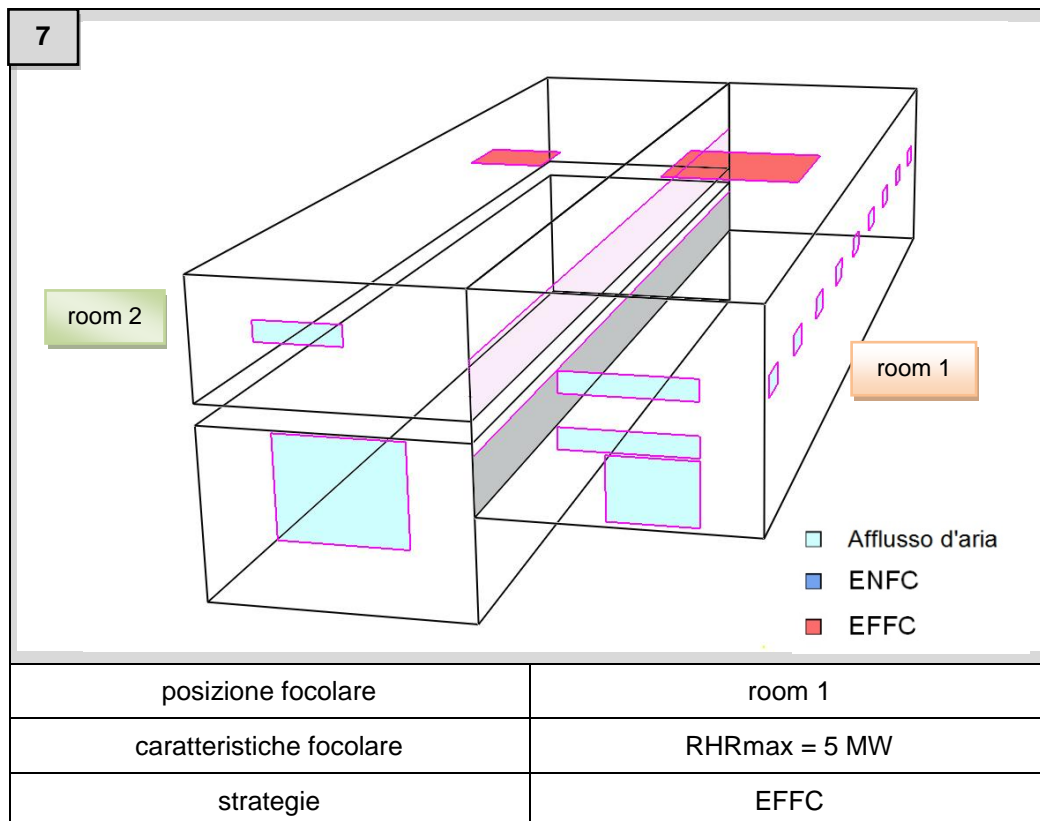
Anche i serramenti che devono essere provvisti di un dispositivo automatico di apertura sono in numero ridotto.



Risulta evidente come i valori si riducono notevolmente rispetto a quelli normativi, ottenendo una situazione vantaggiosa dal punto di vista economico, tecnico e progettuale, nel rispetto degli obiettivi previsti. L'elemento di separazione tra i due ambienti, inoltre, funziona come barriera al fumo poichè è esposto a temperature ridotte.

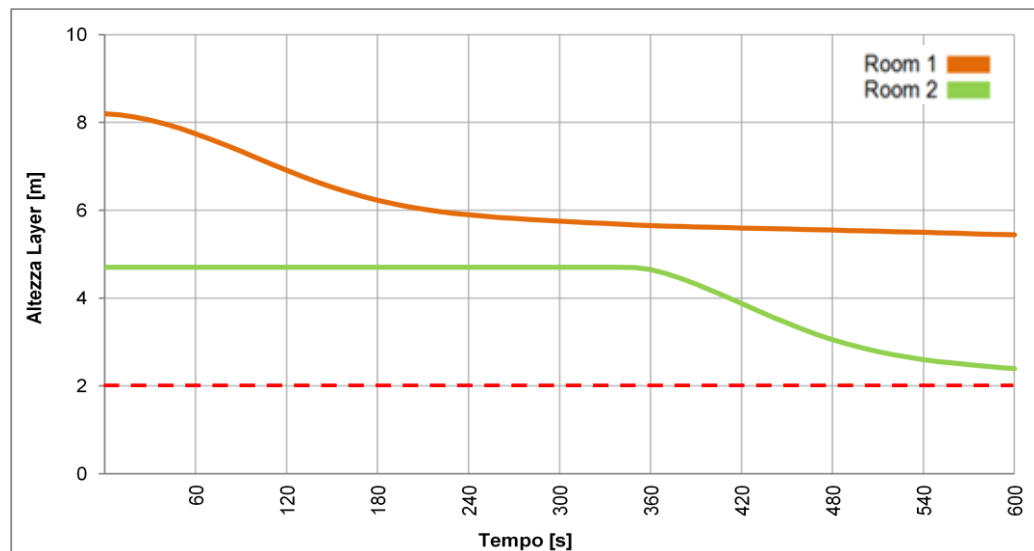


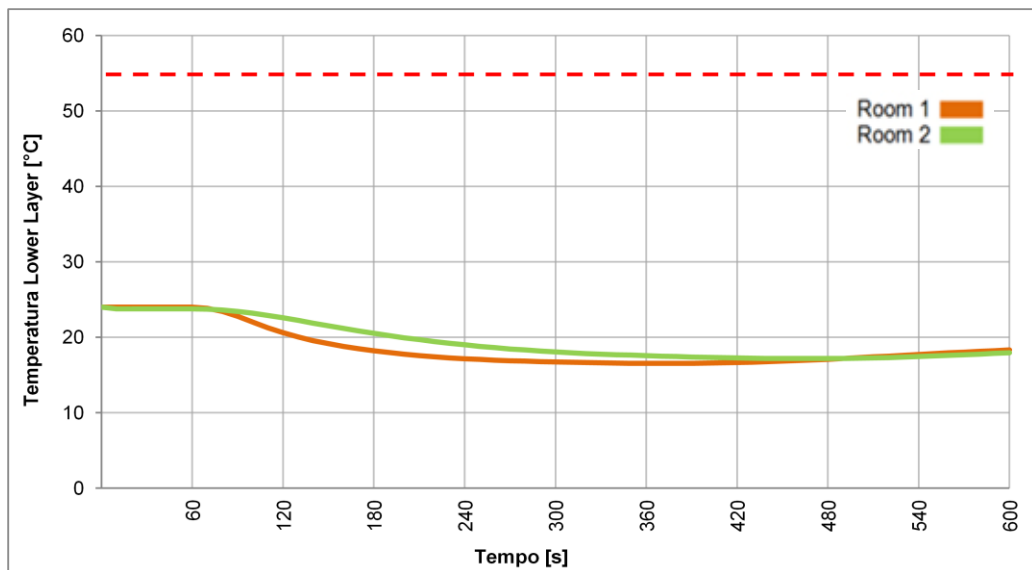
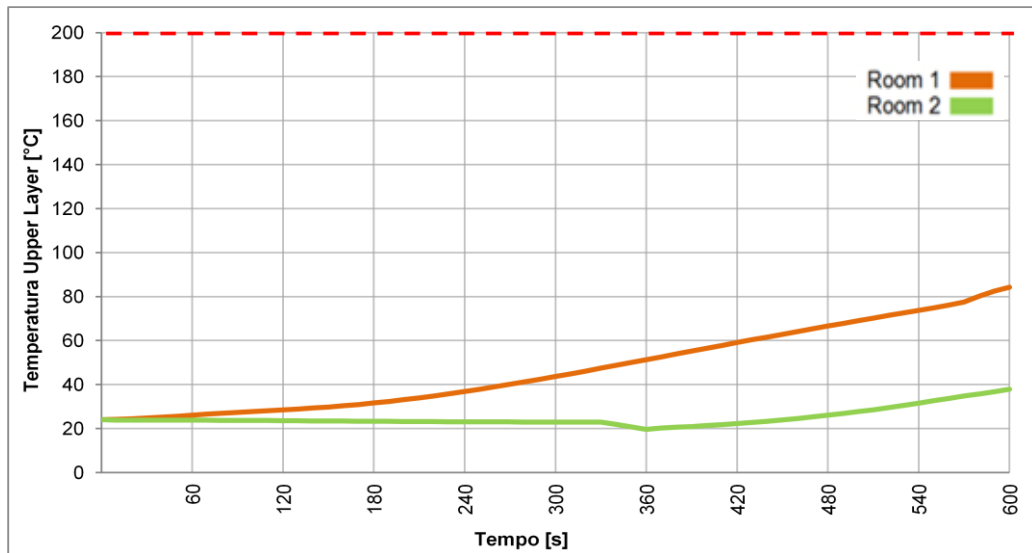
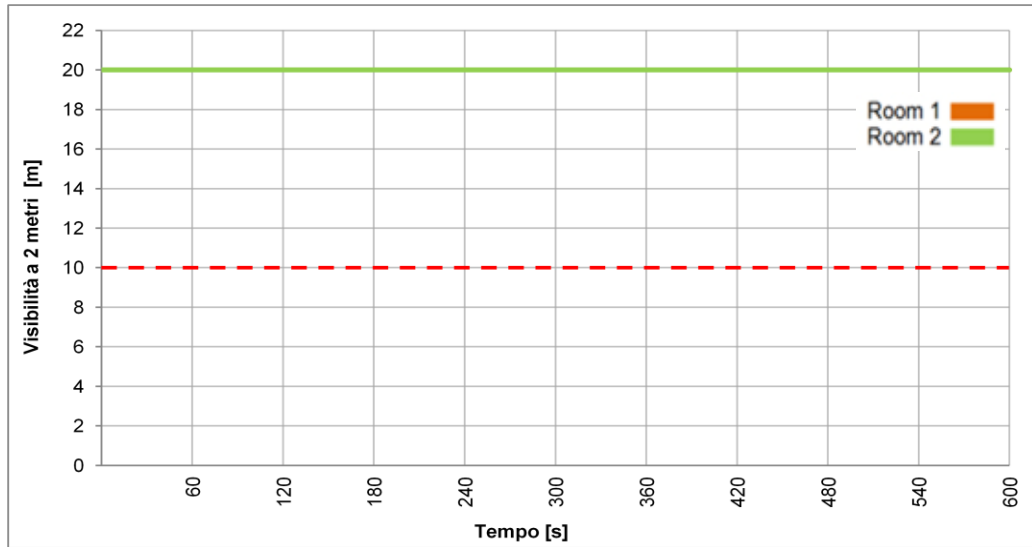
La soluzione con queste caratteristiche del sistema di evacuazione naturale risulta ottimale e verificata; quindi è una possibile scelta da parte del progettista. Nonostante ciò nel caso in cui vi siano vincoli o condizione per cui l'installazione di questo sistema non sia possibile, si analizza come caso alternativo quello di un sistema forzato. Anche in questo caso si parte da valori di normativa come effettuato precedentemente.



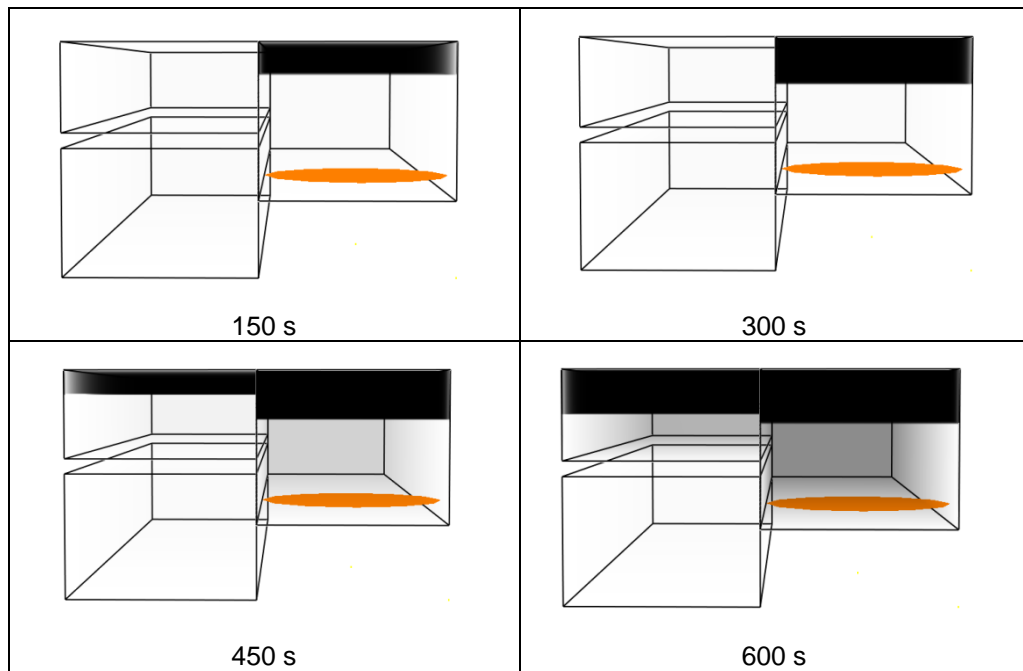
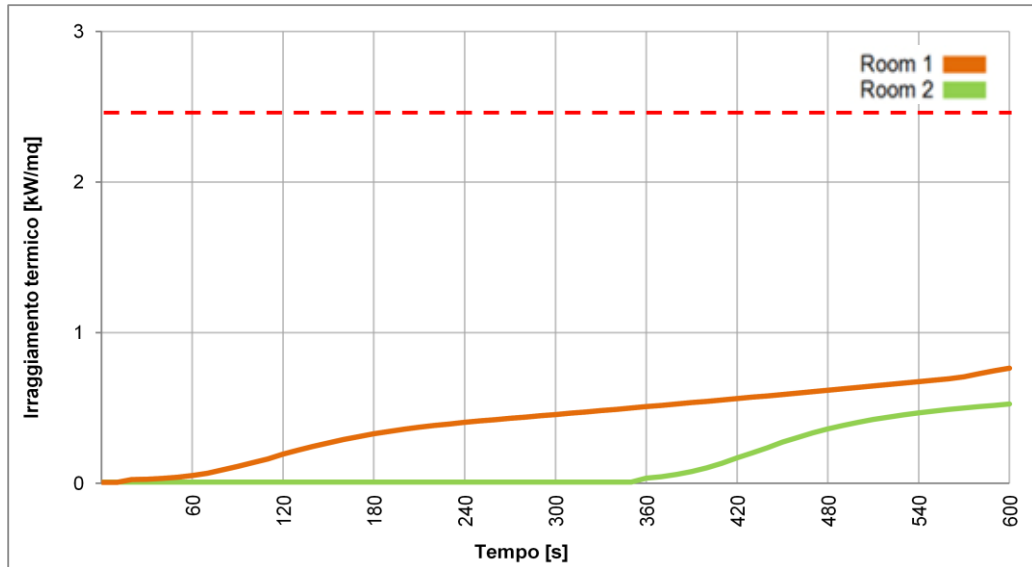


Caratteristiche EFFC	
altezza minima libera dal fumo	$y = 6 \text{ m}$
gruppo di dimensionamento	$GD = 3$
Room 1	
portata di estrazione	$P_{OUT} = 35,65 \text{ m}^3/\text{s}$
numero EFFC previsti	$n = 5$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Room 2	
portata di estrazione	$P_{OUT} = 10,18 \text{ m}^3/\text{s}$
numero EFFC previsti	$n = 2$
tempo di apertura	$T = 60 \text{ s}$
Afflusso	
rapporto di superficie	$R_S = 1,5$
superficie di afflusso	$A_{IN} = 30,55 \text{ m}^2$
coefficiente di riduzione	$C_v = 0,65$










altezza strato libero fumi	2 m	✓
$T_{\max}$ upper layer	200 °C	✓
$T_{\max}$ lower layer	60°C	✓
visibilità	10 m	✓
irraggiamento termico	2,5 kW/m <sup>2</sup>	✓

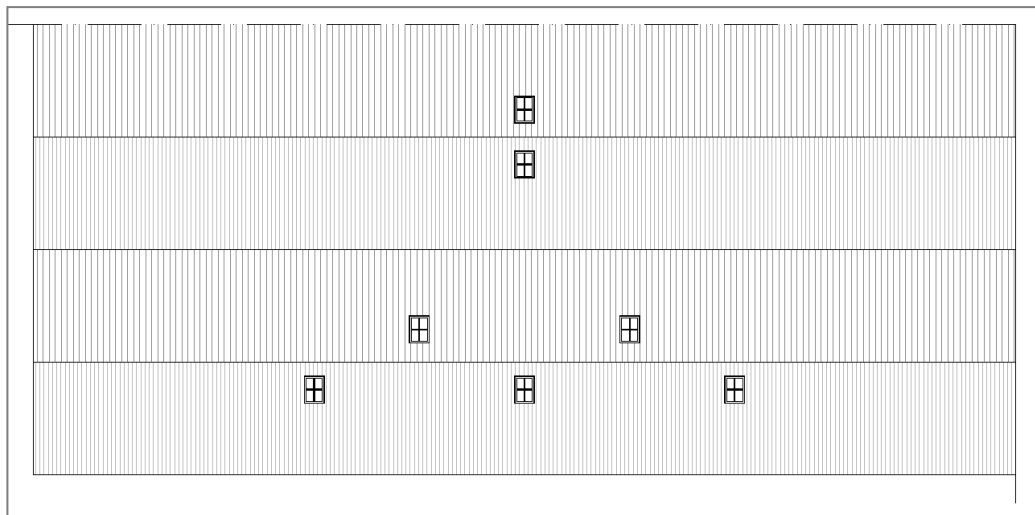


I parametri sono verificati rispetto alla situazione precedente in cui il sistema non riusciva a garantire la sicurezza. Si assumono quindi questi valori come utilizzabili per il dimensionamento del sistema, riferimento ad una specifica tecnologia.

Dati evacuatore	
marca	Bovema
modello	EFFC assiale per parate
Portata di estrazione singolo elemento	$P_{\text{unità}} = 7,97 \text{ m}^3/\text{s}$
portata di estrazione richiesta	$P_{\text{OUT}} = 45,83 \text{ m}^3/\text{s}$
numero previsti	$n = 7$
portata di estrazione totale	$P_{\text{OUT}} = 55,79 \text{ m}^3/\text{s}$

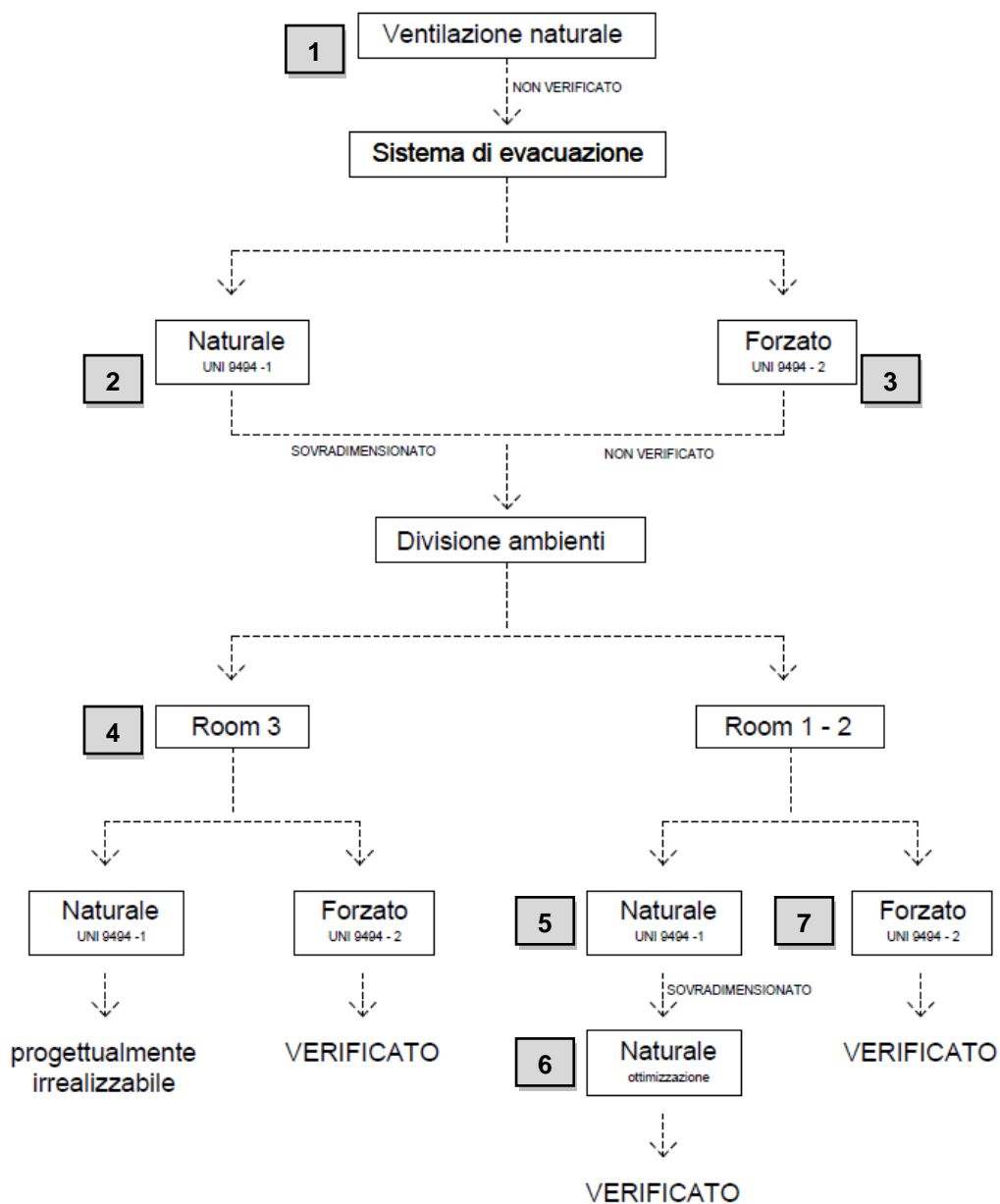


Rispetto ai valori ottenuti dal calcolo normativo sull'intero corpo di fabbrica, separando l'ambiente 3 e prevedendo un numero ridotto di evacuatori forzati i requisiti richiesti vengono mantenuti. Nonostante questo è necessario prevedere più serramenti dotati di dispositivo automatico di apertura, che permettano un corretto funzionamento del sistema



### 6.2.5. Commento finale ai risultati

L'iter procedurale proposto per la progettazione di un idoneo sistema di sicurezza antincendio per la gestione dei fumi può essere riassunto come segue:





Si possono evidenziare all'interno di esso 7 determinanti poiché punti di svolta del processo decisionale.

CASO	STRATEGIA	ROOM
1	ventilazione naturale	1 - 2 - 3
2	sistema di evacuazione naturale	1 - 2 - 3
3	sistema di evacuazione forzato	1 - 2 - 3
4	sistema di evacuazione forzato	3
5	sistema di evacuazione naturale	1 - 2
6	sistema di evacuazione naturale	1 - 2
7	sistema di evacuazione forzato	1 - 2

Se si prendono in considerazione i risultati numerici ottenuti dal programma, si evidenzia come la procedura risulti efficace per l'ottimizzazione del sistema, garantendo i requisiti necessari alla sicurezza. Bisogna specificare che le scelte che portano ad escludere o a ritenere valido un valore, dipendono da un processo complesso in cui si considerano differenti aspetti di natura tecnologica, funzionale, geometrica - dimensionale, gestionale e impiantistica della specifica soluzione.

CASO	STRATEGIA	VALIDAZIONE	
1	ventilazione naturale	✗	requisiti non verificati
2	sistema di evacuazione naturale	✗	sovradimensionamento
3	sistema di evacuazione forzato	✗	requisiti non verificati
4	sistema di evacuazione forzato	✓	verifica room 3
5	sistema di evacuazione naturale	✗	sovradimensionato
6	sistema di evacuazione naturale	✓	verifica room 1 e 2
7	sistema di evacuazione forzato	✓	verifica room 1 e 2

Vengono proposte due alternative che prevedono una compartimentazione al fumo ossia la divisione della room 3 dalla room 1 e 2. Nella room 3 si prevede l'installazione di un sistema di evacuatori forzato, mentre nelle room 1 e 2 sono possibili due soluzioni: un sistema naturale o un sistema forzato.

L'installazione di un sistema di evacuazione naturale potrebbe rispondere in modo più adeguato alle esigenze del museo, in quanto la tecnologia si presta ad essere una risorsa illuminotecnica importante. Nonostante ciò se sussistono vincoli architettonici o richieste da parte della committenza, come per esempio il divieto di prevedere aperture in copertura, oppure l'esigenza di un ambiente di ridotta illuminazione, è possibile l'installazione di un sistema di tipo forzato.





## Conclusioni

La tesi ha permesso di sottolineare come lo scopo principale della progettazione antincendio di questi ambienti sia la salvaguardia della vita umana. Per raggiungere questo obiettivo si utilizza un approccio prestazionale, largamente diffuso in un contesto estero, ma di ridotta applicazione in Italia. Spesso infatti si tende a seguire le prescrizioni e le restrizioni delle normative, che in questo contesto, risultano inadeguate.

Attraverso un esempio applicativo e alla sua estensione ad una situazione reale si è dimostrato come la norma fornisca dei valori che portano a sovradimensionare il sistema di evacuazione, rendendo necessario un approccio che miri all'ottimizzazione dei risultati.

I modelli di calcolo e i software di modellazione applicati sono stati utilizzati come supporti all'intero di un processo più complesso in cui il ragionamento e le conoscenze non possono essere sostituite dal solo utilizzo di strumenti informatici.

Si confida quindi che questo approccio possa diffondersi maggiormente in Italia, poichè, se utilizzato in modo corretto, permette l'ottimizzazione dell'intervento dal punto di vista tecnologico, funzionale ed economico. Inoltre la sua potenzialità sta nel fatto che può essere sviluppato e implementato così da fornire un maggior supporto alla progettazione antincendio in futuro.





## Bibliografia

### Testi e pubblicazioni

- [1] A. Malfa, Prevenzione incendi, approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, Legislazione Tecnica, 2007.
- [2] F. Z. e. G. Zaccarelli, «Centri commerciali: siamo sicuri?,» *Antincendio, dal 1949 la rivista della prevenzione incendi e della protezione civile*, pp. 54-68, 2013.
- [3] L. N. Stefano Marsella, L'ingegneria della sicurezza antincendio e il processo prestazionale, EPC Libri, 2010.
- [4] Tronconi, I centri commerciali Progetti architettonici, investimenti e modelli gestionali, Dogana: Maggioli Editore, 2010.
- [5] P. Coleman, Shopping environments: evolution, planning and design, Architectural Press, 2006.
- [6] G. Eugeni e G. Paparelli, Calcoli pratici di prevenzione incendi: manuale tecnico-pratico per i tecnici della prevenzione e protezione antincendi, Perugia: Editrice Rodana, 1996.
- [7] C. R. Mauro Marchini, Progettare la sicurezza in caso di incendio, Roma: EPC Libri, 2008.
- [8] E. Lazzarotto, Prevenzione incendi: manuale tecnico di progettazione, valutazione dei rischi e intervento, Napoli: Sistemi Editoriali, 2004.
- [9] M. Colombo, «I Maestri dell'Architettura: Santiago Calatrava,» San Giovanni Lupatoto (VR), Hachette, 2009, pp. 42-45.
- [10] M. Colombo, «I Maestri dell'Architettura: Frank Lloyd Wright,» San Giovanni Lupatoto (VR), Hachette, 2009, pp. 56-67.
- [11] R. Harrison, *Smoke control in Atrium Building: A Study of the Thermal Spill Plume*, Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 2004.
- [12] «<http://www.bovema.it/sistemi-di-evacuazione-naturale-di-fumo-e-calore/componenti/enfc/>,» [Online].
- [13] *NFPA 92B standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas*, Quincy: National Fire Protection Association, 2009.





- [14] R. L.P.Custer, «SFPE HandBook of Fire Protection Engineering,» in *Desigh Calculations*, Quincy Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, p. Section 4.
- [15] J. Klote, Method of Predicting Smoke Movement in Atria With Application to Smoke Management,, National Institute of Stantards and Technology NIST, 1994.
- [16] J. Milke, «Smoke Management in Covered Malls and Atria,» in *SFPE HandBook of Fire Protection Engineering*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, pp. Section 4, Chapter 13.
- [17] G. P. Forney, *User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics, Simulation Data*, Washington: National Institute of Standards and Technology Special Publication, 2007.
- [18] G. Heskested, «Fire plumes, Flame Height, and Air Entrainment,» in *SFPE HandBook of Fire Protection Engineering*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, pp. Section 2, Chapter 1.
- [19] L.Y.Cooper, «Smoke and Heat Venting,» in *SFPE HandBook of Fire Protection Engineering*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, pp. Sezione tre, Capitolo 9.
- [20] L. P. Puglisi, *La storia dell'architettura 1905-2008*, 2013.



## Normative

### Norme cogenti

<b>D.M. 19/08/1996</b>	Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo.
<b>D.M. 10/03/1998.</b>	Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.
<b>D.M. 04/05/1998</b>	Disposizioni relative alle modalità di presentazione ed al contenuto delle domande per l'avvio dei procedimenti di prevenzione incendi, nonché all'uniformità dei connessi servizi resi dai comandi provinciali dei Vigili del Fuoco.
<b>D.M. 09/05/2007</b>	Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.

### Norme armonizzate

<b>D.M. 27/07/2010</b>	Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle attività commerciali con superficie superiore a 400 mq
<b>D.P.R. 01/08/2011 n.151</b>	Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'art. 49, comma 4-quater, del Decreto-Legge 31 Maggio 2010, n.78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 Luglio 2010, n. 122.
<b>UNI 9494 - 1/2012</b>	Sistemi per il controllo di fumo e calore - Parte 1: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Naturale di Fumo e Calore
<b>UNI 9494 - 2/2012</b>	Sistemi per il controllo di fumo e calore - Parte 2: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Forzata di Fumo e Calore

### Norme Fire Safety Engineering

<b>ISO/TR 13387</b>	Fire safety engineering
<b>BS PD 7974</b>	Application of fire safety engineering principles to the design of buildings
<b>NFPA</b>	Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2009 Edition





## Indice delle figure

Figura 1: ricostruzione “domus romana” e veduta dell’ “atrium” in una casa pompeiana .....	4
Figura 2: quadriportico basilica di Sant’Ambrogio, Milano 1099 .....	5
Figura 4: Turbine Hall, Tate Gallery, Londra 1995.....	6
Figura 3: Crystal Palace, Londra 1851.....	6
Figura 5: Great Court, British Museum, Londra 2000 .....	7
Figura 6: Galleria Vittorio Emanuele II, Milano 1877.....	7
Figura 7: schema visibilità piani superiori nella Mall .....	10
Figura 8: shopping center Sevens, Dusseldorf 2001 .....	12
Figura 9: shopping center 20 Twenty, Bolzano 2014.....	12
Figura 10: Mole Antonelliana, Torino 1889 .....	14
Figura 11: MAXXI Museo Nazionale delle arti, Roma 2010.....	14
Figura 12: : biblioteca universitaria facoltà di giurisprudenza, Zurigo 2004.....	15
Figura 13: postazioni di studio biblioteca di Zurigo .....	15
Figura 14: biblioteca Civica, Stoccarda 2011 .....	16
Figura 15: biblioteca Universitaria, Aberdeen (Scozia) 2012.....	16
Figura 16: libreria Selexyz Dominicanem Maastricht 2005.....	17
Figura 17: libreria El Ateneo Buenos Aires 2000 .....	17
Figura 18: Royal Conservatory of Music Toronto 2009.....	18
Figura 19: teatro KKL Lucerna 2000 .....	19



Figura 20: Larkin Administration Building, Buffalo, New York 1906; KI Building, Tokyo 1989 ...	19
Figura 21: St. Pancras international railway station Londra.....	20
Figura 22: Terminal 3 aeroporto Dubai .....	20
Figura 23: affollamento di un Centro Commerciale e di un Teatro durante una rappresentazione .....	23
Figura 24: distribuzione utenza su più livelli.....	24
Figura 25: andamento tempo-temperatura dell'incendio.....	38
Figura 26: analogia tra riempimento di un locale di fumi e di una vasca d'acqua.....	41
Figura 27: esempio di propagazione dei fumi nella fase pre-flashover.....	42
Figura 28: dispersione dei fumi a quota intermedia .....	42
Figura 29: axisymmetric plume .....	43
Figura 30: adhered spill plume e balcony spill plume .....	43
Figura 31: differenza di installazione rilevatore puntiforme e lineare.....	48
Figura 32: sistemi di ventilazione meccanica e naturale.....	49
Figura 33: esempi di evacuatori fumo e calore in copertura .....	50
Figura 34: esempi di evacuatori fumo e calore a parete .....	51
Figura 35: applicazione delle barriere mobili al fumo in un centro commerciale .....	52
Figura 36: impianto sprinkler di soppressione .....	53
Figura 37: condivisione degli elettroni nella reazione dell'idrogeno .....	58
Figura 38: condivisione degli elettroni nella reazione del carbonio.....	58
Figura 39: triangolo del fuoco e prodotti.....	61
Figura 40: fasi dell'incendio .....	63
Figura 41: teoria cinetica di reazione .....	64



Figura 42: differenza tra reazioni a bassa e alta temperatura .....	65
Figura 43: effetti della temperatura e della concentrazione sul limite di infiammabilità .....	68
Figura 44: curve di rilascio termico di differenti scaffali a confronto .....	74
Figura 45: curve di rilascio termico di differenti sedie a confronto .....	74
Figura 46: grafico RHR della fase di crescita .....	75
Figura 47: grafici di incendi in assenza e presenza di flashover.....	76
Figura 48: fumo bianco (combustione di sterpaglia) e fumo nero (combustione di petrolio) .....	78
Figura 49: relazione visibilità e coefficiente di estinzione per segnali di luce emessi e riflessi ..	80
Figura 50: relazione tra risposta del rilevatore di fumo e il diametro delle particelle .....	81
Figura 51: approssimazione funzionamento axysimmetric plume .....	87
Figura 52: struttura della fiamma.....	88
Figura 53: grafico dell'intermittenza della fiamma .....	89
Figura 54: dimensioni di un focolaio indisturbato .....	90
Figura 55: schema fire plume.....	92
Figura 56: andamento velocità e temperatura nel plume lungo il proprio asse .....	94
Figura 57: comportamento teorico dei parametri lungo l'asse del plume .....	98
Figura 58: schematizzazione fenomeno del ceiling jet.....	99
Figura 59: schematizzazione della stratificazione del ceiling jet.....	100
Figura 60: variazione delle velocità nel ceiling jet .....	101
Figura 61: gradiente di pressione tra due ambienti adiacenti .....	102
Figura 62: flusso attraverso un'apertura orizzontale .....	103
Figura 63: wall and corner plume .....	104



Figura 64: adhered spill plume .....	105
Figura 65: balcony o free spill plume .....	105
Figura 66: caratteristiche geometriche balcony spill plume .....	106
Figura 67: confronto produzione di fumo di diversi spill plumes .....	107
Figura 68: confronto tra produzione di fumi axysimmetric e balcony spill plumes .....	107
Figura 69: schematizzazione flusso metodo BRE.....	108
Figura 70: ventilazione naturale .....	111
Figura 71: influenza del vento sul sistema di ventilazione naturale in copertura .....	112
Figura 72: ventilazione meccanica .....	113
Figura 73: Plug-Holing.....	114
Figura 74: altezza limite dello strato libero dai fumi .....	120
Figura 75: altezza strato libero dai fumi a più livelli.....	121
Figura 76: schema dei processi coinvolti nel tempo di esodo rispetto al tempo disponibile per la fuga sicura .....	123
Figura 77: modello a due zone.....	131
Figura 78: flussi di massa scambiati tra volumi di controllo nel modello a due zone.....	133
Figura 79: flussi di energia scambiati tra volumi di controllo nel modello a due zone .....	133
Figura 80: asse neutro e andamento delle pressioni .....	134
Figura 81: modello elaborato con B-RISK.....	135
Figura 82: definizione delle aperture tra ambienti .....	136
Figura 83: definizione delle strategie di ventilazione.....	137
Figura 84: definizione aperture verticali .....	137
Figura 85: definizione aperture a soffitto .....	138



Figura 86: definizione degli EFFC .....	138
Figura 87: museo MAGA di Gallarate, 2010 .....	161
Figura 88: incendio del MAGA: vista dei fumi in copertura .....	162
Figura 89: incendio del MAGA: danni provocati alla copertura .....	162
Figura 90: incendio del MAGA: zona espositiva a doppia altezza. ....	163
Figura 91: incendio del MAGA: particolare dei danni alla copertura .....	163
Figura 92: MAGA: pianta copertura e prospetto Nord-Ovest .....	164
Figura 93: MAGA: vista interna area espositiva a doppia altezza .....	167
Figura 94: MAGA: aperture prospetto Sud - Ovest .....	168
Figura 95: MAGA: aperture prospetto Nord - Ovest .....	169
Figura 96: MAGA: strutture espositive estraibili .....	174
Figura 97: MAGA: danni alle tende .....	174
Figura 98: curve RHR delle scaffalature .....	175
Figura 99: tabella dei valori di RHR per i tendaggi .....	175
Figura 100: MAGA. area espositiva a doppia altezza .....	176
Figura 101: MAGA: materiale del museo .....	177
Figura 102: influenza del vento su una copertura inclinata .....	182
Figura 103: installazione in copertura di evacuatori naturali secondo UNI9494 .....	183
Figura 104: installazione in copertura di evacuatori forzati secondo UNI9494 .....	186