

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
a.a. 2020/2021



Tesi di Laurea Magistrale

**Ottimizzazione dei sistemi di controllo di fumo e
calore con strumenti di Fire Safety Engineering**

Relatore: Roberto Vancetti

Correlatore: Emiliano Cereda

Candidata: Simona D'Anna

Novembre 2021

ABSTRACT



I sistemi di controllo di fumo e calore (SEFC) sono largamente usati per perseguire gli obiettivi antincendio di salvaguardia della vita umana e tutela dei beni. L'approccio progettuale tradizionale italiano prescrive i criteri di progettazione e installazione di tali sistemi al fine di ottenere una soluzione conforme. Lo scopo di questo lavoro di tesi è illustrare come ottimizzare tali soluzioni progettuali in un ambiente confinato, mediante gli strumenti della Fire Safety Engineering (FSE).

In primo luogo si definisce e si applica l'approccio prescrittivo su un capannone industriale sede di un deposito intensivo di merci pericolose, approfondendo la tipologia di soluzioni progettuali ritenute più interessanti. Successivamente, si affrontano gli stessi problemi con un approccio ingegneristico, dimostrando come si possano ricercare soluzioni alternative a quelle prescritte dalla norma, tali che siano più convenienti sotto diversi aspetti ma che garantiscano un egual livello di sicurezza.



Smoke and heat control systems are widely used to protect people and reduce property loss during fire events. The traditional normative approach to these systems consists in a series of prescriptions regarding their design and installation. In order to obtain secure solutions, the designer can merely apply these indications without any other evaluations. This study shows how solutions resulting from prescriptive approaches can be optimized with the aid of Fire Safety Engineering instruments.

At first, the traditional approach is defined and tested on an industrial shed containing dangerous goods. Among the solutions allowed by the building, only the most interesting ones are developed in this work. Secondly, the engineering method is used to solve the same problems, showing that alternative solutions exist and they are more convenient on different levels, considering that they assure an equal security level to the solutions resulting from the prescriptive approach.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	IL CONTROLLO DEL FUMO	3
	2.1 Generalità e rischi.....	3
	2.2 Il movimento del fumo	7
	2.3 Meccanismi di controllo del fumo.....	12
3	LA PREVENZIONE INCENDI PER ATTIVITÀ SOGGETTE E NON NORMATE	16
	3.1 Il Codice di Prevenzione Incendi.....	16
	3.2 Norma UNI 9494:2017	17
	3.3 Letteratura di riferimento per la Fire Safety Engineering	18
4	DEFINIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RIFERIMENTO	20
	4.1 Destinazione d'uso e tipologia costruttiva.....	20
	4.2 Contesto dell'attività nell'ambito prevenzione incendi	22
	4.3 Obiettivi di progettazione della sicurezza antincendio.....	22
	4.4 Verifica del sistema di esodo	23
	4.5 Individuazione dei presidi di controllo dell'incendio.....	24
	4.6 Controllo di fumi e calore.....	25
5	PROGETTO AI SENSI DELLA NORMA UNI 9494	26
	5.1 Scenari di contesto del fabbricato	26
	5.2 Progetto del sistema di evacuazione naturale di fumo e calore	28
	5.3 Progetto del sistema di evacuazione forzata di fumo e calore	41
6	PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE	59
	6.1 Soluzioni alternative.....	59
	6.2 Scenari d'incendio di progetto	61
	6.3 Soglie di prestazione.....	63
7	MODELLO A ZONE	64
	7.1 Modellazione in CFAST	64
	7.2 Interpretazione dei risultati.....	79
8	MODELLO DI CAMPO	89
	8.1 Modellazione in FDS (fire dynamics simulator).....	89
	8.2 Interpretazione dei risultati.....	101

9	CONCLUSIONI	110
10	CONSIDERAZIONI PERSONALI E SVILUPPI FUTURI	112
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	113
	ALLEGATI	

1 INTRODUZIONE

Un sistema di controllo di fumo e calore riesce a governare i movimenti dell'aria trascinata o miscelata con i prodotti aerodispersi della combustione. Esso può essere composto da molteplici e diversificati componenti e prevedere specifici meccanismi di trasporto dei fumi. Gli obiettivi principali di sicurezza antincendio che il sistema generalmente si propone sono quelli di mantenere un ambiente sostenibile in condizioni di emergenza, per un tempo abbastanza lungo da far evacuare gli occupanti e salvaguardare i beni, qualora richiesto.

Nell'ambito trattato, il Codice di prevenzione incendi è il punto di riferimento normativo italiano. Esso contiene delle indicazioni prescrittive, che il progettista antincendio può applicare pedissequamente per ottenere una *soluzione conforme*, ritenuta sicuramente efficace per i livelli di sicurezza che si vogliono raggiungere e frutto di prevalutazioni del rischio incendio da parte del normatore. Nelle sue ultime versioni, l'apparato normativo italiano in materia di prevenzione incendi permette agli esperti di attuare un approccio ingegneristico, secondo il quale è il progettista a scegliere i componenti del sistema di controllo del fumo e quantificare le prestazioni degli stessi. Conseguenzialmente a questa opportunità, è sempre più richiesto l'operato di professionisti antincendio per l'elaborazione e la valutazione di *soluzioni alternative* a quelle prescritte nelle regole tecniche del Codice di Prevenzione Incendi, in quanto spesso le soluzioni previste non risultano applicabili.

L'obiettivo dello studio è quello di attuare una lettura critica delle disposizioni legislative dimostrando che, per quanto efficaci, le soluzioni prescritte potrebbero essere in alcuni casi inefficienti e limitative. Inoltre, ci si propone di individuare delle soluzioni alternative più prestanti e soprattutto più sostenibili sotto diversi punti di vista. Infine, si verifica il loro funzionamento con gli strumenti della *Fire Safety Engineering* (FSE in seguito), scegliendo tra tutte la soluzione più idonea ed ottimizzata.

In particolare, nel lavoro svolto vengono introduttivamente esplicitati i rischi derivanti dal fumo in relazione agli occupanti e ai beni presenti in ambienti confinati, oltre che i principali meccanismi di controllo del fumo. Ai fini del raggiungimento degli obiettivi è infatti indispensabile una profonda conoscenza di quali sono le forze che governano il fumo, così da capire in che modi e con quali sistemi è possibile evacuarlo.

Successivamente, si approfondisce l'iter di progettazione previsto dalla normativa italiana vigente, in previsione dello studio di un'attività *soggetta e non normata*, presente negli elenchi del d.P.R. n. 151/11. Tale tipologia di attività prevede l'obbligo di applicazione delle *regole tecniche orizzontali* presenti nel Codice, ai fini del raggiungimento di una soluzione conforme. Contemporaneamente, in previsione dell'applicazione del metodo ingegneristico si approfondiscono i principali riferimenti di letteratura in tema FSE.

Si definisce dunque un'attività tale che costituisca un prototipo semplice ma verosimile a molteplici fabbricati reali, da considerare come riferimento di applicazione. Dopo averne descritto il modello architettonico e la destinazione d'uso, si applicano le soluzioni conformi correlate al dimensionamento degli ambienti e alla strategia di controllo del fumo.

Per trovare sistemi coerenti con l'attività studiata, si ha il bisogno di individuare le variabili di contesto del fabbricato che incidono sulla scelta tecnologica di funzionamento dell'impianto di controllo del fumo. Si rilevano dunque gli scenari di contesto per i quali è possibile applicare direttamente la norma di riferimento e ne garantiscono conformità.

Una volta ottenute le possibili soluzioni conformi al Codice, si interviene su quella ritenuta più limitante e che presenta interessanti margini di miglioramento, elaborando diverse soluzioni alternative.

Dunque, si valutano le soluzioni progettuali alternative attraverso simulazioni d'incendio. Con quest'ultime si misurano quantitativamente gli effetti dell'incendio all'interno dell'ambiente, così da poterli confrontare con valori prefissati di soglia che garantiscono un adeguato livello di sicurezza. Data la varietà di soluzioni previste, si conducono in prima approssimazione simulazioni in modelli a zone in CFAST, con semplificazioni di calcolo elevate. Analizzando i primi risultati ottenuti, si procede con la simulazione in modelli di campo in FDS per le soluzioni più adeguate.

L'approccio ingegneristico condotto consente di individuare la soluzione progettuale più prestante e idonea tra quelle considerate; la quale, a parità di livelli di sicurezza di incendio garantiti, viene infine confrontata con la soluzione conforme ottenuta da un approccio prescrittivo.

2 IL CONTROLLO DEL FUMO

2.1 Generalità e rischi

2.1.1 La combustione

L'incendio è la manifestazione della reazione chimica di combustione, cioè una reazione esotermica di ossidazione. Al fine di permettere lo svolgimento della reazione di combustione sono indispensabili tre elementi, che formano il cosiddetto *triangolo del fuoco*:

- 1) Combustibile;
- 2) Comburente, per eccellenza identificato come l'ossigeno presente nell'aria;
- 3) Fonte di innesco, spesso identificato come una fonte di calore.

L'assenza di uno di questi tre elementi determina l'impossibilità di ottenimento di una combustione, pertanto tale considerazione è alla base del funzionamento dei sistemi di spegnimento dell'incendio.

Combustibile e comburente devono trovarsi in proporzioni adeguate affinché l'innesco abbia effetto, cioè si devono trovare all'interno del loro *campo di infiammabilità*.

La presenza necessaria di una fonte d'innesco è dovuta al fatto che la reazione tra combustibile e comburente non è spontanea ma ha bisogno di un'energia di attivazione esterna. Tuttavia, una volta avviato il processo, la combustione segue il decorso di una reazione a catena con la formazione di radicali liberi, per cui l'incendio è capace di autoalimentarsi. Precludendo la presenza della reazione a catena il fenomeno della propagazione di calore e fiamme non può avvenire, per tale motivo si può anche parlare di *tetraedro del fuoco*.

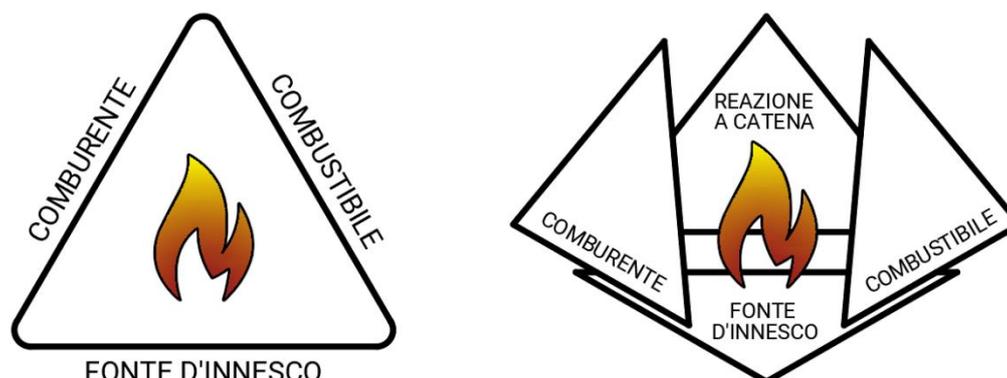


Fig. 1: Triangolo del fuoco e tetraedro del fuoco

2.1.2 L'incendio in ambienti confinati

L'incendio può presentarsi in due differenti modi:

- 1) In assenza di fiamme, nel caso *smouldering fire* o in altri termini *incendio covante*;
- 2) Con produzione di fiamme, nel caso di *flaming fire* o in altri termini *incendio aperto*.

L'incendio covante produce gas incombusti e fumo in quantità discrete ma poco calore, la combustione non avviene velocemente e solo i materiali che producono ceneri possono fare avviare un fenomeno del genere. Inoltre, la presenza di questo tipo di incendio dipende dalle condizioni di ventilazione del locale e dall'energia ceduta dalla sorgente di innesco: se entrambe sono limitate, la probabilità di incendio covante aumenta. La curva che descrive meglio questo fenomeno è la *Mass Loss Rate*, la quale esprime l'andamento temporale del tasso di massa persa.

L'incendio aperto produce quantità sensibili di luce e calore e non richiede continuo apporto di energia, è in grado cioè di autoalimentarsi fino al totale esaurimento del combustibile o del comburente a disposizione. L'elevato rilascio termico che caratterizza questa tipologia di incendio fa sì che esso venga descritto ed identificato efficacemente da una curva *Heat Release Rate* (HRR) che esprime l'andamento temporale della potenza termica rilasciata dall'incendio.

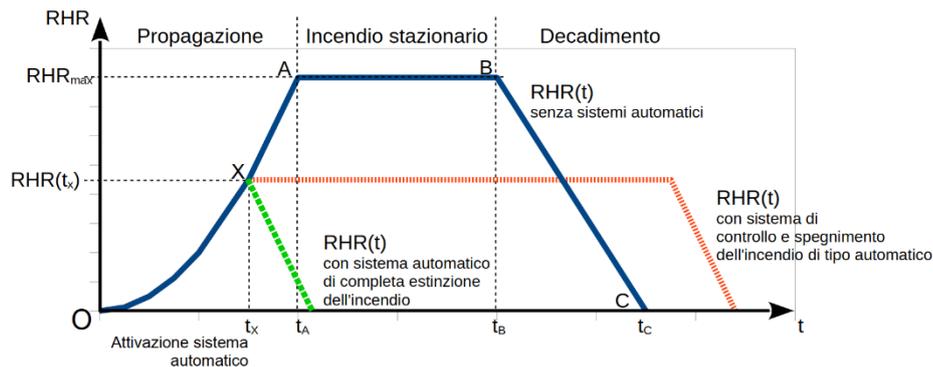


Fig. 2: Grafico M.2-1 dal Codice di Prevenzione incendi, curva RHR e fasi dell'incendio

Gli incendi con presenza di fiamme, in ambienti confinati, seguono nel loro decorso quattro fasi ben distinguibili di condizioni fisiche ambientali e sono:

- **Ignizione:** presuppone la compresenza dei componenti del triangolo del fuoco (vedi §2.1.1), può avvenire in modo pilotato, con l'azione di una sorgente esterna

come una fiamma o una scintilla, oppure in modo spontaneo, quando viene raggiunta la temperatura di autoignizione del combustibile;

- **Propagazione:** viene coinvolto il combustibile limitrofo a quello interessato dall'ignizione in un continuo processo di espansione dell'area interessata dall'incendio e dei prodotti della combustione. Nell'andamento della curva HRR questo si traduce in un rapido accrescimento del valore della funzione, spesso in ambienti chiusi di tipo quadratico (si rimanda al capitolo di modellazione in FDS);
- **Incendio generalizzato:** l'incendio, se non trova difficoltà nella propagazione, raggiunge il *flashover*, vale a dire lo stato in cui qualsiasi combustibile disponibile nell'ambiente prende parte al fenomeno della combustione. Nell'andamento della curva HRR, il raggiungimento di questo stato si traduce in un costante rilascio di potenza termica nel tempo, nello specifico il valore della potenza rilasciata durante un incendio pienamente sviluppato è il massimo raggiungibile;
- **Decadimento:** è una fase in cui si ha una progressiva diminuzione del rilascio di energia, la curva HRR ha un andamento lineare decrescente. Questo fenomeno in un ambiente confinato potrebbe verificarsi a causa di una limitata ventilazione, in quanto l'incendio è governato dal comburente. In questo caso è probabile il rischio di incendi covanti. Se non è il comburente ad esaurirsi, l'incendio continuerà fino all'esaurimento del combustibile disponibile.

La curva HRR è il parametro di input principale per i software di modellazione degli incendi, in quanto da essa dipendono la portata di fumo e di gas nocivi sprigionati a seguito dell'incendio.

2.1.3 Rischi derivanti dal fumo

L'NFPA 92 (*Standard for Smoke Control Systems, Section 3.3.13*) definisce il fumo come "l'insieme del particolato solido e liquido aerodisperso e dei gas, pervenuti nel momento in cui un materiale è sottoposto alla reazione di pirolisi di combustione, il fumo comprende anche l'aria trascinata o miscelata con i composti sopraccitati."

Questi ultimi solitamente comprendono polveri, composti organici semivolatili (SVOC) e volatili, composti inorganici, liquidi e gas inorganici tra cui vapore d'acqua. Inoltre è importante, nell'ambito dei meccanismi di controllo del fumo, puntualizzare che la definizione di fumo comprende l'aria che è miscelata con il particolato e altri gas, perché solitamente il controllo del fumo viene associato all'espulsione di una miscela che è per la maggior parte costituita da aria, oltre al fatto che l'aria in cui è presente il particolato condiziona fortemente la *tenibilità* dell'ambiente.



Fig. 3: dimensione delle particelle di combustione a confronto di pollini, capelli umani e granelli di sabbia. Fonte US EPA

Gli effetti legati alla produzione di fumo comportano un rischio per la salvaguardia della vita umana e per la conservazione di beni materiali.

In particolare, le polveri creano dei legami con i materiali conduttori con conseguente danneggiamento di apparecchi elettronici ed elettrici in tensione, inoltre sono delle eccellenti assorbenti e trasportatrici di componenti non particolati e SVOC, che macchiano e impuzziscono le superfici con cui vengono a contatto. Un altro fattore di rischio è legato al fatto che il fumo contribuisce notevolmente all'aumento di temperatura nell'intero ambiente, minacciando in tal modo i componenti del sistema edilizio, i beni e le merci, ma anche gli occupanti. Questi ultimi sono minacciati dal fumo in modo determinante anche in termini di visibilità, benessere e tempo di esodo. La letteratura scientifica, in particolare statunitense e inglese, è concorde sul fatto che tra gli occupanti soggetti a danni fatali e non fatali causati da un incendio, la porzione di coloro che rientra nella categoria "sopraffatti dal fumo e dai gas" è strettamente maggiore di quella riferita a "calore e ustioni"¹, in particolare per statistiche^{2,3} condotte dalla fine degli anni sessanta fino al 2011. Nel 1979, Harland e Woolley, definiscono⁴ il fumo come la più grande causa di mortalità negli incendi. I rischi derivanti dal fumo a cui più spesso incorrono gli occupanti sono:

¹ D. A. Purser, J. L. McAllister, *Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5ªEd)*, New York, Springer, 2016

² P.C. Bowes, *Smoke and Toxicity Hazards of Plastics in Fire, in Annals of Occupational Hygiene, 1974, n.17, pp. 143 – 156*

³ *Department for Communities and Local Government, Fire Statistics In The United Kingdom, Londra, 2011*

⁴ W. A. Harland, W. D. Woolley, *Fire fatality study, University of Glasgow, Building Research Establishment, 1979*

- Riduzione della visibilità. Causata dall'occlusione delle fonti di illuminazione e delle finestre oltre che dalla coltre di fumo interposta tra gli occupanti e gli oggetti attorno o la segnaletica;
- Irritazione oculare e respiratoria delle mucose, che rallenta il tempo di esodo degli occupanti e influisce sulle loro capacità decisionali;
- Intossicazione, non propriamente causata dalle particelle carboniose di cui è composto il fumo quanto dai gas che vengono trasportati insieme ad esso;
- Ostruzione e ustioni delle vie respiratorie. In questo caso il parametro più importante è la dimensione delle particelle aerodisperse del fumo. Il fumo generato da incendi con la presenza di fiamme contiene particelle di dimensione non trascurabile (superiore a $5\ \mu$), soprattutto quando la concentrazione del fumo dell'aria è elevata e le particelle iniziano ad agglomerarsi.

2.2 Il movimento del fumo

Un sistema di controllo del fumo deve essere progettato in modo che sia in grado di sopraffare le forze motrici che causano lo spostamento del fumo. Di conseguenza, è necessario conoscere quali sono e in che modo agiscono tali forze, al fine di condurre sapientemente il processo di progettazione del sistema. Le forze motrici che provocano lo spostamento dell'aria e del fumo in un edificio sono⁵:

- 1) Effetto camino (*stack effect*)
- 2) Galleggiabilità dei gas di combustione
- 3) Espansione dei gas di combustione
- 4) Vento
- 5) Ventilazione forzata
- 6) Effetto pistone dell'ascensore (*elevator piston effect*)

Solitamente queste forze agiscono combinatamente tra loro, tuttavia è utile descrivere gli effetti che hanno sul fumo come se agissero singolarmente.

2.2.1 Stack effect

Il fenomeno del movimento del fumo causato dall'effetto camino, è normalmente riferito ad una condizione in cui l'ambiente esterno all'edificio si trova ad una temperatura più bassa dell'ambiente interno. In questo caso, vi è un movimento di aria verso l'altro all'interno dell'edificio, in corrispondenza di vani scala, vani ascensori, montacarichi o canne fumarie.

⁵ [6] J. H. Klotz, *Smoke Control, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5^aEd)*, New York, Springer, 2016

L'aria all'interno di questi condotti verticali si trova in una condizione di elevata temperatura nella parte inferiore e a temperatura minore nella parte superiore comunicante con l'ambiente esterno. Dalla legge dei gas ideali, la densità di un gas diminuisce all'aumentare della temperatura, dunque il gas che si trova nella parte bassa dell'edificio, avente minore densità, tende a spostarsi verso l'alto a causa della forza di galleggiamento.

La differenza di pressione causata dall'effetto camino in condizioni normali è pari a¹:

$$\Delta p_{so} = 3460 \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) \cdot z$$

Dove:

Δp_{so} è la differenza di pressione dallo *shaft* rispetto all'ambiente esterno, in Pa

T_o è la temperatura dell'ambiente esterno, in Kelvin

T_s è la temperatura dello *shaft*, in Kelvin

z è la distanza dal piano neutro del punto a cui è riferita Δp_{so} , in metri. Il piano neutro è un piano orizzontale dove la pressione nello *shaft* è pari alla pressione dell'ambiente esterno.

Si deduce che l'effetto camino è più significativo quando la differenza tra temperatura del vano scala e temperatura esterna è elevata, oltre che per vani scala molto alti.

Il diagramma delle pressioni, in presenza di effetto camino ordinario, è mostrato in Fig. 4

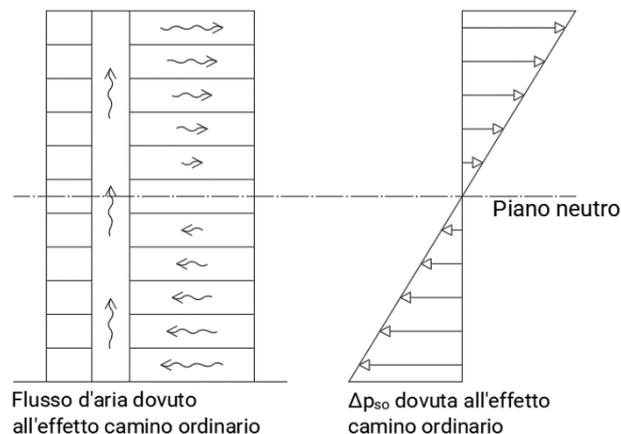


Fig. 4: Fenomeno dell'effetto camino ordinario

Chiaramente, in caso di incendio, l'effetto camino potrebbe avere un'incidenza significativa sul movimento dei fumi. In caso di effetto camino ordinario:

- a) Se il focolare avesse origine in un locale dell'edificio situato al di sotto del piano neutro, il fumo verrebbe veicolato dal locale al vano scala. Proseguirebbe poi il

suo percorso verso l'alto e, una volta superata la quota del piano neutro, tenderebbe a trasferirsi dal vano scala ai locali adiacenti;

- b) Se il focolare avesse origine in un locale dell'edificio situato al di sopra del piano neutro, la differenza di pressione dovuta all'effetto camino, farebbe sì che il fumo vada dal locale di origine del focolare, direttamente verso l'esterno, senza contaminare il vano scala;
- c) Se il focolare al di sopra del piano neutro avesse una galleggibilità sufficiente a superare l'effetto camino, fluirebbe all'interno del vano scala e si infiltrerebbe nei locali al di sopra del focolare.

Si intuisce come, per edifici con diversi vani scala a diverse temperature e altezze, prevedere il flusso del fumo potrebbe diventare molto complicato. Di conseguenza il diagramma delle pressioni sarebbe diverso per ogni vano scala, vi potrebbero essere molteplici piani neutri e l'equazione lineare sopradescritta non sarebbe applicabile. Dunque, risulta più semplice in questi casi simulare il movimento dei fumi in FDS.

2.2.2 Galleggibilità

I gas di combustione si trovano ad una temperatura elevata rispetto a quella dell'aria presente in condizioni di esercizio. Per la legge dei gas ideali, questo comporta che il fumo prodotto dalla combustione abbia una densità ridotta rispetto all'aria presente in ambiente e che quindi galleggi. La differenza di temperatura tra il compartimento in cui è presente il focolare e i compartimenti limitrofi comporta una differenza di pressione tra i due ambienti, espressa dalla formula:

$$\Delta p_{fs} = 3460 \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_f} \right) \cdot z$$

Dove:

Δp_{fs} è la differenza di pressione tra l'incendio e l'ambiente limitrofo, in Pa

T_s è la temperatura dell'ambiente confinante l'incendio, in Kelvin

T_f è la temperatura dove è presente l'incendio, in Kelvin

z è la distanza dal piano neutro del punto a cui è riferita Δp_{fs} , in metri. Il piano neutro è un piano orizzontale dove la pressione in cui è presente l'incendio è pari alla pressione dell'ambiente confinante.

2.2.3 Espansione dei gas di combustione

L'energia rilasciata dalla reazione di combustione può causare movimento del fumo tramite meccanismo di espansione, il quale potrebbe comportare che i prodotti della combustione raggiungano zone esterne al compartimento di origine. In questo

contesto la massa del carburante può essere trascurata rispetto alla portata volumetrica di aria, dunque il rapporto tra le portate volumetriche uscenti ed entranti può essere espresso come:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

Dove:

V_{out} è la portata volumetrica di fumo al di fuori del compartimento, in m^3/s

V_{in} è la portata volumetrica di aria all'interno del compartimento, in m^3/s

T_{out} è la temperatura del fumo che lascia il compartimento, in K

T_{in} è la temperatura dell'aria che entra nel compartimento, in K

L'effetto dell'espansione dei gas è trascurabile nei casi in cui la stanza che ospita il focolare sia provvista di finestre e porte aperte, dato che le sezioni coinvolte nei flussi di aria sono molto grandi.

2.2.4 Effetto vento

Il vento ha, in molti casi, un impatto importante sul movimento del fumo all'interno dell'edificio. Esso esercita una pressione sull'involucro dell'edificio, pari a:

$$p_w = \frac{1}{2} C_w \rho_o U_H^2$$

Dove:

p_w è la pressione del vento, in Pa

C_w è il coefficiente di pressione

ρ_o è la densità dell'aria esterna, in kg/m^3

U_H è la velocità del vento all'altezza del muro, m/s

Il coefficiente di pressione C_w è compreso tra -0.8 e 0.8 e dipende dalla direzione del vento, dalla geometria dell'edificio e dalle ostruzioni presenti. I valori negativi sono riferiti a muri sopravento, mentre quelli positivi a muri sottovento.

La frequente e non trascurabile influenza che ha il vento rispetto ai movimenti dell'aria negli edifici, può far sì che il funzionamento dei sistemi di controllo del fumo venga compromesso da tale effetto. In letteratura scientifica, riguardo all'effetto del vento, è stato pubblicato un articolo che discute "Alcune possibili modalità di fallimento [...] rispetto a differenti tipologie di sistemi di controllo del fumo notando che una particolare condizione può portare a fallimento una tipologia di sistema di controllo

ma incentivare l'efficacia di un altro tipo di sistema"⁶ Sottolineando quanto sia importante che il progettista conosca a fondo il funzionamento fisico di ogni tipologia di sistema che adopera.

2.2.5 Ventilazione forzata

La ventilazione forzata con aria di mandata serve per controllare il movimento del fumo tramite pressurizzazione. Tuttavia, si deve anche prendere in considerazione l'aria veicolata dai sistemi di ventilazione forzata che, in stato di non emergenza, servono a condizionare e ventilare l'ambiente (*HVAC systems*). In passato questi ultimi prendevano frequentemente parte alla combustione oppure, pur non propagando le fiamme, permettevano al fumo di circolare all'interno delle condotte.⁷ I moderni sistemi di aerazione sono costruiti e progettati in modo tale da garantire una certa resistenza al fuoco; inoltre, in condizioni di emergenza, possono essere chiusi con l'attivazione di serrande tagliafuoco, non permettendo la circolazione del fumo all'interno delle condotte, oppure possono essere inclusi nel controllo del movimento dei fumi con apposito progetto operativo.

2.2.6 Elevator piston effect

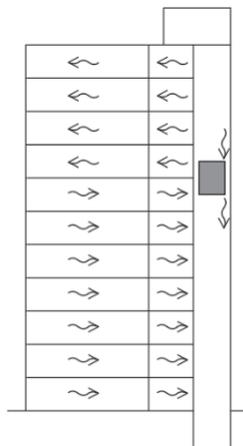


Fig. 5: Flussi di aria causati dall'effetto pistone di un ascensore che si muove verso l'alto

Il transito dell'ascensore all'interno del vano dedicato, provoca una differenza di pressione e un conseguente flusso di aria, schematizzato nella Fig. 5 nella quale l'ascensore si muove verso l'alto. Questo *effetto pistone* provocato dall'ascensore,

⁶ Eric W. Marchant. *Effect of wind on smoke movement and smoke control systems*. In: *Fire Safety Journal* Volume 7, Issue 1, 1984, Pages 55-63

⁷ NBFU 1939. *Smoke Hazards of Air-Conditioning Systems*, NFPA Quarterly, Vol. 33, No. 2

può permettere al fumo di essere trasportato dal vano di origine in altri vani che si trovano normalmente alla stessa pressione dello stesso. L'effetto pistone è stato studiato e validato a partire da esperimenti e progetti statunitensi e canadesi.⁸

2.3 Meccanismi di controllo del fumo

Secondo la norma UNI EN 12101-6 e l'SFPE (5^a ed.) i meccanismi più usati per evitare che il fumo si diffonda e per controllare i suoi effetti sono:

- 4) Compartimentazione
- 5) Diluizione
- 6) Pressurizzazione
- 7) Flusso d'aria
- 8) Galleggiabilità

2.3.1 Compartimentazione

La compartimentazione è il metodo più intuitivo e antico usato per controllare la diffusione delle fiamme e del fumo. Il compartimento può essere limitato da elementi costruttivi come porte, muri, finestre chiuse, i quali impediscono ai prodotti della combustione di attraversarli; inoltre, permettono di ridurre drasticamente l'aria che alimenta la reazione di combustione. Questa misura di protezione passiva è ormai attuata senza un progetto dedicato, tuttavia, la normativa riporta dei limiti di applicabilità legati alla grandezza degli ambienti. Dunque qualora un compartimento antincendio dovesse presentarsi di dimensioni eccessive secondo i limiti della norma, si dovranno attuare misure di compartimentazione dedicate specificamente al contenimento del fumo come, ad esempio, prevedere l'installazione di cortine di contenimento dei fumi, estensibili automaticamente in caso di emergenza.

2.3.2 Diluizione

I composti che fanno parte del fumo derivante dalla combustione, possono diluirsi nell'aria dell'ambiente. Quando l'aria priva di particolato e prodotti della combustione è in quantità elevate, la concentrazione del fumo in ambiente, essendo esigua, può non provocare alcun rischio. Questo principio permette il funzionamento dei sistemi di allontanamento del fumo meccanici e naturali, che diluiscono il fumo con l'immissione di aria esterna fresca e pulita, per poi trasportarlo insieme all'aria in cui è diluito attraverso un percorso all'interno dell'edificio che finisce con uno sbocco

⁸ J. H. Klote (1988). *An Analysis of the Influence of Piston Effect on Elevator Smoke Control*, NBSIR-88-3751, National Bureau of Standards, Gaithersburg

esterno. Se da un lato, con il solo meccanismo di diluizione, l'immissione di aria fresca nel locale di origine contribuisce a creare condizioni tenibili per la salute umana e per la protezione dei beni, dall'altro comporta diversi rischi legati al fatto che l'aria immessa vicino l'origine delle fiamme può far crescere la velocità di espansione dell'incendio oltre che agevolare la produzione di fumo e che prevedere l'effettiva concentrazione di soglia per i molteplici scenari di incendio non è del tutto semplice e affidabile con i mezzi a disposizione. Dati i rischi descritti, non è raccomandabile progettare il sistema di estrazione del fumo contando sulla diluizione, si preferisce prevedere la parte inferiore dell'ambiente totalmente priva di fumo, tenendo conto di altri meccanismi.

2.3.3 Pressurizzazione

La differenza di pressione tra due ambienti adiacenti può impedire al fumo di diffondersi verso l'ambiente a pressione maggiore, questo meccanismo è usato da molti sistemi di controllo forzato del fumo. La creazione di una differenza di pressione tra due ambienti è facilitata se tra i due è posta una barriera, come mostrato in Fig. 6 per una delle prime fasi dell'incendio, considerando che questo meccanismo ha efficacia anche in caso di incendio generalizzato.

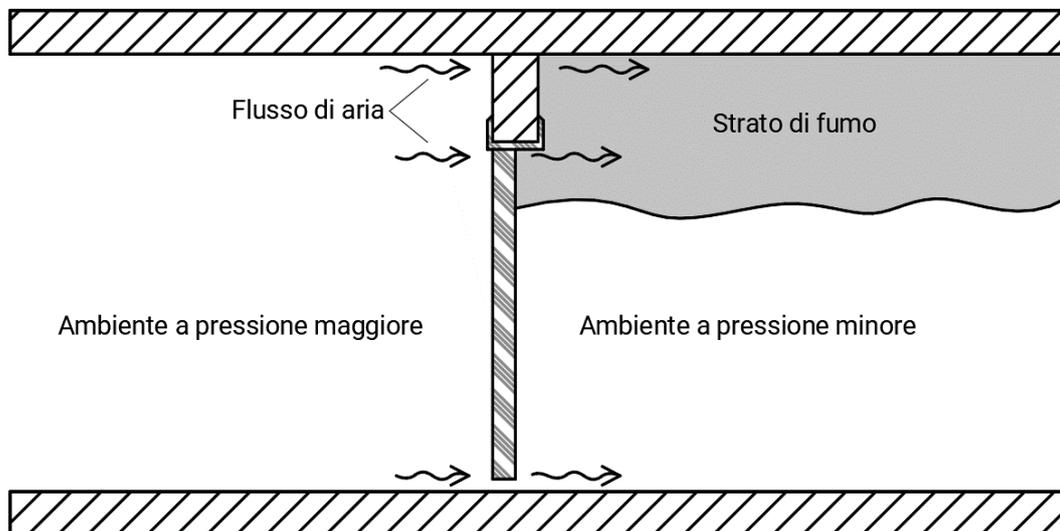


Fig. 6: Verso del flusso d'aria orizzontale attraverso due ambienti a differente pressione

2.3.4 Flusso d'aria

Si combatte la diffusione del fumo con un getto di aria in direzione opposta a quella della naturale espansione. Questo metodo è largamente usato per controllare il fumo in caso di incendio nelle metropolitane, ferrovie e tunnel autostradali; più raramente è anche usato in edifici per contrastare il movimento del fumo tra atri e spazi a loro connessi. Il punto debole di questo sistema consiste nel fatto che necessita di grosse portate d'aria, le quali potrebbero fornire ossigeno al focolare e alimentarlo.

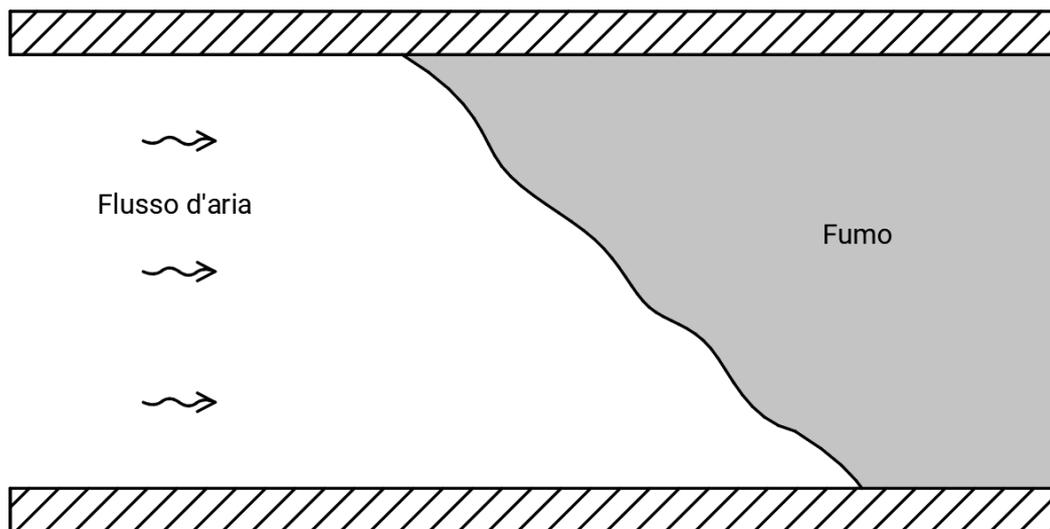


Fig. 7: getto d'aria orizzontale per il controllo del fumo

2.3.5 Galleggiabilità

Alcuni sistemi di rimozione del fumo sfruttano a loro favore il meccanismo di galleggiabilità dei gas di combustione. Nei grandi ambienti, chiamati in seguito genericamente *atri*, si forma, nelle prime fasi dell'incendio, una colonna di fumo che sfocia in un *serbatoio di fumo* nella parte superiore dell'ambiente, questo effetto è dovuto alla galleggiabilità dei gas di combustione; in questo caso, si fa largamente uso dei sistemi di evacuazione di fumo naturale o forzata, prelevando la massa di aria sporca nei pressi del soffitto del locale. Posizionando semplici aperture o ventilatori centrifughi al di sopra della colonna di fumo, si crea una zona libera dal fumo nella parte inferiore dei locali, riuscendo a non fare entrare in contatto con il fumo persone o materiali.

In particolare, i sistemi di controllo forzato del fumo negli atri, non basano del tutto il loro funzionamento sulla galleggiabilità dei fumi, poiché la potenza associata al ventilatore deve essere in grado di fornire una forza motrice abbastanza elevata da

permettere il movimento del fumo a prescindere dai meccanismi autonomi di ascensione del fumo, i quali, se presenti, contribuiscono allo scopo di evacuazione. Al contrario, il funzionamento dei sistemi di controllo naturale del fumo dipende fortemente dalla presenza del meccanismo di galleggiabilità e può anche venire disturbato dall'effetto vento, aspetto di cui si deve tener conto in fase progettuale. Difatti, il fumo potrebbe perdere gran parte dell'effetto di galleggiabilità quando viene raffreddato dallo sprinkler o diluito con l'immissione di aria molto fredda, perché la portata massica del flusso ascendente dipende fortemente dalla differenza di temperatura tra il fumo e l'ambiente esterno: se i due valori differiscono di poco, il flusso di aria che attraversa l'apertura sarà modesto. Al contempo, negli ambienti con altezze interne elevate e focolari esigui, non è detto che il fumo abbia una spinta tale da raggiungere le aperture, di conseguenza potrebbe essere necessario passare alla soluzione di controllo forzato del fumo. Il vantaggio principale del controllo naturale del fumo, tuttavia, è innegabile; di fatto si tratta di un sistema molto affidabile dal punto di vista dell'attivazione e del funzionamento, data la semplicità delle operazioni che le aperture svolgono.

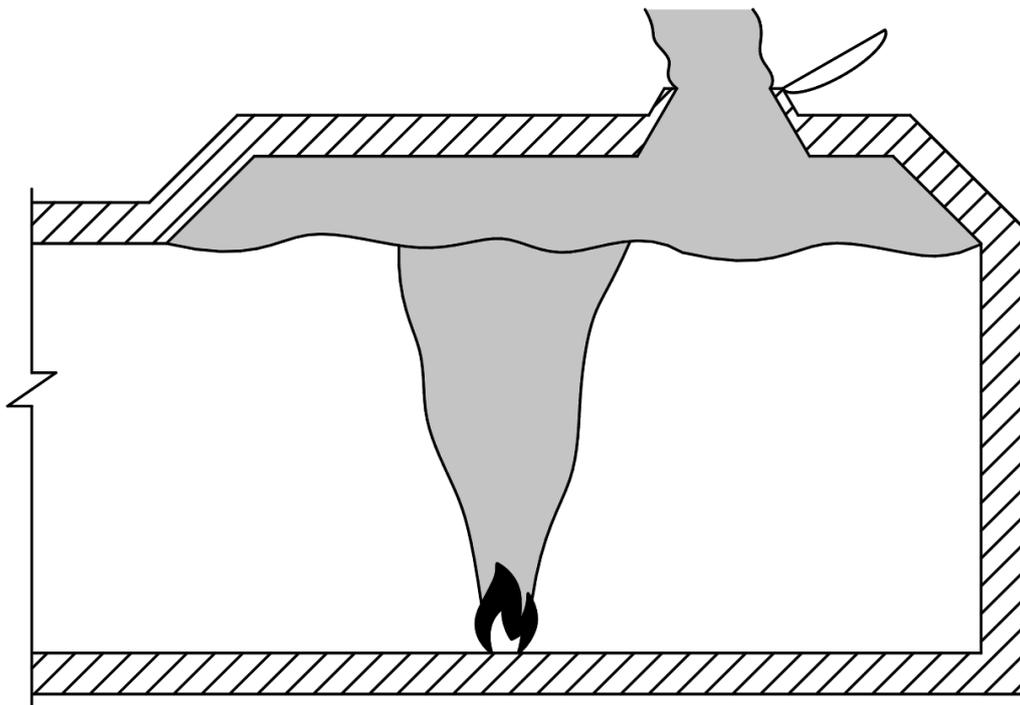


Fig. 8: Schema del meccanismo di evacuazione del fumo che sfrutta la galleggiabilità dello stesso

3 LA PREVENZIONE INCENDI PER ATTIVITÀ SOGGETTE E NON NORMATE

3.1 Il Codice di Prevenzione Incendi

Con la nomenclatura *Codice di Prevenzione Incendi* ci si riferisce al D.M. 3 agosto del 2015 e successive modifiche ed integrazioni. Esso è il riferimento principale per la prevenzione incendi in Italia, in quanto approfondisce organicamente tutti gli aspetti necessari al raggiungimento degli obiettivi progettuali di sicurezza antincendio.

Il codice viene suddiviso in tre aree tematiche:

RTO, sono le regole tecniche orizzontali, valide per qualsiasi tipologia di attività. In questa sezione rientrano le informazioni sulle generalità (*sezione G*) della prevenzione incendi e le strategie antincendio (*sezione S*);

RTV, sono le regole tecniche verticali, (*sezione V*) valide per specifiche attività o ad ambiti delle stesse e generalmente condizionano in maniera limitativa alcune prescrizioni ricavate dalla sezione *RTO*;

FSE, che sta per Fire Safety Engineering, viene approfondita nella sezione Metodi del Codice, vengono approfondite delle metodologie alternative a quelle descritte nelle sezioni *S G* e *V* facendo riferimento ad un approccio ingegneristico applicato alla sicurezza antincendio.

Il presente studio vuole approfondire la tematica dei SEFC per un'attività soggetta e non normata, reperibile negli elenchi del d.P.R. n. 151/11. Tale tipologia di attività prevede l'obbligo di applicazione delle *regole tecniche orizzontali* presenti nel Codice, ai fini del raggiungimento di una soluzione conforme. Per questo tipo di attività non esiste una regola tecnica verticale.

È all'interno del capitolo S.8 del Codice che si delinea la strategia di controllo di fumi e calore, dandone esclusivamente indicazioni sui livelli di prestazione e sulle soluzioni progettuali dello *smaltimento di fumo e calore d'emergenza*. Quest'ultimo serve ad allontanare i prodotti della combustione ai fini della facilitazione delle operazioni dei soccorritori e viene realizzato con delle aperture a flusso orizzontale. A differenza dei sistemi di evacuazione di fumo e calore (SEFC) che hanno il compito di creare e mantenere un adeguato strato d'aria libero dai fumi durante lo sviluppo dell'incendio. L'argomento EFC viene approfondito nelle norme UNI 9494:2017 e non è presente all'interno del Codice.

Le diverse prestazioni di sicurezza sono esplicitate nei livelli del Codice che indica:

livello di prestazione I: non è richiesto alcun requisito. Adatto ai locali di dimensione ridotta, poco frequentato dalle persone, con carico d'incendio inferiore o uguale a 600 MJ/m², e in cui sono assenti sostanze, miscele e lavorazioni pericolose;

livello di prestazione II: il requisito richiesto è quello della presenza di aperture di smaltimento di fumo e calore d'emergenza. Nel Codice è riportata la sezione minima delle aperture e le indicazioni per una corretta distribuzione a servizio di tutto il locale. Questa soluzione è adatta ai locali che oltrepassano i limiti del livello I ma non quelli del livello III;

livello di prestazione III: impone il confinamento del fumo nel compartimento d'origine, la creazione di uno stato libero da fumo per la salvaguardia della vita umana e dei beni, qualora richiesta. In sostanza, si rimanda all'installazione di SEFC, con riferimento alle norme UNI 9494:2017. Adatto a locali affollati o con alto carico di incendio e presenza di materiali e/o lavorazioni pericolose.

3.2 Norma UNI 9494:2017

La norma UNI 9494 regola la progettazione dei sistemi di evacuazione di fumo e calore. Essi si oppongono ai rischi descritti nel §2.1.3 sfruttando diversi tra i meccanismi descritti nel §2.3 ed il loro compito principale è quello di creare e mantenere un adeguato strato d'aria, nella parte inferiore dei locali, libero dai fumi durante lo sviluppo dell'incendio.

La normativa è divisa in tre parti:

norma UNI 9494-1: rivolta ai SEFC con evacuazione naturale dei fumi (**SENF**)

norma UNI 9494-2: rivolta ai SEFC con evacuazione forzata dei fumi (**SEFF**)

norma UNI 9494-3: rivolta ai controlli e alla manutenzione dei SEFC

La norma prefissa esplicitamente i seguenti obiettivi di prevenzione incendi che intende raggiungere:

- mantenere, nella parte inferiore dell'ambiente, uno strato di aria indisturbato che agevola il regolare esodo dei presenti e lo svolgimento delle operazioni da parte delle squadre di soccorso;
- evitare la propagazione dei fumi e dei gas di combustione ai compartimenti circostanti e attività attigue;
- prevenire, o almeno ritardare, il raggiungimento del flashover, scongiurando la propagazione dell'incendio agli ambienti circostanti;

- tutelare i beni e le merci, se richiesto;
- limitare i danni all'edificio, specie in riferimento ai componenti strutturali garantendone la stabilità per un determinato periodo di tempo.

Si specifica infine che nel campo di applicazione della norma rientrano gli ambienti con una superficie minima di 600 m² e un'altezza minima di 3 m. Per condizioni differenti di installazione dei SEFC si può ricorrere ai metodi dell'ingegneria antincendio (FSE).

3.3 Letteratura di riferimento per la Fire Safety Engineering

la Fire Safety Engineering (FSE) viene citata nell'ambito normativo italiano per la prima volta all'interno del D.M. 9 maggio del 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio", per poi essere ampiamente ripresa nella sezione M del Codice di Prevenzione Incendi.

È importante tuttavia specificare che l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio ha radici negli USA, dove gli organismi radicalmente influenti in materia sono la National Fire Protection Association (NFPA) e la Society of Fire Protection Engineers (SFPE). Questi ultimi, dal 1988, pubblicano edizioni dell' *Handbook of Fire Protection Engineering* , considerato "il riferimento definitivo per la FSE e l'approccio *performance based* sulla sicurezza antincendio. Per il quale oltre 130 illustri ingegneri specializzati in antincendio e ricercatori hanno contribuito a creare capitoli, in rappresentanza delle diverse università e organizzazioni di tutto il mondo. Questo fa del libro una risorsa essenziale per la definizione dei fondamenti della FSE, della dinamica del fuoco, del calcolo e dell'analisi del rischio incendio e della modellazione di scenari di incendio e altro ancora."⁹

Dal 1999 Canada, Regno Unito, Nuova Zelanda e Svezia sono coinvolte nella pubblicazione del *rapporto tecnico ISO TR 13387* sulla fire safety engineering, nel quale si definisce la FSE come: "applicazione di principi ingegneristici, di regole e di giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzati alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell'ambiente, alla quantificazione dei rischi

⁹ <https://www.sfpe.org/standards-guides/sfpehandbook>, ultima visualizzazione in data 21.11.2021

d'incendio e dei relativi effetti ed alla valutazione analitica delle misure antincendio ottimali, necessarie a limitare entro livelli prestabiliti le conseguenze dell'incendio.”

Il progetto condotto con i metodi della FSE viene costruito su misura dello specifico ambiente analizzato. Il progetto non è frutto di mere prescrizioni, ma di una valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio raggiunto per scenari prefissati di incendio. La verifica del raggiungimento del livello di sicurezza richiesto viene condotta confrontando i valori di grandezze impattanti ottenute applicando i metodi della FSE con valori di soglia prefissati. Le grandezze da considerare potrebbero essere temperatura, visibilità o altezza dello strato libero da fumi.

4 DEFINIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RIFERIMENTO

Si definisce un'attività rientrante negli elenchi del d.P.R. n. 151/11, tale che costituisca un prototipo semplice ma verosimile a molteplici fabbricati reali, da considerare come riferimento di applicazione. Dopo averne descritto il modello architettonico e la destinazione d'uso, si applicano le soluzioni conformi correlate al dimensionamento degli ambienti e alla strategia di controllo del fumo.

4.1 Destinazione d'uso e tipologia costruttiva

Si prende in considerazione un capannone di nuova realizzazione, con apparecchiatura costruttiva costituita da strutture portanti prefabbricate in calcestruzzo armato.

Di seguito si riportano i dati principali che caratterizzano il manufatto:

- Il capannone è sede di un deposito intensivo di cavi e conduttori elettrici isolati e presenta una quantità di materiale stoccato pari a circa 23500 kg.
- Le dimensioni geometriche del capannone sono reperibili nella Tavola 1 in allegato, la superficie lorda dello stabilimento è di 2450 m² e l'altezza interna libera è pari a 6 m.
- È presente un'area di movimentazione merci che non contribuisce al calcolo del valore del carico di incendio specifico, in quanto non vi sono depositati materiali che possano prendere parte alla combustione. Quest'area ha il valore di 410 m², pertanto il valore della superficie che contribuisce al calcolo del carico di incendio è pari a 2040 m²
- Il manufatto costituisce unico compartimento antincendio.
- Il numero di addetti stimato è pari a 10 e non è prevista la presenza di persone diversamente abili.

In relazione al quantitativo di materiale combustibile presente nel capannone, si stima il valore del carico di incendio specifico q_f pari a 820 MJ/m², tramite la procedura riportata nel paragrafo S.2.9 del Codice. I risultati dell'analisi sono riportati in Tab. 1

Superficie in pianta lorda	Materiale combustibile	m	ψ	Quantità	Potere calorifico inferiore H	Carico d'incendio q	Carico d'incendio specifico q_f
m ²				kg	MJ/kg	MJ	MJ/m ²
2040	Pallets in legno	0,8	1	5000	18,48	73920,0	
	Arredi e scaffalature	0,8	1	2600	18,48	38438,4	
	Scatole di cartone	0,8	1	2800	18,48	41395,2	
	Materiali plastici	1	1	4000	46	184000,0	
	Componenti impianti tecnologici	1	1	5500	46	253000,0	
	Cavi e conduttori elettrici	1	1	23500	46	1081000,0	
TOTALE						1671753,6	819,5

Tab. 1: Stima del carico di incendio specifico per il caso studio 1

Si specifica che, per quanto riguarda gli arredi e le scaffalature, si conteggia il contenuto di legno presente. Per i componenti degli impianti tecnologici si considera il 70% del peso complessivo come materiale composto da plastica, la rimanente parte è ipotizzata incombustibile.

Di seguito si riportano degli screen del modello architettonico dal software di modellazione Revit.

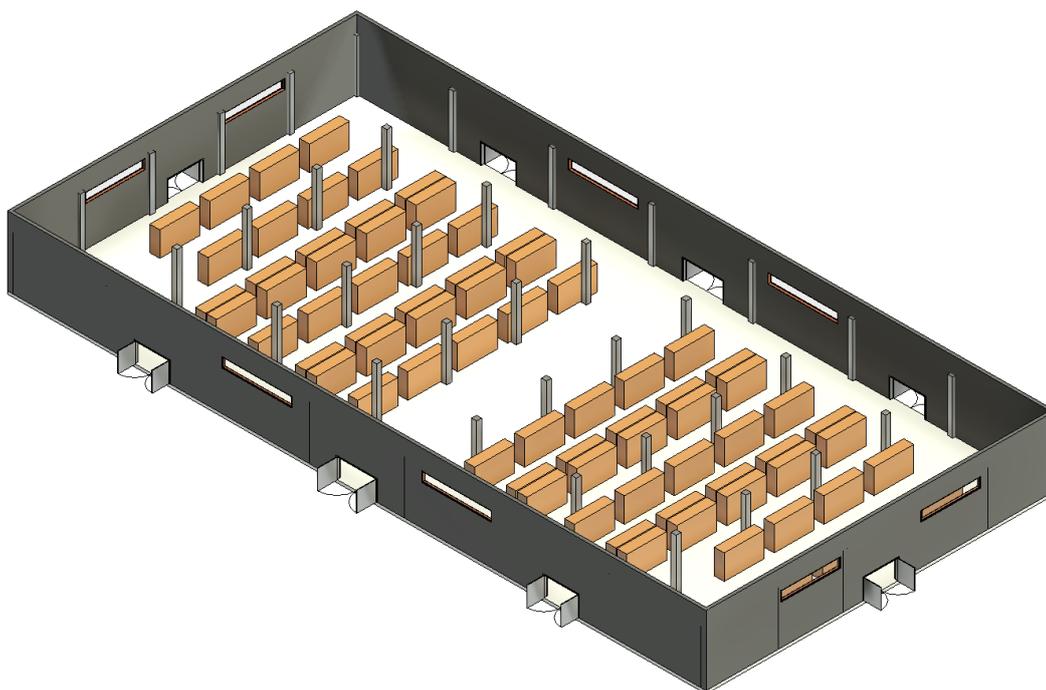


Fig. 10: Vista 3D isometrica, disposizione dei pilastri e della scaffalatura



Fig. 9: Vista 3d prospettica, apparecchiatura delle travi e dei travetti a doppio T

4.2 Contesto dell'attività nell'ambito prevenzione incendi

L'attività in esame risulta essere non normata. Ai sensi dell'allegato I del d.p.r. 1 agosto 2011 n. 151, si trova la classificazione pertinente al caso studio, nel punto 47 e categoria B: Stabilimenti ed impianti per la fabbricazione di cavi e conduttori elettrici isolati, con quantitativi in lavorazione e/o in deposito da 10000 a 100000 kg. Depositi e/o rivendite di cavi elettrici isolati con quantitativi da 10000 a 100000 kg.

4.3 Obiettivi di progettazione della sicurezza antincendio

L'obiettivo principale della progettazione può essere determinato dal progettista sulla base della valutazione dei profili di rischio delle attività, con riferimento al Codice nel capitolo G.3. Di seguito si determinano i profili di rischio per la salvaguardia della vita umana, dei beni e dell'ambiente se considerati significativi nel progetto in esame:

- *Rischio vita*: le caratteristiche prevalenti degli occupanti portano ad una classificazione di tipo A, poiché in stato di veglia ed aventi familiarità con l'edificio; il capannone in esame, in via cautelativa, potrebbe essere classificato come attività ad *alto pericolo HHP1* secondo il prospetto A.3 della norma UNI 12845, con una velocità di crescita caratteristica dell'incendio di tipo rapido. Per analogia, il rischio vita stimato è di tipo A3.
- *Rischio beni*: si ipotizza che non esistano atti normativi che classifichino l'edificio pregevole per arte o storia oppure che istituiscano che la continuità d'esercizio debba essere garantita, in quanto non viene condotta al suo interno un'attività strategica. Di conseguenza, per l'intera attività il profilo di rischio $R_{beni} = 1$. Tuttavia, secondo specifici accordi tra progettista e titolare dell'attività, i beni possono essere considerati nella progettazione, al fine di proteggerli.
- *Rischio ambiente*: Il rischio ambiente per l'intera attività non rientra nell'ambito della progettazione affrontata

Dalla determinazione dei profili di rischio, si deduce che il rischio vita è importante per la progettazione della sicurezza antincendio dell'attività, tuttavia gli addetti presenti sono pochi e sono formati, la progettazione è maggiormente finalizzata alla salvaguardia dei beni.

Se per la vita umana, durante l'esodo, il rischio costituito dal fumo è quello della riduzione della visibilità degli occupanti e dell'ostruzione delle vie respiratorie (vedi §2.1.3), per la protezione dei beni uno dei rischi più dannosi è quello del raggiungimento di temperature elevate, in particolar modo negli stadi avanzati della combustione. Si segnala, tuttavia, che, la norma UNI 9494, pur riconoscendo l'efficacia dei SEFC rispetto alla riduzione degli effetti termici sulle strutture o rispetto

al limitamento dei danni agli impianti e alle merci, esplicita un solo iter progettuale approfondito, il quale impone la creazione e il mantenimento di uno strato libero da fumo al di sopra del pavimento mediante la rimozione del fumo stesso. Di fatto si è obbligati a determinare a prescindere uno spessore dello strato della zona libera da fumo, precludendo la possibilità di progettare ai soli fini del contenimento della temperatura in ambiente. In questo senso la norma risulta essere limitativa, la valutazione delle temperature raggiunte nell'ambiente va condotta per via alternativa attraverso la simulazione di scenari di incendio.

È importante infine riconoscere che, ai fini dell'efficacia del SEFC, occorre valutare attentamente la validità degli input progettuali utilizzati, in quanto un'errata quantificazione degli stessi potrebbe comportare un'insufficiente quantificazione degli EFC e pregiudicare l'efficacia del sistema.

4.4 Verifica del sistema di esodo

La modalità prevista per l'esodo è quella di esodo simultaneo.

L'attività prevede il raggiungimento del livello di prestazione I del Codice, per cui gli occupanti devono raggiungere un luogo sicuro prima che l'incendio determini condizioni incapacitanti negli ambiti dell'attività attraversati durante l'esodo.

La verifica del dimensionamento delle vie e uscite d'esodo viene effettuata seguendo le disposizioni dei paragrafi S.4.8 e S.4.9 del Codice, ed è svolta riassuntivamente nella Tab. 2.

Si specifica che il calcolo del valore effettivo della larghezza delle uscite finali è condotto con verifica di ridondanza, non considerando volutamente la presenza di un'uscita di emergenza. Le lunghezze massime di esodo del caso studio riportate in tabella, sono state ricavate con il metodo del filo teso, mentre nella planimetria di emergenza vengono esplicitate le lunghezze effettive dei percorsi, considerando l'ingombro degli arredi fissi.

PARAMETRO	VALORE PRESCRITTO	VALORE EFFETTIVO	U.M.	RIFERIMENTO
Numero di vie d'esodo indipendenti	2	8		S.4.8.1.1
Numero di uscite indipendenti	2	8		TAB. S.4-15
Massima lunghezza d'esodo	45	20	m	TAB. S.4-25
Altezza delle vie di esodo	2	6	m	S.4.8.4
Larghezza minima esodo orizz. (L_0)	700	1000	mm	S.4-28
Larghezza minima delle uscite (L_F)	1,4	25	m	S.4.8.9
Massima lunghezza corridoio cieco	20	8	m	S.4-18

Tab. 2: verifica esodo

4.5 Individuazione dei presidi di controllo dell'incendio

Il Codice approfondisce la tematica del controllo dell'incendio all'interno della strategia S.6. Secondo il Codice, le tecniche di controllo dell'incendio possono prevedere la protezione:

- a) nei confronti di un principio di incendio;
- b) finalizzata all'inibizione o al controllo dell'incendio;
- c) mediante la completa estinzione dell'incendio.

La protezione antincendio viene effettuata grazie alla predisposizione di presidi antincendio, i quali vengono previsti per l'attività in base al livello di prestazione che è necessario raggiungere. I presidi antincendio sono:

- 1) estintori;
- 2) idranti;
- 3) sistemi automatici di controllo dell'incendio.

Il livello di prestazione richiesto dall'attività è verosimilmente il IV, poiché le sostanze stoccate sono pericolose ed il carico di incendio è molto elevato. Di conseguenza, la soluzione conforme prevede la presenza della totalità delle tipologie di presidi di controllo dell'incendio.

4.5.1 Estintori

I materiali presenti in quantità più rilevante nel compartimento antincendio, sono di tipo plastico, come PVC e PE; di conseguenza, secondo la norma europea EN 2, la classe di fuoco adatta a descrivere gli scenari possibili nell'attività studiata è la *classe B*, descritta come "*fuochi di materiali liquidi o solidi liquefacibili*", al contempo vi sono materiali, anche plastici, che formano braci e che pertanto portano alla classificazione di tipo *A*, descritta come "*fuochi di materiali solidi, usualmente di natura organica, che portano alla formazione di braci*". Di conseguenza gli estintori da installare dovranno essere di tipo polivalente AB. Le ulteriori prescrizioni dedotte dalle diciture del codice sono riassunte nella Tab. 3.

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Rischio vita	A3	-
Distanza dalle sorgenti di rischio	≤15	m
Capacità estinguente	≥21A; ≥89B	-
Massima distanza di raggiungimento	30	m
Carica nominale	≥6	kg o litri

Tab. 3: Prescrizioni per gli estintori portatili

4.5.2 Idranti

Si prevede l'installazione di una RI ordinaria con idranti a muro.

4.5.3 Sistema automatico di controllo dell'incendio

Si prevede l'installazione di un impianto sprinkler (SPK in seguito) ai fini del controllo e contenimento dell'incendio.

L'impianto è caratterizzato da tubazioni a secco durante il normale svolgimento dell'attività, la sua attivazione avviene tramite elettrovalvola. In tal modo si previene il rischio gelo in particolare nelle ore notturne, coerentemente con la tipologia dell'attività e l'assenza di impianti di riscaldamento. Inoltre, il comando di attivazione dell'impianto avviene a partire dall'attivazione di rilevatori di fumo, più reattivi di un bulbo termosensibile.

4.6 Controllo di fumi e calore

Il punto di partenza per la progettazione della strategia di controllo di fumi e calore è costituito dalle prescrizioni di cui al cap. S.8 del Codice degli Incendi.

In rimando ai livelli di prestazione descritti nel §3.1, si sottolinea che il locale è caratterizzato da alto carico di incendio e dalla presenza di materiali pericolosi. Pertanto si richiede il raggiungimento del livello di prestazione III, che impone il confinamento del fumo nel compartimento d'origine, la creazione di uno stato libero da fumo per la salvaguardia della vita umana e dei beni. In sostanza, si rimanda all'installazione di SEFC, con riferimento alle norme UNI 9494:2017.

5 PROGETTO AI SENSI DELLA NORMA UNI 9494

Sulla base della valutazione del rischio ed avendo l'obiettivo di proteggere i beni in caso di incendio, si progetta ai fini del raggiungimento del livello III di prestazione secondo il Codice nella sezione S.8, il quale prevede che debba essere mantenuto nel compartimento uno strato libero dai fumi tale che:

- Sia garantita la salvaguardia degli occupanti e delle squadre di soccorso;
- I beni siano protetti, se richiesto.

La soluzione conforme a questo livello di prestazione, prevede l'installazione di un sistema di evacuazione di fumo e calore nel campo della diretta applicazione delle norme UNI 9494-1 (SEFC) o UNI 9494-2 (SEFFC).

5.1 Scenari di contesto del fabbricato

Sulla base del contesto in cui il fabbricato è calato, si potrebbero presentare diverse scelte progettuali che condizionano la natura dei SEFC.

Le diverse combinazioni possibili variano per tipologia di estrazione e di immissione di aria in ambiente. Difatti per entrambi i flussi di aria citati, potrebbe essere previsto un sistema forzato, naturale o ancora un mix tra i due (vedi Tab. 4). Tralasciando le condizioni in cui si presenta il fabbricato è chiaro che la tipologia di sistema da preferire sia quella naturale, perché ha un basso impatto nei costi, nell'energia e nelle maestranze coinvolte; tuttavia esistono dei casi in cui si è propensi verso scelta di sistemi di controllo forzati che fanno uso di ventilatori. Di seguito si cerca di citare i possibili motivi per cui la scelta dei sistemi è indirizzata verso una specifica soluzione.

Immissione naturale

La tipologia di immissione naturale prevede innanzitutto che il fabbricato sia fuori terra. Il flusso di aria è vincolato a provenire dai lati del fabbricato attraverso delle aperture ai lati dell'ambiente, questo è possibile solo se l'ambiente confina direttamente con l'esterno, se il committente è disposto a effettuare aperture nell'involucro e se i fabbricati limitrofi si trovano a distanze ragionevoli tali che non siano condizionati dall'irraggiamento in caso di emergenza.

Immissione forzata

L'immissione forzata può essere prevista sia nel caso di fabbricato interrato, che seminterrato o fuori terra. Nel caso in cui i locali non siano confinanti con l'ambiente esterno oppure nel caso in cui le distanze da altri fabbricati non siano rispettate, non

si può immettere aria naturalmente nel locale e le porte delimitanti il compartimento saranno porte REI.

Immissione mixata

L'immissione mixata suppone che il fabbricato sia fuori terra. Inoltre è da preferire quando le aperture nell'involucro presenti non rispettano la SCT minima e si vuole immettere aria anche nelle zone centrali dei locali, quando il committente non vuole forare ulteriormente l'involucro oppure quando alcuni confini del locale non rispettano le distanze da altri fabbricato o non sono connessi direttamente sull'ambiente esterno.

Estrazione naturale

L'estrazione naturale può essere scelta in caso di fabbricato seminterrato o fuori terra. Si presuppone che i fumi abbiano una buona galleggiabilità, in modo che autonomamente possano raggiungere le aperture. Il convogliamento autonomo dei fumi può inoltre essere ostacolato dalla presenza di serbatoi di fumo a soffitto non progettati appositamente, come per esempio in presenza di travi ingombranti, le quali, pertanto, devono essere compatibili con il sistema di estrazione naturale o preferibilmente di dimensione ridotta. È importante effettuare valutazioni sull'effetto vento, che potrebbe compromettere la fuoriuscita dei fumi dalle aperture, come anticipato nel §2.3.5. È necessario inoltre che vi sia la possibilità di forare liberamente la copertura, in particolare senza interferire con i possibili impianti presenti in copertura.

Estrazione forzata

L'estrazione forzata può essere prevista sia nel caso di fabbricato interrato, che seminterrato o fuori terra. La scelta verso questo tipo di soluzione potrebbe essere condizionata da diversi fattori quali: una ridotta galleggiabilità dei fumi che, come approfondito nel §2.3.5, si può verificare nei casi in cui l'impianto sprinkler agisse fortemente nella riduzione di temperatura dei fumi; la presenza di elementi ingombranti nei pressi del soffitto, i quali non permettono un convogliamento autonomo dei fumi nei punti di estrazione; una valutazione nei confronti dell'effetto vento che potrebbe compromettere la fuoriuscita dei fumi all'esterno delle aperture; in caso di fabbricato esistente, il committente potrebbe volere ridurre al minimo la forometria, anche in funzione dell'apparato strutturale e della presenza di impianti sul tetto. Infine, il committente potrebbe non voler installare le cortine di fumo, in funzione di diverse interferenze tra costruito, funzione d'uso e progetto antincendio.

Estrazione mixata

L'estrazione mixata può essere scelta in caso di fabbricato seminterrato o fuori terra. Si presuppone che i fumi abbiano una buona galleggiabilità, in modo che autonomamente possano raggiungere le aperture. È importante effettuare valutazioni sull'effetto vento, che potrebbe compromettere la fuoriuscita dei fumi dalle aperture, come anticipato nel §2.3.5. Una soluzione di estrazione mixata potrebbe ovviare al problema della presenza di elementi ingombranti a soffitto che non permettono un convogliamento autonomo dei fumi nei punti di estrazione. Può anche essere un metodo per ridurre la forometria in quei punti in cui sono presenti impianti sul tetto o per soddisfare la richiesta di estrazione di una certa portata quando il sistema naturale non riesce a sopperire del tutto alle esigenze prefissate.

Dalle combinazioni dei possibili scenari del fabbricato sopradescritti, si ricavano 9 casistiche di funzionamento dei SEFC, codificate in Tab. 4.

ID	IMMISSIONE	ESTRAZIONE
1	NAT	FOR
2	NAT	NAT
3	NAT	MIX
4	FOR	FOR
5	FOR	NAT
6	FOR	MIX
7	MIX	FOR
8	MIX	NAT
9	MIX	MIX

Tab. 4: Codifica delle combinazioni di funzionamento dei SEFC

Il presente studio si sofferma inizialmente sull'analisi specifica dell'applicazione diretta e conforme della norma UNI 9494, che nella parte 1 affronta esclusivamente il secondo caso codificato come immissione ed estrazione naturali, mentre nella parte 2 affronta il primo e il quarto caso codificato in Tab. 4.

5.2 Progetto del sistema di evacuazione naturale di fumo e calore

Nel presente paragrafo si dimensionano i dispositivi di evacuazione naturale di fumo e calore, secondo le disposizioni della norma UNI 9494-1.

5.2.1 Principi

Le dimensioni del SENFC dipendono dalle caratteristiche dell'incendio e dall'altezza dello strato libero da fumo che si desidera raggiungere nell'ambiente da proteggere.

La progettazione del sistema SENFC si articola secondo le seguenti fasi:

- a) valutazione della durata convenzionale di sviluppo dell'incendio (t_c);
- b) determinazione del gruppo di dimensionamento;
- c) calcolo della superficie utile totale di apertura e del numero degli ENFC;
- d) verifica della corretta superficie totale delle aperture di afflusso di aria fresca.

5.2.2 Superficie dei serbatoi di fumo

Il dimensionamento dei SENFC secondo la norma UNI 9494-1 presuppone che i locali abbiano una superficie compresa tra i 600 m² e i 1600 m². Se necessario, i locali possono essere suddivisi in serbatoi di fumo con una superficie massima A_s pari a 1600 m². Viene imposto in ogni caso che nessun lato del serbatoio di fumo debba essere maggiore di 60 m. Il serbatoio di fumo, o compartimento a soffitto, viene definito come il volume all'interno di un ambiente limitato o chiuso dal soffitto e dalle barriere al fumo o da elementi strutturali per trattenere il fumo che stratifica in caso d'incendio. La separazione del fabbricato in serbatoi di fumo può avvenire con l'installazione di barriere al fumo, cioè dei dispositivi atti a convogliare, contenere e/o prevenire la migrazione del fumo e degli effluenti prodotti dall'incendio; esse possono essere indicate come cortine di contenimento fumo. L'intero capannone considerato, non può costituire unico serbatoio di fumo poiché di superficie complessiva pari a 2450 m². È necessario separare l'ambiente in almeno due compartimenti a soffitto, si sceglie di prevedere **2 compartimenti di fumo**, come da Fig. 11, separati da una porzione del locale dedicata alla **movimentazione delle merci**, con carico di incendio sostanzialmente nullo.

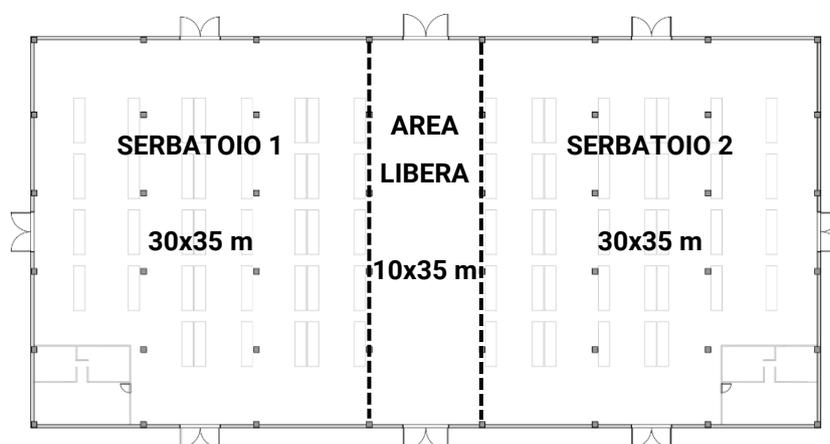


Fig. 11: Suddivisione in compartimenti di fumo del capannone industriale

5.2.3 Altezza dello strato libero da fumo, altezza delle barriere al fumo

L'altezza di riferimento ai fini del dimensionamento del SENFC secondo la norma UNI 9494-1 coincide con l'altezza h del locale, definita come distanza tra il livello più alto del pavimento e la media delle altezze del punto più alto e del punto più basso del tetto. Se ne deduce che l'altezza del locale, essendo la copertura dell'edificio studiato orizzontale, è pari all'altezza libera interna $h = 6,00$ m. La norma impone un'altezza minima dal pavimento y dello strato libero da fumi non minore di 2,5 e sulla base delle esigenze dell'attività, tra cui l'altezza della scaffalatura, si fissa:

$$y = 3,00 \text{ m}$$

Di conseguenza, lo spessore z dello strato di fumo a soffitto risulterà pari a:

$$z = h - y = 6,00 - 3,00 = 3,00 \text{ m}$$

Successivamente, è possibile ricavare l'altezza del serbatoio di fumo, coincidente con l'altezza della barriera al fumo h_b , secondo le regole del paragrafo 6.4 della norma. Nel caso in cui y sia minore di 4 metri, la norma impone che la barriera al fumo debba superare lo strato di fumo per almeno 0,5 metri, da cui si ricava:

$$h_b = z + 0,5 = 3,5 \text{ m}$$

Di conseguenza l'altezza minima da terra delle barriere al fumo è di 2,5 metri.

5.2.4 Valutazione della durata convenzionale dell'incendio

La durata convenzionale di sviluppo dell'incendio (t_c) indica l'intervallo di tempo compreso tra l'inizio dell'incendio e l'istante nel quale viene attuata un'azione di spegnimento. Essa è ricavata dalla somma di due contributi:

$$t_c = t_1 + t_2$$

Dove:

- t_1 è il tempo di allarme tra lo scoppio dell'incendio ed il momento dell'allarme. Si assume pari a 0 min, data la presenza di un sistema automatico di rivelazione dell'incendio che aziona automaticamente il SENFC.
- t_2 è il tempo di intervento tra l'allarme e l'inizio delle operazioni di estinzione. Ipotizzando una squadra di soccorso esterna, il tempo di intervento dipende dalla distanza dalla caserma dei VVF, dal traffico, dalle condizioni climatiche, dall'accessibilità dei mezzi di soccorso all'area e da altri fattori. Di conseguenza

è consentito stimare il tempo di intervento a partire dalla località dello stesso, attraverso il prospetto C.1 della norma riportante i valori medi di intervento dei VVF degli anni 2012 e 2013, o in alternativa, si possono utilizzare valori basati su dati statistici più recenti pubblicati in via ufficiale dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco o concordare con il comando locale dei VVF il valore più corretto. Nel caso in esame si sceglie di consultare l'annuario statistico del 2020, i dati acquisiti sono stati riassunti nella Tab. 5. Dalla media dei valori dagli anni 2014 al 2018 si ricava un tempo di intervento pari a circa 15 minuti

Pertanto, la durata convenzionale t_c di sviluppo d'incendio, data dalla somma dei due suddetti tempi, risulta pari a:

$$t_c = 0 + 15 = 15 \text{ minuti}$$

REGIONI	Tempi in minuti di arrivo sul luogo di intervento			
	2019	Media (*)	Var (**)	Var (***)
ABRUZZO	17,7	17,1	3,70%	3,10%
BASILICATA	21,8	20,7	5,30%	6,90%
CALABRIA	16,2	16,3	-0,60%	-9,60%
CAMPANIA	17,9	15,8	13,10%	5,00%
EMILIA ROM.	16,9	15,6	8,10%	-1,10%
FRIULI V.G.	15,5	14	10,90%	2,50%
LAZIO	18,1	16,8	8,00%	-1,00%
LIGURIA	15,8	13,3	18,80%	5,10%
LOMBARDIA	15,9	14,4	10,60%	4,80%
MARCHE	16,1	14,7	9,40%	-0,30%
MOLISE	17	16,7	1,70%	-3,50%
PIEMONTE	16,9	14,9	13,50%	5,10%
PUGLIA	18	16,3	10,80%	4,10%
SARDEGNA	16,9	15,6	8,30%	0,60%
SICILIA	16,6	14,2	17,10%	1,90%
TOSCANA	17,2	15,6	10,00%	2,40%
UMBRIA	18,9	15,6	21,50%	1,00%
VENETO	17,6	17,3	1,90%	-5,10%
MEDIA NAZ.	17	15,5	10,00%	1,20%
(*) Valore medio calcolato su 5 anni (dal 2014 al 2018).				
(**) Variazione % riscontrata nel 2019 rispetto alla Media dei 5 anni precedenti.				
(***) Variazione % riscontrata nel 2019 rispetto all'anno precedente (2018)				

Tab. 5: estratto della tabella 24 dell'annuario dei VVF anno 2020

5.2.5 Determinazione del gruppo di dimensionamento

La superficie convenzionale dell'incendio corrisponde alla dimensione che potrebbe assumere il focolare prima dell'inizio delle operazioni di spegnimento. La superficie raggiunta dal focolare fino a quel momento è funzione della velocità di propagazione dell'incendio e della durata convenzionale di sviluppo dell'incendio t_c . Tale dimensione, corrisponde ad un gruppo di dimensionamento GD, sulla base dei valori elencati nella Tab. 6

GD	1	2	3	4	5
Superficie convenzionale (m ²)	5	10	20	40	80

Tab. 6: Corrispondenza tra i valori di GD e della superficie convenzionale dell'incendio

Il gruppo di dimensionamento (GD), grandezza ausiliaria per il dimensionamento del sistema SENFC, si seleziona secondo le indicazioni di cui al prospetto 1 della norma UNI 9494-1. La velocità di propagazione dell'incendio viene valutata come da rischio vita, valutato nel §4.3, ed è di tipo alta; il tempo di sviluppo dell'incendio è stato ricavato nel paragrafo precedente ed è pari a 15 minuti. Di conseguenza, il gruppo di dimensionamento è pari a 5. Si nota che la dimensione del focolare non è funzione dell'area del compartimento in cui l'incendio si sviluppa.

La norma, si è implicitamente imposta di riuscire a confinare all'area indicata la propagazione delle fiamme a seguito delle ipotesi fatte circa la velocità di propagazione dell'incendio e della durata convenzionale dello stesso. Se tale confinamento non avviene, l'impianto SENFC non è in grado di mantenere l'altezza libera dai fumi prefissata.

t (min)	Gruppo di dimensionamento (GD)		
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20	4	5	5 ^(*)
> 20	5	5 ^(*)	5 ^(*)
Velocità di propagazione dell'incendio	bassa	media	alta
(*) In questi casi la sola installazione di Sistemi di Evacuazione di Fumo e Calore dimensionati con GD pari 5 non è sufficiente. Per raggiungere gli obiettivi di protezione della UNI 9494-1 è quindi necessario adottare misure aggiuntive (per esempio sistemi automatici di spegnimento) e/o dimensionare il SENFC con criteri più restrittivi			

Tab. 7: prospetto 1 della norma UNI 9494-1 per la determinazione di GD

5.2.6 Scelta tecnologica degli ENFC, individuazione della SUA

Gli ENFC devono essere selezionati in base alle prestazioni richieste e alle norme di riferimento, in particolare alla UNI 12101-2. Per ragioni tecnico economiche, di manutenzione e di intercambiabilità dei componenti, è opportuno installare la stessa tipologia di ENFC in tutti i compartimenti a soffitto.

Nel caso in esame, si predispone l'installazione un ENFC a un battente, reperibile nel mercato, la cui superficie geometrica è pari a 120x150 cm ($A_v = 1,8 \text{ m}^2$), con un angolo di apertura $\gamma = 165^\circ$.



Nel dimensionamento degli ENFC la grandezza di riferimento è la superficie utile di apertura A_a (SUA), che misura la capacità ad estrarre da un ambiente i fumi provenienti da un incendio anche in condizioni climatiche avverse, per esempio in presenza di vento esterno. La SUA, che caratterizza un ENFC, differisce dalle sue dimensioni geometriche perché si tiene conto dei fenomeni fisici che influenzano l'efflusso del fumo attraverso l'apparecchio, come ad esempio le caratteristiche geometriche dell'apparecchio, le caratteristiche di installazione e l'interferenza fra il flusso di fumo che fuoriesce dall'apparecchio e il flusso d'aria di un eventuale vento esterno.

La superficie utile di apertura A_a equivale all'effettiva sezione che un fluido attraversa quando fuoriesce da un'apertura. Il fenomeno è caratterizzato dal coefficiente di efflusso C_v che rappresenta il rapporto fra l'area dell'effettiva sezione di efflusso e l'area dell'apertura di riferimento. Nel caso di un ENFC installato su un tetto piano, l'apertura di riferimento coincide con l'area geometrica della base del basamento dell'ENFC, A_v .

$$C_v = A_a / A_v$$

La misurazione della SUA è effettuata con una prova in laboratorio autorizzato che definisce l'efficienza di evacuazione dell'apparecchio con e senza vento esterno simulato, Il valore dichiarato è il minore dei due valori rilevati. La soluzione tecnologica presa in considerazione prevede:

$$C_v = 0,62$$

$$A_a = C_v \cdot A_v = 1,12 \text{ m}^2$$

PARAMETRI DI TEST AI SENSI UNI EN 12101-2 E RISULTATI DEI TEST

I nostri ENFC aprono affidabilmente il lucernario in posizione di evacuazione fumi in soli 60 secondi...

	...e assicurano la fuoriuscita di grandi quantità di fumo	Coefficiente di efflusso C_v da 0,60 a 0,65 Superficie utile d'apertura A_a (Sua) da 0,6 m ² a 1,42 m ²
	...dopo il test di durata (1000 volte in posizione di evacuazione fumi e 10.000 volte in posizione di aerazione)	RE 1000 Aerazione 10.000 + 10.000 aperture per aerazione
	...sotto l'azione della neve	Da SL 500 a SL 2400
	...in caso di gelo con temperature interne fino a -15°C	T(-15)
	...sotto l'azione del vento (fino a 150 kg/m ²)	WL 1500
	...in caso di incendio	B300

Tab. 8: Condizioni di prova del lucernario di esempio individuato

5.2.7 Calcolo della superficie utile totale di apertura e del numero degli ENFC

La superficie totale utile di apertura SUT è il valore minimo che si deve raggiungere sommando le superfici utili di apertura degli ENFC installati nello stesso serbatoio di fumo. Condizione necessaria per un corretto dimensionamento dei SENFC è che il numero complessivo n di ENFC per ogni compartimento a soffitto deve essere tale che:

$$SUT \leq \sum_{i=1}^n A_{ai}$$

il valore di SUT, definito per ogni serbatoio a soffitto, può essere ricavato facilmente con metodo tabellare ed è funzione dell'altezza del locale h , dell'altezza libera da fumo y , e del gruppo di dimensionamento GD. Il dimensionamento degli ENFC viene eseguito per ogni serbatoio di fumo; nel caso in esame i due serbatoi descritti nel §5.2.2 sono equivalenti, pertanto ricondurranno ad identico dimensionamento. Dalla Tab. 9 si ottiene $SUT = 8,3 \text{ m}^2$.

Fissata la superficie di un singolo ENFC $A_a = 1,12 \text{ m}^2$, si ricava il minimo numero di dispositivi da installare tramite la seguente relazione:

$$n_{\min} = \lceil SUT / A_a \rceil = \lceil 8,3 / 1,12 \rceil = 8$$

h (m)	z (m)	y (m)	Valori di SUT (m ²)				
			1	2	3	4	5
3	0,5	2,5	4,8	6,2	8,2	11,0	15,4
3,5	1,0	2,5	3,4	4,4	5,8	7,8	10,9
	0,5	3,0	6,7	8,7	11,3	15,0	20,4
4,0	1,5	2,5	2,8	3,6	4,7	6,4	8,9
	1,0	3,0	4,8	6,2	8,0	10,6	14,4
4,5	2,0	2,5	2,4	3,1	4,1	5,5	7,7
	1,5	3,0	3,9	5,0	6,5	8,7	11,8
	1,0	3,5	5,9	8,4	10,7	13,9	18,6
5,0	2,5	2,5	2,2	2,8	3,6	4,9	6,9
	2,0	3,0	3,4	4,4	5,7	7,5	10,2
	1,5	3,5	4,8	6,8	8,7	11,4	15,2
	1,0	4,0	7,1	10,3	13,8	17,7	23,4
5,5	3,0	2,5	2,0	2,5	3,3	4,5	6,3
	2,5	3,0	3,0	3,9	5,1	6,7	9,1
	2,0	3,5	4,2	5,9	7,5	9,8	13,1
	1,5	4,0	5,8	8,5	11,3	14,6	19,1
	1,0	4,5	8,2	12,2	17,4	22,2	28,8
6,0	3,5	2,5	1,8	2,3	3,1	4,2	5,8
	3,0	3,0	2,7	3,6	4,6	6,1	8,3
	2,5	3,5	3,7	5,3	6,7	8,8	11,8
	2,0	4,0	5,0	7,3	9,8	12,6	16,5
	1,5	4,5	6,7	10,0	14,2	18,1	23,5
	1,0	5,0	9,3	14,0	20,5	27,2	35,0
GD			1	2	3	4	5

Tab. 9: Estratto del prospetto 2 della norma UNI 9494-1

Conseguentemente, si esaminano le condizioni consigliate dalla norma, riguardo al posizionamento degli ENFC per coperture piane, in modo che la loro distribuzione sia uniforme ed efficace:

- Il numero minimo di ENFC dovrebbe essere uno ogni 200 m². Con le condizioni sopradescritte, un singolo ENFC serve un area di 130 m², in linea con le prescrizioni della norma.
- La distanza fra gli ENFC deve essere compresa tra i 5 m e i 20 m. Dalla Fig. 11 in seguito si possono osservare le quote che indicano che tale relazione è rispettata.

Dalla Tab. 10 si evidenzia che la superficie utile totale degli ENFC è appena maggiore della SUT, risultato accettabile in quanto si tenta di testare le prestazioni minime indispensabili prescritte dalla norma.

Serbatoio di fumo	A_s [m ²]	SUT [m ²]	n. ENFC	m ² /ENFC	A_a [m ²]	ΣA_a [m ²]
1	1020	8,3	8	130	1,12	9
2	1020	8,3	8	130	1,12	9

Tab. 10: prospetto riassuntivo del dimensionamento degli enfc

La norma impone, inoltre, che la dimensione e la posizione degli ENFC debba garantire che non ci sia trascinato di aria attraverso lo strato di fumo: fenomeno denominato *plugholing*. Per evitare tale fenomeno, devono essere rispettate due condizioni:

- a) La superficie utile di apertura A_a deve essere inferiore alla superficie utile di apertura critica $A_{a,crit} = 1,4 z^2$

$$A_a = 1,12 \text{ m}^2$$

$$A_{a,crit} = 1,4 \cdot 3^2 = 12,6 \text{ m}^2$$

$$A_a \leq A_{a,crit}$$

Dati i valori rilevati la verifica risulta ampiamente soddisfatta.

- b) Quando la distanza tra i bordi di 2 ENFC contigui è minore di $3z = 9 \text{ m}$, la somma delle due superfici utili di apertura deve essere minore della superficie utile di apertura critica

$$A_{a1} = A_{a2} = 1,12 \text{ m}^2$$

$$A_{a1} + A_{a2} = 2,24 \text{ m}^2$$

$$A_{a,crit} = 12,6 \text{ m}^2$$

$$A_{a1} + A_{a2} \leq A_{a,crit}$$

Dati i valori rilevati la verifica risulta ampiamente soddisfatta. Di seguito viene riportata una pianta dei locali, in cui viene segnalato il posizionamento e la grandezza dei fori ai fini dell'installazione degli ENFC.

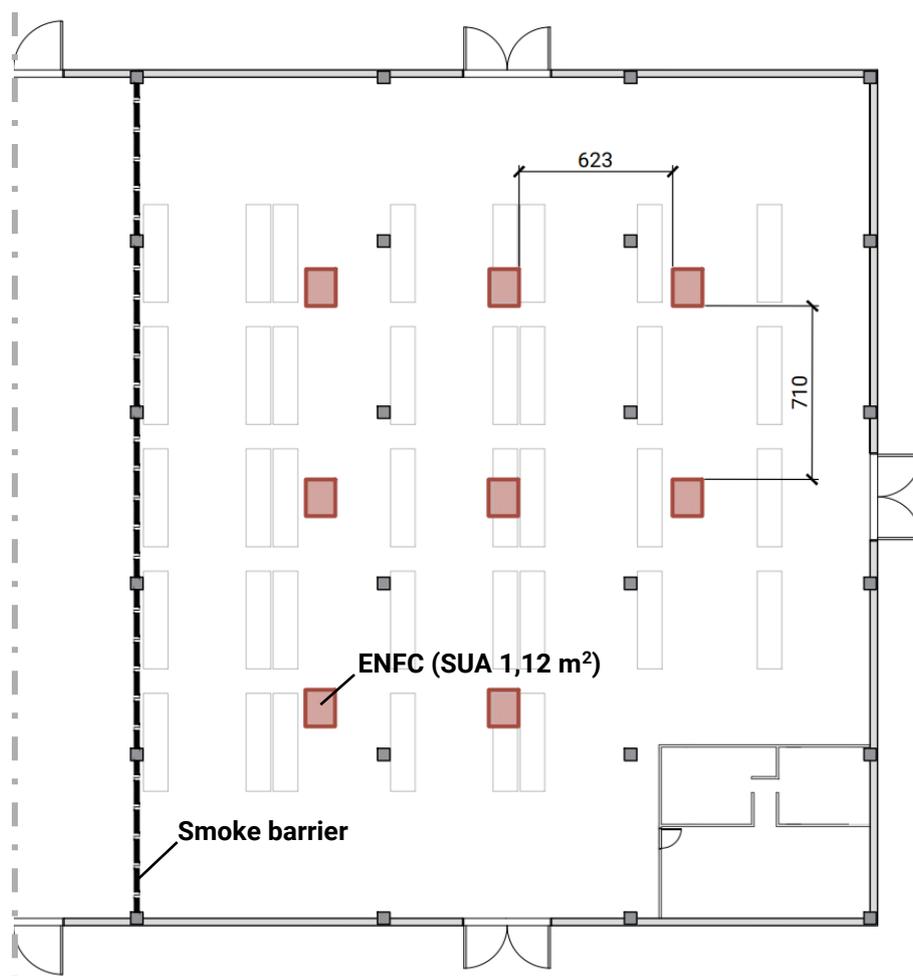


Fig. 12: schema in pianta dei dispositivi di evacuazione naturale di fumo e calore

5.2.8 Verifica della corretta superficie totale delle aperture di afflusso di aria fresca

Secondo il punto 6.7 della norma UNI 9494-1, occorre verificare che le aperture presenti da progetto, in prossimità del pavimento, siano idonee a garantire un sufficiente afflusso di aria fresca proveniente dall'esterno verso l'ambiente da proteggere. In alternativa, si potrebbe presentare la necessità di installare aperture dedicate, al fine di garantire la completa efficacia del SENFC.

La sezione ricercata a tal scopo è quella che garantisce l'afflusso di aria in uno solo dei serbatoi di fumo in caso di emergenza, in particolare quello avente il massimo valore di SUT, questo perché si presuppone che l'incendio si sviluppi in unico serbatoio. Nel caso studio i due compartimenti a soffitto sono equivalenti tra loro, per cui se ne sceglie arbitrariamente uno.

Per rispettare i requisiti normativi, bisogna imporre che il rapporto R_s fra la superficie totale corretta delle aperture di afflusso di aria e la superficie utile totale di apertura ricava dalla Tab. 9 debba essere maggiore di 1,5:

$$R_{s,\min} = \text{SCT} / \text{SUT} = 1,5 \Rightarrow \text{SCT} = 1,5 \cdot \text{SUT} = 1,5 \cdot 9 = 13,44 \text{ m}^2$$

Infine, il numero m delle aperture del locale deve essere tale da soddisfare la seguente condizione:

$$\text{SCT} \leq \sum_{i=1}^m A_{ci}$$

Dove A_c è la superficie corretta di un'apertura per l'afflusso d'aria, ottenuta moltiplicando il valore della superficie geometrica di passaggio di un'apertura per un coefficiente c_z riportato nel prospetto 3 della citata norma.

Si individuano di conseguenza le aperture per l'afflusso d'aria già disponibili nel progetto. Le aperture idonee per l'afflusso di aria fresca devono innanzitutto prevedere che il loro spigolo superiore sia distante dallo strato di fumo almeno un metro, in modo da evitare che l'aria immessa non disturbi quanto accumulato all'interno del serbatoio di fumo; se questo succedesse i gas caldi si raffredderebbero e scenderebbero, con la probabilità di innescare di moti turbolenti, in grado di richiamare i fumi a strati più bassi del serbatoio. Il progetto vanta 6 porte di larghezza pari a 3,5 metri e altre 2 con larghezza pari a 4 metri, tutte le porte hanno altezza pari a 2 metri. Ragion per cui sono idonee allo scopo citato. Inoltre dal prospetto 3 della norma si ottiene c_z pari a 0,65. Dunque:

$$\sum_{i=1}^m A_{ci} = 6 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 0,65 + 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,65 = 37,7 \text{ m}^2 \geq \text{SCT} = 13,44 \text{ m}^2$$

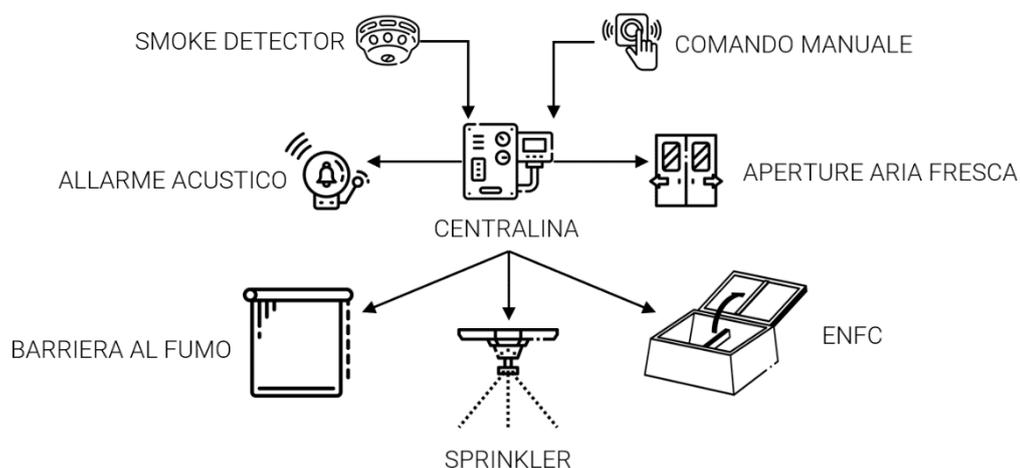
La verifica risulta largamente soddisfatta.

5.2.9 Funzionamento operativo del SENFC

Il SENFC viene attivato da un comando; questo può essere mandato alla centralina del sistema sia automaticamente, attraverso rivelatori di fumo, sia manualmente, con l'intervento di un operatore. Il comando, nella fase di crescita dell'incendio, apre la totalità degli ENFC del compartimento a soffitto e cala la barriera al fumo per creare il serbatoio di fumo. Le aperture per l'afflusso d'aria sono progettate per essere

azionate anche manualmente, per cui nel piano di emergenza aziendale andrà previsto un comportamento personale che assicura l'apertura delle porte del locale. Si segnala che le aperture debbono essere mantenute nella loro posizione di massima apertura durante il funzionamento del SENFC e che la centralina, cui il sistema fa capo, assicuri la possibilità che tali aperture si aprano contemporaneamente all'attivazione del SENFC. Al fine di garantire il livello di prestazione III del SENFC, essendo presente un sistema IRAI, deve essere soddisfatta la prescrizione tecnica aggiuntiva segnalata dal Codice, che richiede la presenza di funzioni di comunicazione e controllo dello stato dell'impianto SEFC.

Infine, secondo quanto stabilito nel §254.5.3 si dovrà gestire automaticamente l'attivazione dell'impianto sprinkler insieme alle eventuali interferenze tra quest'ultimo e l'impianto ENFC. Le precauzioni minime che si possono intraprendere in tal senso riguardano il posizionamento degli ugelli, in modo che siano adeguatamente distanti dai punti di estrazione dei fumi, e la loro attivazione, che viene gestita dalla centralina a seguito del segnale dello smoke detector con priorità rispetto all'apertura degli evacuatori, in modo che i flussi di aria coinvolti non pregiudichino il funzionamento dell'impianto ad acqua.



Schema dell'attivazione del SENFC

5.2.10 Riepilogo e commento dei risultati

Nel presente caso studio è stato effettuato il progetto di un sistema di evacuazione naturale di fumo e calore (SENFC) a servizio di un capannone di nuova realizzazione. L'impianto progettato è una soluzione conforme al livello di prestazione richiesto (III), in quanto garantisce le prestazioni prescritte all'interno della norma UNI 9494-1.

Grandezza	Simbolo	UM	Valore
Carico di incendio specifico	q_f	MJ/m ²	819,5
Valutazione rischio vita	R_{vita}		A3
Valutazione rischio beni	R_{beni}		1
Livello di prestazione da S.8			III
Altezza del locale	h	m	6
Altezza dello strato libero dal fumo	y	m	3
Altezza dello strato di fumo	z	m	3
Velocità di propagazione dell'incendio	δ_α		alta
Tempo di allarme	t_A	min	0
Tempo di intervento	t_{int}	min	15
Durata convenzionale dello sviluppo dell'incendio	t	min	15
Gruppo di dimensionamento	GD		5
Superficie convenzionale incendio	A_f	m ²	80
Minima altezza del serbatoio di fumo secondo y	$h_{b,min}$	m	3,5
Altezza del serbatoio di fumo	h_b	m	3,5
Superficie singolo ENFC	A_{lorda}	m ²	1,8
Coefficiente di efflusso	C_v		0,62
Superficie utile di apertura	A_a	m ²	1,12
Area del serbatoio di fumo	A_s	m ²	1020
Superficie utile totale di apertura	SUT	m ²	8,3
Area servita dal singolo ENFC		m ² /#ENFC	130
Numero di ENFC	#ENFC		8
Superficie utile totale di effettiva	SUT_d	m ²	9,0
Superficie utile di apertura critica	$A_{a,crit}$	m ²	12,6
Somma delle due superfici di apertura	$A_{a1}+A_{a2}$	m ²	2,24
SUT del compartimento più ampio	SUT_{max}	m ²	9,0
Coefficiente di correzione	C_z		0,65
Superficie totale corretta delle aperture richiesta	SCT_{min}	m ²	13,4
Superficie totale corretta delle aperture effettiva	SCT	m ²	31,9
Verifica R_s	SCT/SUT		1,6

Tab. 11: riepilogo dei risultati ottenuti per soluzione conforme alla UNI 9494-1

Il progetto del sistema di *evacuazione naturale* risulta abbastanza lineare e semplificato grazie all'approccio tabellare proposto dalla norma UNI 9494-1. Quest'ultimo risulta di semplice e diretta applicazione e non sembra presentarsi la lampante necessità di ottimizzare tale sistema per quanto riguarda i dispositivi di evacuazione.

5.3 Progetto del sistema di evacuazione forzata di fumo e calore

Nel caso in esame si dimensionano i dispositivi di evacuazione forzata di fumo e calore, secondo le disposizioni della norma UNI 9494-2.

5.3.1 Principi

Le dimensioni del SEFFC dipendono dalle caratteristiche dell'incendio e dall'altezza dello strato libero da fumo che si desidera raggiungere nell'ambiente da proteggere.

La progettazione del sistema SEFFC si articola secondo le seguenti fasi:

- 1) Valutazione della durata convenzionale di sviluppo dell'incendio (t_c);
- 2) Determinazione del gruppo di dimensionamento;
- 3) Determinazione della portata di aspirazione necessaria;
- 3a) Verifica della corretta superficie totale delle aperture di afflusso di aria fresca;
- 3b) Determinazione della portata di immissione necessaria;
- 4) Caratterizzazione e posizionamento dei componenti del sistema.

5.3.2 Superficie dei serbatoi di fumo

Il dimensionamento dei SEFFC secondo la norma UNI 9494-2 presuppone che i locali soddisfino le medesime caratteristiche esposte nel §5.2.2. Per cui la suddivisione dei locali in compartimenti a soffitto risulta la medesima.

5.3.3 Altezza dello strato libero da fumo, altezza del serbatoio di fumo

I parametri di input riguardanti le altezze di progetto sono stati ricavati nel medesimo modo descritto nel §5.2.3 e sono di seguito riassunti nella Tab. 12

PARAMETRO	SIMBOLO	VALORE	U.M.	RIFERIMENTO
Altezza del locale	h	6	m	6.3
Altezza dello strato libero da fumo	y	3	m	6.3
Altezza dello strato di fumo	z	3	m	Figura 2
Altezza del serbatoio di fumo	h_b	3,5	m	6.4

Tab. 12: altezze di riferimento per la progettazione dei SEFFC ricavate secondo la norma UNI 9494-2, a cui si fa riferimento

5.3.4 Valutazione della durata convenzionale dell'incendio

La durata convenzionale dello sviluppo dell'incendio viene valutata identicamente al §5.2.4 e risulta pari a 15 minuti.

5.3.5 Determinazione del gruppo di dimensionamento

La superficie convenzionale dell'incendio corrisponde alla dimensione che potrebbe assumere il focolare prima dell'inizio delle operazioni di spegnimento. La superficie raggiunta dal focolare fino a quel momento è funzione della velocità di propagazione dell'incendio e della durata convenzionale di sviluppo dell'incendio t_c .

Tale dimensione, corrisponde ad un gruppo di dimensionamento GD, sulla base dei valori elencati nella Tab. 3.

Il gruppo di dimensionamento, si seleziona secondo le indicazioni di cui al prospetto 1 della norma UNI 9494-2. La velocità di propagazione dell'incendio viene valutata come da rischio vita, valutato nel §4.3 ed è di tipo alta, il tempo di sviluppo dell'incendio (t) è stato ricavato dalla Tab. 5 ed è pari a 15 minuti. Di conseguenza, il gruppo di dimensionamento è pari a 5. Si nota che la dimensione del focolare non è funzione dell'area del compartimento in cui l'incendio si sviluppa.

t (min)	Gruppo di dimensionamento (GD)		
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20	4	5	-
Velocità di propagazione dell'incendio	bassa	media	alta

Tab. 13: prospetto 1 della norma UNI 9494-2 per la determinazione del GD

A differenza del sistema di evacuazione naturale di fumo e calore, la norma dedicata all'estrazione forzata non contempla valore di tempo di sviluppo dell'incendio superiori a 20 minuti, né scenari caratterizzati da una velocità di propagazione alta con tempo di propagazione superiore a 15 minuti.

5.3.6 Determinazione della portata volumetrica di aspirazione

Facendo riferimento al punto 6.6.5 della norma, per ogni serbatoio di fumo, viene determinata la portata volumetrica che l'impianto SEFFC deve evacuare. Si evidenzia che i serbatoi di fumo sono identici dal punto di vista del dimensionamento, per cui si illustra il procedimento di uno solo dei compartimenti.

Il calcolo proposto dalla norma, prende spunto da un modello a zone semplificato con rilascio termico di riferimento pari a 300 kW/m². La determinazione delle diverse portate d'aria presenti nella norma, deriva dal risultato del bilancio dei flussi di massa e di energia entranti e uscenti dallo strato contenente i prodotti della combustione. Il calcolo è stato eseguito in regime stazionario, trascurando il transitorio di accensione, prendendo in considerazione determinate superfici dell'incendio a cui corrisponde un determinato gruppo di dimensionamento GD.

Di conseguenza, la norma permette la determinazione della portata volumetrica di aspirazione adatta al caso studio, attraverso un approccio semplice, di natura tabellare. Nel prospetto 2 della norma, riportato in Tab. 14, con GD pari a 5 e altezza dello strato libero da fumo pari a 3 metri, si ottiene la portata volumetrica di aspirazione $Q_1 = 248000 \text{ m}^3/\text{h}$ per ogni compartimento di fumo.

y = h - z	Portata volumetrica di aspirazione Q (m ³ /h)				
2,5	29000	46000	75000	128000	223000 (*)
3	34000	55000	88000	146000	248000
4	43000	72000	115000	181000	303000
5	50000	85000	143000	229000	366000
6	59000	96000	160000	276000	436000
7	73000	105000	183000	311000	512000
8	88000	121000	197000	342000	580000
9	106000	143000	208000	368000	633000
10	123000	166000	231000	387000	681000
GD	1	2	3	4	5
(*) In questa condizione è lecito supporre condizioni di incendio generalizzato (flashover) che rendono il sistema SEFFC inefficace nella creazione di uno strato libero da fumo per proteggere le persone presenti nel locale. È quindi necessario modificare il progetto per ottenere un gruppo di dimensionamento minore.					

Tab. 14: prospetto 2 norma UNI 9494-2, valori di portata di smaltimento necessaria in m³/h

5.3.7 Determinazione della temperatura dei fumi

Tramite i prospetti 3 e 4 della norma è possibile ricavare le temperature dei fumi, rispettivamente media e locale. La temperatura dei fumi media $\theta_{F,media}$ è un dato riferito all'intero strato di fumo e contribuisce a ricavare la densità dei fumi, utile al calcolo aerulico per i sistemi di estrazione e immissione. La temperatura locale dei fumi $\theta_{F,locale}$, invece, condiziona la determinazione della classe di temperatura dei componenti dell'impianto SEFFC, come riportato in Tab. 17.

Con un GD pari a 5 e un'altezza dello strato libero da fumo pari a 3 metri, dalla Tab. 15 si ricava $\theta_{F,media} = 430$ °C, mentre dalla Tab. 16 si ricava $\theta_{F,locale} = 554$ °C.

y = h - z	Temperatura media dei fumi $\theta_{F,media}$ (°C)				
2,5	160	210	290	400	560
3	130	170	230	310	430
4	100	120	150	210	290
5	80	100	120	160	210
6	70	90	100	120	170
7	60	80	90	110	140
8	50	70	90	100	120
9	50	60	80	90	110
10	40	60	70	90	100
GD	1	2	3	4	5

Tab. 15: prospetto 3 UNI 9494-2

y = h - z	Temperatura locale dei fumi $\theta_{F,locale}$ (°C)				
2,5	196	268	371	516	722 (*)
3	156	209	287	397	554
4	121	148	193	265	367
5	103	122	148	196	268
6	90	108	127	155	209
7	74	99	114	135	170
8	64	87	106	122	146
9	56	75	101	113	133
10	50	67	91	107	123
GD	1	2	3	4	5

(*) In questa condizione è lecito supporre condizioni di incendio generalizzato (flashover) che rendono il sistema SEFFC inefficace nella creazione di uno strato libero da fumo per proteggere le persone presenti nel locale. È quindi necessario modificare il progetto per ottenere un gruppo di dimensionamento minore.

Tab. 16: prospetto 4 UNI 9494-2

Alcuni componenti del SEFFC dovranno essere scelti in funzione delle prestazioni da garantire, in maniera da resistere alle sollecitazioni cui saranno soggetti durante il funzionamento in caso d'incendio. Le dimensioni dovranno soddisfare i requisiti prestazionali dell'impianto, con particolare riferimento alle classi minime di temperatura (Tab. 17), in funzione delle condizioni di funzionamento di cui alla Tab. 16.

Componenti	Temperatura locale dei fumi $\theta_{F, locale}$ (°C)				Norme di riferimento
	≤ 200 °C	≤ 300 °C	≤ 400 °C	≤ 600 °C	
Ventilatori per SEFFC	F200	F300	F400	F600	UNI EN 12101-3
Condotte di controllo del fumo (singolo compartimento)	E ₃₀₀ 30 S	E ₃₀₀ 30 S	E ₆₀₀ 30 S	E ₆₀₀ 30 S	UNI EN 12101-7
Condotte di controllo del fumo (compartimenti multipli)	Ei xxx S				
Serrande di controllo del fumo (singolo compartimento)	E ₃₀₀ 30 S	E ₃₀₀ 30 S	E ₆₀₀ 30 S	E ₆₀₀ 30 S	UNI EN 12101-8
Serrande di controllo del fumo (compartimenti multipli)	Ei xxx S				
Barriere al fumo	D 30				UNI EN 12101-1
Cavi di segnale					CEI 20-105
Cavi di potenza					UNI EN 13501-1 UNI EN 13501-3

Tab. 17: Prospetto 5 uni 9494-2

Successivamente saranno illustrati i componenti principali del SEFFC oggetto del caso in esame.

5.3.8 Individuazione dei ventilatori per SEFFC

I ventilatori per SEFFC sono apparecchi motorizzati specificamente progettati per convogliare il fumo e i gas caldi all'esterno di un edificio in caso di incendio. L'individuazione di tali apparecchi richiede di definirne le seguenti prestazioni:

- Classe di temperatura
- Portata totale volumetrica da estrarre
- Tecnologia ventilatore e modalità di installazione generiche
- Portata e prevalenza dei ventilatori
- Numero e posizionamento dei ventilatori
- Potenza assorbita

Per quanto riguarda la classe di temperatura, essendo la temperatura locale dei fumi pari a 554 °C, dalla Tab. 17 si ricava una prestazione F600 con norma di riferimento UNI EN 12101-3.

La portata totale volumetrica da estrarre è posta al minimo possibile da norma, cioè pari a quella ricavata dalla Tab. 14 di 248000 m³/h.

Sulla base dei dati a disposizione si individua una tecnologia di ventilatore. In questo caso è possibile, tra le molteplici soluzioni, scegliere quella di torrini centrifughi a scarico verticale, installati a soffitto, il cui schema di funzionamento è reperibile nella Fig. 14. Anche in questo caso si fa riferimento ad un prodotto presente sul mercato in modo da stabilirne le prestazioni. In particolare, si fa riferimento al torrino della linea roof HPF600 i cui principali componenti sono reperibili in Fig. 13, le proprietà del torrino sono riassunte in Tab. 18.

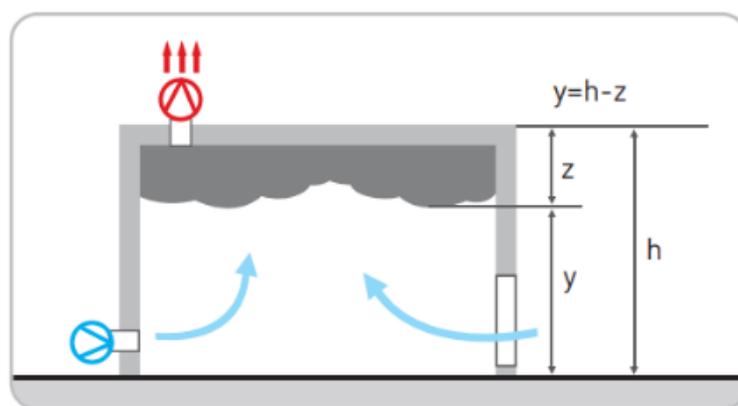


Fig. 14: Schema di funzionamento del torrino centrifugo a estrazione verticale

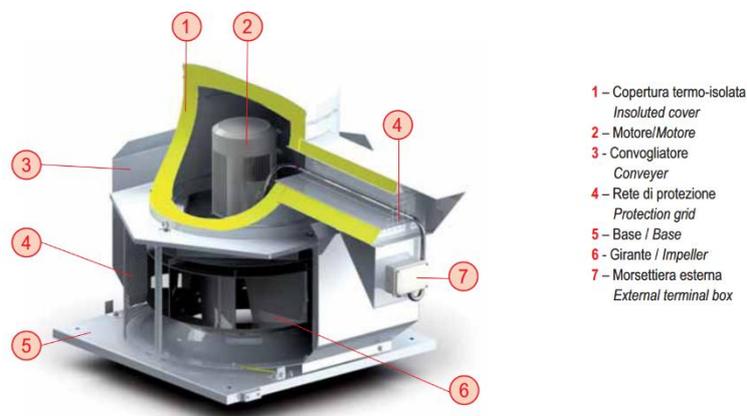


Fig. 13: parti di ricambio del torrino individuato

Portata	Potenza media assorbita	Alimentazione
26000 m ³ /h	5,5 kW	3 Ph – 400 V – 50 Hz

Tab. 18: Caratteristiche del ventilatore centrifugo commerciale

La prevalenza dei ventilatori, chiamata anche pressione statica del ventilatore, è pari al salto di pressione che il gas subisce attraversando la girante e viene espressa in Pa secondo il SI.

Oltre al salto di pressione dovuto all'eventuale differenza di quota tra il punto di imbocco del fumo nel sistema e quello di sbocco, il ventilatore deve essere in grado di compensare anche le perdite di carico che il fumo incontra nel tragitto di allontanamento verso l'esterno del compartimento. Il sistema oggetto d'esame non prevede canalizzazioni, per cui le perdite di carico al di fuori del funzionamento della macchina sono assenti, il dislivello in entrata e in uscita è minimo, per cui la prevalenza del ventilatore non viene valutata in quanto trascurabile.

Il numero necessario di torrini sarà:

$$n_{\min} = \lceil Q_{\min} / Q_{\text{tor}} \rceil = \lceil 248000 / 26000 \rceil = 10$$

Il cui posizionamento coinciderà con i punti di estrazione individuati nel §5.3.9.

Per cui la portata effettiva totale di progetto sarà pari a:

$$Q_d = Q_{\text{tor}} \cdot n = 26000 \cdot 10 = 260000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

5.3.9 Individuazione dei punti di estrazione di fumo e calore

I punti di estrazione di fumo e calore possono essere costituiti da:

- 1) Aperture di estrazione del fumo integrate nel ventilatore, se il sistema lavora ad aspirazione diretta;
- 2) Aperture realizzate su condotte di controllo del fumo per singolo compartimento;
- 3) Elementi terminali installati sulle condotte di controllo del fumo per singolo compartimento;
- 4) Serrande di controllo del fumo installate sulla superficie delle condotte di controllo del fumo.

Si presuppone che il materiale utilizzato ed il sistema di fissaggio e installazione debbano garantire la resistenza alle temperature locali dei fumi previste, riportate in Tab. 17, al fine di evitare che il distacco di alcuni componenti comprometta il funzionamento della singola apertura di aspirazione o dell'intero SEFFC. La presenza di eventuali componenti in materiale non metallico, come ad esempio PVC o nylon, è da attenzionare particolarmente.

A prescindere dalla tipologia del sistema, per ciascun serbatoio di fumo si deve verificare che:

$$Q_{\min} \leq \sum_{i=1}^N Q_{\text{op},i}$$

Dove:

- Q_{\min} è la portata volumetrica totale di aspirazione del serbatoio di fumo pari a 248000 m³/h e ricavata dalla Tab. 14
- $Q_{\text{op},i}$ è la portata volumetrica dell'i-esimo punto di aspirazione
- N è il numero delle aperture di aspirazione

Ogni singolo punto di aspirazione è tuttavia vincolato a una portata massima $Q_{i,\max}$ ricavata dal nomogramma in Fig. 15.

Inoltre, la distanza minima tra due punti di aspirazione vicini S_{\min} deve verificare l'equazione:

$$S_{\min} \geq 0,015 \cdot \sqrt{Q_{\text{op},i}}$$

Ed infine, le dimensioni del punto di aspirazione, in particolare intese come diametro del punto di estrazione D_{AB} , devono rispettare la condizione:

$$D_{AB} \leq \Delta d_s / 2$$

Dove Δd_s è la distanza tra l'imbocco della condotta di estrazione e la superficie inferiore dello strato di fumo.

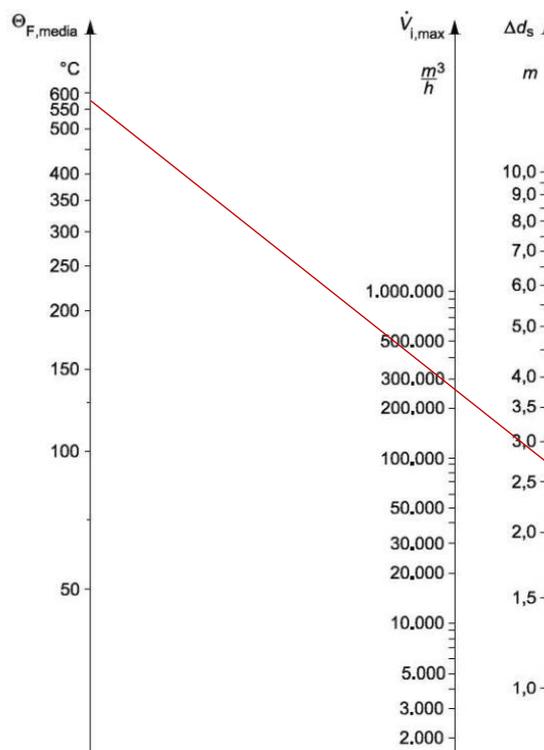


Fig. 15: nomogramma per ottenimento della portata massima del singolo aspiratore, fonte UNI 9494-2

Nel caso in esame, prevedendo delle aperture di estrazione posizionate a 20 centimetri dal limite superiore dello strato di fumo, si conduce il seguente dimensionamento:

$$Q_d = 260000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$N = 10$$

Di conseguenza ogni apertura sarà disponibile al passaggio di:

$$Q_{op,i} = 260000/10 = 26000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Supponendo che le aperture si trovino ad una distanza di 0,2 m rispetto all'intradosso del solaio, ne segue che:

$$\Delta d_s = z - 0,2 = 2,8 \text{ m}$$

Ricordando che $\theta_{F,media} = 430 \text{ }^\circ\text{C}$, dal nomogramma riportato in Fig. 15 si ottiene che: $Q_{i,max} = 250000 \text{ m}^3/\text{h}$, ampiamente superiore di $Q_{op,i} = 26000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Si tiene inoltre in considerazione che le aperture devono essere distanti tra loro almeno di:

$$S_{min} = 0,015 \cdot \sqrt{26000} = 2,4 \text{ m}$$

Grandezza che dallo schema in Fig. 16 viene ampiamente superata.

Si esegue, infine, l'ultima verifica con $D_{AB} = 0,75 \text{ m}$ ricavato da scheda tecnica del produttore, che è correttamente minore di $\Delta d_s/2 = 2,7/2 = 1,35 \text{ m}$.

5.3.10 Individuazione dei punti di afflusso di aria esterna (immissione naturale)

L'ambiente da proteggere ha bisogno, sussidiariamente all'estrazione dei fumi e gas di combustione, dell'immissione di aria esterna fresca e priva di particolato. L'aria esterna di ricambio deve affluire nel locale all'interno dello strato libero da fumo in modo naturale, tramite apposite aperture, o in modo forzato tramite ventilatori di immissione. Nel presente paragrafo si analizza il caso di immissione di aria naturale, nel successivo quello di immissione forzata.

Al fine di evitare turbolenze che rischierebbero di interferire con la stratificazione dei gas caldi. Lo spigolo superiore di ciascuna apertura deve avere una distanza di almeno 1 m dal limite inferiore dello strato di fumo e, in tal caso, la velocità massima di immissione non può superare i 2 m/s.

La superficie minima efficace di apertura A_{EF} , viene valutata nel modo seguente:

$$A_{EF} = \frac{Q_d}{V_{max}} = \frac{260000}{3600 \cdot 2} = 36,1 \text{ m}^2$$

Inizialmente, viene valutata l'ipotesi di immettere l'aria di ricambio naturalmente, considerando le aperture installate su più pareti del compartimento antincendio confinanti con l'ambiente esterno. La superficie efficace delle aperture viene valutata in modo analogo rispetto al SENFC:

$$\sum_{i=1}^m A_{ci} = 6 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 0,65 + 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,65 = 37,7 \text{ m}^2 \geq A_{EF}$$

Dunque, non vi è il bisogno di predisporre ulteriori griglie dedicate per l'immissione di aria.

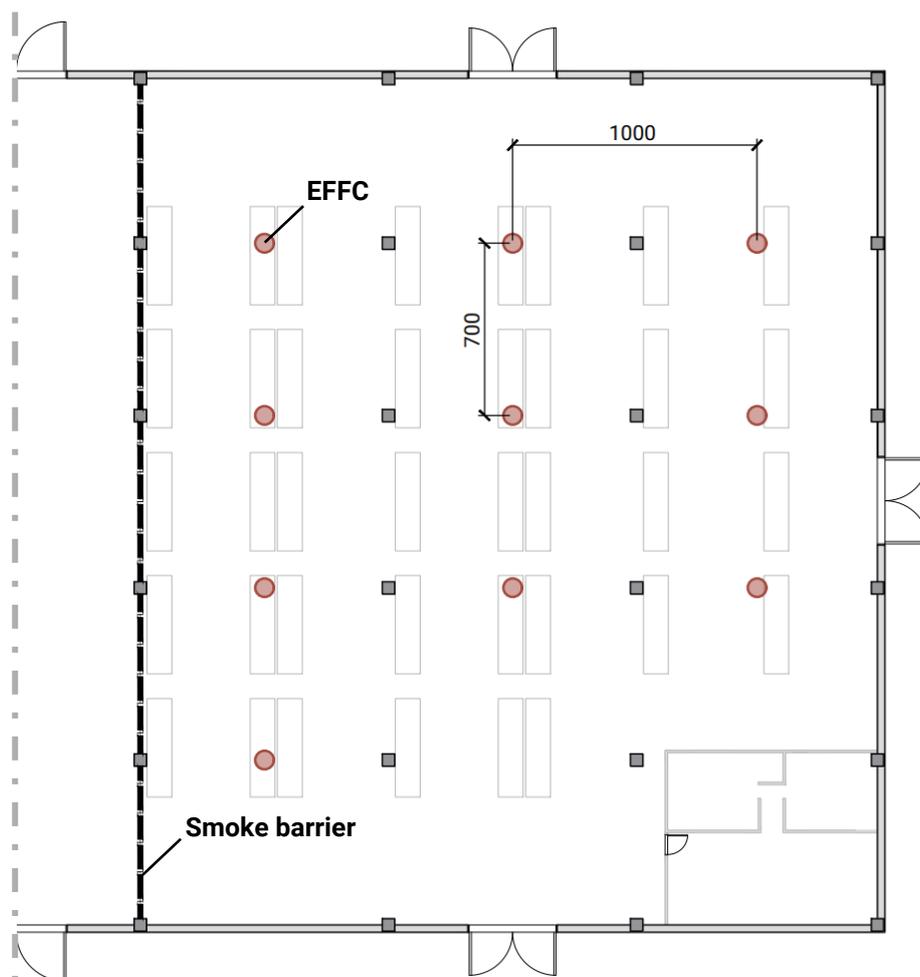


Fig. 16: Pianta del locale con il posizionamento dei torrini ventilatori

5.3.11 Individuazione dei punti di afflusso di aria esterna (immissione forzata)

L'ambiente da proteggere ha bisogno, sussidiariamente all'estrazione dei fumi e gas di combustione, dell'immissione di aria esterna fresca e priva di particolato. L'aria esterna di ricambio deve affluire nel locale all'interno dello strato libero da fumo in modo naturale, tramite apposite aperture, o in modo forzato tramite ventilatori di immissione. Nel presente paragrafo si analizza il caso di immissione forzata, nel precedente quello di immissione naturale.

Inizialmente si predispongono le stesse assunzioni del caso di immissione naturale. Al fine di evitare turbolenze che rischierebbero di interferire con la stratificazione dei gas caldi. Lo spigolo superiore di ciascuna apertura deve avere una distanza di almeno 1 m dal limite inferiore dello strato di fumo e, in tal caso, la velocità massima di immissione non può superare i 2 m/s. Successivamente si considera che con l'immissione forzata, data la presenza di un ventilatore che garantisce la portata progettata, non sono necessari fattori correttivi per il calcolo delle superfici; pertanto la somma delle aree geometriche delle aperture dovrà essere pari a 34 m².

Al fine di avere un bilanciamento in massa delle portate fluenti si deve tener conto che la portata di reintegro è funzione della densità dei fumi estratti. La portata di immissione sarà pari a:

$$Q_{\text{rein,min}} = Q_d \cdot \frac{\rho_{430}}{\rho_{20}} = 260000 \cdot \frac{0,50}{1,2041} = 107973 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Dove:

ρ_{430} è la densità dei fumi estratti ad una temperatura di 430 °C parti a $\theta_{F,media}$ e ricavata dalla Tab. 19;

ρ_{20} è la densità dell'aria valutata a 20 °C supponendo che quest'ultima sia la temperatura dell'aria esterna.

y = h - z	Densità dei fumi ρ [kg/m ³], corrispondenti a $\theta_{F,media}$				
2,5	0,81	0,73	0,63	0,52	0,42
3	0,88	0,80	0,70	0,61	0,50
4	0,96	0,90	0,83	0,73	0,63
5	1,00	0,96	0,90	0,81	0,73
6	1,03	0,97	0,95	0,90	0,80
7	1,06	1,00	0,97	0,92	0,85
8	1,09	1,03	0,97	0,96	0,90
9	1,09	1,06	1,00	0,97	0,92
10	1,13	1,06	1,03	0,97	0,95
GD	1	2	3	4	5

Tab. 19: prospetto 7 norma UNI 9494-2

Al fine di distribuire nel miglior modo possibile le aperture di immissione dell'aria si considera l'ipotesi che tutto l'ambiente sia diviso in otto zone, quattro per serbatoio di fumo. La divisione in zone del fabbricato, permette di non attivare il sistema di attivazione nei pressi del punto di innesco delle fiamme, in quanto in quel caso l'immissione di aria esterna potrebbe incentivare il movimento e la propagazione delle fiamme e dei fumi verso altri punti del locale. In caso di rilevamento dell'incendio, la centralina riceverà la posizione del primo rilevatore di fumo attivato, e impedirà l'attivazione del sistema di immissione della zona di cui fa parte.

A partire dallo schema in Fig. 17, il dimensionamento del sistema va condotto considerando che il ventilatore della zona interessata dalle fiamme non sia disponibile, di conseguenza la portata minima assegnata a ciascun ventilatore è di:

$$Q_{\text{ven}} = \frac{Q_{\text{rein}}}{14} = \frac{107973}{14} = 7712 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

La tecnologia di ventilazione selezionata, permette l'installazione di un torrino ventilatore sul tetto, il quale viene collegato ad una condotta verticale. Quest'ultima viene fissata al lato di un pilastro e, nei pressi della sua estremità inferiore, vanta un'apertura che permette l'immissione di aria fresca nella parte bassa dell'ambiente.

La superficie minima efficace di apertura A_{EF} , viene valutata nel modo seguente:

$$A_{\text{EF}} = \frac{Q_{\text{rein}}}{v_{\text{max}}} = \frac{107973}{3600 \cdot 2} = 15,0 \text{ m}^2$$

Si predispongono $n = 16$ griglie di aerazione di area pari a $1,12 \text{ m}^2$ tali che:

$$\sum_{i=1}^n A_{\text{ci}} = (16-2) \cdot 1,12 = 15,4 \text{ m}^2 \geq A_{\text{EF}} = 15,0 \text{ m}^2$$

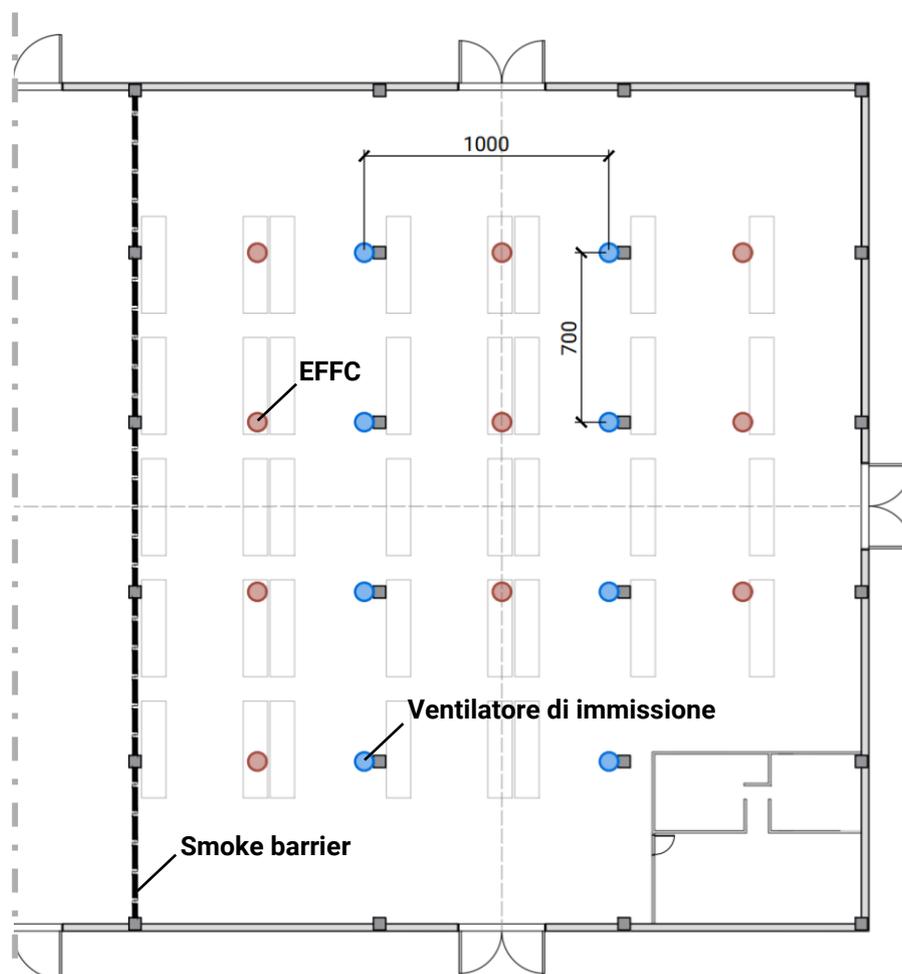


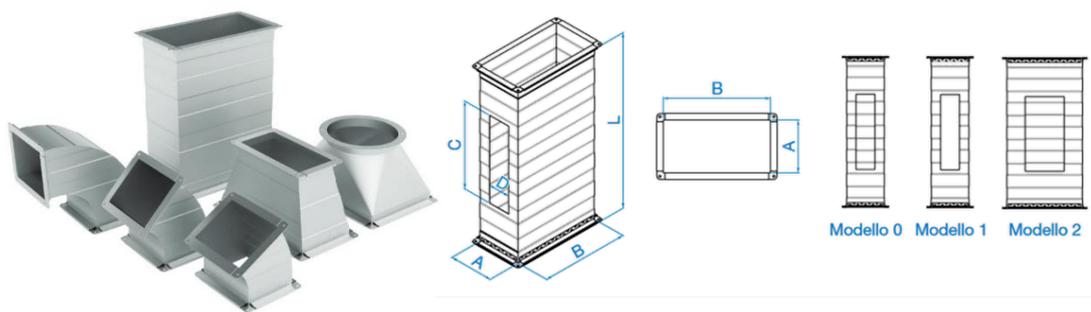
Fig. 17: schema di posizionamento torrini centrifughi per estrazione ed immissione forzate

5.3.12 Individuazione delle condotte di controllo del fumo

Le condotte di controllo sono dei componenti dell'impianto che permettono di collegare ad un unico ventilatore per SEFFC una o più aperture di estrazione di fumo e calore. Devono essere dimensionate in modo che la pressione massima al loro interno sia coerente con i valori delle pressioni di classificazione delle condotte stesse secondo la norma UNI EN 12101-7. Nel progetto in questione non vi sono molteplici compartimenti antincendio, per cui le condotte saranno esclusivamente di tipo a singolo compartimento.

A partire dalla Tab. 17 si apprende che le condotte dovranno essere di tipo E₆₀₀ 30S, cioè resistenti ad una temperatura di esercizio di 600 gradi e garantire il funzionamento per almeno 30 minuti.

Si seleziona, per le dimensioni delle condotte, un prodotto reperibile sul mercato.



Si conosce la portata all'interno della condotta, che è pari a

$$Q_{\text{ven}} = 7712 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Scegliendo delle condotte di dimensione pari a 100x50 cm si deduce che la velocità del fluido all'interno della condotta è pari a:

$$v = \frac{Q_{\text{ven}}}{A_{\text{con}}} = \frac{7712}{0,5 \cdot 3600} = 4 \text{ m/s}$$

Che non è molto distante dalla velocità con cui fuoriesce dall'apertura che ha dimensioni pari a 1,1 m² con una velocità del fluido pari a 2 m/s.

5.3.13 Individuazione delle serrande di controllo del fumo

Le serrande sono dei componenti dell'impianto che hanno lo scopo di permettere l'estrazione del fumo esclusivamente dal compartimento a soffitto interessato dall'incendio. Il loro stato può essere aperto o chiuso, a seconda dello scenario di incendio occorso, in modo che assicurino o impediscano il passaggio del fumo dal punto in cui sono posizionate. Il tipo di installazione previsto dal progetto in analisi prevede che siano posizionate in condotta, nel punto di giunzione tra due tratti successivi di condotte di controllo del fumo.

Vengono classificate dalla norma UNI EN 12101-8 e nel caso in esame si prevedono serrande di controllo del fumo per singolo compartimento e di tipologia AA con posizione non modificabile e sistema di attivazione automatico, in ogni caso devono essere collegate al sistema di controllo in modo da poter cambiare il loro stato (aperto o chiuso) in funzione dello scenario di incendio occorso. A partire dalla Tab. 17 si apprende che le serrande dovranno essere di tipo E₆₀₀ 30S, cioè resistenti ad una

temperatura di esercizio di 600 gradi e garantire il funzionamento per almeno 30 minuti.

5.3.14 Individuazione dei dispositivi di azionamento e controllo

I dispositivi di azionamento e controllo vengono esaminati dalla norma nel punto 6.10.12. In particolare si distinguono:

- Il sistema di comando e controllo;
- L'impianto di alimentazione elettrica;
- Le condutture elettriche;
- I cavi di segnale e trasmissione dati.

Presupponendo che sia presente un sistema di rivelazione e di segnalazione d'incendi, conforme alla norma UNI 9795, nel compartimento in esame, il sistema di comando e controllo del SEFFC è ad esso collegato ricevendo la segnalazione di incendio per ogni specifico serbatoio a soffitto. Di conseguenza, il sistema di comando e controllo realizza e segnala il ciclo di attivazione del SEFFC e di tutti gli elementi attivi dello stesso, cioè i ventilatori per SEFFC, le serrande di controllo del fumo e le barriere al fumo. Il sistema di comando e controllo del SEFFC è dunque automatico e costituito specificamente da:

- 1) Unità centrale
- 2) Interfaccia di gestione
- 3) Moduli di campo
- 4) Cavi di trasmissione dati di collegamento tra l'unità centrale e i moduli di campo

Sono inoltre forniti alcuni vincoli in merito alla tipologia di collegamento tra la centrale di controllo e i moduli di campo preposti al controllo dei singoli dispositivi: il collegamento deve essere costituito da uno o più anelli chiusi o da un collegamento a stella, al fine di assicurare il funzionamento anche nell'ipotesi di interruzione delle linee di comando; non è ammesso il collegamento costituito da uno a più anelli aperti. La centralina permette la gestione dell'interferenza tra il sistema di spegnimento automatico di tipo sprinkler e il sistema SEFFC, tramite attivazione controllata e rispettivamente sequenziale degli impianti. Si vuole inoltre specificare che l'individuazione automatica dell'incendio permette la non attivazione del sistema di immissione dell'aria nella zona d'innescò dell'incendio, la suddivisione delle zone dell'ambiente in tal senso, è stata specificata nel §5.3.11. Per quanto riguarda l'impianto di alimentazione elettrica si specifica che deve essere dedicato

esclusivamente al SEFFC e deve garantire l'alimentazione elettrica ai componenti attivi del sistema anche nel caso in cui l'alimentazione all'edificio venisse interrotta. Tuttavia, una indisponibilità di circa 60 ore all'anno è ritenuta accettabile per motivi di manutenzione.

5.3.15 Schema di funzionamento e tipologia del SEFFC

Facendo riferimento all'appendice D della norma, si schematizza il sistema di evacuazione di fumo e calore e ne si descrive la tipologia con una sigla di quattro lettere così definita:

SEFFC -

1	2	3	4
---	---	---	---

Dove:

1

 È riferito tipologia di aspirazione ed evacuazione fumo e calore. È definito come **D** se si hanno sistemi con aspirazione diretta nell'ambiente, **M** se canalizzata per singolo serbatoio di fumo, **C** se centralizzata per più serbatoi di fumo.

2

 È riferito all'interazione con la compartimentazione antincendio. È definito come **S** se si hanno sistemi atti a estrarre il fumo e calore da un singolo compartimento antincendio, **M** se da compartimenti multipli

3

 È riferito alla tipologia di immissione dell'aria esterna. È definito come **N** se si hanno sistemi con afflusso naturale, **F** se forzato

4

 È riferito alla natura dell'impianto SEFFC. È definito come **S** se il sistema viene usato solo per estrazione fumi, **D** se ha doppia funzione (HVAC + SEFFC)

Nel caso in esame si sono previsti sistemi SEFFC - DSNS e SEFFC - DSFS

Il funzionamento operativo del SEFFC è concettualmente molto simile a quello del SENFC, in particolare per quanto riguarda la gestione dei comandi della centralina. Pertanto si rimanda al §5.2.9 in cui si approfondisce l'argomento per i sistemi di evacuazione naturali. Si specifica che in presenza di impianto sprinkler, come approfondito nel §2.3.5, il fumo potrebbe perdere parte dell'effetto di galleggiabilità, di conseguenza i sistemi di evacuazione forzata potrebbero essere preferiti in tal caso, dopo un'attenta analisi del progettista sulle interferenze dei sistemi automatici.

Rimane invariato il fatto che l'impianto sprinkler va attivato con priorità rispetto all'impianto di evacuazione forzata, in modo che i flussi di aria coinvolti con l'evacuazione non interferiscano con l'operato dell'impianto ad acqua.

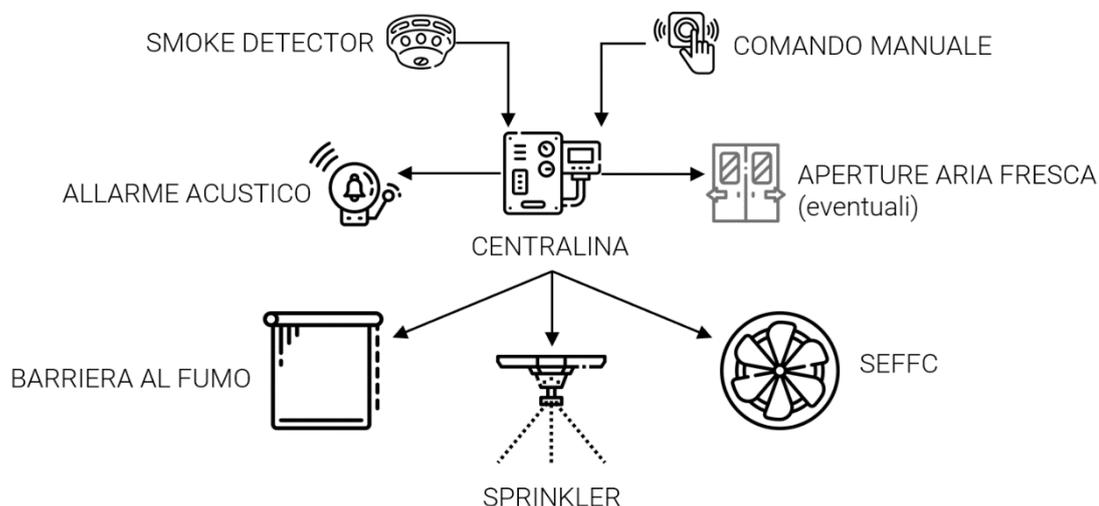


Fig. 18: Schema di funzionamento del SEFFC

5.3.16 Riepilogo e commento dei risultati

Nel presente caso studio è stato effettuato il progetto di un sistema di evacuazione forzata di fumo e calore (SEFFC) a servizio del capannone. In particolare sono presenti due varianti di progetto, una prevede l'immissione di aria in modo forzato, l'altra naturale; entrambe le varianti aspirano i fumi in modo forzato.

Gli impianti progettato sono soluzioni conformi al livello di prestazione richiesto (III) dal Codice di prevenzione incendi, in quanto seguono le regole e indicazioni prescritte all'interno della norma UNI 9494-2.

Grandezza	Simbolo	UM	Valore
Rilascio termico incendio		kW/m ²	300
Altezza del locale	h	m	6
Altezza dello strato libero dal fumo	y	m	3
Altezza dello strato di fumo	z	m	3
Velocità di propagazione dell'incendio	δ_a		alta
Tempo di allarme	t_A	s	0
Tempo di intervento	t_{int}	min	15
Durata convenzionale dello sviluppo dell'incendio	t	min	15
Gruppo di dimensionamento	GD		5
Superficie convenzionale incendio	A_f	m ²	80
Minima altezza del serbatoio di fumo secondo y	$h_{b,min}$	m	3.5

Altezza del serbatoio di fumo	h_b	m	3.5
Classe di temperatura barriera al fumo			D30
Portata volumetrica di estrazione minima	Q_{min}	m ³ /h	248000
Temperatura media dei fumi	$\Theta_{F,media}$	°C	430
Temperatura locale dei fumi	$\Theta_{F,locale}$	°C	554
Classe di temperatura ventilatori estrazione			F600
Portata totale effettiva ventilatori estrazione	Q_d	m ³ /h	260000
Numero di torrini centrifughi installati	N_{tot}		20
Numero di torrini centrifughi attivi in emergenza	N_{tor}		10
Portata singolo torrino evacuatore	Q_{tor}	m ³ /h	26000
Potenza singolo ventilatore di evacuazione		kW	3.1
Distanza di aspirazione dallo strato inferiore del fumo	Δd_s	m	2.7
Portata massima del punto di estrazione (da nomogramma)	$V_{i,max}$	m ³ /h	250000
Diametro punto di aspirazione	D_{AB}	m	0.75
Verifica diametro punto di aspirazione	$D_{AB} \leq \Delta d_s / 2$		verificato
Minima superficie delle aperture	A_{EF}	m ²	15.00
Distanza minima spigolo apertura - fumo		m	1
Velocità di immissione massima		m/s	2
Area singola griglia		m ²	1.1
Numero di griglie attive in emergenza			14
Area griglie totale		m ²	15.40
Densità fumo		kg/m ³	0.5
Densità mandata		kg/m ³	1.2041
Portata di reintegro	Q_{rein}	m ³ /h	107973
Portata singolo ventilatore	Q_{ven}	m ³ /h	7712
Minima superficie efficace aperture aria fresca	A_{EF}	m ²	36.1
Area porte per reintegro		m ²	37.7
Velocità di immissione massima		m/s	2
Portata in condotta	Q_{ven}	m ³ /h	7712
Sezione minima condotta	$A_{min,con}$	m ²	0.50
Area effettiva condotta	A_{con}	m ²	0.50
Velocità fluido in condotta	v	m/s	4.28
Classe di temperatura condotte			E ₆₀₀ 30 S
Classe di temperatura serrande di controllo			E ₆₀₀ 30 S
Tipologia serrande di controllo			AA

Tab. 20: riepilogo dei risultati ottenuti per soluzioni conformi alla UNI 9494-2

L'approccio prescrittivo applicato al sistema di *evacuazione forzata* risulta più complesso e articolato rispetto al precedente, ma anche esso basa i risultati principali sulla consultazione di tabelle. Per questa tipologia di sistema, i risultati ottenuti sulle portate di evacuazione fanno da subito intuire la presenza di un grande margine di ottimizzazione.

6 PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE

6.1 Soluzioni alternative

Dopo aver studiato le soluzioni progettuali che la norma UNI 9494 considera come conformi, si pone l'attenzione sulla soluzione che prevede l'estrazione e l'immissione di aria forzata. In quanto si ritiene che il dimensionamento condotto nel §5.3 abbia un ampio margine di miglioramento e può lasciare al progettista un'ampia scelta di posizionamento dei punti immissione ed estrazione di aria.

Dunque si elaborano soluzioni progettuali alternative, la cui efficacia verrà indagata con l'aiuto delle simulazioni in modelli a zone o di campo.

La prima soluzione alternativa consiste nella riduzione della portata dei ventilatori di estrazione di circa il 50% rispetto i valori minimi richiesti dalla norma. Di conseguenza si sceglie un modello commerciale di ventilatori che rispetti tale caratteristica, in particolare si trova un ventilatore con portata di 12600 m³/h. Quindi, riproponendo lo schema dei ventilatori in tavola 4, la portata totale nel compartimento di fumo è di 126000 m³/h.

Modello	Portata	P _m
	m ³ /h	kW
406 T	3.100	0,37
456 T	4.500	0,75
506 T	6.200	0,75
566 T	8.700	1,5
636 T	12.600	3
716 T	18.300	3
806 T	26.000	5,5
906 T	37.000	11
1006/A T	41.000	11
1006/B T	52.000	15

La portata di reintegro viene così ottenuta:

$$Q_{\text{rein,min}} = Q_d \cdot \frac{\rho_{430}}{\rho_{20}} = 126000 \cdot \frac{0,50}{1,2041} = 53321 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Le aperture di immissione rimangono invariate.

La seconda soluzione alternativa consiste nella riduzione della portata dei ventilatori di estrazione di circa il 70% rispetto i valori minimi richiesti dalla norma. Di

conseguenza si sceglie un modello commerciale di ventilatori che rispetti tale caratteristica, in particolare si trova un ventilatore con portata di 6200 m³/h. Quindi, riproponendo lo schema dei ventilatori in tavola 4, la portata totale nel compartimento di fumo è di 62000 m³/h.

Modello	Portata	P _m
	m ³ /h	kW
406 T	3.100	0,37
456 T	4.500	0,75
506 T	6.200	0,75
566 T	8.700	1,5
636 T	12.600	3
716 T	18.300	3
806 T	26.000	5,5
906 T	37.000	11
1006/A T	41.000	11
1006/B T	52.000	15

$$Q_{\text{rein,min}} = Q_d \cdot \frac{\rho_{430}}{\rho_{20}} = 62000 \cdot \frac{0,50}{1,2041} = 25745 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Le aperture di immissione rimangono invariate.

Successivamente si propone la rimozione dei serbatoi di fumo poiché, non raramente, il committente potrebbe non voler installare le cortine di fumo, in funzione di diverse interferenze tra costruito, funzione d'uso e progetto antincendio. La progettazione convenzionale spesso prevede l'intervento del professionista antincendio in fase avanzata di progettazione o addirittura di costruzione. Sotto queste condizioni, nella maggior parte dei casi non si può fare a meno di applicare soluzioni alternative difficilmente integrabili con il resto del costruito. A titolo di esempio, se l'apparecchiatura delle travi fosse stata prevista in senso perpendicolare a quello progettato in questo studio, le barriere di fumo non si sarebbero potute introdurre, stesso discorso va fatto nel caso in cui, in un locale delle stesse dimensioni fossero previsti degli impianti HCVA a vista sotto trave o in presenza di un carroponete.

Dunque, la terza soluzione alternativa prevede l'abolizione dei serbatoi di fumo con conseguente attivazione di tutti gli estrattori del compartimento, che sono 20, in modo che in totale soddisfino la portata richiesta della norma, ricavata nel §5.3.6 e pari a 248000 m³/h

Quindi, ogni estrattore soddisferà una portata pari a 12600 m³/h

La portata di reintegro viene così ottenuta:

$$Q_{\text{rein,min}} = Q_d \cdot \frac{\rho_{430}}{\rho_{20}} = 12600 \cdot 20 \cdot \frac{0,50}{1,2041} = 104643 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Le aperture di immissione rimangono invariate.

Questa soluzione permette di risparmiare sull'investimento iniziale, in quanto i singoli torrini ventilatori devono soddisfare una portata dimezzata e inoltre non bisogna installare le cortine di fumo né il loro sistema di controllo. Provocando una collaterale riduzione delle maestranze coinvolte in cantiere e in fase di progetto. Tuttavia in termini di dimensionamento dell'impianto elettrico non vi è un vero e proprio efficientamento in quanto non vi è un risparmio nella potenza totale richiesta dall'impianto.

Infine, la quarta soluzione alternativa prevede l'attivazione di tutti gli estrattori del compartimento, che sono 20, in modo che in totale garantiscano il 50% della portata richiesta della norma, ricavata nel §5.3.6 e pari a 248000 m³/h

Quindi, ogni estrattore soddisferà una portata pari a 6200 m³/h,

La portata di reintegro viene così ottenuta:

$$Q_{\text{rein,min}} = Q_d \cdot \frac{\rho_{430}}{\rho_{20}} = 6200 \cdot 20 \cdot \frac{0,50}{1,2041} = 51490 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Le aperture di immissione rimangono invariate.

6.2 Scenari d'incendio di progetto

Gli scenari di incendio di progetto sono identificati da una schematizzazione di eventi e condizioni legate all'attività, agli occupanti e al focolare. Essi hanno le caratteristiche di essere i più gravosi e al contempo credibili tra tutti gli scenari di incendio potenzialmente prevedibili. In altre parole, si estrae, dall'insieme degli scenari di incendio possibili, il sottoinsieme degli scenari d'incendio che presenta un livello di rischio maggiore. In tal modo le soluzioni progettuali previste per gli scenari di progetto, se rispettose delle soglie di prestazione esplicitate nel §6.3, garantiscono lo stesso grado di sicurezza anche nei confronti di tutti gli altri scenari di incendio.

Si ritiene che i focolari attesi risultino meno gravosi di quelli previsti per i focolari predefiniti del Codice di prevenzione incendi. Dunque la descrizione quantitativa del focolare rimane invariata per tutte le simulazioni proposte. Il calcolo delle grandezze

specifiche di riferimento viene affrontato nel §7.1.2 in cui si descrive la modellazione del focolare all'interno delle simulazioni.

La posizione del focolare viene scelta al centro di un serbatoio di fumo, in modo da riprodurre lo scenario peggiore nei confronti dell'organizzazione del compartimento in zone (vedi §5.3.11), in quanto l'innesco si colloca al centro tra l'intersezione delle stesse, di conseguenza si disattivano i ventilatori di immissione di una zona ma sono in funzione dei ventilatori equidistanti da quelli eliminati rispetto al focolare, con il pericolo che, con flussi d'aria abbastanza veloci, i prodotti della combustione vengano trascinati. Per quanto riguarda gli occupanti, si presuppone che la loro presenza non incida nella valutazione delle soluzioni progettuali, in quanto le prestazioni richieste dalla progettazione sono rivolte alla salvaguardia delle strutture e dunque a condizioni tenibili anche dopo il raggiungimento del flashover. Se le soluzioni progettuali rispettano le soglie di prestazione previste, i pochi occupanti che potrebbero essere presenti nell'attività sarebbero automaticamente fuori pericolo.

Le condizioni dell'ambiente circostante sono assunte come costanti e standard, si approfondiscono nel §7.1.1 le condizioni in cui verte l'ambiente caratterizzante i locali in condizioni ordinarie.

Da quanto stabilito in precedenza, ne segue che gli scenari di analisi delle simulazioni sono diversificati tra loro esclusivamente sulla base dei presidi antincendio previsti, questi scenari rispecchiano l'applicazione delle diverse soluzioni approfondite e valutate con gli strumenti della FSE. Si identificano in tutto 6 scenari e vengono brevemente caratterizzati in Tab. 21 qui di seguito.

ID	DESCRIZIONE	INDICAZIONI SUI PRESIDI			MODELLAZIONE	
		SPK	SMOKE BARRIER	RIDUZIONE PORTATA DI ESTRAZIONE*	ZON E	CAMPO
1	Ottenimento del valore t_x	No	Sì	-	Sì	Sì
2	Riproduzione della soluzione conforme	Sì	Sì	0%	Sì	No
3	Riduzione della portata rispetto alla soluzione conforme del 50%	Sì	Sì	50%	Sì	No
4	Riduzione della portata rispetto alla soluzione conforme del 70%	Sì	Sì	70%	Sì	No
5	Rimozione dei serbatoi di fumo. La portata totale dei ventilatori attivi è pari a quella dello scenario 2	Sì	No	0%	Sì	Sì
6	Rimozione dei serbatoi di fumo, la portata totale dei ventilatori attivi è dimezzata	Sì	No	50%	Sì	Sì

[*] rispetto alla portata totale dei ventilatori attivi in emergenza richiesta dalla norma UNI 9494 in una soluzione conforme.

Tab. 21: scenari di analisi, contraddistinti per soluzioni impiegate

6.3 Soglie di prestazione

Seguendo i metodi ingegneristici permessi dal Codice, si traducono gli obiettivi di sicurezza antincendio in soglie di prestazione quantitative. In modo che dopo aver ottenuto la descrizione e le misure degli effetti degli scenari d'incendio di progetto, grazie a strumenti di modellazione, essi si possano confrontare con le predette soglie di prestazione. Se gli effetti calcolati conservano un adeguato margine di sicurezza rispetto le soglie di prestazione stabilite allora la soluzione progettuale analizzata può essere considerata accettabile.

Si definiscono le soglie di prestazione per perseguire gli obiettivi antincendio proposti: la prima tipologia di soglia riguarda l'altezza dello strato libero da fumo, che deve essere superiore ai **3 metri** per ricalcare le condizioni di progetto scelte per lo svolgimento delle soluzioni conformi alla norma UNI 9494; in secondo piano si fa riferimento anche al valore dell'altezza dello strato libero dai fumi di 2 metri, inteso come minimo assoluto accettabile dalla normativa; la seconda tipologia riguarda le temperature raggiunte dagli elementi strutturali in ottica di salvaguardia dei beni.

Secondo le NTC2018, in conformità all'Eurocodice3, l'andamento delle temperature per l'incendio convenzionale di progetto adottato possono essere valutate attraverso le **curve nominali di incendio degli idrocarburi**, che seguono l'andamento della seguente funzione:

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Dove θ_g è la temperatura dei gas caldi, espressa in $^\circ\text{C}$, e t è il tempo espresso in minuti primi.

Pertanto, la soglia di prestazione per quanto riguarda le temperature a cui sono soggette le strutture coincide con il grafico della curva nominale degli idrocarburi riportato in seguito.

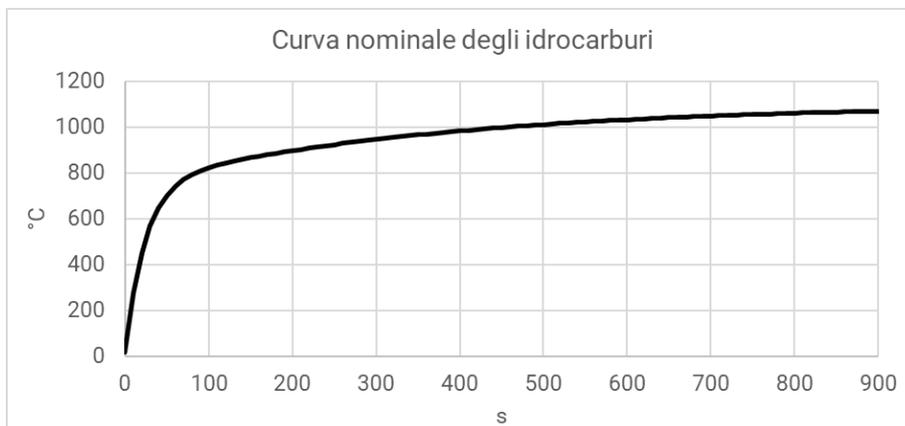


Fig. 19: Curva nominale degli idrocarburi secondo l'incendio di progetto, da NTC2018

7 MODELLO A ZONE

Il modello di calcolo condotto dalla norma UNI 9494, al fine di definire i dati tabellari messi a disposizione dei progettisti, è un modello a zone semplificato. Quest'ultimo considera la separazione dell'ambiente in due macrovolumi:

- a) Porzione superiore, che contiene i prodotti della combustione e viene confinata nel serbatoio di fumo;
- b) Porzione inferiore, che contiene aria pulita e non riscaldata.

All'interno di ciascuno dei due volumi descritti, il tipo di semplificazione presuppone che nello spazio le grandezze di interesse siano uniformi, come ad esempio la temperatura e la pressione. In sostanza esiste una superficie ideale, definita da una altezza z , posizionata all'interfaccia tra i due macrovolumi e in corrispondenza della quale le grandezze di interesse subiscono una variazione a gradino.

Le semplificazioni del modello rendono il suo campo di applicazione ristretto, in particolare è adatto ad ambienti confinati con geometrie semplici, in cui si presuppone che la distribuzione del fumo vista dall'alto sia uniforme nell'ambiente. Questa limitazione si percepisce chiaramente dai requisiti imposti dalla norma UNI 9494 riguardo ad esempio la geometria dei locali: i lati geometrici del fabbricato in pianta non possono essere di lunghezza molto differente tra loro, e il locale non deve superare una certa area complessiva in pianta, tali limiti sono stati considerati nel capitolo 5.

7.1 Modellazione in CFAST

Il *Consolidated Model of Fire and Smoke Transport* (CFAST in seguito) è un software sviluppato dal NIST di tipo OpenSource che permette, attraverso un'interfaccia grafica, la realizzazione di un modello di simulazione a due zone.

CFAST è capace di predire le condizioni ambientali di un fabbricato a più compartimenti, soggetto alla presenza di incendi. Calcola la distribuzione del fumo e la composizione dei gas prodotti, così come la temperatura delle zone dell'edificio durante un incendio, le cui proprietà sono descritte come dato di input immesso dall'utente.

Lo script del programma prevede la definizione dei valori iniziali per il sistema di equazioni differenziali ordinarie, le quali verranno derivate usando le leggi della conservazione della massa e dell'energia, dei gas ideali e altre relazioni legate alla densità e all'energia interna, prevedendo in questo modo le grandezze di interesse durante tutto il tempo della simulazione. Ne segue che gli output di CFAST sono

prettamente sensibili ai valori di input immessi dall'utente, più precisamente viene definito lo scenario, più il risultato sarà accurato.

La versione del software usata per le simulazioni in questo elaborato è la 7.7.1.

7.1.1 Ambiente di simulazione

Si definiscono i tempi caratteristici della simulazione e le condizioni al contorno dell'ambiente.

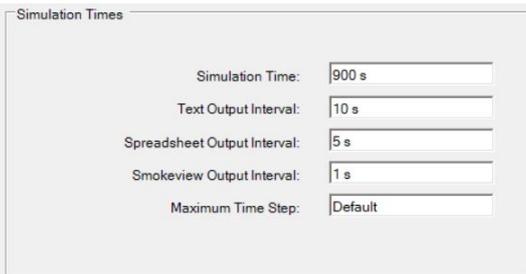
Il **tempo di simulazione** impostato è pari a 900 secondi, pari al tempo di sviluppo dell'incendio dimensionato secondo i criteri della UNI 9494.

Il **text output interval** è la cadenza con la quale il software *stampa* i risultati, ed è impostato pari a 10 secondi.

Lo **spreadsheet output interval** indica la frequenza con la quale il software trascrive i risultati della simulazione all'interno di un file .csv. Questo parametro è impostato pari a 2 secondi.

Lo **Smokeview output interval** indica la frequenza con la quale si trasferiscono i dati di output all'interno di un file compatibile con la visualizzazione grafica degli stessi nel programma *Smokeview*. Questo parametro è impostato pari a 1 secondo.

Il **Maximum Time Step** indica la frequenza con la quale il software risolve le equazioni differenziali, ed è automaticamente impostato in modo che la simulazione sia più efficiente possibile, nel caso in cui il modello non riesca a convergere in un'unica soluzione il valore può essere ridotto per portare a termine la run. Nel caso in questione il valore di default è sufficiente.



Parameter	Value
Simulation Time	900 s
Text Output Interval	10 s
Spreadsheet Output Interval	5 s
Smokeview Output Interval	1 s
Maximum Time Step	Default

Fig. 20: Riepilogo dei valori temporali di simulazione all'interno dell'interfaccia del programma

Per quanto riguarda le condizioni ambientali, si approvano i valori di default del programma, in quanto verosimili. Inoltre il cambiamento dei seguenti dati non incide molto sui risultati della simulazione¹⁰.

¹⁰ R. D. Peacock, P. A. Reneke, G. P. Forney, *CFAST- Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide*, Washington DC, NIST Technical Note 1889v2, 2021

I dati in questione sono:

Temperatura iniziale dell'ambiente, impostata pari a 20 °C;

Umidità relativa iniziale interna, impostata pari a 50%;

Pressione atmosferica iniziale, impostata pari a 101325 Pa;

The image shows a software interface titled "Simulation Conditions". It is divided into two main sections: "Interior" and "Exterior". In the "Interior" section, there are two input fields: "Temperature" set to "20 °C" and "Humidity" set to "50 %". In the "Exterior" section, there are two input fields: "Temperature" set to "20 °C" and "Pressure" set to "101325 Pa". Below these sections, there is a checkbox labeled "Adiabatic Compartment Surfaces" which is currently unchecked. At the bottom, there is a field for "Lower Oxygen Limit" set to "0.15".

Fig. 21: Riepilogo dei dati di condizioni ambientali all'interno dell'interfaccia del programma

7.1.2 Modellazione del locale

C-FAST non supporta l'importazione di formati di file che possano contenere le geometrie del modello architettonico, di conseguenza è necessario modellare l'ambiente all'interno del programma con un livello di dettaglio molto basso.

La modellazione dell'ambiente avviene definendo la grandezza, la posizione e i materiali dei compartimenti. Nel caso in esame, pur essendoci un unico compartimento antincendio, si ha il bisogno di interporre delle ostruzioni all'interno del locale per simulare il comportamento delle tende di fumo; dunque si modellano tre compartimenti coincidenti con i tre serbatoi di fumo progettati. Il compartimento C1 è il serbatoio di fumo in cui ha origine il focolare, delle dimensioni di 30x35 metri. Con riferimento alla Fig. 22, si identifica il compartimento C1 coincidente con l'ambiente in cui uno dei vertici coincide con l'origine del sistema di riferimento di CFAST. Il compartimento CM è adiacente al compartimento C1 ed ha le dimensioni di 10x35 metri, è la zona atta alla movimentazione delle merci, con carico di incendio trascurabile. Infine, il compartimento C2 è l'ultimo serbatoio di fumo, con una superficie di 30x35 metri.

ID	Num	Width	Depth	Height	X Position	Y Position	Z Position
C1	1	30	35	6	0	0	0
C2	2	30	35	6	40	0	0
CM	3	10	35	6	30	0	0

Tab. 22: Posizione e grandezza dei compartimenti di fumo, da interfaccia C-FAST. Misure in metri

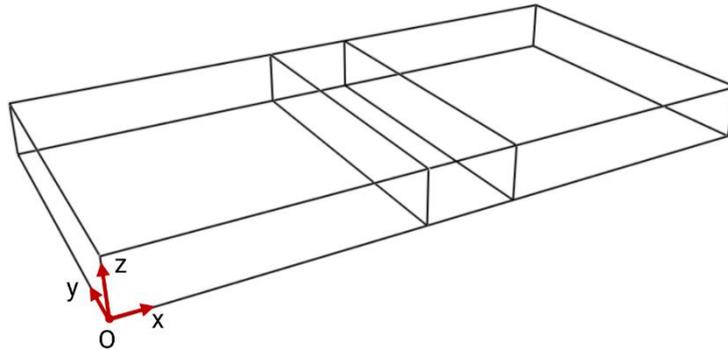


Fig. 22: Risultato della modellazione dei compartimenti, visualizzazione in Smokeview; con annotazione del sistema di riferimento in CFAST

Per calcolare la dispersione del calore attraverso l'involucro edilizio, si definiscono i materiali del compartimento. Indicativamente si ricavano i valori di default del programma dal file `thermal.csv` e si assegnano ai componenti edilizi quelli relativi al calcestruzzo prefabbricato.

7.1.3 Modellazione del SEFC

Il SEFC viene modellato attraverso tre istanze: vents, exhaust mechanical ventilation, supply mechanical ventilation.

Vents

Le istanze di tipo *vents* servono esclusivamente a modellare le tende di fumo, poiché nessun altro tipo di apertura, come porte o finestre, viene usato in emergenza nello scenario analizzato.

Si modellano 4 elementi di apertura ospitati dai muri separatori dei compartimenti di fumo, nella parte inferiore dell'ambiente si mantiene sempre attiva un'apertura dell'altezza di 2,5 metri, mentre nella parte superiore si modella un'apertura attiva nelle prime fasi dell'incendio che si chiude una volta attivato il sistema di allarme, entrambe le tipologie di apertura attraversano lungo l'asse y l'intero ambiente. Si ricorda che nel capannone studiato, non è presente alcun muro separatore tra i serbatoi di fumo, ma in tal modo si simula il comportamento delle tende di fumo che sono assenti durante lo svolgimento ordinario dell'attività e che vengono attivate in emergenza.

I dati necessari alla definizione geometrica delle vent sono elencati in seguito.

First Compartment: Il primo dei due compartimenti connessi dall'apertura, che definisce il riferimento per le seguenti relative specifiche;

Second Compartment: è il secondo compartimento a cui è associata l'apertura;

Bottom: è la quota a cui si trova lo spigolo inferiore dell'apertura, a partire dal pavimento del compartimento di riferimento;

Height: è l'altezza geometrica dell'apertura, relativa alla quota *bottom* sopracitata;

Width: è la larghezza dell'apertura;

Face: è il muro sul quale l'apertura è posizionata, in riferimento al primo compartimento definito. Le scelte sono Fronte/Retro per aperture parallele all'asse X, Destra/Sinistra per le aperture parallele all'asse Y (vedi Fig. 22).

Num	ID	First Compartment	Second Compartment	Bottom	Height	Width	initial Oper	Face
1	SB1	C1	CM	2.45	3.55	34.5	1	Right
2	SB2	C1	CM	0.05	2.4	34.5	1	Right
3	SB3	C2	CM	2.45	3.55	34.5	1	Left
4	SB4	C2	CM	0.05	2.4	34.5	1	Left

Fig. 24: riepilogo dei valori di modellazione delle vents, ai fini della simulazione delle Smoke Barrier

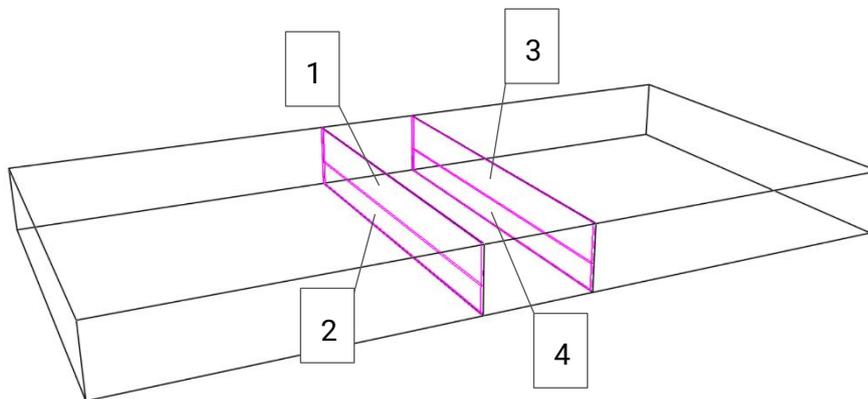


Fig. 23: Individuazione degli elementi delle smoke barrier, visualizzazione in Smokeview

Le vent possono essere aperte o chiuse nel tempo, sulla base di valori temporali specificati dall'utente, oppure sulla base di specifici detectors (vedi §7.1.5)

In questo studio si vogliono attivare le vent a seconda del trigger di un certo rilevatore, pertanto vengono richiesti i seguenti input:

Open/Close Criterion: grandezza secondo la quale si definisce la frazione di apertura, i valori disponibili sono tempo, flusso di calore, temperatura. Ai fini della simulazione è stato scelto il valore di temperatura come da §7.1.5;

Set Point: è il valore soglia della grandezza per la quale cambia la frazione di apertura, si imposta un valore di 40°C e nel §7.1.5 ne viene approfondito il motivo;

Trigger Target: bisogna indicare l'istanza target che serve da rilevatore della grandezza desiderata, essa viene definita dal programma in una sezione separata, descritta nel §7.1.5;

Pre-Activation Fraction: è il valore che definisce la frazione di apertura prima dell'attivazione del trigger, esso è compreso tra 0 e 1, dove 0 corrisponde allo stato totale di chiusura e 1 allo stato totale di apertura. Per tutte le aperture questo valore è stato impostato pari a 1.

Post-Activation Fraction: è il valore che definisce la frazione di apertura dopo l'attivazione del trigger. Per le aperture inferiori il valore non subisce variazioni dopo l'attivazione del trigger, mentre le aperture superiori vengono chiuse, pertanto il valore imposto è 0.

Exhaust

I torrini di estrazione sono modellati tramite la loro posizione e la portata garantita, CFAST non tiene conto dell'efficienza della macchina o delle curve del ventilatore. Concettualmente il software richiede di modellare una connessione tra compartimenti, sede di un ventilatore attraversato da un flusso volumetrico costante di aria. I dati di input impostati per ogni torrino sono specificati in seguito.

First Compartment: è il compartimento dal quale ha origine la portata volumetrica, per tutti i torrini è stato impostato il valore sul compartimento C1, in quanto lo scenario di incendio ha luogo in quel serbatoio, per cui non si modellano i torrini previsti nei pressi del compartimento C2;

Second Compartment: è il compartimento nel quale termina la portata volumetrica, per tutti i torrini è stato impostata come secondo compartimento l'opzione *outside*;

Area dell'apertura, che in riferimento alla scheda tecnica del prodotto è pari a 0,75 m²;

Center Height: è l'altezza di estrazione del torrino, con riferimento alla quota del pavimento, il valore è stato impostato pari a 5,8 metri;

Orientation: può essere verticale od orizzontale. Nel caso dei torrini ventilatori è stato impostato il valore orizzontale, che implica un flusso d'aria attraverso un elemento orizzontale, in questo caso il soffitto;

Vent offset: è la distanza in metri del ventilatore dall'origine del primo compartimento, sul piano XY (vedi Fig. 22);

Flow rate: costante e pari a 7,2 m³/s (valore ricavato nel §5.3.6)

L'attivazione dei torrini è gestita in modo identico a quello delle istanze di tipo vents sopradescritte.

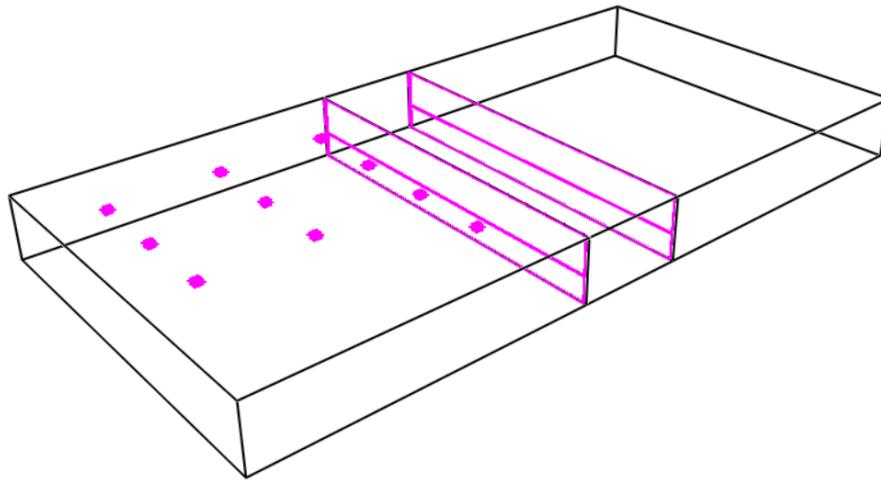


Fig. 25: visualizzazione del posizionamento dei torrini ventilatori in Smokeview

Ogni torrino ha un ID univoco codificato in tal modo:

E	prog1	_	X	prog2	_	Y	prog3
---	-------	---	---	-------	---	---	-------

Dove:

E sta per "exhaust", seguito da un numero progressivo (*prog1*) a due cifre il cui massimo valore equivale al numero totale di torrini modellati;

X si riferisce alla coordinata del torrino rispetto al sistema di riferimento in CFAST, questa dicitura è seguita da un numero progressivo (*prog2*) a due cifre con valore coincidente a quello della distanza lungo X del torrino rispetto l'origine del sistema di riferimento;

Y si riferisce alla coordinata del torrino rispetto al sistema di riferimento in CFAST, questa dicitura è seguita da un numero progressivo (*prog3*) a due cifre con valore coincidente a quello della distanza lungo Y del torrino rispetto l'origine del sistema di riferimento;

Supply

Le bocchette di mandata sono modellate con la stessa tipologia di input di quelle di estrazione, in quanto entrambi i sistemi ricadono sotto la categoria *mechanical ventilation*.

First Compartment: è stato impostato per alcune bocchette su C1, per altre su C2, in quanto l'aria di immissione proviene da tutte le bocchette presente nel locale, tranne le due della zona a cui appartiene il focolare;

Second Compartment: è stato impostato come *outside*;

Area: in riferimento alla scheda tecnica del prodotto è pari a 0,5 m²;

Center Height: è l'altezza del punto medio di immissione della bocchetta con riferimento alla quota del pavimento, il valore è stato impostato pari a 0,5 metri;

Orientation: Nel caso delle bocchette di immissione è stato impostato il valore verticale;

Flow rate: costante e pari a 2,14 m³/s (valore ricavato nel §5.3.11)

L'attivazione dei torrini è gestita in modo identico a quello delle istanze di tipo vents sopradescritte in questo stesso paragrafo.

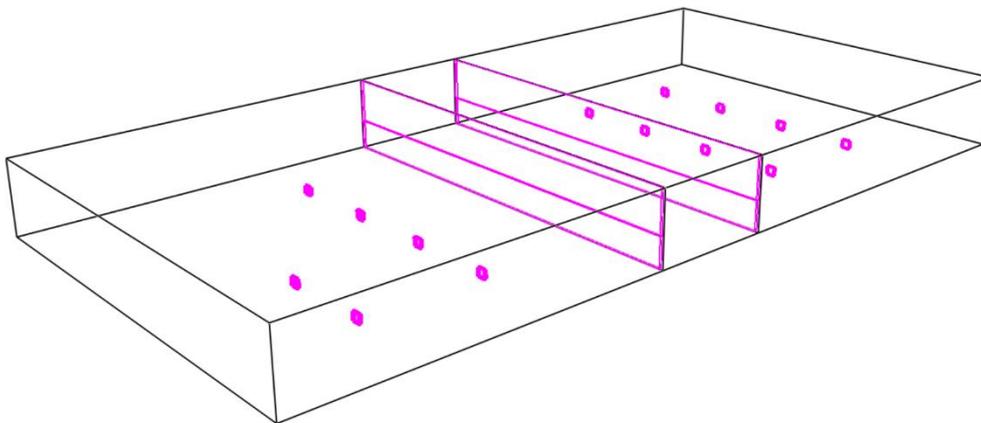


Fig. 26: Posizione delle bocchette di aerazione attive nel compartimento per lo scenario prestabilito, visualizzazione in Smokeview

Ogni bocchetta ha un ID univoco codificato in tal modo:

S	prog1	_	X	prog2	_	Y	prog3
---	-------	---	---	-------	---	---	-------

Dove:

S sta per "supply", seguito da un numero progressivo (*prog1*) a due cifre il cui massimo valore equivale al numero totale di torrini modellati;

X si riferisce alla coordinata della bocchetta rispetto al sistema di riferimento in CFAST, questa dicitura è seguita da un numero progressivo (*prog2*) a due cifre con valore coincidente a quello della distanza lungo X del torrino rispetto l'origine del sistema di riferimento;

Y si riferisce alla coordinata della bocchetta rispetto al sistema di riferimento in CFAST, questa dicitura è seguita da un numero progressivo (*prog3*) a due cifre con valore coincidente a quello della distanza lungo Y del torrino rispetto l'origine del sistema di riferimento.

7.1.4 Focolare

Come anticipato nel §2.1.2, il parametro di input principale per la descrizione del focolare nei software di modellazione è la curva HRR in funzione del tempo. Da quest'ultima, in rapporto all'area del focolare, il software ricava il tasso di massa persa dal combustibile e, insieme a informazioni sulla sua composizione, l'entità dei prodotti di combustione.

Per prima cosa si stima l'equazione della curva HRR con i metodi descritti nel Codice di prevenzione degli Incendi¹¹, riferendosi ad un focolare predefinito, in cui si distinguono le fasi di cui al §2.1.2.

Si definiscono i valori di:

HRR_{max}

è la massima potenza rilasciabile dall'incendio all'interno del compartimento, viene ricavata dal Codice, seguendo una caratterizzazione della velocità di espansione dell'incendio di tipo *fast*, pertanto tale valore è pari a 5000 kW;

t_a

è il tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga il valore di 1000 kW e viene misurato in secondi. Nel caso in esame questo valore viene ricavato dal Codice, seguendo una caratterizzazione della velocità di espansione dell'incendio di tipo *fast*, pertanto tale valore è pari a 150 secondi;

t_A

è l'istante in cui il focolare raggiunge il rilascio della massima potenza termica HRR_{max}, ovvero il tempo di inizio della fase di incendio stazionario. Si ricava con la seguente equazione:

$$t_A = \sqrt{HRR_{max} \frac{t_a^2}{1000}} = 335 \text{ s}$$

t_B

è il termine della fase dell'incendio stazionario, istante in cui inizia la fase di decadimento. Dal Codice si riporta: "se l'energia termica inizialmente disponibile non è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione, la curva RHR raggiunge il valore massimo per qualche secondo poi passa direttamente alla fase di decadimento", al contrario, se si verifica la seguente condizione:

¹¹ Sezioni: M.2.6–Stima della curva HRR e M.2.7–Focolare predefinito

$$70\% q_f A_f \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3$$

Allora il tempo t_B può essere ottenuto come:

$$t_B = t_A + \frac{70\% q_f A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3}{HRR_{\max}}$$

Dove:

$$q_f = 819,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ e } A_f = 2040 \text{ m}^2$$

Dunque:

$$70\% q_f A_f = 1170246 \text{ MJ} \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3 = 559017 \text{ MJ}$$

$$t_B = 458 \text{ s}$$

Ed infine, t_c

È il termine della fase di decadimento, ovvero l'istante per il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla. Si ricava con la seguente equazione:

$$t_C = t_B + \frac{2 \times 30\% q_f A_f}{HRR_{\max}} = 658 \text{ s}$$

Conoscendo questi parametri è possibile definire l'andamento della curva HRR in tutte le fasi dell'incendio.

Durante la fase di **propagazione** la curva HRR ha un andamento descritto dalla seguente funzione:

$$HRR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t_a} \right)^2$$

Dove:

t è il tempo di simulazione, avente un valore inferiore a t_A coincidente con il raggiungimento della HRR_{\max} , ed è misurato in secondi;

Durante la fase **stazionaria** dell'incendio, la curva HRR ha un andamento descritto dalla seguente funzione:

$$HRR(t) = HRR_{\max}$$

Dove:

t è compreso tra t_A e t_B ,

Durante la fase di **decadimento** dell'incendio, la curva HRR ha un andamento descritto dalla seguente funzione:

$$HRR(t) = HRR_{\max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B}$$

Dove:

t è compreso tra t_B e t_C

Il risultato di questi dati è descritto dalla curva in Fig. 27

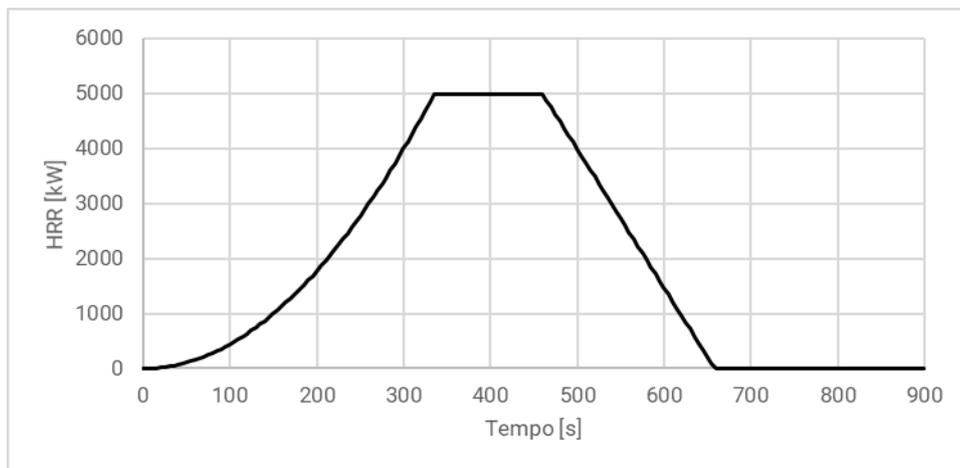


Fig. 27: Curva HRR ottenuta con i metodi del Codice di prevenzione incendi, crescita di tipo fast

Si procede pertanto alla definizione dei dati di input seguendo le richieste del software. Si aggiunge un'istanza di tipo *fire*, descritta da dati costanti e dati dipendenti dal tempo di simulazione, principalmente i primi sono:

Compartment: è il nome del compartimento in cui ha origine il focolare, impostato come il compartimento di fumo C1;

Position: è la posizione del centro del focolaio sul piano XY con origine relativa al compartimento di innesco, nel caso in esame $X=15$ m e $Y=17$ m ;

Ignition Criterion: è il criterio con cui viene attivato l'innesco, nel caso in esame l'innesco viene attivato dall'inizio della simulazione;

Composizione chimica del combustibile: ricavata dal Codice di prevenzione incendi, $CH_2O_{0,5}$;

Heat of Combustion: è l'energia rilasciata per unità di massa persa dal combustibile, pari a 20 MJ/kg dal Codice di prevenzione incendi;

Radiative Fraction: Frazione di RHR in irraggiamento, pari al 35% dal Codice di prevenzione incendi.

I dati in funzione del tempo che descrivono il *fire* vengono immessi dall'utente e interpolati linearmente dal programma, essi sono:

Tempo: una serie di istanti a partire dall'innesco misurati in secondi, sono stati riportati gli istanti dal tempo 0 al tempo 900 con intervalli di 10 secondi;

HRR: valore della potenza termica rilasciata dal fire in kW e riferita al valore del tempo, sono stati riportati i valori della curva in Fig. 27 con intervalli di 10 secondi;

Height: è l'altezza della base del focolare, impostata costante e pari alla quota del pavimento;

Area: è relativa alla pianta del focolare in metri quadri. Il valore può cambiare da istante a istante ed è stato calcolato a partire dall'equazione¹²:

$$A = \frac{HRR_f}{HRR(t)}$$

Dove: HRR_f è pari a 500 kW/m², ricavata dal Codice di prevenzione incendi;

CO Yield: produzione in massa di CO per unità di massa persa del combustibile. Valore pari a 0,1 dal Codice di prevenzione incendi;

Soot Yield: produzione in massa di polveri per unità di massa persa del combustibile. Valore pari a 0,07 dal Codice di prevenzione incendi.

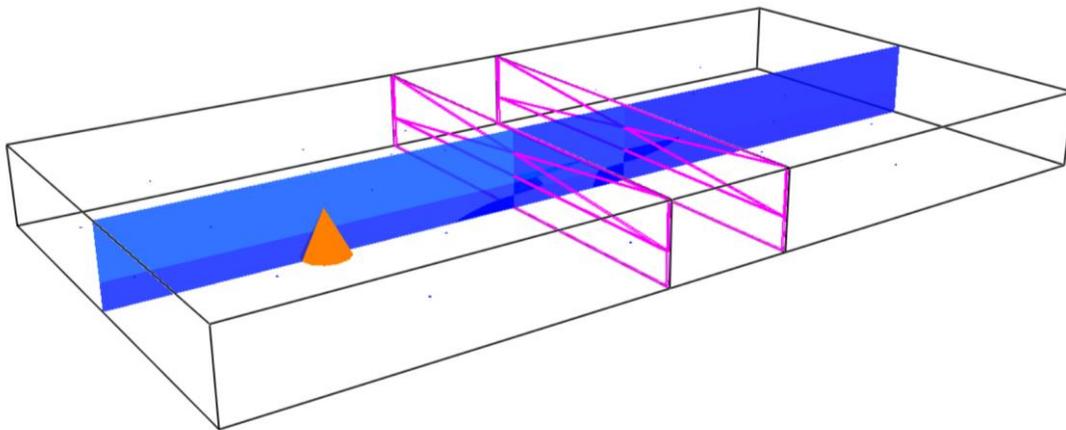


Fig. 28: massima espansione del focolare, curva HRR ricavata dal Codice in assenza di impianto sprinkler

¹² A. La Malfa, S. La Malfa, R. La Malfa, *Ingegneria della sicurezza antincendio: progettazione con il metodo tradizionale e il codice di prevenzione incendi*, (9^a Ed.), Roma, Legislazione Tecnica, 2017

7.1.5 Targets

Un'istanza di tipo target è stata modellata per simulare il comportamento degli smoke detector presenti nell'ambiente. Concettualmente viene modellato esclusivamente lo smoke detector più vicino al focolaio, in modo che dalla sua attivazione (*trigger*) possano avviarsi le procedure automatiche di emergenza, cioè il discioglimento delle tende al fumo, l'attivazione dell'impianto sprinkler e successivamente l'attivazione dei ventilatori di estrazione e di immissione.

Nell'ambiente di modellazione il target è un oggetto che misura esclusivamente la propria temperatura raggiunta, è presente all'interno del software una scheda chiamata "detection" che permetterebbe la creazione di un'istanza di tipo smoke detector, sensibile all'oscuramento provocato dai fumi. Quest'ultima opzione, seppur molto in linea concettualmente con l'oggetto che si vuole modellare, non è stata presa in considerazione in quanto, citando la pubblicazione del manuale dell'utente da parte del NIST, "il calcolo (dell'oscuramento) avviene secondo la divisione dei valori in due macrozone di concentrazione delle polveri che non include l'impatto iniziale dello strato di fumo depositato a soffitto, come invece viene fatto per i calcoli basati sulla grandezza di temperatura". Dunque la soluzione suggerita è quella di modellare lo smoke detector sulla base dell'innalzamento della temperatura, in particolare si prende in considerazione quello di default consigliato dalla Nuclear Regulatory Commission nel NUREG-1805 che è pari a 10°C al di sopra della temperatura ordinaria dell'ambiente.

Le istanze che dipendono dal valore di temperatura raggiunto dal target sono le entità facenti parte della modellazione del SEFC (§7.1.3) e quelle facenti parti dell'impianto sprinkler (§7.1.6). Secondo le considerazioni proposte, quest'ultimo si attiva quando il target raggiunge la temperatura di 30°C, mentre il SEFC deve subire un ritardo di almeno 60 secondi rispetto l'attivazione dell'impianto ad acqua, per cui si imposta l'attivazione del SEFC coincidente con il raggiungimento della temperatura del target di 40°C.

Gli input immessi che caratterizzano lo smoke detector sono:

Compartment: impostato su C1;

Width (X): È la distanza lungo X rispetto l'origine del compartimento sopradescritto, ed è pari a 15 metri;

Depth (Y): È la distanza lungo Y rispetto l'origine del compartimento sopradescritto, ed è pari a 19 metri;

Height (Z): è la quota del detector a partire dal pavimento, impostata pari a 5,8 metri.

Normal Vector (X,Y,Z) : è un vettore perpendicolare alla faccia esposta al trigger del target. Nel caso in esame si immette (0,0,-1) per che il target è esposto verso il pavimento;

Material: il materiale del target è preso dalla banca dati di CFAST ed è stato selezionato il *thermocouple* di default.

7.1.6 Effetti dell'impianto sprinkler

Come dal §4.6 si prevede l'uso di un impianto sprinkler con attivazione tramite termovalvola, ai fini del controllo dell'incendio. Dunque, citando il codice di prevenzione incendi nella sezione M.2.6: "l'andamento della potenza termica rilasciata $RHR(t)$ non raggiunge il valore massimo RHR_{max} [...] ma può essere assunta costante e pari al valore di $RHR(t_x)$ raggiunto all'istante t_x di entrata in funzione dell'impianto automatico. Tale valore permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto, entro cui si presume che l'incendio controllato venga definitivamente estinto mediante l'intervento manuale."

Dunque, il processo di integrazione degli sprinkler nelle simulazioni, non comprende una vera e propria modellazione geometrica, ma occorre condurre una *run* preliminare in cui è assente l'impianto sprinkler, così da registrare esclusivamente il risultato del tempo t_x . A seguito di questa informazione, si conduce una seconda *run* tenendo conto dell'effetto che ha lo sprinkler sulla curva HRR.

I dati del focolaio per la prima run sono riportati in allegato in riferimento allo scenario01 di incendio, si puntualizza che nessuna parte del sistema è stata attivata nella run, con eccezione delle barriere al fumo che sono utili alla registrazione del tempo t_x . Quest'ultimo risulta essere pari a 130 secondi. I risultati ottenuti sono descritti dai seguenti grafici e tabelle.

Dunque seguendo le indicazioni del codice degli incendi, la curva HRR ne risulta modificata come in Fig. 30. Quest'ultima è stata considerata dato di input per la compilazione dello scenario 2, di cui si riportano i dati di ingresso per la definizione temporale del focolare in allegato e di cui verranno interpretati i risultati nel §7.1.1

Simulation Time	Opening Fraction
s	
125.00	1.00
130.00	0.00
135.00	0.00

Tab. 23: Stralcio di file .csv, attivazione delle smoke barrier ai fini dell'ottenimento di t_x

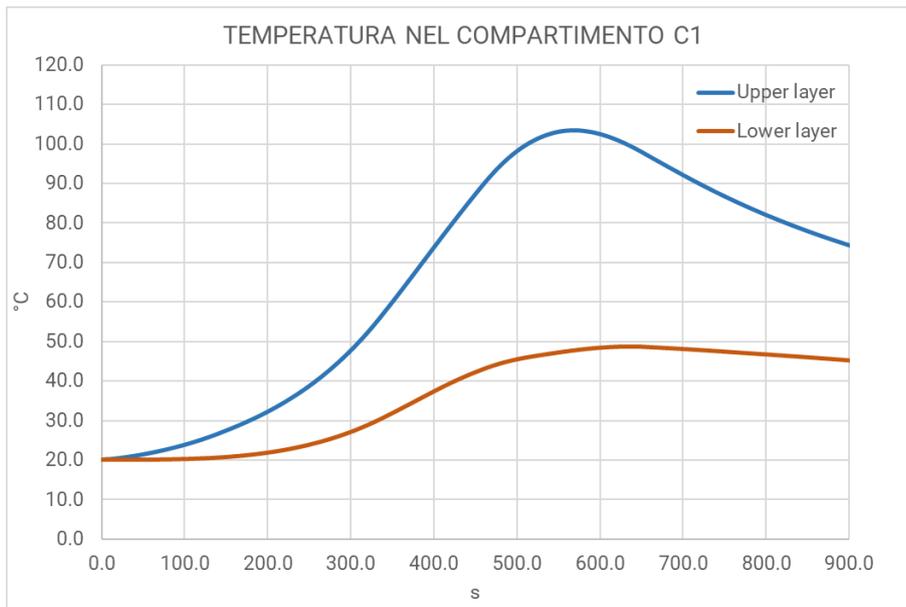


Fig. 31: Risultato della RUN01, temperature raggiunte nel compartimento di innesco

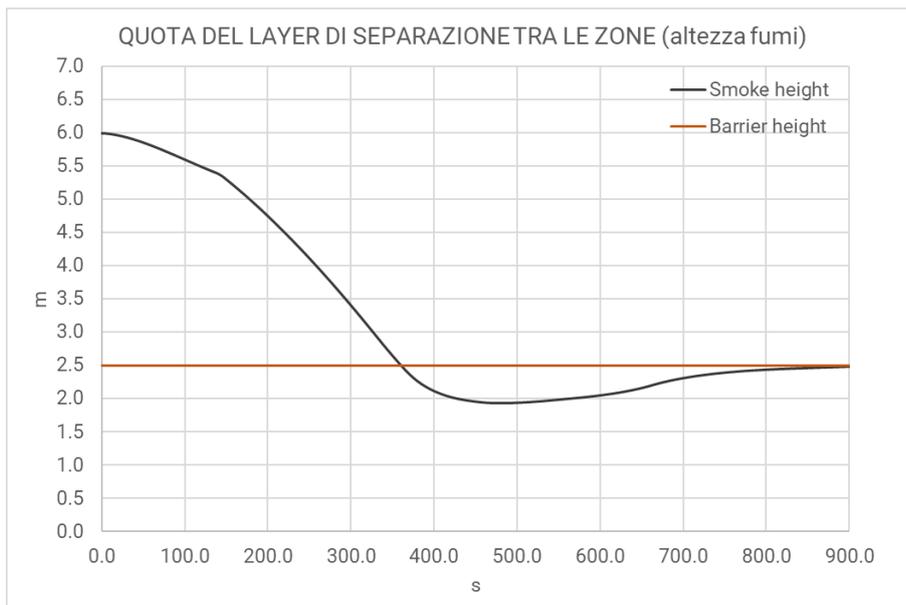


Fig. 29: Risultato della RUN 01, altezza dello strato di fumo in confronto all'altezza delle barriere al fumo

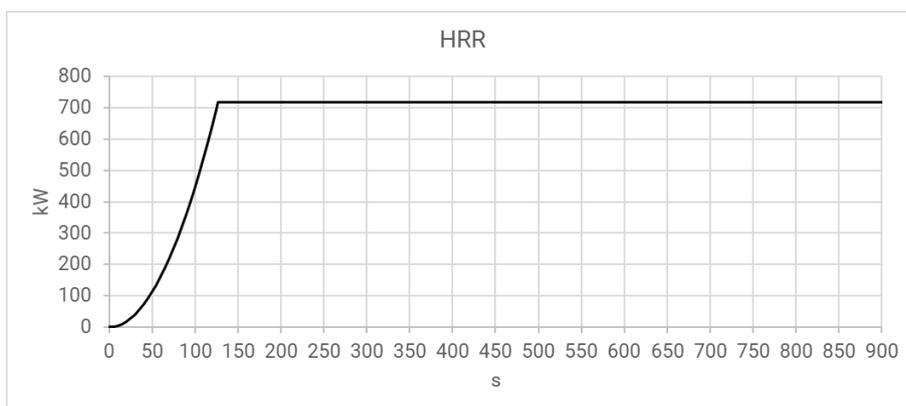


Fig. 30: Curva HRR considerando gli effetti del sistema sprinkler, t_x pari a 130 secondi ottenuto con CFAST

7.1.1 Posizionamento slice

In CFAST si modellano delle slice 2D di temperatura, che misurano istante per istante i valori di temperatura su un piano specificato attraverso il valore della coordinata di un asse. In particolare si prevedono:

3 slice sul piano yz (vedi Fig. 22): una che attraversa il centro del focolare ($x=15$ m) e le altre a distanza di 6 metri da essa;

1 slice sul piano xz che passa attraverso il centro del focolare ($y=17.5$ m).

7.2 Interpretazione dei risultati

Di seguito si espongono ed interpretano i principali risultati degli scenari di incendio elencati nel §6.2. I risultati mostrati sono prodotti da una post elaborazione dei dati di output prodotti da CFAST, i quali consistono in file dati di estensione .csv e .smv; il contenuto dei primi è accessibile attraverso fogli di calcolo, quello dei secondi è visibile sottoforma di animazioni con il programma Smokeview.

Scenario 1

I risultati dello scenario d'incendio 1 sono stati approfonditi nel §7.1.6 in quanto utili esclusivamente alla registrazione del tempo di attivazione dell'impianto di controllo automatico dei fumi.

Scenario 2

La prima valutazione delle soluzioni viene affrontata nei riguardi dell'approccio progettuale prescritto dalla normativa. La simulazione è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 30 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler, oltre a considerare l'attivazione di tutti gli elementi del SEFFC dimensionato secondo la normativa. L'immissione dei dati di input viene descritta nei paragrafi precedenti, i dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

L'attivazione dei ventilatori del SEFFC avviene a 190 secondi.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici seguenti riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1

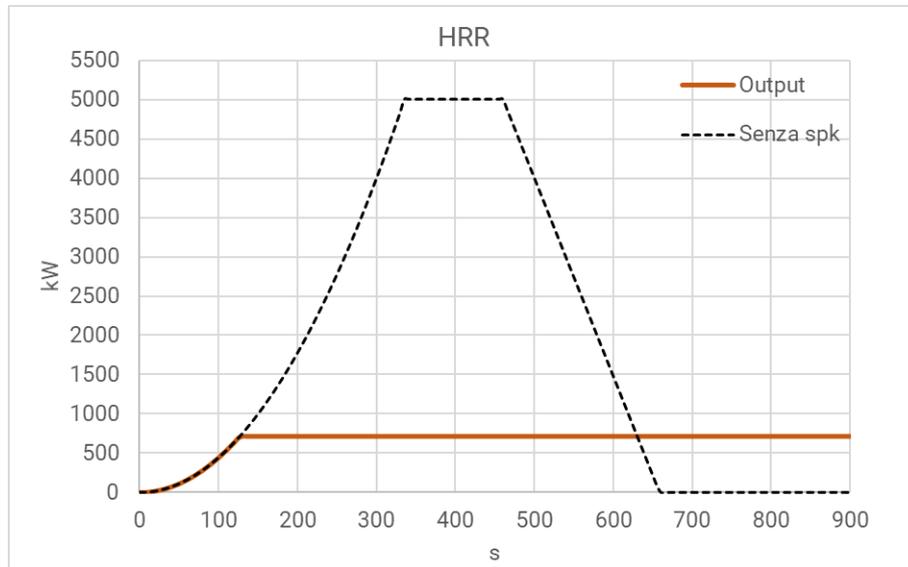


Fig. 32: Curva HRR di riferimento per gli scenari dotati di impianto sprinkler in CFAST

- L'altezza dello strato libero da fumi in relazione all'altezza costante della barriera al fumo

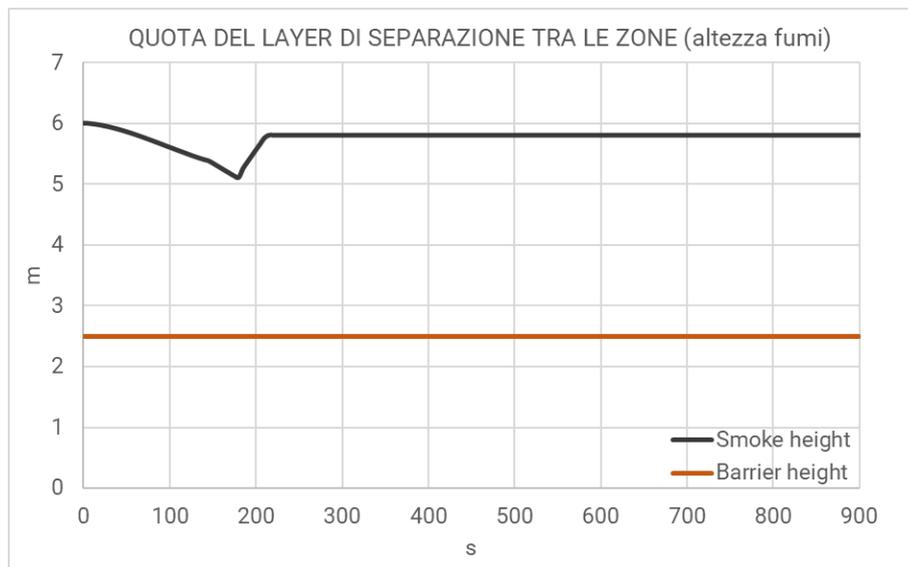


Fig. 33: In nero l'altezza dello strato libero da fumi a partire dalla quota del pavimento, in arancio la quota minima della smoke barrier

- Temperatura nel compartimento di fumo di innesco, suddivisa per valori di strato superiore, in cui sono presenti i fumi, e strato inferiore, libero da fumi.

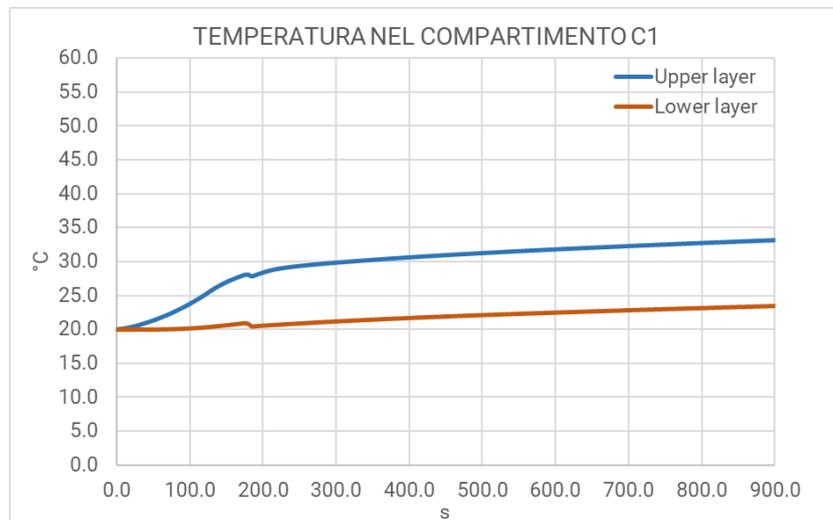


Fig. 34: Temperatura media della zona superiore (in blu) e inferiore (in arancio) del serbatoio di fumo di innesco durante i tempi di simulazione

A commento dei risultati si rileva che, per quanto riguarda la presenza di fumo nel compartimento, a partire dall'attivazione degli evacuatori di fumo il sistema è in grado di ripristinare le condizioni di esercizio in poco tempo. Le temperature sono tenute sotto controllo soprattutto anche grazie all'intervento dell'impianto sprinkler, si nota che lo strato superiore del serbatoio di fumo ha una temperatura più elevata dello strato inferiore ma in ogni caso è tenuta parecchio sotto controllo, con il raggiungimento di circa 35 °C; 15°C in più rispetto le condizioni di esercizio ipotizzate.

Scenario 3

La simulazione dello scenario 3 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 30 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera l'attivazione di tutti gli elementi del SEFFC previsti dalla normativa, ma prevedendo una riduzione del 50% della portata totale dei ventilatori di estrazione attivi. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1, invariata rispetto lo scenario precedente e reperibile in Fig. 32.

- L'altezza dello strato libero da fumi in relazione all'altezza costante della barriera al fumo

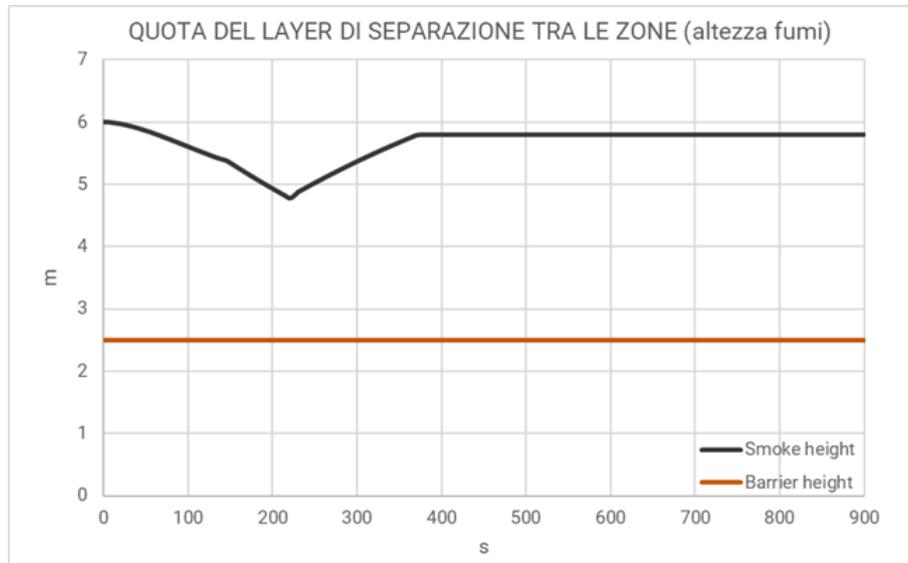


Fig. 35: In nero l'altezza dello strato libero da fumi a partire dalla quota del pavimento, in arancio la quota minima della smoke barrier

- La temperatura nel compartimento di fumo di innesco, suddivisa per valori di strato superiore, in cui sono presenti i fumi, e strato inferiore, libero da fumi.

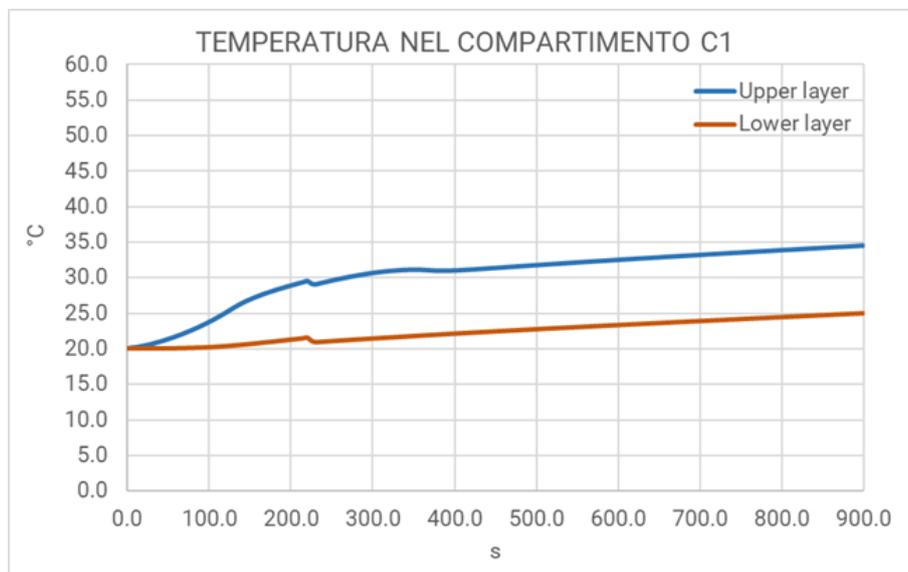


Fig. 36: Temperatura media della zona superiore (in blu) e inferiore (in arancio) del serbatoio di fumo di innesco durante i tempi di simulazione

A commento dei risultati si rileva che, per quanto riguarda la presenza di fumo nel compartimento, a partire dall'attivazione degli evacuatori di fumo il sistema è in grado

di ripristinare le condizioni di esercizio, seppur con un ritardo non trascurabile. Le temperature sono tenute sotto controllo soprattutto anche grazie all'intervento dell'impianto sprinkler, si nota che lo strato superiore del serbatoio di fumo ha una temperatura più elevata dello strato inferiore ma in ogni caso è tenuta parecchio sotto controllo, con il raggiungimento di circa 35 °C; 15°C in più rispetto le condizioni di esercizio ipotizzate.

Scenario 4

La simulazione dello scenario 4 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 30 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera l'attivazione di tutti gli elementi del SEFFC previsti dalla normativa, ma prevedendo una riduzione del 70% della portata totale dei ventilatori di estrazione attivi. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1, invariata rispetto lo scenario precedente e reperibile in Fig. 32.
- L'altezza dello strato libero da fumi in relazione all'altezza costante della barriera al fumo

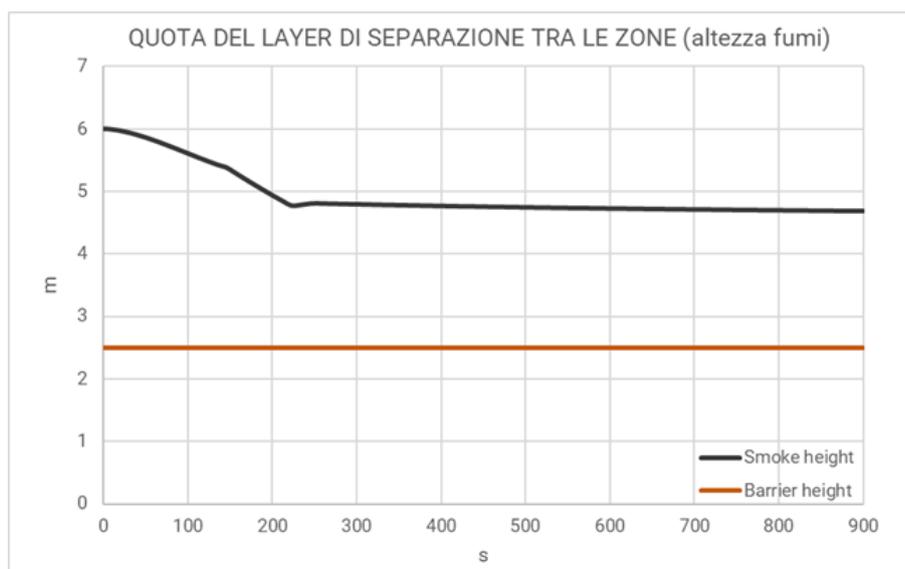


Fig. 37: In nero l'altezza dello strato libero da fumi a partire dalla quota del pavimento, in arancio la quota minima della smoke barrier

- La temperatura nel compartimento di fumo di innesco, suddivisa per valori di strato superiore, in cui sono presenti i fumi, e strato inferiore, libero da fumi.

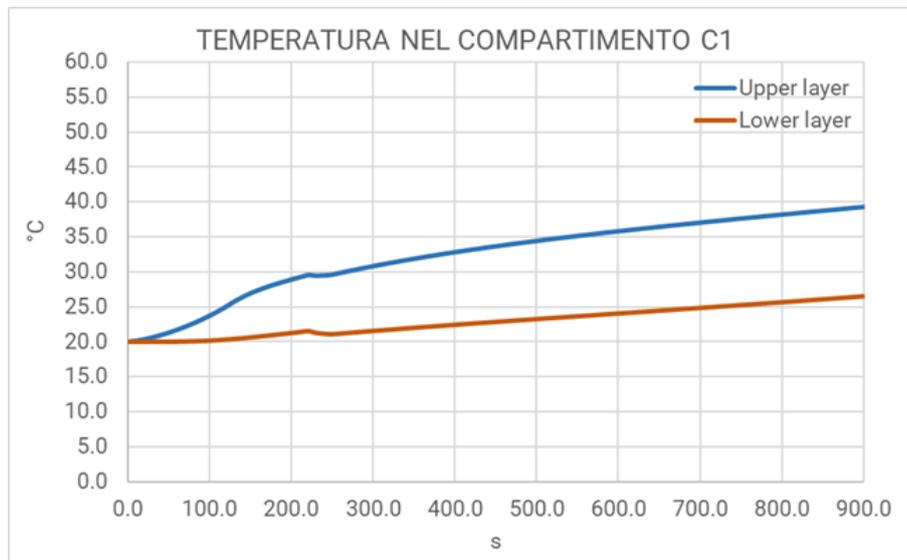


Fig. 38: Temperatura media della zona superiore (in blu) e inferiore (in arancio) del serbatoio di fumo di innesco durante i tempi di simulazione

A commento dei risultati si rileva che, per quanto riguarda la presenza di fumo nel compartimento, a partire dall'attivazione degli evacuatori di fumo il sistema non è in grado di ripristinare le condizioni di esercizio, seppur riesca a mantenerle sotto controllo. Rispetto ai due scenari precedenti si nota dunque un punto di svolta in cui il tempo di attivazione del sistema ha un ruolo cruciale nei risultati della simulazione, in quanto non si notano miglioramenti delle condizioni ambientali dopo che i ventilatori sono stati attivati. La temperatura media dello strato superiore del serbatoio di fumo ha una temperatura più elevata dello strato inferiore ma in ogni caso raggiunge al massimo i 40 °C; 20°C in più rispetto le condizioni di esercizio ipotizzate.

Scenario 5

La simulazione dello scenario 5 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 30 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera la rimozione del sistema di compartimentazione dell'ambiente tramite serbatoi di fumo, ma si prevede una portata complessiva all'interno di tutto il locale pari a quella della ventilatori attivi nella soluzione conforme. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1, invariata rispetto lo scenario precedente e reperibile in Fig. 32.
- L'altezza dello strato libero da fumi in relazione all'altezza costante della barriera al fumo

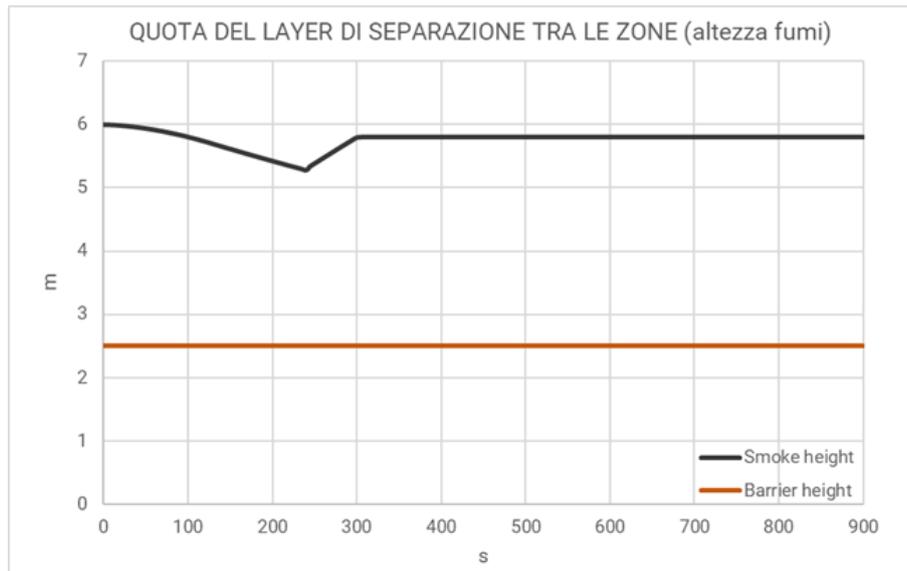


Fig. 39: In nero l'altezza dello strato libero da fumi a partire dalla quota del pavimento, in arancio la quota minima della smoke barrier

- La temperatura nel compartimento di fumo di innesco, suddivisa per valori di strato superiore, in cui sono presenti i fumi, e strato inferiore, libero da fumi.

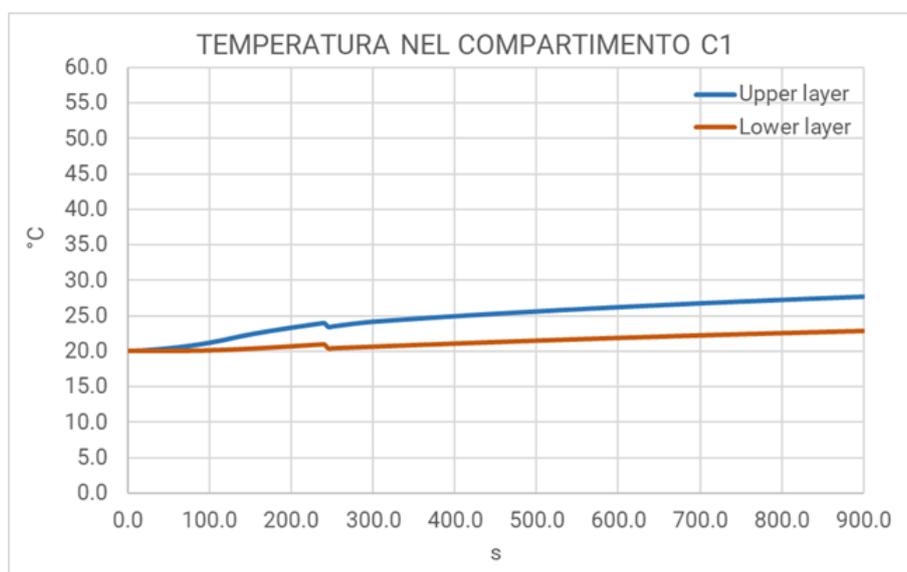


Fig. 40: Temperatura media della zona superiore (in blu) e inferiore (in arancio) del serbatoio di fumo di innesco durante i tempi di simulazione

A commento dei risultati si rileva che, la rimozione delle smoke barrier non preclude il funzionamento del sistema di controllo del fumo in quanto, similmente allo scenario 2 conforme alla normativa, a partire dall'attivazione degli evacuatori di fumo il sistema è in grado di ripristinare le condizioni di esercizio in poco tempo, per quanto riguarda la presenza dei fumi nel compartimento. Le temperature sono tenute sotto controllo, si nota tuttavia che i valori medi dello strato superiore e inferiore sono meno rappresentativi degli scenari precedenti perché la media delle temperature dei due strati è stata condotta su una superficie grande più del doppio rispetto ai suddetti scenari. Questo fattore influisce sul risultato delle temperature che si innalzano di poco meno di 10°C rispetto le condizioni di esercizio.

Scenario 6

La simulazione dello scenario 5 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 30 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera la rimozione del sistema di compartimentazione dell'ambiente tramite serbatoi di fumo e si prevede una portata complessiva di evacuazione all'interno di tutto il locale ridotta del 50% rispetto a quella dei ventilatori attivi nella soluzione conforme. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1, invariata rispetto lo scenario precedente e reperibile in Fig. 32.
- L'altezza dello strato libero da fumi in relazione all'altezza costante della barriera al fumo

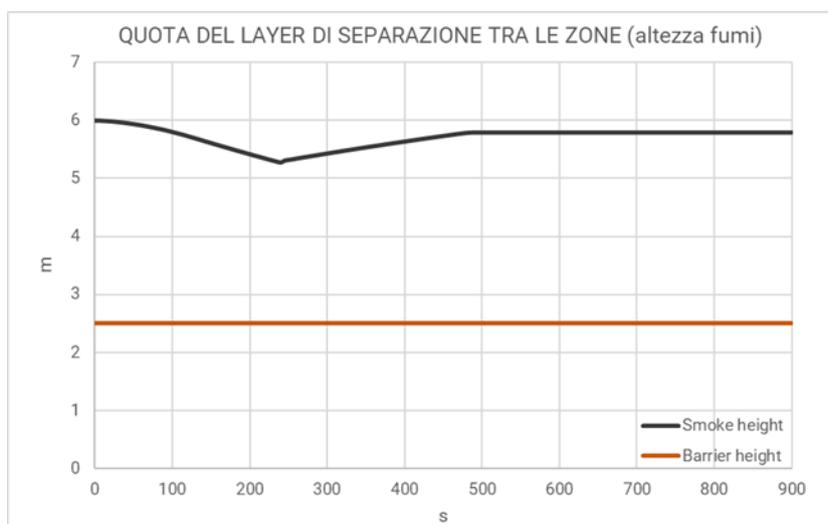


Fig. 41: In nero l'altezza dello strato libero da fumi a partire dalla quota del pavimento, in arancio la quota minima della smoke barrier

- La temperatura nel compartimento di fumo di innesco, suddivisa per valori di strato superiore, in cui sono presenti i fumi, e strato inferiore, libero da fumi.

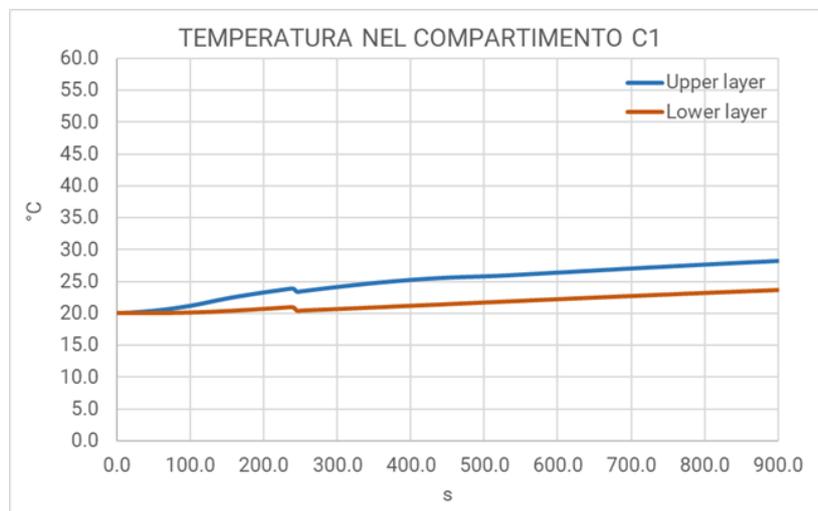


Fig. 42: Temperatura media della zona superiore (in blu) e inferiore (in arancio) del serbatoio di fumo di innesco durante i tempi di simulazione

A commento dei risultati si rileva che, la rimozione delle smoke barrier non preclude il funzionamento del sistema di controllo del fumo in quanto, similmente allo scenario 3, a partire dall'attivazione degli evacuatori di fumo il sistema è in grado di ripristinare le condizioni di esercizio, seppur con un tempo prolungato. Le temperature sono tenute sotto controllo, si nota tuttavia che i valori medi dello strato superiore e inferiore sono meno rappresentativi degli scenari in cui sono presenti le smoke barrier, perché la media delle temperature dei due strati è stata condotta su una superficie grande più del doppio rispetto ai suddetti scenari. Questo fattore influisce sul risultato delle temperature che si innalzano di poco meno di 10°C rispetto le condizioni di esercizio.

Da un'analisi complessiva dei risultati ottenuti dalle modellazioni condotte a zone, si considera che la riduzione della portata ottimale del compartimento, rispetto ai limiti imposti della normativa, è del 50%. Inoltre, per quanto il modello a zone applichi un'importante approssimazione nei calcoli, si evince che non è strettamente necessaria la presenza delle smoke barrier ai fini del raggiungimento del livello di sicurezza richiesto.

L'assenza delle smoke barrier è quello che rende le soluzioni previste negli scenari 5 e 6 più appetibili rispetto agli altri scenari; in quanto in molteplici realtà costruttive è

impossibile l'installazione di suddette barriere, come viene brevemente dettagliato nel §6.1. Di conseguenza, gli scenari che verranno approfonditi con modelli di campo sono il numero 5 e il numero 6.

A corredo dei risultati ottenuti, si riportano degli screen provenienti dai risultati della simulazione dello scenario 6 visibili in Smokeview.

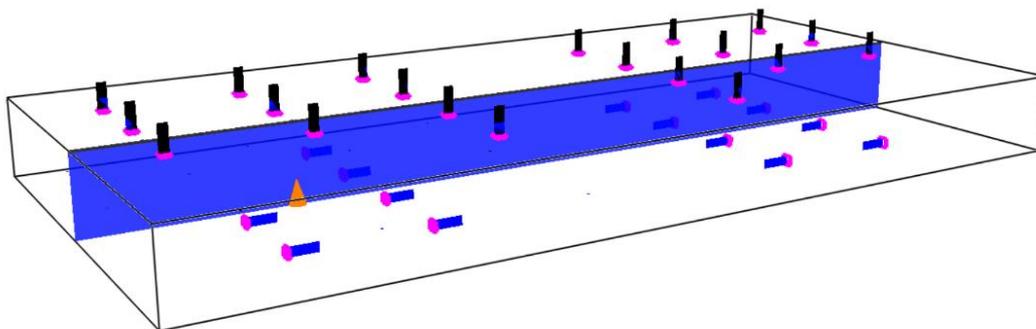


Fig. 44: Visualizzazione dell'espansione del focolare, flussi di aria che attraversano i ventilatori

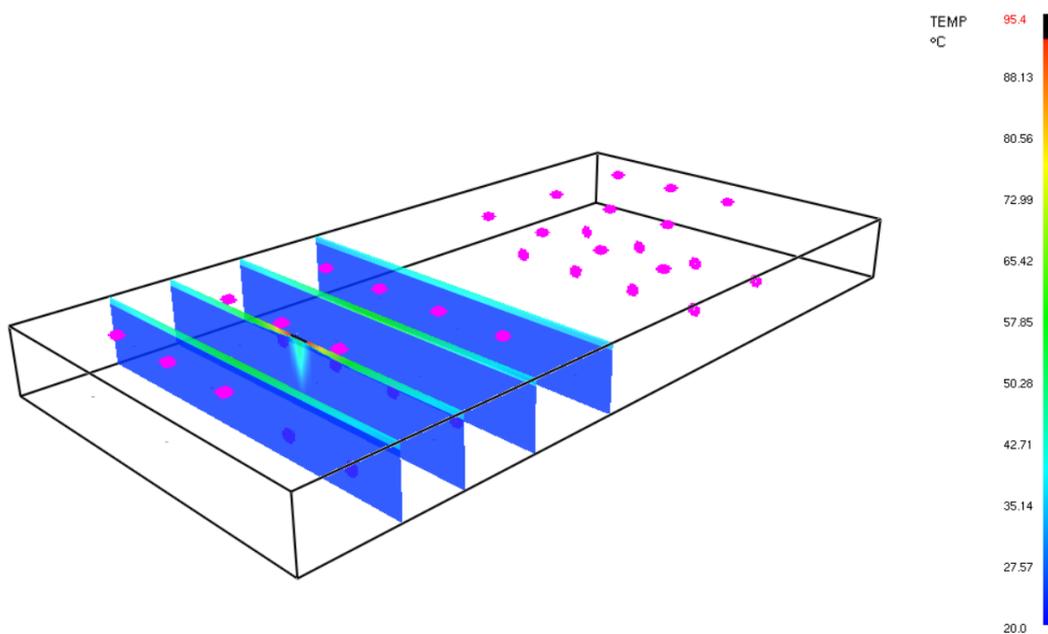


Fig. 43: Slice di temperatura 2d nei pressi del focolare, scala delle temperature

8 MODELLO DI CAMPO

Al fine di approfondire la valutazione della soluzione alternativa ritenuta ottimale, si simula lo scenario di incendio con un modello di campo. Il dominio computazionale prevede la discretizzazione dello spazio in celle elementari tridimensionali che, nel loro insieme, formano una griglia di calcolo (*mesh*). All'interno delle celle elementari vengono valutati quantitativamente gli effetti dell'incendio e la loro variazione nel tempo, in questo modo, valutando correttamente la dimensione idonea delle celle, si ottiene un approccio valutativo molto flessibile, che può essere applicato per indagare gli effetti dell'incendio per qualsiasi tipo di focolare e geometria dell'ambiente.

8.1 Modellazione in FDS (fire dynamics simulator)

FDS è un simulatore d'incendio sviluppato dal NIST (National Institute of Standard and Technology). La simulazione condotta in FDS prevede l'applicazione della CFD (fluidodinamica computazionale) per risolvere le equazioni fondamentali di bilancio energetico, di massa e della quantità di moto, in particolare di Navier-Stokes, in forma adatta ai flussi con basse velocità e dipendenti da gradienti termici. Si presuppone che gli effetti dell'incendio e la loro variazione siano uniformi all'interno delle celle elementari in cui viene suddiviso l'ambiente, puntualizzando tuttavia che ogni cella è un sistema aperto che interagisce con i volumi elementari limitrofi su effetto delle variazioni delle rispettive grandezze misurate.

In particolare si descrive l'iter seguito nella modellazione degli scenari con riferimento all'interfaccia grafica *Pyrosim* sviluppata da *Thunderheadeng*, in cui sono ampiamente integrati sia FDS che Smokeview.

8.1.1 Ambiente di simulazione

Si definiscono i tempi caratteristici della simulazione e le condizioni al contorno dell'ambiente.

Il **tempo di simulazione** impostato è pari a 900 secondi, pari al tempo di sviluppo dell'incendio dimensionato secondo i criteri della UNI 9494.

Non si inseriscono parametri che riguardano gli intervalli di tempo di scrittura dei file di output.

I parametri ambientali sono stati impostati come nel §7.1.1

8.1.2 Modellazione del locale

Pyrosim permette l'importazione del modello architettonico dell'opera, vantando una buona interoperabilità con il software di modellazione Revit, almeno per quanto riguarda le geometrie. I formati di esportazione usati sono di tipo .ifc .dwg. Si nota che il primo formato è più ricco di informazioni sull'entità dei materiali, inoltre successivamente all'importazione è possibile modificare i confini dei solidi. Il secondo formato appesantisce in modo significativamente minore le simulazioni, ma generalmente comporta l'importazione di facce piuttosto che di geometrie solide, inoltre non è possibile modificare la forma geometrica degli oggetti una volta importati in Pyrosim.

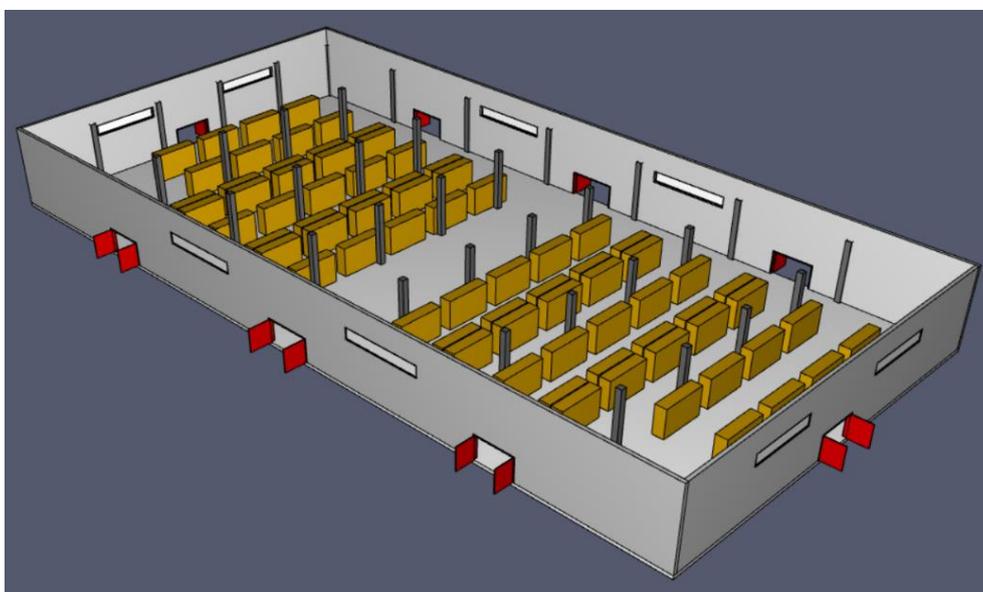


Fig. 45: Modello importato in Pyrosim

Tutte le geometrie solide importate sono state identificate dal software come *obstruction*, che non permettono l'attraversamento di fumo. Vi è la possibilità di modellare altre tipologie di geometrie, come gli *holes* (o vuoti), tuttavia si fa notare che nello scenario riprodotto non si fa uso né di porte né di finestre durante i tempi d'emergenza, di conseguenza sono state omesse del tutto le porte e le finestre del modello architettonico come è mostrato in Fig. 46.

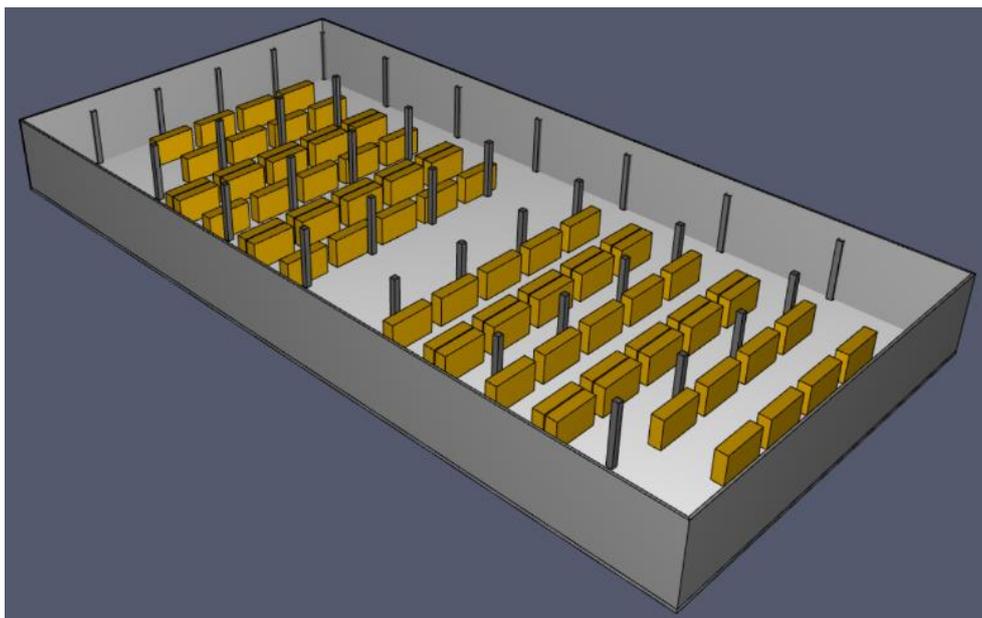


Fig. 46: Modello architettonico effettivamente considerato in Pyrosim

Nonostante non vi sia un limite inferiore per le dimensioni delle geometrie importate, nel dominio di simulazione il modello viene discretizzato in celle tridimensionali elementari, che formano nel loro insieme un reticolo di calcolo (*mesh*) come anticipato nell'introduzione al presente capitolo; le celle hanno forma cubica. Il risultato dell'applicazione delle mesh consiste in un'approssimazione delle geometrie, in funzione della dimensione della cella unitaria. È importante visualizzare il modello approssimato cosicché si possa intervenire su eventuali errori di rappresentazione, che graverebbero sulla simulazione, come mostrato in Fig. 47.

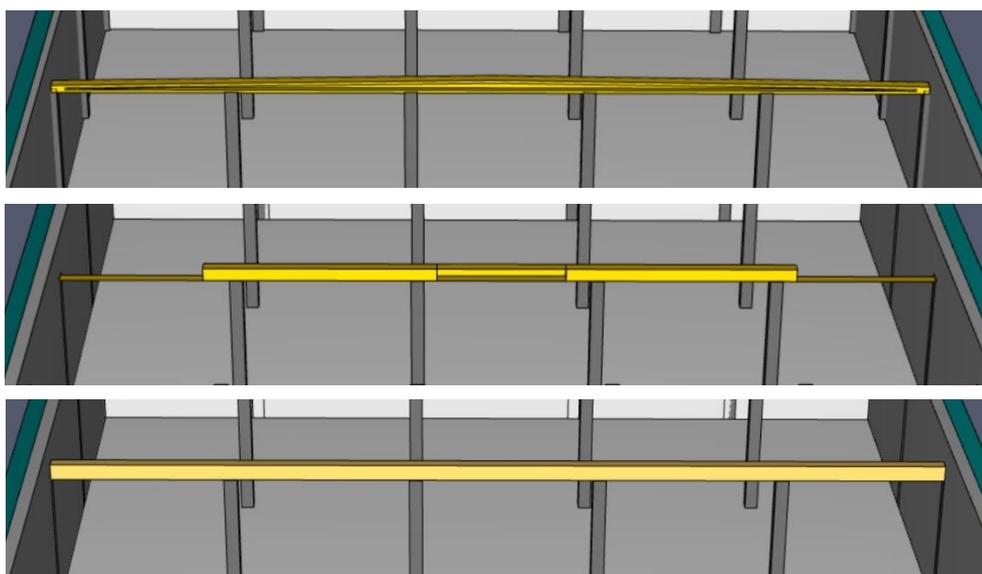


Fig. 47: processo di correzione del modello discretizzato, per una trave rastremata ai lati

Per indirizzare la scelta del dimensionamento delle celle si tiene conto del fatto che al raffittimento delle mesh corrisponde un'elevazione nell'affidabilità e nella precisione dei risultati, oltre che ad una più raffinata restituzione delle geometrie del modello; tuttavia si verificherebbe un allungamento dei tempi di attesa per ottenere i risultati della simulazione. Dunque, le dimensioni delle celle usate sono di 0,25 cm o, nella maggior parte delle simulazioni, 0,5 cm, in modo da permettere tempi di simulazione governabili. È inoltre importante accertarsi che tutte le geometrie di interesse si trovino all'interno di una mesh, altrimenti non saranno considerate nella simulazione, in Fig. 48 si segnalano i confini di due mesh allineate con dimensioni degli spigoli dei cubi elementari di 0,5 cm.

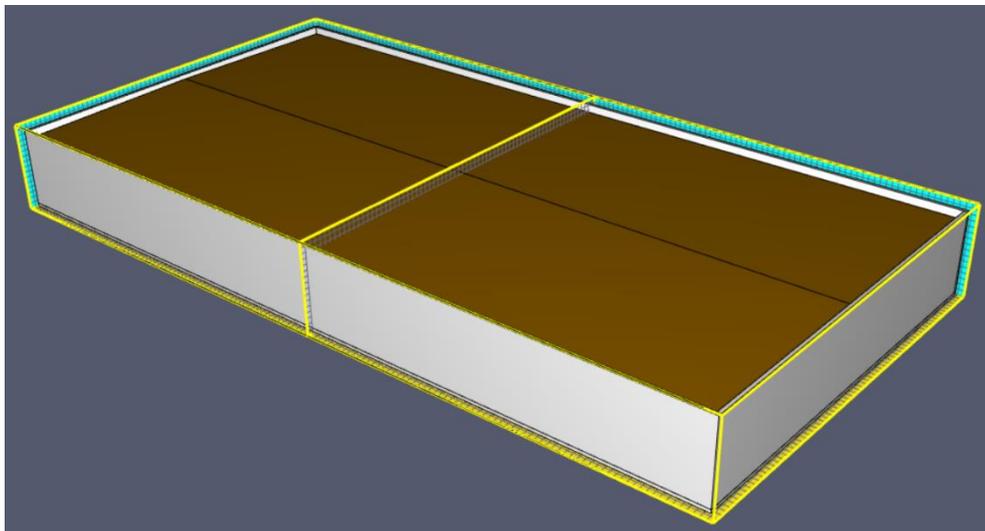


Fig. 48: Visualizzazione dei confini di due mesh allineate, estensione rispetto ai confini del modello geometrico

È importante impostare i confini della mesh come superfici aperte al passaggio di fumo nell'ambiente esterno, lo si può fare tramite il comando *open vents*, tuttavia questo comando crea una superficie di tipo *vent* anche in corrispondenza del confine limitrofo al terreno la mesh, dove invece deve rimanere adiabatica, di conseguenza si deve provvedere all'eliminazione manuale di questa specifica superficie; nel confine tra una mesh e l'altra non bisogna applicare tali superfici in quanto lo scambio di parametri tra celle limitrofe è già previsto.

8.1.3 Modellazione del SEFC

Il SEFC viene modellato principalmente attraverso tre istanze: wall obstruction, exhaust surface, supply surface.

Wall

Le istanze di tipo wall possono essere utili a modellare le cortine di fumo, in quanto riconosciute come obstruction non permettono il passaggio di fumo, inoltre attraverso le informazioni di localizzazione geometrica all'interno del modello si può posizionare l'ostruzione nella posizione voluta.

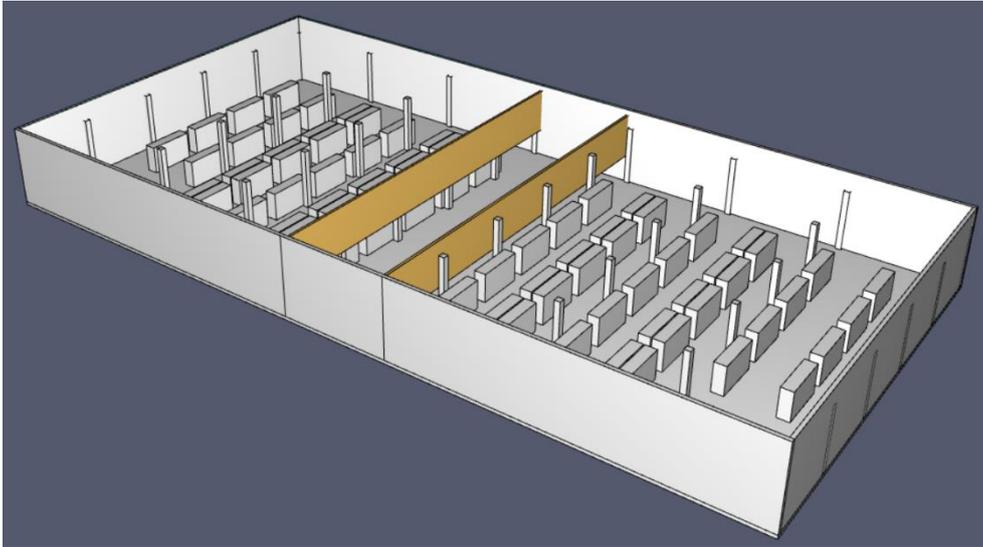


Fig. 49: esempio di modellazione di cortine di fumo

Le obstruction possono essere attivate o disattivate nel tempo, sulla base di valori temporali specificati dall'utente, oppure sulla base dell'attivazione di controlli programmati sulla base di variabili fisiche misurate durante la simulazione (vedi §8.1.5).

Negli scenari in esame non si contemplano soluzioni in cui si fa uso di cortine di fumo, tuttavia è utile tenere presente che la modellazione delle stesse è resa molto immediata in pyrosim più che su CFAST (vedi §7.1.3), anche le opzioni che regolano il controllo e l'attivazione degli elementi sono più variegata e se ne discuterà in seguito nel §8.1.5.

Exhaust

I torrini di estrazione sono stati modellati geometricamente attraverso una *block obstruction*. Per il tipo di scenari previsti e descritti nel §6.2, i torrini hanno diametro della bocchetta di estrazione compreso tra i 48 e i 60 cm, tenendo in considerazione la relazione tra geometrie del modello e mesh si ritiene accettabile approssimare la sezione dei ventilatori in modo che occupi un'intera cella di forma cubica di dimensioni 0,5x0,5x0,5 cm, in tal modo il programma è in grado di computare agevolmente il flusso che attraversa il ventilatore. Anche l'altezza di estrazione è approssimativamente impostata pari a 5,5 cm, quota di base del cubo modellato. Il

posizionamento dei torrini ventilatori nell'ambiente di modellazione è raffigurato in Fig. 50.

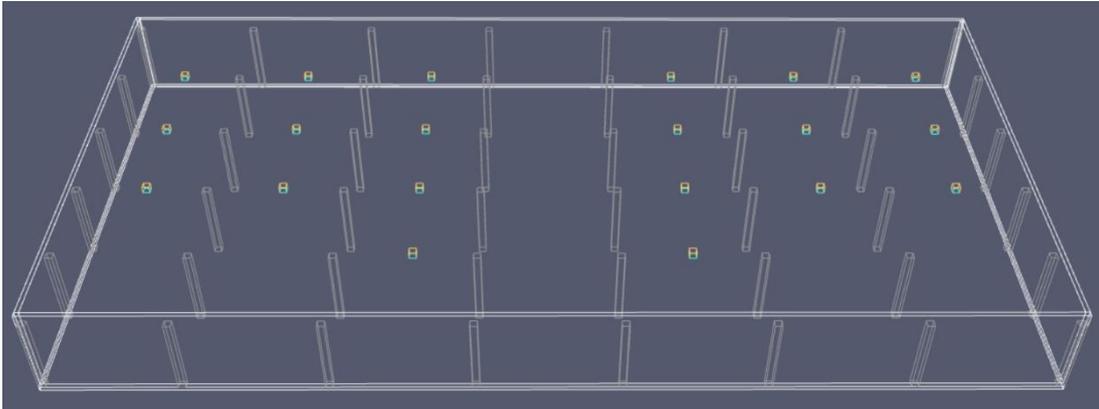


Fig. 50: modellazione geometrica dei torrini di estrazione

Le informazioni necessarie per il funzionamento del ventilatore sono immesse attraverso l'assegnazione di una particolare tipologia di superficie alla faccia inferiore del cubo. Mentre alle altre facce viene di default assegnato il materiale di inerte, per la faccia inferiore si predispone una superficie di tipo *exhaust*. I principali input immessi per la definizione di questo tipo di superficie sono:

Volume flux: è la portata costante che attraversa il ventilatore, pari a 12600 m³/h per lo scenario 5 e pari a 6200 m³/h per lo scenario 6 (vedi §6.1)

Ramp-Up Time: permette di segnalare istante per istante la frazione del ventilatore. Quest'ultima ha un valore compreso tra 0 e 1, dove 0 rappresenta il ventilatore totalmente spento e 1 indica che il ventilatore è nella condizione di pieno regime. Conoscendo l'istante ($t_x = 60$ s) di attivazione dell'impianto sprinkler (vedi §8.1.6), con ritardo di un minuto il ventilatore inizierà a estrarre i fumi dal compartimento, la messa a regime è assunta pari a 30 secondi, nella Tab. 24 si mostra uno stralcio dei dati di input immessi che contiene i secondi di attivazione del ventilatore.

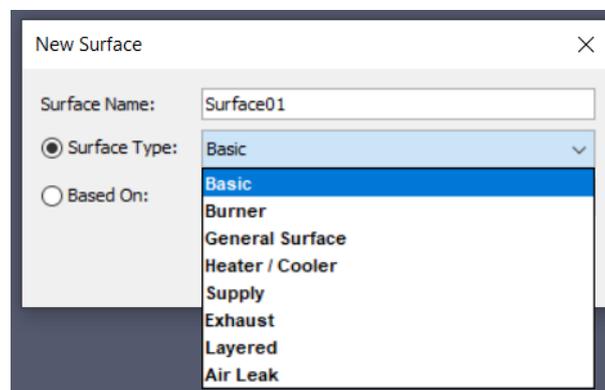


Fig. 51: tipologie di superficie modellabili in Pyrosim

	Time (s)	Fraction
7	60,0	0,0
8	70,0	0,0
9	80,0	0,0
10	90,0	0,0
11	100,0	0,0
12	110,0	0,0
13	120,0	0,2
14	127,0	0,4
15	130,0	0,5
16	140,0	0,8
17	150,0	1,0
18	160,0	1,0

Tab. 24: input del tempo di attivazione dei ventilatori

Supply

Le bocchette di immissione di aria sono modellate in modo molto simile a quello dei torrini ventilatori sopradescritti. Non si modella un vero e proprio ventilatore e neanche le canalizzazioni che lo collegano alla bocchetta di immissione, ma si definisce una superficie di tipo *supply* (vedi Fig. 51) e la si assegna ad una faccia di una block obstruction. La faccia in questione avrà le dimensioni e la posizione corrispondente a quelle delle bocchette di immissione previste nel §5.3.12.

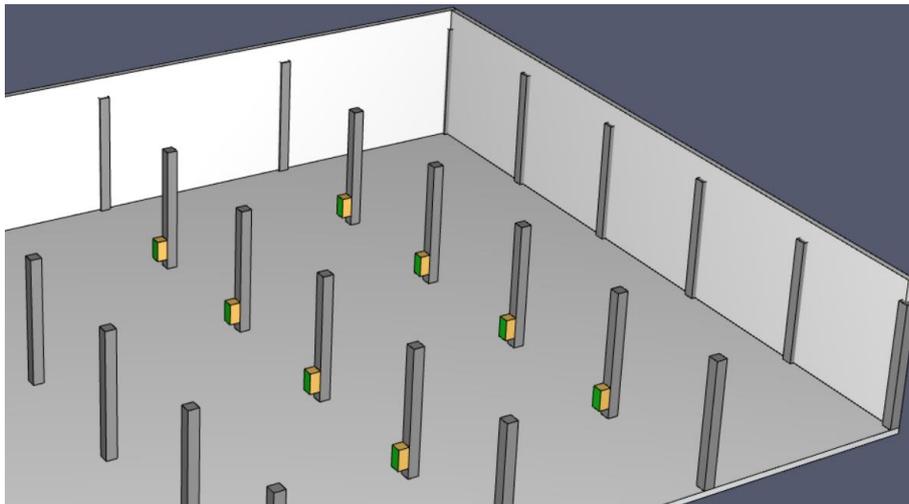


Fig. 52: posizionamento bocchette di immissione, superficie supply in verde

I principali input immessi per la definizione di questo tipo di superficie sono:

Volume flux: è la portata costante progettata nel punto di immissione di aria, pari a 7500 m³/h per lo scenario 5 e pari a 3600 m³/h per lo scenario 6 (vedi §6.1)

Ramp-Up Time: permette di segnalare istante per istante la frazione del ventilatore. Quest'ultima ha un valore compreso tra 0 e 1, dove 0 rappresenta il ventilatore totalmente spento e 1 indica che il ventilatore è nella condizione di pieno regime. Conoscendo l'istante ($t_x = 60$ s) di attivazione dell'impianto sprinkler (vedi §8.1.6), con ritardo di un minuto il ventilatore inizierà a estrarre i fumi dal compartimento, la messa

a regime è assunta pari a 30 secondi, la Tab. 24 mostrata in precedenza contiene uno stralcio dei dati di input immessi riguardo gli istanti di attivazione dei ventilatori.

8.1.4 Focolare

Operativamente il focolare viene modellato in Pyrosim definendo una superficie di tipo *burner* (vedi Fig. 51) e la si assegna ad una faccia di una *block obstruction*, è inoltre importante definire una *reaction* per definire la natura del combustibile.

Burner

Questo tipo di superficie rappresenta un focolare con una HRR nota, si rimanda pertanto al §7.1.4 dove è descritto il metodo di stima della curva HRR. I parametri di input che sono stati impostati manualmente per caratterizzare un *burner* sono i seguenti:

Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): considerando che il focolare ha dimensioni unitarie, essa è pari a 5000 kW/m² per lo scenario 1 e 160 kW/m² per gli scenari 5 e 6.

Ramp-Up Time: all'interno di questo campo è possibile descrivere la quantità di potenza termica rilasciata dal focolare per ogni istante di simulazione desiderato. Per lo scenario 1 la curva immessa è identica a quella in Fig. 27, mentre per gli scenari 5 e 6 la curva immessa contiene i valori ricavati a seguito dell'attivazione dell'impianto sprinkler, argomento approfondito nel §8.1.6. Per tutti gli scenari è stato riportato il valore della curva HRR con intervalli di 10 secondi per tutto il tempo della simulazione.

Obstruction

Si modella un obstruction di dimensione rientrante esattamente all'interno delle celle unitarie e la si posiziona in corrispondenza del focolare, che negli scenari proposti ha il centro in X=15 m e in Y=17.5 m. Alla faccia superiore della obstruction, di dimensione pari a 1 m², si associa la superficie di tipo *burner* appositamente creata.

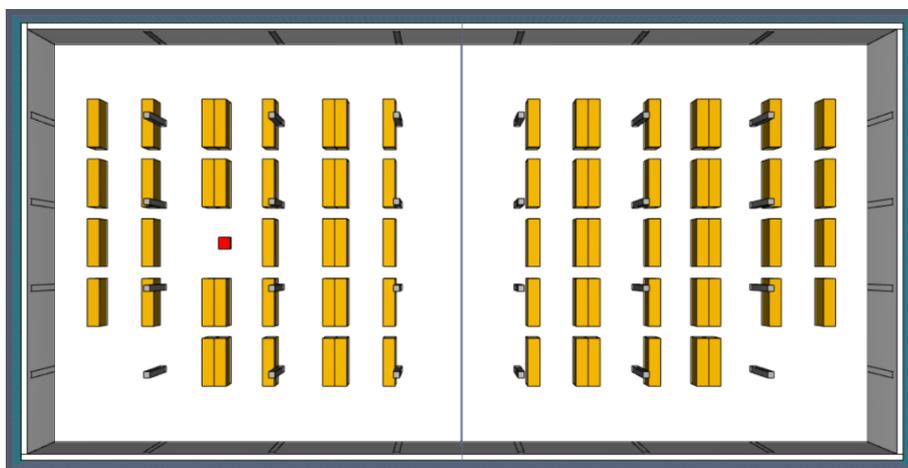


Fig. 53: posizione del focolare in Pyrosim, in rosso la superficie di tipo burner

È importante specificare che all'interno di Pyrosim non è possibile cambiare nel tempo la superficie in pianta dell'incendio.

Reaction

La creazione di una reazione permette l'immissione dei seguenti dati di input:

Composition: composizione chimica del combustibile, ricavata dal Codice di prevenzione incendi, $\text{CH}_2\text{O}_{0,5}$;

Heat of combustion: è l'energia rilasciata per unità di massa persa dal combustibile, pari a 20 MJ/kg dal Codice di prevenzione incendi;

CO Yield: produzione in massa di CO per unità di massa persa del combustibile. Valore pari a 0,1 dal Codice di prevenzione incendi;

Soot Yield: produzione in massa di polveri per unità di massa persa del combustibile. Valore pari a 0,07 dal Codice di prevenzione incendi.

È importante notare che il valore degli ultimi due parametri, a differenza degli scenari modellati a zone, non può variare in funzione degli istanti di simulazione.

8.1.5 Controlli e detector

All'interno del software è possibile modellare delle istanze di tipo *device*. Esse possono essere usate per misurare determinate grandezze nel modello in diversi istanti e anche per simulare il comportamento di particolari sensori, come gli smoke detectors, tramite l'associazione degli stessi ad un'istanza di tipo *control*, descritta in seguito in questo paragrafo. I device che fanno le veci degli smoke detector sono stati modellati nello scenario 1 (vedi §6.2), per ricavare il ritardo di attivazione t_x dell'impianto sprinkler.

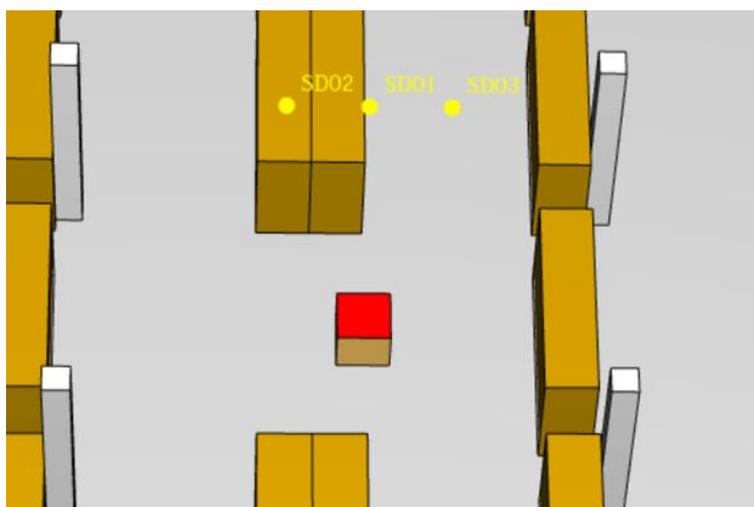


Fig. 54: posizione degli smoke detector

Si posizionano tre smoke detector poco distanti dal focolare, come reperibile in Fig. 54, in modo che all'attivazione di almeno due smoke detector possano avviarsi le procedure automatiche di emergenza, cioè l'attivazione dell'impianto sprinkler e successivamente l'attivazione dei ventilatori di estrazione e di immissione.

Per stabilire il tempo di attivazione dello sprinkler come sopradescritto, bisogna impostare un *control* con le condizioni stabilite in Fig. 55. L'istante di attivazione del controllo sarà reperibile tra i risultati della simulazione in un file .csv apposito.

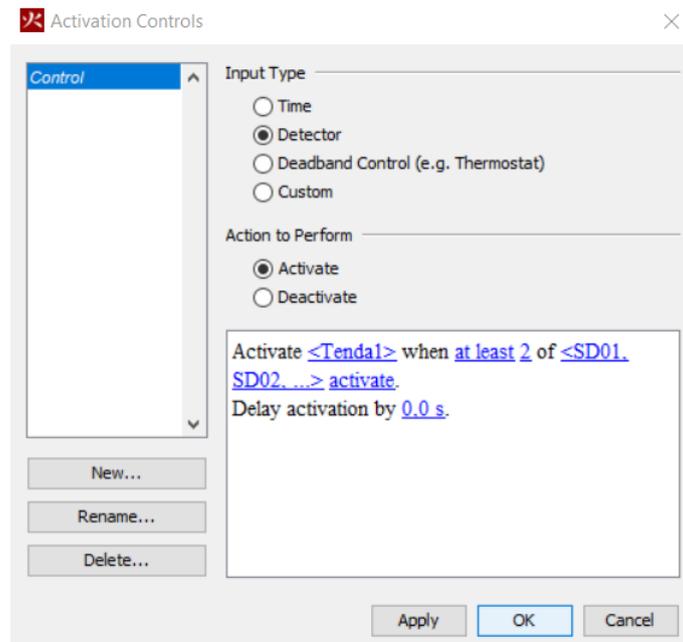


Fig. 55: Dati di input relativi al control

Altre tipologie di device sono state modellate con lo scopo di registrare le grandezze da loro misurate, si approfondisce il tema nel §8.1.7.

8.1.6 Effetti dell'impianto sprinkler

Si prevede l'uso di un impianto sprinkler ai fini del controllo dell'incendio, come anticipato nel §4.5.3. Dunque, citando il codice di prevenzione incendi nella sezione M.2.6: "l'andamento della potenza termica rilasciata RHR(t) non raggiunge il valore massimo RHRmax [...] ma può essere assunta costante e pari al valore di RHR(t_x) raggiunto all'istante t_x di entrata in funzione dell'impianto automatico. Tale valore permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto, entro cui si presume che l'incendio controllato venga definitivamente estinto mediante l'intervento manuale."

Come per CFAST, anche in pyrosim non viene contemplata una vera e propria modellazione di tutto il sistema, ma occorre condurre una *run* preliminare in cui la

curva HRR non tiene in considerazione la presenza dell'impianto sprinkler, così da registrare esclusivamente il risultato del tempo t_x (scenario d'incendio 1). A seguito di questa informazione, si possono condurre le simulazioni successive tenendo conto dell'effetto che ha lo sprinkler sulla curva HRR.

Con i dati sopracitati relativi allo scenario d'incendio 1 si avvia una simulazione d'incendio, tenendo in considerazione che l'obiettivo è semplicemente quello di fare attivare il controllo, per questo motivo lo scenario può avere tempi di simulazione molto ridotti. In particolare, in Fig. 57 è possibile notare un'estrapolazione dei dati output della simulazione:

- In nero, con linea tratteggiata, viene indicata la curva HRR immessa come dato di input nel programma;
- In giallo, viene rappresentata la curva HRR estrapolata dal file hrr.csv di output del programma
- Con l'etichetta di colore rosso si indica il momento in cui viene attivato il controllo nella simulazione, cioè il momento in cui almeno due smoke detector hanno rilevato la presenza di fumo. Tale valore è stato ricavato dal file ctrl.csv di output del programma.



ATTIVAZIONE CONTROLLO	
s	status
Time	Control
46.83	-1.00
47.75	1.00
48.61	1.00

Fig. 56: output dello scenario 1 modellato in pyrosim

Il valore di t_x ricavato come dato di output si attesta intorno ai 50 secondi, è un valore molto minore rispetto a quello ricavato su CFAST, poiché le equazioni di conservazione delle grandezze di interesse sono risolte all'interno di ogni singola cella, rendendo il sistema molto più reattivo. Inoltre, lo scenario di incendio è caratterizzato da una curva con crescita veloce ($t_a=150$ secondi) ed elevata produzione di fumi ($Y_{soot}=0,07$), per cui è comprensibile che dei sensori che misurano l'oscurazione nei pressi del focolare abbiano un *trigger* molto celere. Tuttavia, il valore accettabile per simulare al meglio il tempo minimo affinché gli smoke detector mandino un segnale alla centralina, considerando i sistemi presenti in commercio, può essere considerato pari a 60 secondi.

Dunque, la stima finale del tempo t_x è ritenuta pari a 60 secondi.

Seguendo le indicazioni del codice degli incendi, la curva HRR ne risulta modificata come in Fig. 58. Quest'ultima è stata considerata dato di input per gli scenari 5 e 6, di cui si riportano i dati di ingresso per la definizione temporale del focolare in allegato e di cui verranno interpretati i risultati nel §8.2.

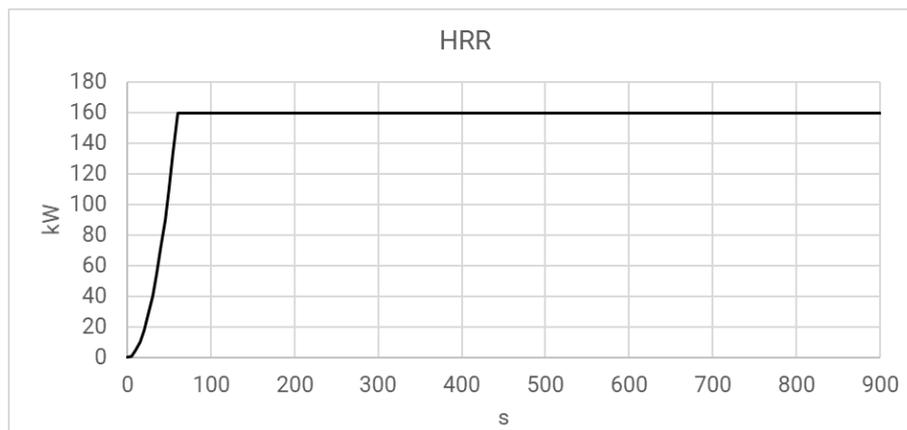


Fig. 58: Curva HRR con effetti dell'impianto sprinkler

8.1.7 Posizionamento device, layer e slice

Per registrare i valori delle grandezze che il software è in grado di misurare, si posizionano delle sonde puntiformi (device), lineari (layer) e planari (2D slice) in particolari punti del modello. I valori registrati dai device e dai layer sono disponibili all'interno del file di output *devc.csv*, mentre le 2D slice possono essere visualizzate in Smokeview.

Il posizionamento sul piano XY di questi elementi è reperibile nella tavola 6 in allegato.

Si specifica che:

- I device di temperatura sono posizionati nei pressi dell'intradosso del solaio a 5,5 metri di altezza dal pavimento, in modo da compiere un'indagine utile alla salvaguardia degli elementi strutturali;
- I device di visibilità aiutano a capire la distribuzione dei fumi e sono posizionati ad una quota di 2 metri da terra;
- I layer misurano la quota dello strato libero da fumo nel punto di posizionamento in XY e hanno lunghezza lungo Z di 5,5 metri a partire dalla quota del pavimento;
- Le 2D slice di temperatura sono posizionate nei piani definiti dalle coordinate X= 15,0 m; Y=17,5 m; Z=5,5 m;
- Le 2D slice di visibilità sono posizionate nei piani definiti dalle coordinate X= 15,0 m; Y=17,5 m; Z= 2 m;
- Le 2D slice di velocità del flusso di aria con vettori orientati in (u,v,z) sono posizionate in Z=5,5 m.

8.2 Interpretazione dei risultati

Di seguito si espongono ed interpretano i principali risultati degli scenari 5 e 6 di incendio elencati nel §6.2. I risultati mostrati sono prodotti da una post elaborazione dei dati di output prodotti da FDS, i quali consistono in file dati di estensione .csv e .smv; il contenuto dei primi è accessibile attraverso fogli di calcolo, quello dei secondi è visibile sottoforma di animazioni con il programma Smokeview. Il posizionamento dei device menzionati nei risultati è reperibile in allegato dalla tavola 5.

Scenario 1

I risultati dello scenario d'incendio 1 sono stati approfonditi nel §8.1.6, in quanto utili esclusivamente alla registrazione del tempo di attivazione dell'impianto di controllo automatico dei fumi.

Scenario 5

La simulazione dello scenario 5 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 58 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera la rimozione del sistema di compartimentazione dell'ambiente tramite serbatoi di fumo, ma si prevede una portata complessiva all'interno di tutto il locale pari a quella della ventilatori attivi nella soluzione conforme. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1 in Pyrosim



Fig. 59: Curva HRR, confronto tra input ed elaborazione del programma

- I valori registrati dai layer posizionati sul modello, che indicano l'altezza dello strato libero da fumo nel punto in cui è presente il layer, in relazione alla soglia di prestazione scelta

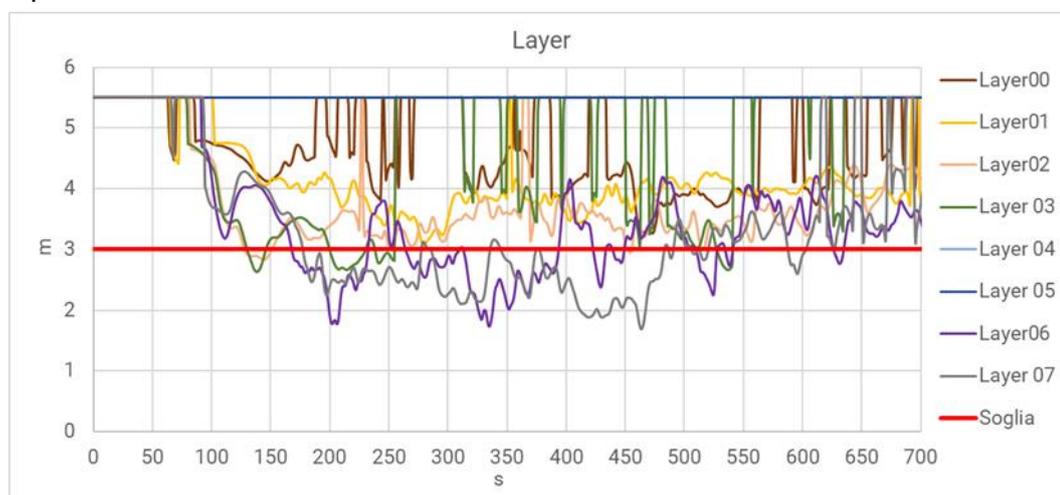


Fig. 60: Altezza dello strato libero da fumo nei punti di posizionamento dei layer

- La temperatura nel compartimento di incendio, all'altezza di 5,5 metri. Si specifica che non tutti i device sono riportati all'interno del grafico, in quanto si mostrano solo quelli che hanno cambiamenti sensibilmente riconoscibili rispetto le condizioni di esercizio

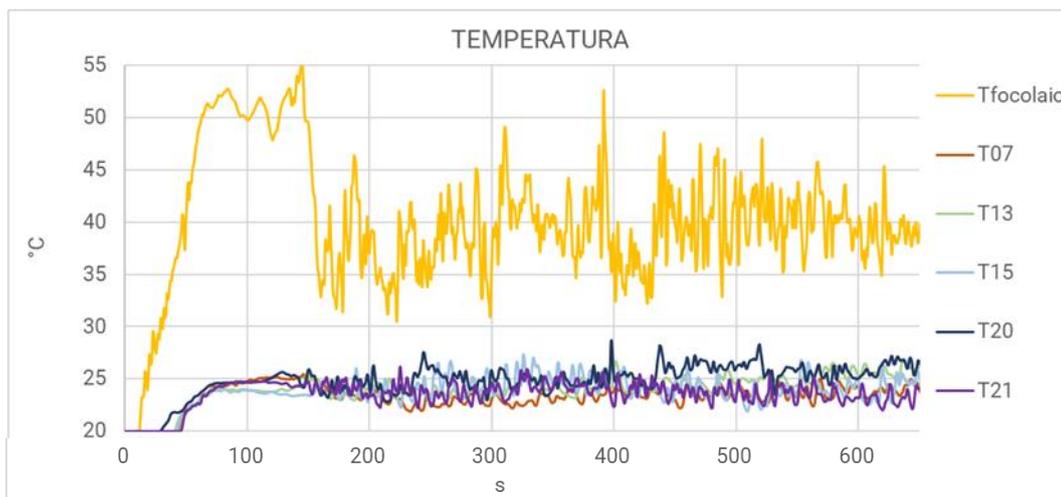


Fig. 61: Temperatura misurata dai device all'altezza di 5,5 metri dalla quota del pavimento

- La visibilità nel compartimento di incendio, all'altezza di soglia di 3 metri. Si specifica che non tutti i device sono riportati all'interno del grafico, in quanto si mostrano solo quelli che hanno cambiamenti sensibilmente riconoscibili rispetto le condizioni di esercizio.

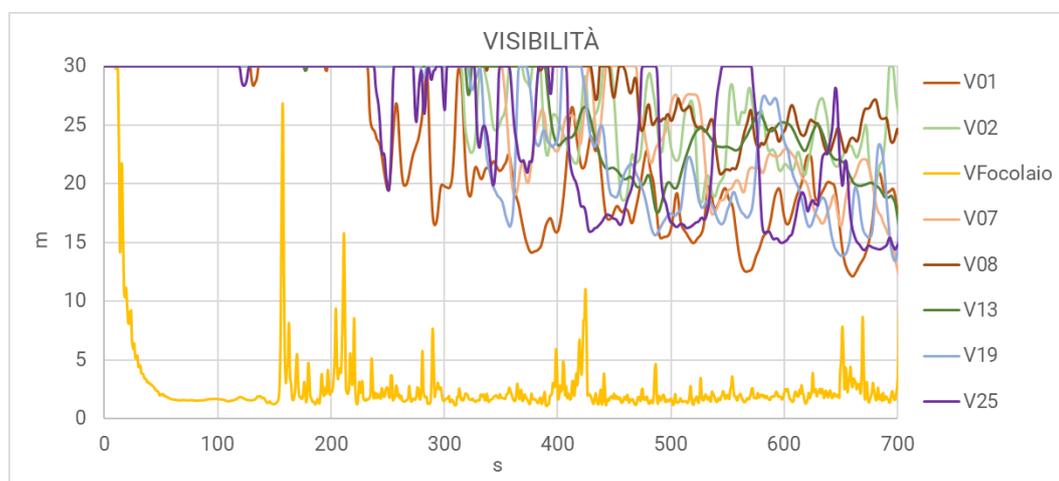


Fig. 62: Visibilità misurata dai device all'altezza di 3 metri dalla quota del pavimento

A commento dei risultati si rileva che, l'accensione del SEFFC provoca all'interno della simulazione delle fluttuazioni elevate delle grandezze, questo perché i flussi di aria forzati sono molto importanti, soprattutto per i valori delle portate previste dalla normativa. La post elaborazione dei risultati può prevedere di mediare le grandezze per range di tempo, in questo modo le fluttuazioni che avvengono per pochi secondi

di tempo possono essere rimosse, fornendo una più chiara interpretazione dei risultati. Ciò considerato, si nota che:

- I valori delle temperature sono ben lontani dal raggiungimento delle curve di riferimento impostate come soglie di prestazione, anche per il punto direttamente al di sopra del focolare. Tuttavia, sarebbe opportuno studiare nello specifico ogni singolo elemento strutturale;
- I valori di visibilità sono molto promettenti in quanto, escludendo gli immediati pressi del focolare, la concentrazione di polveri è molto bassa in corrispondenza della soglia minima di altezza dello strato libero da fumi;
- Le altezze registrate dai layer sono abbastanza variabili ma accettabili in quanto solo per due layer, in determinati periodi, la soglia proposta viene superata. Inoltre questi layer sono posizionati in punti limitrofi del locale vicini al focolare, si ritiene che tale fenomeno sia puntuale.

Scenario 6

La simulazione dello scenario 6 è caratterizzata dalla curva HRR in Fig. 58 che tiene conto dell'intervento dell'impianto sprinkler. Si considera la rimozione del sistema di compartimentazione dell'ambiente tramite serbatoi di fumo e si prevede una portata complessiva di estrazione pari a metà di quella dei ventilatori attivi nella soluzione conforme. I dati del focolare dipendenti dal tempo di simulazione sono riportati in allegato. In questo caso la post elaborazione dei risultati comprende i valori mediati nel tempo ogni 10 secondi, in modo da rimuovere le fluttuazioni delle grandezze misurate che intercorrono per pochi istanti di simulazione.

I risultati più significativi ottenuti dalla simulazione fluidodinamica sono riassunti nei grafici riguardanti:

- La curva HRR caratteristica dello scenario e modificata in funzione del tempo di attivazione ottenuto dallo scenario1 in Pyrosim

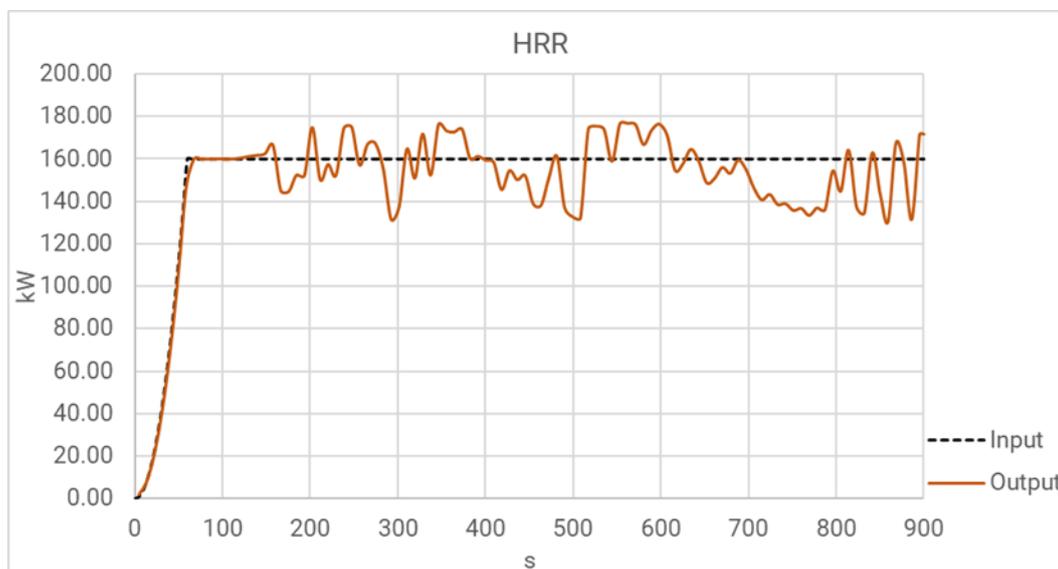


Fig. 63: Curva HRR, confronto tra input ed elaborazione del programma

- I valori registrati dai layer posizionati sul modello, che indicano l'altezza dello strato libero da fumo nel punto in cui è presente il layer, in relazione alla soglia di prestazione scelta

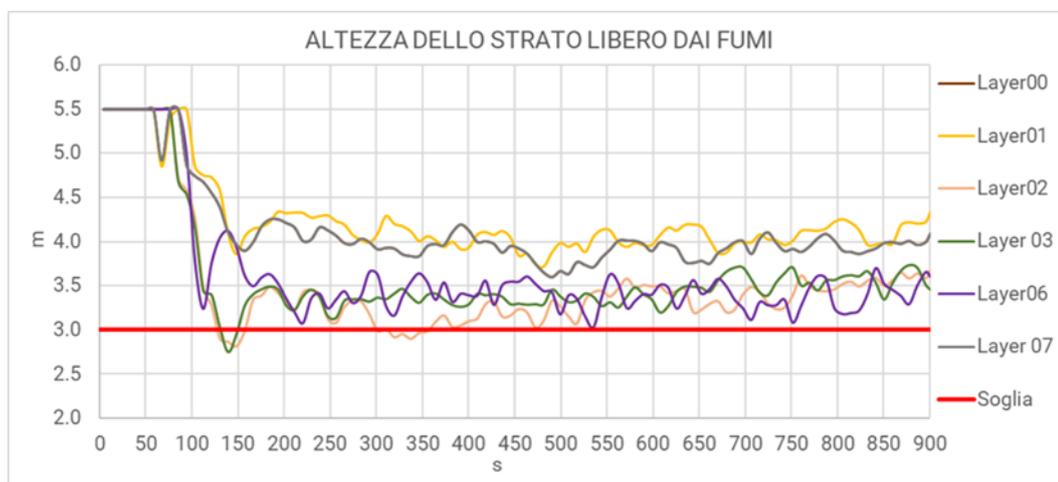


Fig. 64: Altezza dello strato libero da fumo nei punti di posizionamento dei layer

- La temperatura nel compartimento di incendio, all'altezza di 5,5 metri. Si specifica che non tutti i device sono riportati all'interno del grafico, in quanto si mostrano solo quelli che hanno cambiamenti sensibilmente riconoscibili rispetto le condizioni di esercizio

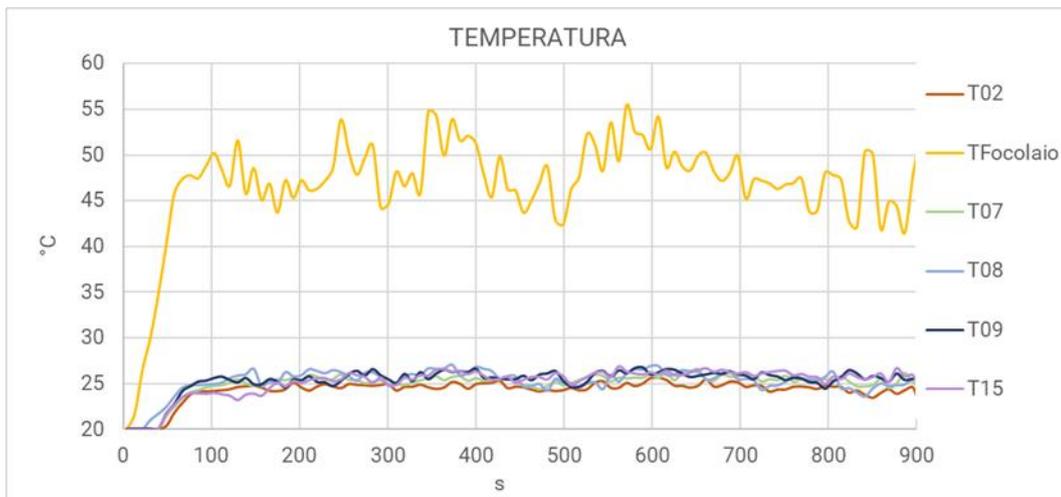


Fig. 65: Temperatura misurata dai device all'altezza di 5,5 metri dalla quota del pavimento

- La visibilità nel compartimento di incendio, all'altezza di soglia di 3 metri. Si specifica che non tutti i device sono riportati all'interno del grafico, in quanto si mostrano solo quelli che hanno cambiamenti sensibilmente riconoscibili rispetto le condizioni di esercizio.

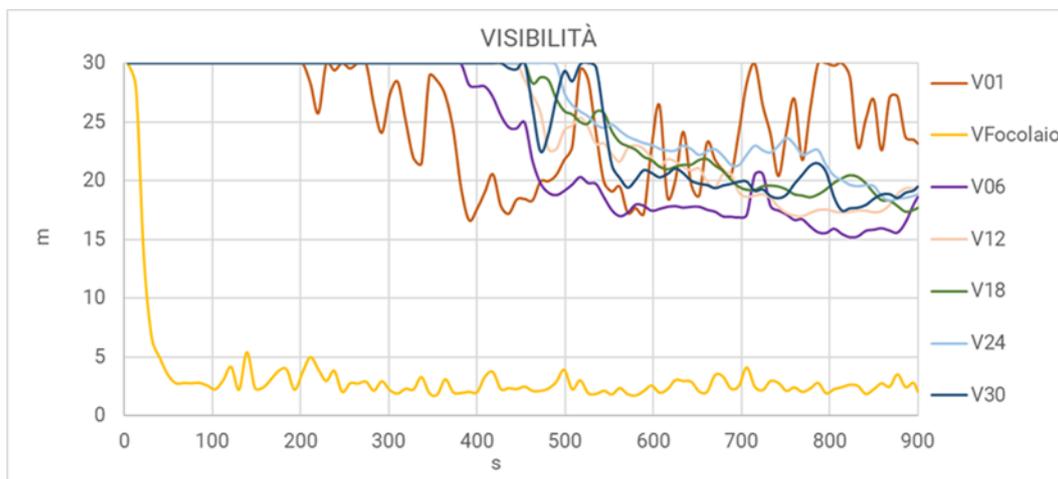


Fig. 66: Visibilità misurata dai device all'altezza di 3 metri dalla quota del pavimento

A commento dei risultati si rileva che:

- I valori delle temperature sono ben lontani dal raggiungimento delle curve di riferimento impostate come soglie di prestazione, anche per il punto direttamente al di sopra del focolare. Tuttavia, sarebbe opportuno studiare nello specifico ogni singolo elemento strutturale;

- I valori di visibilità sono molto promettenti in quanto, escludendo gli immediati pressi del focolare, la concentrazione di polveri è molto bassa in corrispondenza della soglia minima di altezza dello strato libero da fumi;
- Le altezze registrate dai layer sono abbastanza variabili ma accettabili in quanto solo per due layer, per poco tempo, la soglia proposta viene leggermente superata. Inoltre questi layer sono posizionati in punti specularmente vicini al focolare, dunque si ritiene che tale fenomeno irrisorio e puntuale.

A corredo dei risultati ottenuti, si riportano degli screen provenienti dai risultati della simulazione visibili in Smokeview.

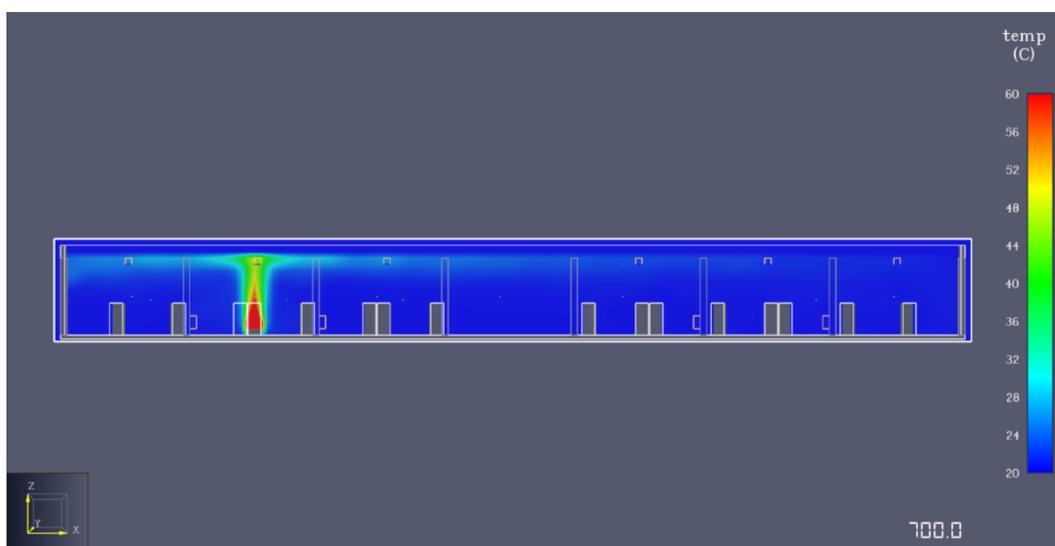


Fig. 67: Slice di temperatura $y=17,5$ metri all'istante di simulazione di 700 secondi

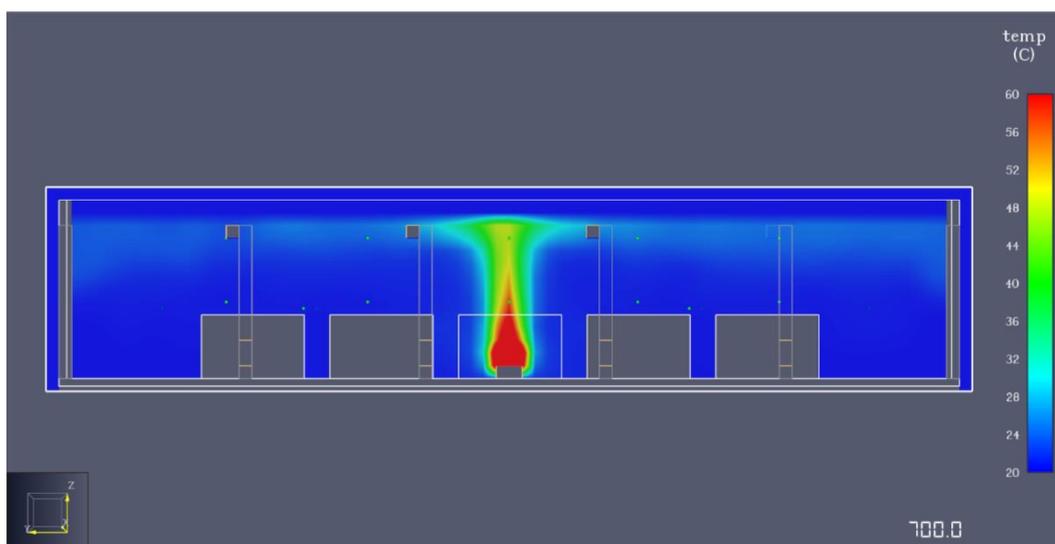


Fig. 68: Slice di temperatura in $x=15$ metri all'istante di simulazione di 700 secondi

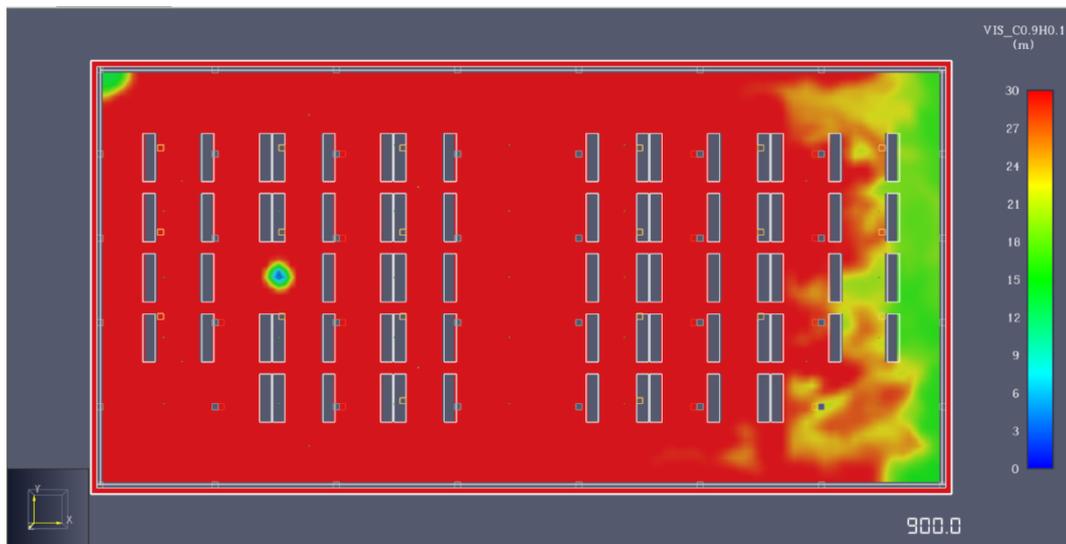


Fig. 70: Slice di visibilità posta in $z=2$ metri, a 900 secondi di simulazione, cioè il momento previsto di arrivo dei soccorsi

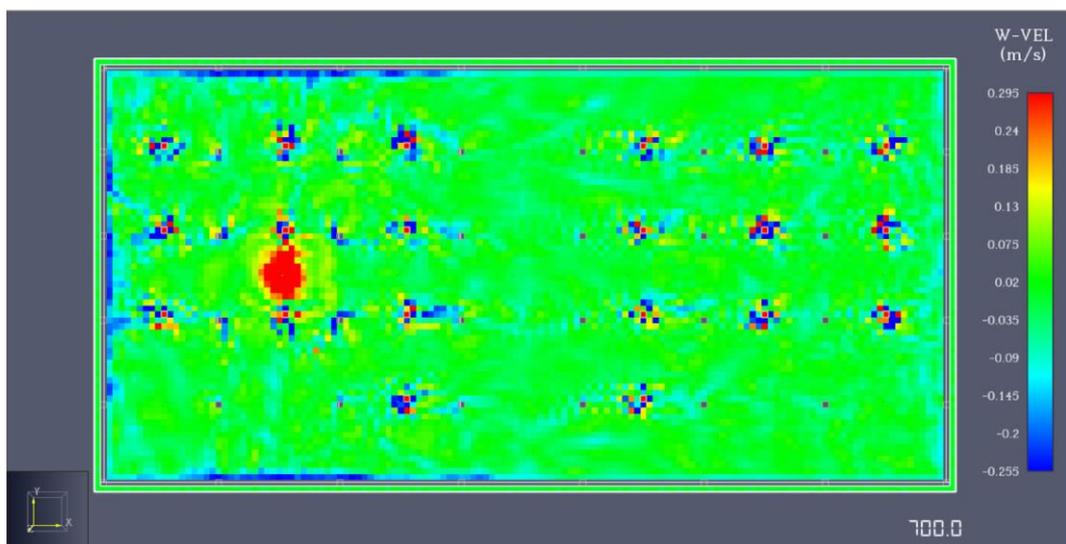


Fig. 69: Slice di velocità posizionata in $z=5,5$ cioè all'altezza delle bocchette dei ventilatori. Velocità lungo w dei flussi di aria

Da un'analisi complessiva dei risultati ottenuti dalle modellazioni di campo, si considera che entrambe le soluzioni approfondite negli scenari 5 e 6 siano accettabili.

Tuttavia si ritiene che la soluzione 6 sia quella più ottimizzata e adatta all'attività definita in quanto offre molteplici vantaggi rispetto allo scenario 5, oltre che alla soluzione conforme, come esplicitato nel §6.1. Inoltre, dai risultati di simulazione traspare come la riduzione della portata di immissione nel compartimento, che a

parità di grandezza delle bocchette di aerazione si traduce in una diminuzione della velocità dell'aria immessa nel locale, sfavorisca la propagazione dei prodotti della combustione, nonostante il focolare sia posizionato nel modo più svantaggioso possibile per il funzionamento del sistema di immissione a zone (vedi §6.2).

9 CONCLUSIONI

Questo studio è stato condotto al fine di dimostrare che le normative disponibili sul tema del controllo del fumo, in ambienti confinati, sono per alcuni aspetti ingiustamente limitative e spesso inapplicabili se usate in modo esclusivo. Si propone in alternativa un approccio progettuale che integra e ottimizza le prescrizioni con metodi ingegneristici, e valuta le soluzioni alternative con l'uso delle simulazioni fluidodinamiche.

Per quanto riguarda le prescrizioni normative, si nota che le soluzioni progettuali sono rivolte direttamente a sole tre tipologie di sistemi di evacuazione:

- Estrazione naturale dei fumi con immissione naturale di aria fresca;
- Estrazione forzata dei fumi con immissione naturale di aria fresca;
- Estrazione forzata dei fumi con immissione forzata di aria fresca.

Seguendo pedissequamente le prescrizioni, si nota che il progetto del sistema di *evacuazione naturale* risulta abbastanza lineare e semplificato grazie all'approccio tabellare proposto dalla norma UNI 9494-1. Non sembra presentarsi la lampante necessità di ottimizzare tale sistema per quanto riguarda i dispositivi di evacuazione. Viene richiesto al progettista di valutare l'interferenza tra impianto sprinkler e SENFC in modo che l'attivazione di uno non precluda il funzionamento dell'altro. Nel lavoro svolto si risolve tale problema considerando un ritardo di 60 secondi nell'attivazione dell'impianto SENFC rispetto a quello dell'impianto sprinkler, oltre che prevedere un'adeguata distanza tra gli ugelli e i punti di estrazione di aria. Tuttavia bisognerebbe valutare in che modo l'impianto di controllo ad acqua influisce sulla galleggiabilità dei fumi, che potrebbe essere ostacolata a causa di una ridotta differenza di temperatura tra i fumi e l'ambiente circostante. In tal caso, converrebbe applicare la tipologia di estrazione forzata che non basa il suo funzionamento sul principio di galleggiabilità dei fumi.

L'approccio prescrittivo applicato al sistema di *evacuazione forzata* risulta più complesso e articolato rispetto al precedente, ma anche esso basa i risultati principali sulla consultazione di tabelle prestabilite dal normatore seguendo la UNI 9494-2. Per questa tipologia di sistema, i risultati ottenuti sulle portate di evacuazione fanno da subito intuire la presenza di un grande margine di ottimizzazione: ci si riferisce ad una portata richiesta di estrazione di circa 248000 m³/h per garantire un'altezza libera da fumo di 3 metri in un serbatoio di fumo delle dimensioni di 30x35x6 metri. La

restrittività della norma per questa tipologia di sistema, risiede anche in una limitazione dell'altezza dello stoccaggio, oltre che all'obbligo di installazione delle barriere al fumo per la creazione di diversi serbatoi a soffitto. Tenendo inoltre in mente che la prevenzione incendi non contempla la presenza di incendi multipli, ne segue che solo i ventilatori di estrazione del serbatoio d'innescio vengono attivati, con il risultato di prevedere la restante parte degli estrattori inattivi in emergenza.

Considerando i vantaggi che se ne possono trarre, si propongono delle soluzioni alternative per il sistema di estrazione forzata dei fumi con immissione forzata di aria fresca. Dalla valutazione delle stesse ne scaturisce che la più conveniente, a confronto della soluzione conforme comprende le seguenti caratteristiche:

- Rimozione delle smoke barrier;
- Stesso numero di aperture di estrazione e di immissione;
- Tutti i ventilatori del sistema attivi in emergenza, con una portata complessiva di estrazione pari a 124000 m³/h, ovvero dimezzata;

La sostenibilità della soluzione alternativa ricavata consiste nell'ottenimento di una soluzione: meno complessa, che prevede minori interferenze tra maestranze in fase di esecuzione; di ridotto impatto economico, sia per quanto riguarda l'investimento iniziale in quanto la portata dei ventilatori risulta sensibilmente ridotta e in quanto assenti i costi dei componenti di compartimentazione, sia per quanto riguarda il costo di manutenzione ed eventuali sostituzioni dei componenti; di ridotto impatto energetico, in quanto viene ridotta sensibilmente la potenza richiesta dall'impianto elettrico dedicato.

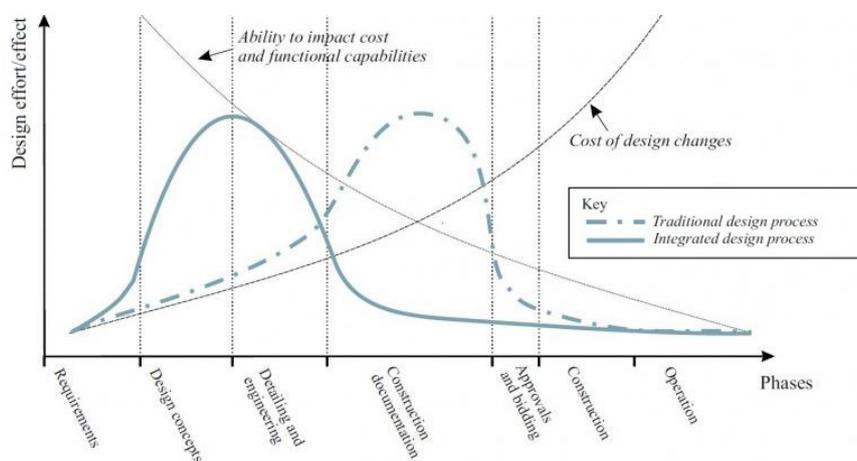
Dai risultati ottenuti se ne deduce in conclusione che la necessità ed efficacia di un approccio integrato tra indicazioni prescrittive e FSE è innegabile. Spesso l'intervento dei professionisti antincendio viene richiesto in contesti comuni ma che presentano specifiche esigenze per le quali è immediato fuoriuscire dal campo della diretta applicazione della norma. Dunque, la possibilità data dal Codice di effettuare valutazioni analitiche con metodi ingegneristici è sicuramente un beneficio imprescindibile. Si segnala tuttavia il bisogno di un aggiornamento delle disposizioni normative, in modo che possano stare al passo con i più recenti metodi di scelta e applicazione delle soluzioni tecnologiche e che approfondiscano e guidino un metodo di approccio ingegneristico specificamente in tema SEFFC, in maniera verosimile a quanto condotto per lo studio effettuato e a complemento delle indicazioni già presenti nella sezione Metodi del Codice di Prevenzione Incendi.

10 CONSIDERAZIONI PERSONALI E SVILUPPI FUTURI

Al fine di arricchire il lavoro condotto, si potrebbero implementare, con la stessa metodologia presentata, sistemi di evacuazione ed immissione del tutto naturale o mixata. In questo modo si pone una base per poter applicare l'approccio ingegneristico sui sistemi di controllo di fumo e calore per un qualsiasi caso studio di interesse, che andrebbe poi indagato nei riguardi delle specifiche peculiarità.

Un altro approfondimento potrebbe essere condotto in ottica di ottimizzare economicamente il sistema SEFFC, dapprima confrontando la soluzione conforme con la soluzione alternativa, considerando anche le parcelle dei progettisti, e secondariamente prevedendo un numero ridotto di ventilatori con molteplici aperture di evacuazione, in confronto a un sistema che prevede molti torrini verticali in corrispondenza delle aperture, considerando che le prestazioni richieste dalle canalizzazioni nel primo caso avrebbero un impatto non indifferente nei costi.

Infine, è una considerazione da affrontare sul fatto che, parte cruciale della modellazione architettonica integrata con il progetto antincendio è stata la personale intenzione di attuare una progettazione attenta al comportamento in servizio dell'edificio, che indaghi le possibili criticità, al fine di gestire le eventuali interferenze e problematiche scaturite. Questo approccio integrato di progettazione è di sicuro agevolato da un metodo di progettazione BIM e da un buon sistema di worksharing, che ben si relazionano con le premesse della FSE. Al contrario, la progettazione convenzionale spesso permette l'intervento del professionista antincendio in fase avanzata di progettazione o addirittura di costruzione. Sotto queste condizioni, nella maggior parte dei casi non si può fare a meno di applicare soluzioni alternative difficilmente integrabili con il resto del costruito e che possono rendere il risultato finale del tutto inefficiente e dispendioso sotto diversi aspetti di sostenibilità.



Curva di Mac Leamy: confronto Costi/Benefici tra un processo di progettazione integrata e uno sequenziale

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] P.C. Bowes, *Smoke and Toxicity Hazards of Plastics in Fire*, in *Annals of Occupational Hygiene*, 1974, n.17, pp. 143 – 156
- [2] C. Brugnoli, C. Signoretti, *Annuario statistico del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco*, Ministero dell'Intero Direzione Centrale per le Risorse Logistiche e Strumentali Ufficio di coordinamento tecnologico, 2020
- [3] Department for Communities and Local Government, *Fire Statistics In The United Kingdom*, Londra, 2011
- [4] D.M. 3 agosto 2015, *Testo coordinato dell'allegato I Codice di prevenzione incendi*, edizione in vigore al 19/11/2020
- [5] W. A. Harland, W. D. Woolley, *Fire fatality study*, University of Glasgow, Building Research Establishment, 1979
- [6] J. H. Klote, *Smoke Control*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5^aEd)*, New York, Springer, 2016
- [7] J.H. Klote, *Smoke Hazards of Air-Conditioning System*, NFPA Quarterly, Vol.33, n.2
- [8] J.H. Klote, *An Analysis of the Influence of Piston Effect on Elevator Smoke Control*, in NBSIR-88-3751, National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1988
- [9] A. La Malfa, S. La Malfa, R. La Malfa, *Ingegneria della sicurezza antincendio: progettazione con il metodo tradizionale e il codice di prevenzione incendi*, (9^a Ed.), Roma, Legislazione Tecnica, 2017
- [10] E.W. Marchant, *Effect of wind on smoke movement and smoke control systems*, in *Fire Safety Journal*, 1984, Volume 7, pp. 55-63
- [11] S. Marsella, L. Nassi, *L'ingegneria della sicurezza antincendio e il processo prestazionale*, Roma, EPC, 2010
- [12] K. McGrattan, G. Forney, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, Washington DC, NIST Special Publication 1019, 2013
- [13] G. Paparelli, *Sistemi di controllo di fumo e calore, progettazione, installazione, controllo, manutenzione*, Roma, Legislazione Tecnica, 2017
- [14] R. D. Peacock, P. A. Reneke, G. P. Forney, *CFAST- Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide*, Washington DC, NIST Technical Note 1889v2, 2021

- [15] D. A. Purser, J. L. McAllister, *Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5^aEd)*, New York, Springer, 2016
- [16] P. Rugarli (a cura di), *Norme tecniche per le Costruzioni integrate con la circolare applicativa, (5^aEd.)*, Roma, EPC, 2019
- [17] R. Sabatino, M. Lombardi, N. Sciarretta, M. Mazzaro, P. Cancelliere, L. Ponticelli, M. Di Felice, V. Cascioli, F. Cosi, L. Nigro, *La protezione attiva antincendio*, Milano, Inail, 2019
- [18] UNI 9494-1:2017, *Sistemi per il controllo di fumo e calore – Parte 1: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Naturale di Fumo e Calore (SENFEC)*
- [19] UNI 9494-2:2017, *Sistemi per il controllo di fumo e calore - Parte 2: Progettazione e installazione dei Sistemi di Evacuazione Forzata di Fumo e Calore (SEFFEC)*
- [20] UNI ISO/TR 13387-1:2008, *Ingegneria della sicurezza antincendio - Parte 1: Applicazioni dei concetti prestazionali antincendio nella definizione degli obiettivi di progetto*
- [21] www.lamilux.it/sistemi-di-lucernari/soluzioni/evacuazione-fumi-e-calore-efc.html (ultimo accesso: 21/11/2021)
- [22] www.elektrovent.it/it/prodotti/ (ultimo accesso: 21/11/2021)
- [23] www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media (ultimo accesso: 21/11/2021)
- [24] pages.nist.gov/cfast/ (ultimo accesso: 21/11/2021)
- [25] <https://www.sfpe.org/standards-guides/sfpehandbook> (ultimo accesso: 21/11/2021)

ALLEGATI

Lista delle tavole

Tavola 1: PLA_LOC_01, planimetria del locale, definizione maglia strutturale e posizionamento scaffalature;

Tavola 2: SEZ_LOC_01, prospetti e sezioni del locale;

Tavola 3: PLA_SEF_01, planimetria con sistema di evacuazione fumi, posizioni aperture per evacuazione naturale;

Tavola 4: PLA_SEF_02, planimetria con sistema di evacuazione fumi, posizione torrini per evacuazione e immissione forzata.

Tavola 5: PLA_FSE_01, planimetria di approccio ingegneristico, posizione device e slice in PyroSim

Tavola 6: PLA_FSE_02, planimetria di approccio ingegneristico, schema di estrazione ed immissione per la soluzione alternativa scelta

INPUT run CFAST

Scenario 1: assenza di impianto sprinkler, assenza di ventilatori, attivazione delle sole smoke barrier

Tempo s	RHR kW	Height m	Area m ²	CO Yeld kg/kg	Soot Yeld kg/kg
0	0.00	0.00	0.00	0.10	0.07
10	4.44	0.00	0.01	0.10	0.07
20	17.78	0.00	0.04	0.10	0.07
30	40.00	0.00	0.08	0.10	0.07
40	71.11	0.00	0.14	0.10	0.07
50	111.11	0.00	0.22	0.10	0.07
60	160.00	0.00	0.32	0.10	0.07
70	217.78	0.00	0.44	0.10	0.07
80	284.44	0.00	0.57	0.10	0.07
90	360.00	0.00	0.72	0.10	0.07
100	444.44	0.00	0.89	0.10	0.07
110	537.78	0.00	1.08	0.10	0.07
120	640.00	0.00	1.28	0.10	0.07

130	751.11	0.00	1.50	0.10	0.07
140	871.11	0.00	1.74	0.10	0.07
150	1000.00	0.00	2.00	0.10	0.07
160	1137.78	0.00	2.28	0.10	0.07
170	1284.44	0.00	2.57	0.10	0.07
180	1440.00	0.00	2.88	0.10	0.07
190	1604.44	0.00	3.21	0.10	0.07
200	1777.78	0.00	3.56	0.10	0.07
210	1960.00	0.00	3.92	0.10	0.07
220	2151.11	0.00	4.30	0.10	0.07
230	2351.11	0.00	4.70	0.10	0.07
240	2560.00	0.00	5.12	0.10	0.07
250	2777.78	0.00	5.56	0.10	0.07
260	3004.44	0.00	6.01	0.10	0.07
270	3240.00	0.00	6.48	0.10	0.07
280	3484.44	0.00	6.97	0.10	0.07
290	3737.78	0.00	7.48	0.10	0.07
300	4000.00	0.00	8.00	0.10	0.07
310	4271.11	0.00	8.54	0.10	0.07
320	4551.11	0.00	9.10	0.10	0.07
330	4840.00	0.00	9.68	0.10	0.07
340	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
350	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
360	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
370	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
380	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
390	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
400	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
410	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
420	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
430	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
440	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
450	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
460	5000.00	0.00	10.00	0.10	0.07
470	4747.82	0.00	9.50	0.10	0.07
480	4495.64	0.00	8.99	0.10	0.07
490	4243.45	0.00	8.49	0.10	0.07
500	3991.27	0.00	7.98	0.10	0.07
510	3739.09	0.00	7.48	0.10	0.07
520	3486.91	0.00	6.97	0.10	0.07
530	3234.73	0.00	6.47	0.10	0.07
540	2982.54	0.00	5.97	0.10	0.07
550	2730.36	0.00	5.46	0.10	0.07
560	2478.18	0.00	4.96	0.10	0.07
570	2226.00	0.00	4.45	0.10	0.07
580	1973.82	0.00	3.95	0.10	0.07
590	1721.64	0.00	3.44	0.10	0.07
600	1469.45	0.00	2.94	0.10	0.07
610	1217.27	0.00	2.43	0.10	0.07
620	965.09	0.00	1.93	0.10	0.07
630	712.91	0.00	1.43	0.10	0.07
640	460.73	0.00	0.92	0.10	0.07
650	208.54	0.00	0.42	0.10	0.07
660	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
...
900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Scenari 2÷6: presenza di impianto sprinkler

Tempo	RHR	Height	Area	CO Yield	Soot Yield
s	kW	m	m ²	kg/kg	kg/kg
0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.07
10.00	4.44	0.00	0.01	0.10	0.07
20.00	17.78	0.00	0.04	0.10	0.07
30.00	40.00	0.00	0.08	0.10	0.07
40.00	71.11	0.00	0.14	0.10	0.07
50.00	111.11	0.00	0.22	0.10	0.07
60.00	160.00	0.00	0.32	0.10	0.07
70.00	217.78	0.00	0.44	0.10	0.07
80.00	284.44	0.00	0.57	0.10	0.07
90.00	360.00	0.00	0.72	0.10	0.07
100.00	444.44	0.00	0.89	0.10	0.07
110.00	537.78	0.00	1.08	0.10	0.07
120.00	640.00	0.00	1.28	0.10	0.07
130.00	751.11	0.00	1.50	0.10	0.07
...
900.00	751.11	0.00	1.50	0.10	0.07

INPUT run PyroSim

Scenario 1: assenza di impianto sprinkler, assenza di ventilatori, attivazione delle sole smoke barrier

Tempo	Frazione
s	-
0	0.0000
10	0.0009
20	0.0036
30	0.0080
40	0.0142
50	0.0222
60	0.0320
70	0.0436
80	0.0569
90	0.0720
100	0.0889
110	0.1076
120	0.1280
130	0.1502
140	0.1742
150	0.2000
160	0.2276
170	0.2569
180	0.2880
190	0.3209
200	0.3556
210	0.3920
220	0.4302
230	0.4702
240	0.5120
250	0.5556
260	0.6009
270	0.6480

280	0.6969
290	0.7476
300	0.8000
310	0.8542
320	0.9102
330	0.9680
340	1.0000
350	1.0000
360	1.0000
370	1.0000
380	1.0000
390	1.0000
400	1.0000
410	1.0000
420	1.0000
430	1.0000
440	1.0000
450	1.0000
460	1.0000
470	0.9496
480	0.8991
490	0.8487
500	0.7983
510	0.7478
520	0.6974
530	0.6469
540	0.5965
550	0.5461
560	0.4956
570	0.4452
580	0.3948
590	0.3443
600	0.2939
610	0.2435
620	0.1930
630	0.1426
640	0.0921
650	0.0417
660	0.0000
...	...
900	0.0000

Scenari 2÷6: presenza di impianto sprinkler

Tempo s	Fraction
0.00	0.000
10.00	0.028
20.00	0.111
30.00	0.250
40.00	0.444
50.00	0.694
60.00	1.000
...	...
900.00	1.000