

3. SECONDA FASE: ANALISI QUANTITATIVA

3.1. MODELLAZIONE

Sulla base dell'obiettivo prefissato viene di seguito effettuata un'analisi quantitativa dello sviluppo dell'incendio mediante la quale si quantificano gli effetti dello scenario d'incendio definito di progetto. Mediante tale fase viene individuata la *definizione della curva di crescita – RHR*, al fine di poter comprovare le condizioni di sicurezza della stessa scaturenti da un'analisi condotta secondo l'azione reale del fuoco nonché il mantenimento della capacità portante della struttura.

Tale fase di analisi quantitativa è stata condotta mediante l'adozione di modelli numerici avanzati.

3.2. SCELTA DEL MODELLO DI CALCOLO –SOFTWARE FDS

L'attività di simulazione numerica è stata condotta applicando il modello di campo di simulazione dinamica mediante il programma **FDS** prodotto dal NIST- *National Institute of Standard Tecnology*.

La scelta del software e della tipologia di modello utilizzato rispetto ad altri programmi di simulazione risiede in una serie di motivazioni legate prettamente al campo nel quale il modello opera: il software FDS è un simulatore della dinamica evolutiva di un incendio mediante un modello di calcolo fluidodinamico capace di risolvere numericamente le equazioni di Navier –Stokes, adatte per un flusso a bassa velocità guidato dalla temperatura e specializzato per la produzione del fumo e del trasporto di calore. La turbolenza è trattata mediante la risoluzione delle formulazioni di Smagorinski tramite il metodo LES (LargeEddy Simulatiom). Il modello di combustione è "mixture fraction". La frazione di miscela è una quantità scalare, che è definita come la frazione di gas in un determinato punto del dominio del campo di flusso che è originato dal combustibile. Il modello assume la combustione come controllato dalla miscela, e la reazione del combustibile e dell'ossigeno è infinitamente veloce. Per simulare il trasporto radiativo, il modello utilizza il metodo FVM (Finite Volume Method).

Il software utilizzato è la versione 6.7.1. di FDS (fire dynamics simulator) sviluppato dai gruppi BFRL (building e fire research laboratory) del Nist degli Stati Uniti.

Il modello è stato validato per i materiali testati sperimentalmente dal Nist.

Il modello contenuto in FDS è stato originariamente sviluppato per analizzare incendi a scala industriale. Pertanto, l'affidabilità dei risultati ottenuti per mezzo del codice di calcolo è ragionevole se la dimensione del focolaio è circoscritta e le dimensioni dell'ambiente sono relativamente grandi rispetto a quelle della sorgente, come nell'analisi corrente

Un limite del programma, dal punto di vista applicativo, riguarda le risorse hardware per la sua esecuzione ed i tempi di calcolo. Nel caso di studio è stato utilizzato un processore Intel Xeon 6 Core con sistema operativo 64 bit Windows 7.

Di seguito verranno formalizzati tutti gli aspetti legati alla costruzione del modello dello scenario ipotizzato e verranno prospettati i risultati forniti in output dal programma e dall'applicazione *smokeview* di FDS.

3.3. ANALISI DI SENSITIVITA' E VALIDAZIONE DEL MODELLO

L'accuratezza del modello di calcolo utilizzato è stata analizzata nell'ambito della normativa ISO 23932 e la guida ASTM E 1355-97 "*Standard guide for evaluating the predictive capability of deterministic fire models*" a cui la stessa fa riferimento.

La valutazione di quanto il modello interpreta il comportamento reale del fuoco, sia in termini di attivazione delle testine sprinkler che di modalità di combustione del materiale, è stata valutata assicurando l'accuratezza (verifica) e l'affidabilità (validazione) dell'analisi numerica.

La rappresentatività del modello (validazione del modello fisico) rispetto al fenomeno reale è stata sviluppata, nell'ambito delle suddette procedure, sulla base di un confronto tra le previsioni relative alle simulazioni dei modelli e le misurazioni effettuate sperimentalmente (test presenti in letteratura).

Ai fini della verifica, che esamina l'aleatorietà dei dati in input e l'accuratezza di quelli in output, è stata condotta un'analisi di sensitività connessa alle proprietà termofisiche dei materiali. I calcoli di massima o le soluzioni in forma chiusa di pertinenza della verifica, che garantiscono che la "matematica" rappresentativa del modello fisico sia correttamente calcolata, vengono validati mediante una valutazione analitica (es. procedure Eurocodice 1 - EN 1991-1, curve parametriche, norme ISO etc) dell'intero fenomeno atteso.

AFFIDABILITÀ DELL'IMPIANTO SPRINKLER SU BASE SPERIMENTALE

L'analisi condotta ha preso in riferimento delle prove sperimentali inerenti l'affidabilità dell'impianto *sprinkler* utilizzato nell'ambito delle modellazioni e rappresentativo della realtà per l'attività.

Lo studio di riferimento *"Effect of an Obstructed Ceiling on the Activation Time of a Residential Sprinkler"* è stato condotto da R. Vettori del NIST (*National Institute of Standards Technology*); la scelta di tale studio risulta rappresentativo in quanto i risultati forniti permettono la validazione dei parametri in input riferiti allo sprinkler (es. temperatura di attivazione, tempo di risposta RTI) e relativi alla definizione del modello generale.

Nello specifico, l'analisi prevederà la comparazione dei tempi di risposta degli sprinkler e delle temperature registrate in prossimità degli stessi.

L'esperimento è stato condotto in un compartimento (**Fig. 14**) costituito da una stanza di dimensioni 9,2x5,6x2,6 m, dotata di una porta 0,91x2,1 m, rimasta chiusa. Una scala conduce a una seconda stanza di dimensioni identiche alla precedente al piano superiore. La fiamma utilizzata è costituita da un bruciatore a metano di dimensioni 0,7x1,0x0,31 m, la cui posizione è stata variata durante la serie di esperimenti: in corrispondenza di un angolo della stanza (*Corner*), in posizione centrale (*Detached*) e affiancato al muro (*Wall*). La massima potenza termica emessa dalla fiamma è pari a 1055 kW ed è stata raggiunta con una legge at^2 con tre differenti velocità di crescita: *veloce, media e lenta*.

Ai fini della verifica della riproduzione mediante *modellazione fluidodinamica*, l'esperimento è stato riprodotto, in relazione alla tipologia prevalente di stoccaggio e materiale presente tipico della realtà, per il caso di una velocità di crescita del tipo *fast* e con bruciatore posto in posizione centrale (*Detached*).

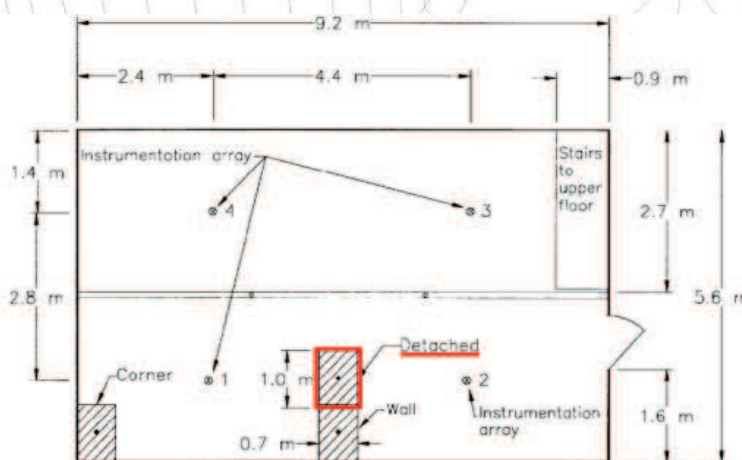


Fig. 13 – Pianta del locale oggetto dello studio.

Gli elementi tratteggiati indicano le tre posizioni in cui è stato posto il bruciatore nei diversi esperimenti, mentre i numeri indicano la posizione degli sprinkler; in rosso è evidenziato lo scenario replicato nel modello.

La suddetta configurazione è stata discretizzata nel modello del quale è riportata la rappresentazione del volume d'indagine (**Fig. 14**).

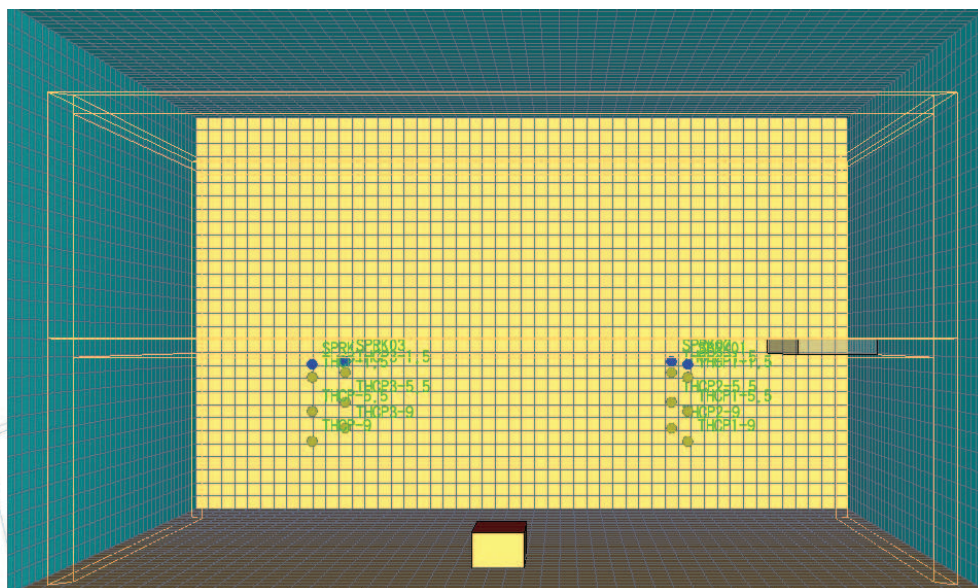


Fig. 14 – Vista 3D della riproduzione del test di Vettori tramite software FDS.

Il volume di calcolo utilizzato per discretizzare l'ambiente di simulazione (**validazione**) è stato pertanto comprovato mediante la riproduzione del suddetto studio all'interno di un compartimento di prova di dimensioni **10x8x6m** (numero di celle: 60 000), capace di assicurare una griglia di discretizzazione - mesh pari a 0,2x0,2x0,2m di tipo "fine", compatibile con gli oneri computazionali e con la massima potenza termica rilasciata dall'incendio.

Di seguito vengono riportati i dati di input del modello per il bruciatore e per gli sprinkler, ricavati dall'esperimento che è stato condotto da Vettori in scala reale e che sono stati riprodotti nel modello.

Parametri in input del bruciatore

- HRRPUA: 1758,3 kW/m²
- t_g : 100 s

Parametri in input degli sprinkler

- T di attivazione: 68 °C
- RTI: 50
- C factor: 0,7

L'affidabilità del modello, in linea con l'ambito del software sviluppato dal NIST, viene valutata sulla base dei tempi di attivazione della prima testina. Il modello è stato replicato anche all'interno di una mesh pari a 0,5x0,5x0,5 di tipo "moderata", che verrà utilizzata nelle modellazioni, con lo scopo di

effettuare l'analisi di sensitività del software. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella e mostrati nei seguenti grafici.

Parametro	Esperimento Vettori - NIST	Modello (mesh 0,20m)	Modello (mesh 0,50m)
Tempo di attivazione della prima testina sprinkler	46 s	50 s	62 s

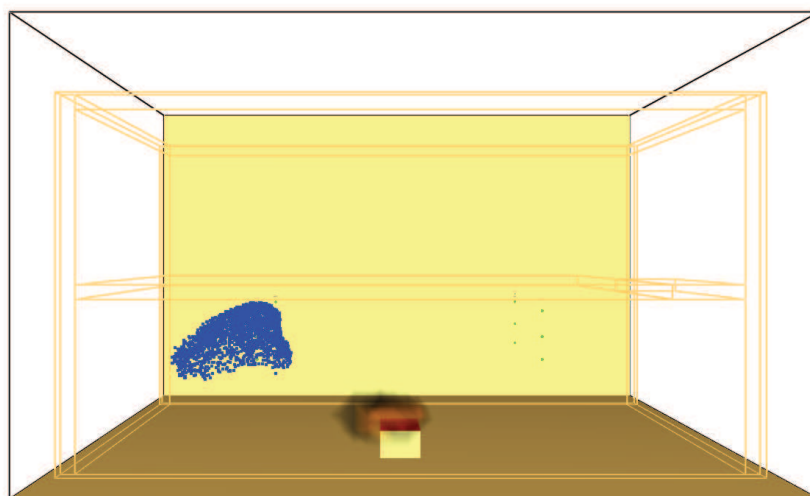
La modellazione ha mostrato dei risultati in termini di *tempi di attivazione* vicini e del tutto paragonabili all'esperimento in scala reale: come mostrato nella tabella sopra riportato, il divario tra i tempi di attivazione risulta pari a 4 s nel caso di *mesh fine* (0,2x0,2x0,2m); non si apprezzano variazioni significative anche nel caso di *mesh moderato* rispetto alla quale il divario è pari a 16 s.

Si precisa che il lieve discostamento nei tempi di attivazione risulta in ogni caso conservativo in quanto, in linea con la dinamica evolutiva dell'incendio, il sistema interviene in una fase più avanzata di sviluppo del fuoco, pertanto con effetti nel complesso più gravosi rispetto ai quali valutare il perseguimento degli obiettivi di sicurezza antincendio oggetto di analisi.

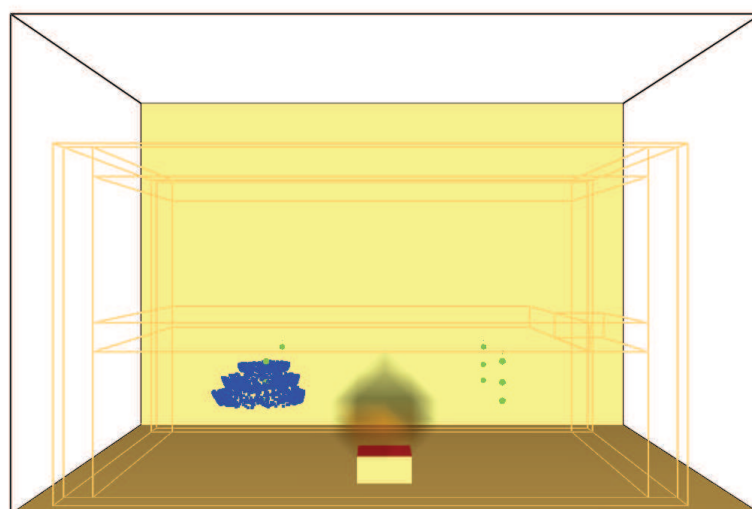
Ad avvalorare la comparabilità si evidenzia come, per entrambi i casi, la **prima testina** ad attivarsi è lo *sprinkler 1*, come anche attestato dai risultati ottenuti in termini di grafici tempo/temperatura.

L'attivazione del suddetto sprinkler avviene ad un tempo leggermente superiore rispetto a quello misurato nel caso sperimentale, risultando in linea e più conservativo rispetto al caso reale;

In **Figura 15** sono riportate le immagini ricavate dallo strumento *Smokeview* che permettono di osservare l'istante di attivazione degli sprinkler nel caso, rispettivamente, della modellazione con mesh da 0,20 e 0,50.



a) Time: 53.8



b) Time: 62.3

Fig. 15 – Immagini fornite dallo strumento *Smokeview* all’attivazione della prima testina sprinkler nel caso di a) mesh da 0,20 e b) mesh da 0,50

La validità della simulazione è avvalorata dalle temperature registrate da una termocoppia posta 15 cm al di sotto della testina, riportate in **Figura 16**.

Il grafico Temperatura/Tempo mostra un andamento generalmente corrispondente tra i due modelli, soprattutto per quanto riguarda la parte iniziale di crescita della curva, per i quali non si apprezzano sensibili variazioni nei valori registrati.

I risultati delle temperature sono riportati nella tabella di seguito:

Parametro	Esperimento Vettori - NIST	Modello (mesh 0,20m)	Modello (mesh 0,50m)
Temperature termocoppia all'istante di attivazione della prima testina	130°C	120°C	160°C

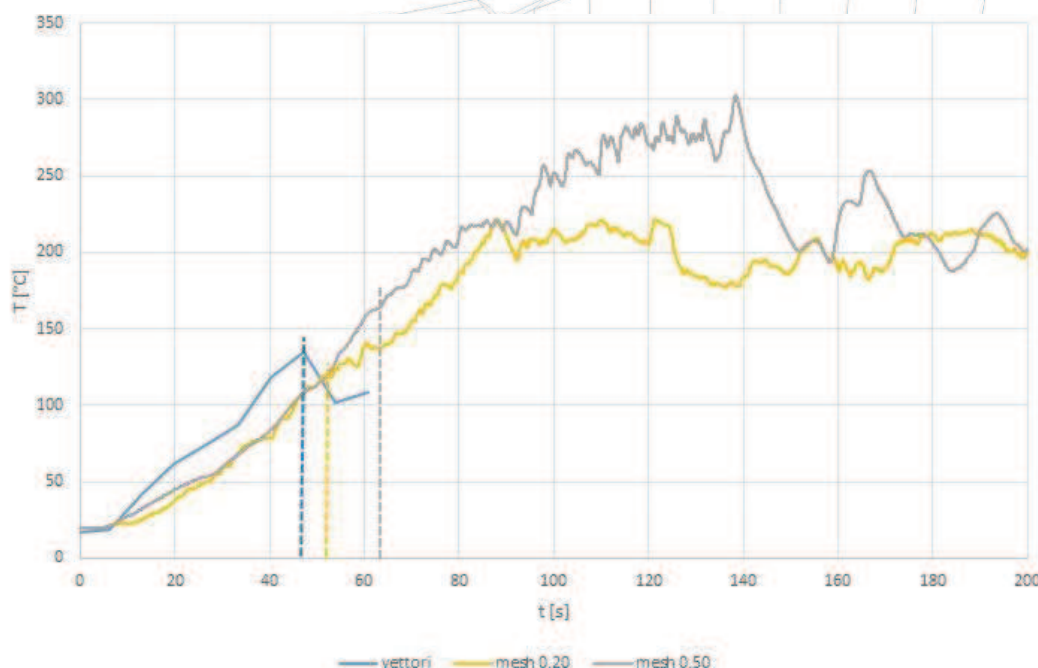


Fig. 16 - Grafico dell'andamento Temperatura/Tempo della comparazione tra i modelli ed il caso reale; Le linee tratteggiate indicano il tempo di attivazione della prima testina sprinkler in ogni caso considerato.

Sia per il caso di mesh “fine” che per il caso di mesh “moderata”, confrontando i valori di temperatura rilevati dalle termocoppie si nota che anche per questo parametro esiste una corrispondenza tra modello FDS e caso reale (test di Vettori), a meno di una tolleranza di circa 8%, considerata comunque accettabile ai fini del calcolo (l'ottenimento di temperature superiori è comunque giustificato dal ritardo nell'attivazione dello sprinkler).

Anche in questo caso si osserva che il lieve discostamento del software si realizza sempre a vantaggio di sicurezza in quanto un intervento lievemente ritardato dell'impianto corrisponde nel caso di mesh moderata a temperature superiori (di circa 30 °C) che rendono pertanto cautelative le verifiche delle soluzioni alternative perseguite.

MATERIALE COMBUSTIBILE

Nel presente magazzino, oltre che una grande quantità di materiale plastico (HDPE in forma granulare), sono presenti numerosi imballaggi per il confezionamento di quest'ultimo.

Gli **imballaggi** in questione, come già riportato nel capitolo 2.4 “Materiali e modalità di stoccaggio” sono **di natura plastica**; nello specifico:

- **Polipropilene** (le confezioni dei sacchi)
- **Polietilene e Polipropilene** (i grandi sacchi “big bag” sono costituiti da entrambi i tipi di plastica uniti per garantire resistenza e impermeabilità).

La presenza di materiale plastico influisce in maniera considerevole sullo sviluppo dell'incendio, per questo motivo sarà presa in esame la combustione delle materie plastiche, le quali causano una crescita **più rapida** della potenza termica e una maggiore propagazione dell'incendio.

Questa ipotesi risulta dunque essere più conservativa ai fini dell'analisi della sicurezza antincendio.

L'analisi condotta ha preso a riferimento dei test report sperimentali condotti in scala reale e inerenti nello specifico all'utilizzo di materiale plastico stoccato su pallet, nell'ambito delle modellazioni e rappresentative della realtà. Si può ragionevolmente considerare che la natura del materiale oggetto dell'analisi e la tipologia di prodotto stoccato all'interno del *magazzino*, confezionato all'interno di sacchi in polietilene e polipropilene, sia del tutto paragonabile al modello preso in considerazione.

Lo studio di riferimento "*RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests*" è stato condotto dalla *Lund University, Department of Fire Safety Engineering, Sweden Institute of Technology*, nell'ambito di una ricerca finanziata dallo "*Swedish Fire Research Board*", relativo alla combustione di una determinata quantità di materiale plastico (PET e casse di plastica) stoccati su pallet di legno. La scelta di tale studio risulta rappresentativa in quanto i risultati forniti permettono la validazione dei parametri in input riferiti all'unità di superficie (e. velocità di combustione, RHR/m^2 , tipo di fuoco) relativi alla definizione del modello generale.

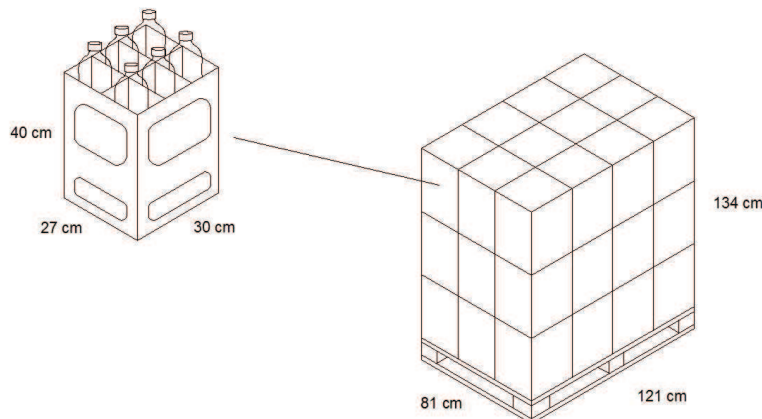


Fig. 17 – Schematizzazione del modello adottato nell'esperimento di validazione.

In termini di **geometria**, l'esperimento è stato realizzato utilizzando come materiale n.36 casse di plastica di 27x30x40cm, ognuna contenente 6 bottiglie in PET da 1,5L vuote (Swedish Standard Bottle). Nello specifico le 36 casse sono state disposte su 3x4x3 livelli (vedi **Figura 17**), per una dimensione d'ingombro totale di 81x120x120cm. Le suddette casse sono poi state impilate sopra un pallet di legno di misura 81x121x14cm. Il peso totale del modello è pari a 83,2 kg.

RHR (kW) vs Time (s)

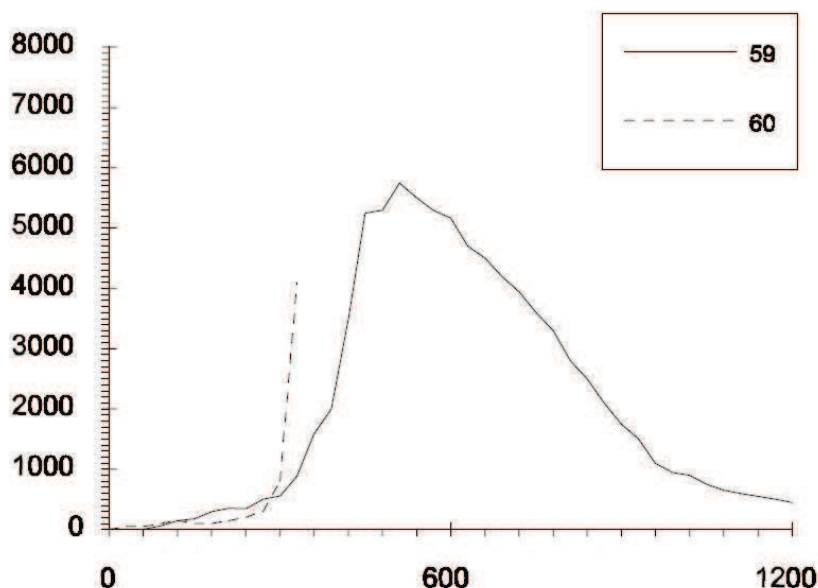


Fig. 18 – Andamento della potenza termica (curva RHR) nel tempo, rilevata durante il test effettuato sul pallet di casse di bottiglie in PET (Arvidson, M. & Persson, H. – Sprinkling av PET flaskor, ISSN 0283-1155, Sweden 1993).

Per quanto riguarda le quantità di combustibili desiderate, l'analisi di sensitività condotta sui parametri di input ha permesso di stabilire il campo di validazione delle singole grandezze fisiche introdotte. I risultati ottenuti in termini di potenza termica mediante l'applicazione del modello, nel campo di validazione dei suddetti parametri, mostrano risultati molto prossimi a quelli riportati nello studio di riferimento.

L'ambito di validazione dei parametri termofisici del materiale consente di apprezzare correttamente anche differenti densità e quindi diverse quantità dello stesso, nonché di garantire la corretta combustione delle sostanze sia in termini di tempi che di materiale coinvolto e di relativo apporto alla potenza termica ottenuta: infatti, rimanendo inalterato il comportamento fisico-chimico dei prodotti, la principale connessa variabile risulta rappresentata dalle tempistiche con cui viene completata la combustione in relazione alla quantità di materiale.

❖ Analisi di validazione

Il confronto tra le *previsioni del modello* e le misurazioni effettuate sperimentalmente del fenomeno fisico reale (**validazione**) è stato comprovato mediante la riproduzione del caso di studio attraverso la definizione di un volume di calcolo, utilizzato per discretizzare l'ambiente di simulazione, di dimensione tale da riprodurre correttamente la scala dell'esperimento.

Il volume d'indagine è stato discretizzato mediante l'utilizzo di maglie cubiche di dimensione 0.25x0.25x0.25 – mesh di tipo *“fine”*, e applicato nel campo di validazione di FDS, come valutato dal Nist. Inoltre, essendo stata utilizzata per il modello finale una mesh di tipo *“media”*, verrà svolta un'analisi della sensibilità per verificare il grado di accuratezza dell'approssimazione rispetto al volume utilizzato per la validazione.

Confronto andamento curve RHR

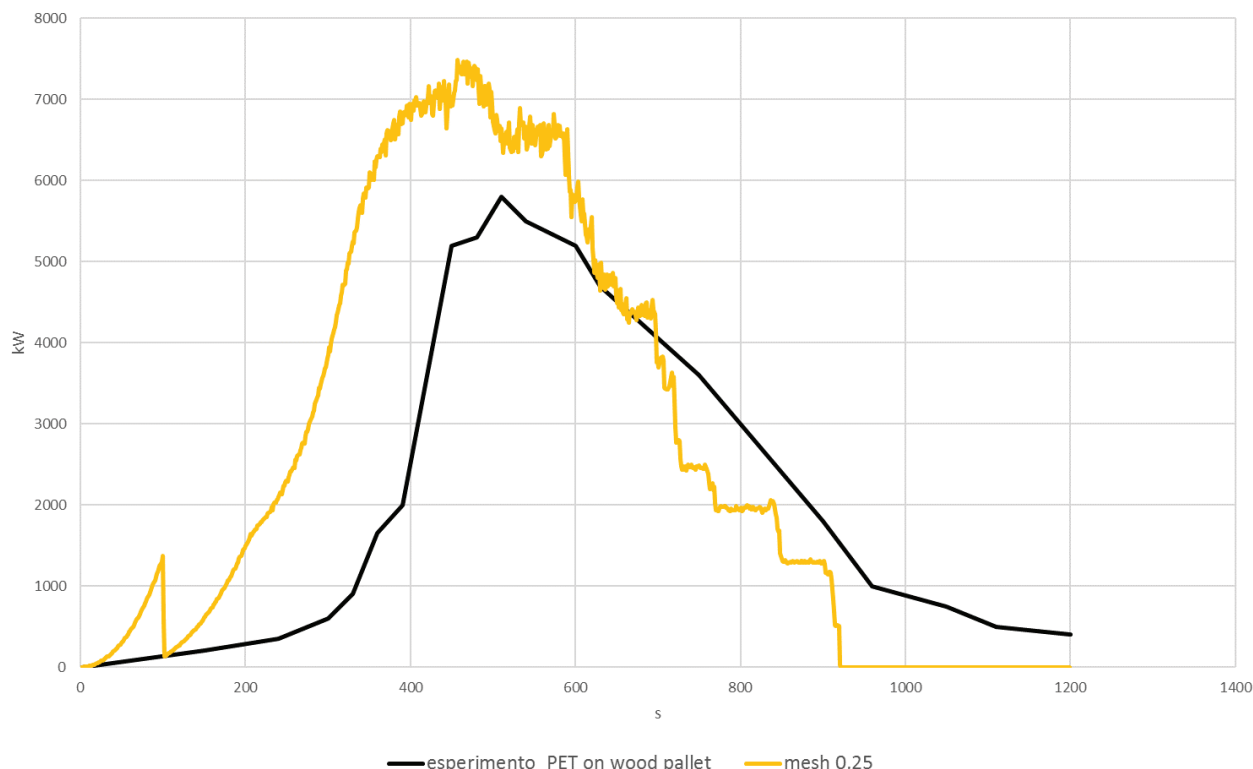


Fig. 19 Curva ottenuta da mesh fine (0.25m, in giallo) confrontata con la curva ottenuta in maniera sperimentale (*PET on wood pallet*) in nero.

La curva ricavata mediante l'applicazione del modello risulta in linea con quella di origine sperimentale in quanto descrittiva di **una dinamica che, caratterizzata da una iniziale crescita più rapida, raggiunge un valore di picco maggiore riscontrato sperimentalmente (7500 > 5500 kW), in un periodo di tempo di circa 500 sec, per poi decrescere, con tempistiche che risultano del tutto corrispondenti a quelle rilevate sperimentalmente (circa 900 s).**

Tali risultati conferiscono valore e rigore al modello impiegato: il valore massimo di RHR è superiore rispetto alla curva sperimentale. **L'incendio simulato con FDS risulta più cautelativo e conservativo rispetto a quello ottenuto dallo studio di riferimento in quanto produce effetti termici più gravosi per la struttura in oggetto.**

Si precisa che i risultati del test di validazione, che riproduce il procedimento caratteristico del test di prova, attestano l'affidabilità del modello in quanto rappresentativo della realtà. L'affidabilità di tali risultati può pertanto essere estesa anche alle analisi che verranno condotte per il magazzino in oggetto, nei quali la potenza termica della fonte d'innesco sarà realisticamente ridotta alla minima potenza termica sufficiente a generare un innesco, ottenendo dei risultati altrettanto attendibili e conservativi.

Verranno pertanto adottati i seguenti parametri di riferimento:

PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE	VALORE e DESCRIZIONE
Descrizione materiale	HDPE – <i>High Density Polyethylene</i>
Mass Loss Rate, m_s	0,033 kW/m ² <i>High density polyethylene thermal degradation</i>

	<p><i>and gaseous compound evolution in a cone calorimeter</i> – Jocelyn Luche, Etienne Mathis, Thomas Rogaume, Franck Richard, Eric Guillaume;</p> <p><i>B.T. Rhodes, J.G. Quintiere, Burning rate and flame heat flux for PMMA in a cone calorimeter, Fire Safety J. 26 (1996) 221–240;</i></p> <p><i>D. Hopkins, Predicting the Ignition Time and Burning Rate of Thermoplastics in the Cone Calorimeter, NIST-GCR-95-677, National Institute of Standards and Technology, 1995.</i></p>
Velocità di crescita, t_g	<p>150 s (velocità di crescita media)</p> <p><i>High density polyethylene/cenosphere composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes: Mechanical, thermal and fire retardancy studies</i> – V.C. Divya, M. Ameen Khan, B. Nageshwar Rao, R.R.N. Sailaja</p>
Temperatura d'ignizione	<p>350 °C</p> <p><i>High density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter</i> – Jocelyn Luche, Etienne Mathis, Thomas Rogaume, Franck Richard, Eric Guillaume</p>
Conducibilità	<p>0,4 W/mK</p> <p><i>High density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter</i> – Jocelyn Luche, Etienne Mathis, Thomas Rogaume, Franck Richard, Eric Guillaume</p>
Calore specifico	<p>2 kJ/kgK</p> <p><i>High density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter</i> – Jocelyn Luche, Etienne Mathis, Thomas Rogaume, Franck Richard, Eric Guillaume</p>

Fig. 20 – Valori della burning rate, calore specifico e conducibilità termica, dedotti da letteratura.

❖ Analisi di sensitività

I risultati ottenuti dall'utilizzo di maglie cubiche di dimensione 0.25x0.25x0.25 - di tipo "fine" sono state confrontate con quelli ottenuti con delle maglie di dimensione pari a 0.50x0.50x0.50 - di tipo "medio".

I risultati ottenuti nei due casi di analisi, riportati di seguito in termini di *Heat Release Rate*, mostrano il raggiungimento di un medesimo valore di picco (7500KW), associati ad effetti termici sulle strutture del tutto analoghe. Inoltre, si osserva che il leggero ritardo nell'andamento complessivo della curva di rilascio con mesh di tipo "medio" trova riscontro con la curva rilevata

sperimentalmente, in cui la fase di crescita risulta lievemente meno rapida rispetto ai risultati ottenuti con mesh di tipo “fine”.

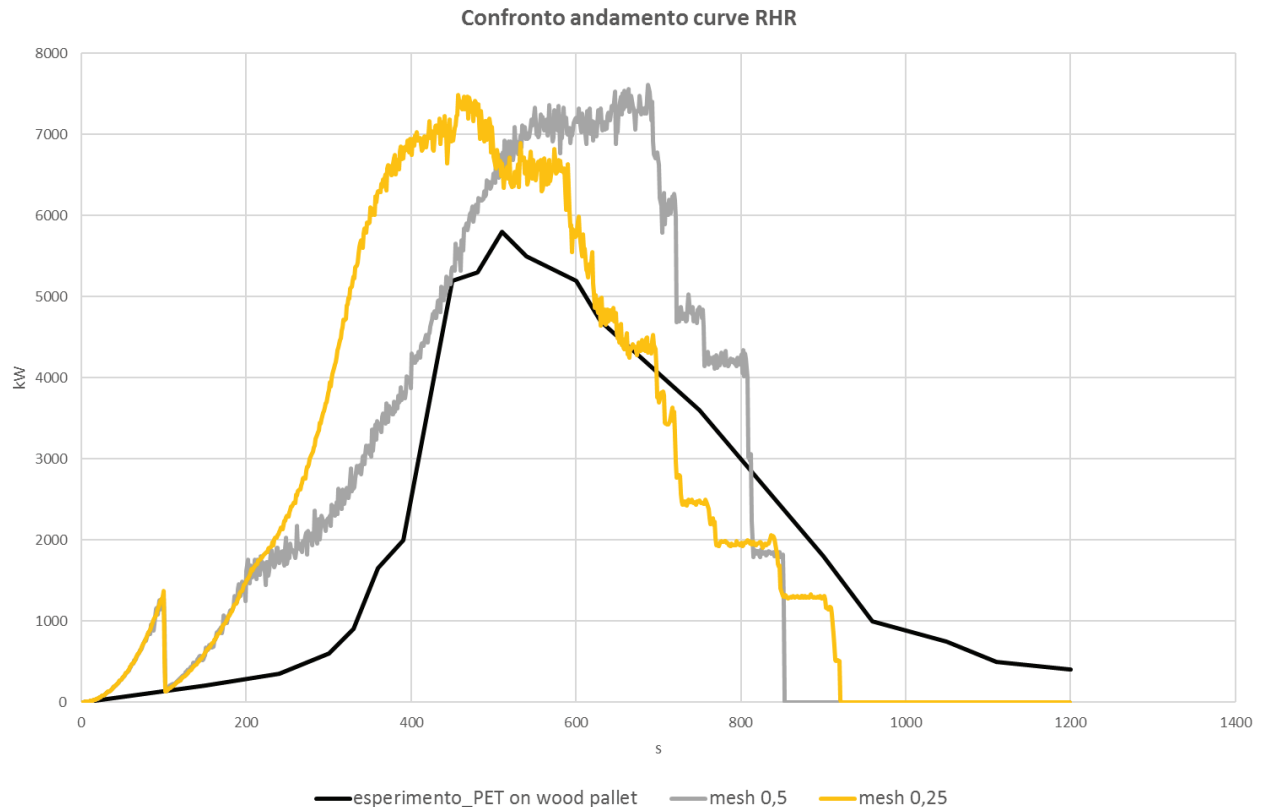


Fig. 21 – Raffronto della fase di crescita della *potenza termica* ottenuta con mesh fine (0.25m, in giallo) e mesh moderata (0.5m, in grigio) confrontate con la curva ottenuta in maniera sperimentale (*PET on wood pallet*) in nero.

❖ **Verifica analitica**

Ai fini della rappresentatività del modello in termini di risultati dello stesso tra i risultati rispetto al fenomeno fisico atteso (**verifica**), si riportano di seguito i valori relativi alla massima potenza termica emessa negli incendi che risultano controllati dalla combustibile. Tale formula è riportata dal paragrafo M.2.6.3 del D.M.3/8/2015:

$$RHR_{max} = RHR_f \cdot A_f$$

dove:

- RHR_f è il valore della potenza termica massima rilasciata per unità di superficie (kW/mq). Tale valore viene desunto da normativa di cui al DM 3/8/2015 ed assunto come 500 kW/mq nell’ambito di calcolo mediante focolare predefinito;
- A_f è l’area della superficie di compartimento interessata dalla combustione [m²].

Per il caso in esame risulta che $RHR_{max} = 7'500 \text{ kW} > 5'500 \text{ kW}$ da modello, avente lo stesso ordine di grandezza, ma descrittiva di un incendio più intenso e conservativo, in quanto capace di sollecitare in maniera più gravosa le strutture.

CARRELLI ELEVATORI

Per la caratterizzazione della combustione di un carrello elevatore si farà riferimento alla curva descritta nello studio *"Performance based coupled CFD-FEM analysis of 3-bay high industrial hall under natural fire"* di M. Malendowski, A. Glema e W. Szymkuc del Politecnico di Poznan (Polonia), assumendo che la massa totale dei materiali combustibili che compongano un carrello elevatore non ecceda i 320 kg su un totale di 3500 kg, la curva analitica di riferimento non differisce sensibilmente da quella di un veicolo ordinario.

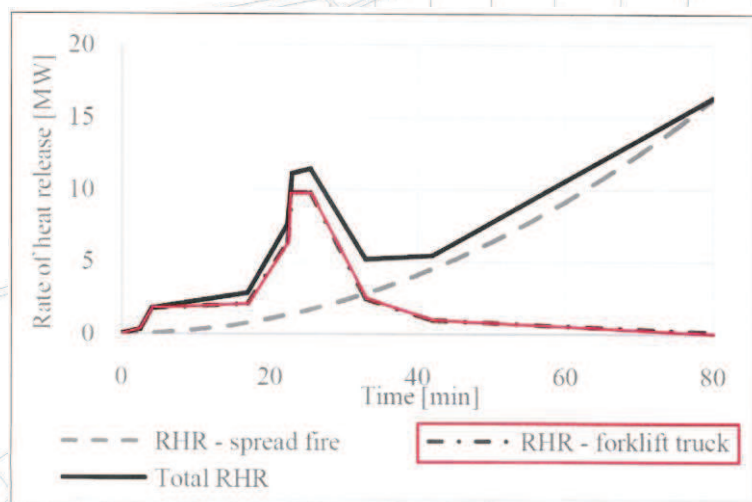


Fig. 22 – Andamento della potenza termica nel tempo per un carrello elevatore.

L'adozione di tale tipologia di curva trova una specifica applicazione in quanto più pertinente nell'ambito dal quale è stata derivata.

Come infatti specificato da fonti autorevole e condivise, come il *Codice di prevenzione incendi* – D.M. 03/08/2015, la curva RHR basata esclusivamente sul tempo caratteristico (descritta nello specifico *paragrafo M.2.6 – "Stima della Curva RHR"*), non trova applicazione diretta in quanto incapace di rappresentare nella totalità i fenomeni di maggiore interesse e di definire in dettaglio la fase di crescita del fuoco, che per l'analisi in oggetto assume maggiore rilevanza relativamente all'intervento dell'impianto automatico sprinkler.

❖ Analisi di validazione

La modellazione ha interessato una stanza di dimensioni 10,0mx10,0mx4,0m, non confinata superiormente, capace di riprodurre realisticamente le condizioni di **ventilazione** rilevate sperimentalmente.

Il volume di calcolo utilizzato per discretizzare l'ambiente di simulazione (**validazione**) presenta dimensioni **15,0x15,0x10,0m** (n. di celle 144000), capace di assicurare una griglia di discretizzazione - mesh pari a 0.25x0.25x0.25m di tipo "fine", compatibile con gli oneri computazionali e con la massima potenza termica rilasciata dall'incendio.

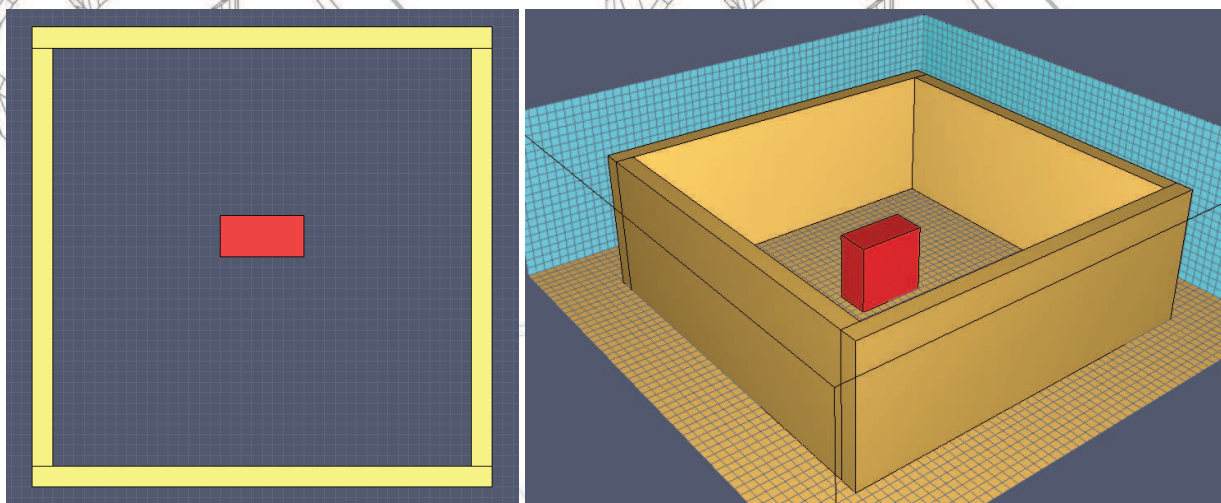


Fig. 23 – Modello della camera di prova.

La **Figura 24** mostra il confronto dei dati di output del modello di calcolo raffrontati con quelli sperimentali.

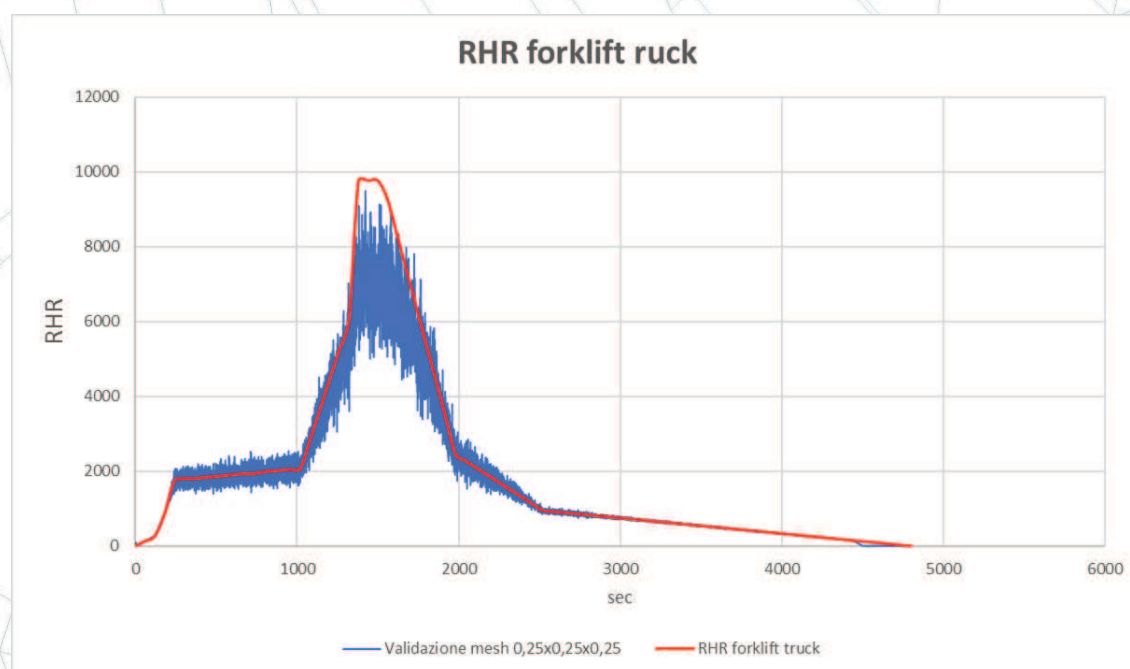


Fig. 24 – Confronto tra la curva RHR sperimentale e la curva risultante dalla simulazione.

La curva ricavata mediante l'applicazione del modello risulta in linea con la curva analitica attribuita in quanto descrittiva di **una dinamica di crescita e di sviluppo che ricalca la curva di potenza termica RHR**, raggiungendo, con le medesime tempistiche (1400 s) il picco di potenza termica (9760 kW); successivamente la curva rappresentativa dell'incendio decresce fino ad abbattersi definitivamente al tempo di 4800 s (= 80 minuti). Nel complesso l'evoluzione dell'incendio modellato sviluppa nel periodo considerato un'energia termica e può pertanto risultare rappresentativa dell'**evento termico descritto dalla curva analitica individuata**.

Verranno pertanto adottati i seguenti parametri di riferimento:

PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE	VALORE
Potenza del bruciatore	4880 kW/m ² (RHR _{MAX} = 9760 kW)

❖ Analisi di sensitività

I risultati ottenuti dall'utilizzo di maglie cubiche di dimensione 0,25 m × 0,25 m × 0,25 m – di tipo **"fine"** – sono state confrontate con quelli ottenuti con delle maglie di dimensione pari a 0,5 m × 0,5 m × 0,5 m – di tipo **"moderata"**: i due casi, riportati di seguito in termini di *Heat Release Rate*, mostrano andamenti corrispondenti. Si evidenzia, inoltre, come mostrato in **Figura 25**, che la modellazione a maglia "moderata" (0,50) approssima in maniera più cautelativa l'andamento della curva HRR della prova sperimentale.

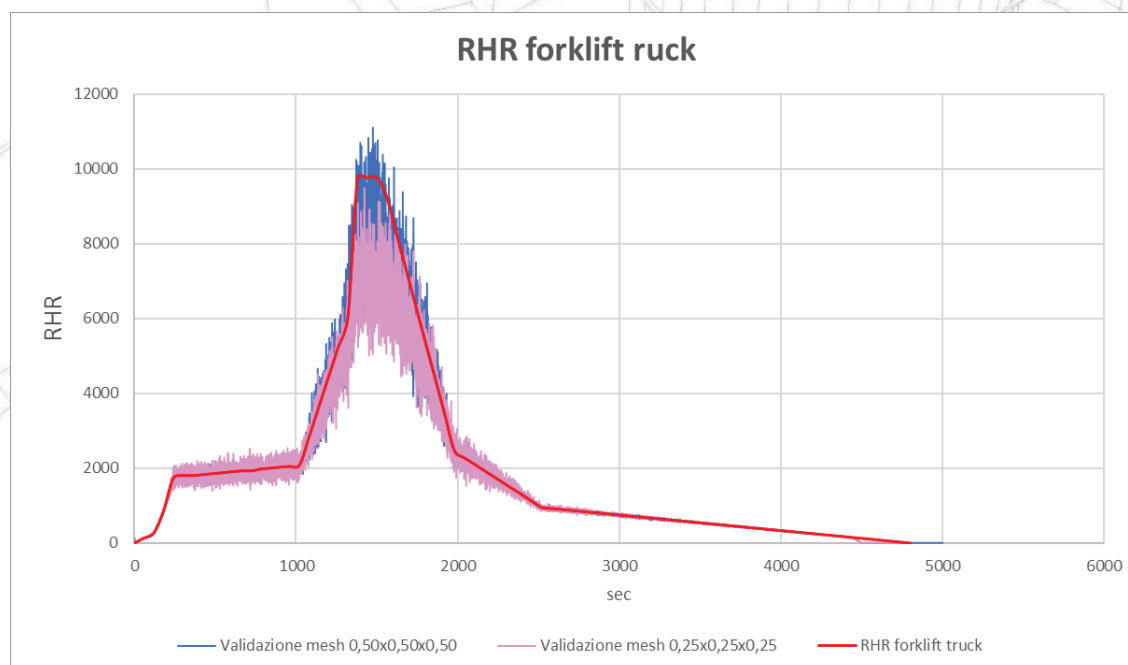


Fig. 25 – Confronto tra la curva RHR sperimentale e le curve risultanti dalle simulazioni con mesh 0,25 e 0,50.

3.4. DEFINIZIONE DELLA SOLUZIONE PROGETTUALE

Prima di pervenire alla definizione della soluzione progettuale finale sono state portate a termine numerose modellazioni mediante le quali si è ricercato, in funzione dell'obiettivo e del livello di prestazione stabilito, la situazione di progetto che rispetta le soglie di prestazione stabilite.

Le modellazioni e gli scenari incidentali preliminari condotti hanno indagato e ricercato le seguenti condizioni incidentali:

- ❖ individuazione della corretta geometria e condizioni al contorno rispetto all'intero volume d'indagine;
- ❖ grado di coinvolgimento dei materiali ed eventuale propagazione alle aree di stoccaggio adiacenti a quella interessata dall'innesco, nell'intervallo di tempo considerato;

- ❖ scenari d'incendio più gravosi in termini di propagazione del fuoco, di condizioni al contorno (apertura/chiusura ventilazione), dei prodotti della combustione, temperature rilevate, e in relazione alle verifiche del mantenimento della capacità portante delle strutture;
- ❖ individuazione del più idoneo layout distributivo dei materiali e delle relative altezze massime di stoccaggio;
- ❖ analisi dei tempi di attivazione delle testine sprinkler (e relativo rilascio termico).

Tutti gli scenari d'incendio e le soluzioni preliminari indagate hanno portato alla definizione della soluzione progettuale finale. Di seguito si riportano tutti gli aspetti che portano alla definizione del modello ed ai risultati ottenuti.

GEOMETRIA DEL VOLUME D'INDAGINE

L'applicazione del modello scelto ha interessato l'intero *magazzino* adibito a deposito di materie di natura plastica: il volume di calcolo utilizzato per discretizzare l'ambiente di simulazione ha dimensione di circa 21 m x 34 m avente altezza compresa tra 6,3m e 6,45m e struttura in calcestruzzo (64.000 celle totali). Verrà utilizzata una griglia di discretizzazione - mesh pari a 0.50x0.50x0.50m di tipo "media", compatibile con gli oneri computazionali e con la massima potenza termica rilasciata dall'incendio.

La geometria dei materiali considerata risulta conforme alle modalità di immagazzinamento del deposito: come si osserva dal layout dell'attività e come indicato nell'elaborato grafico progettuale *Tav. F1 Planimetria Antincendio Prestazionale FSE*, l'immagazzinamento dei materiali si realizza attraverso 2 aree di stoccaggio, denominate *Area A* ed *Area B* rispettivamente di dimensioni pari a circa 12 m x 12 m, composta da 80 pallets di materiale confezionato in "big bag" aventi altezza pari a 2m (*Area A*), e di dimensioni 14,7 m x 20 m composta da 143 pallets della medesima natura, eccezion fatta per un limitato numero di moduli stoccati in grandi sacchi di polipropilene e polietilene su n.2 livelli (*Area B*).

Di seguito, si ripropone la geometria del volume di indagine del compartimento, modellato ed utilizzato come base della simulazione fluidodinamica.

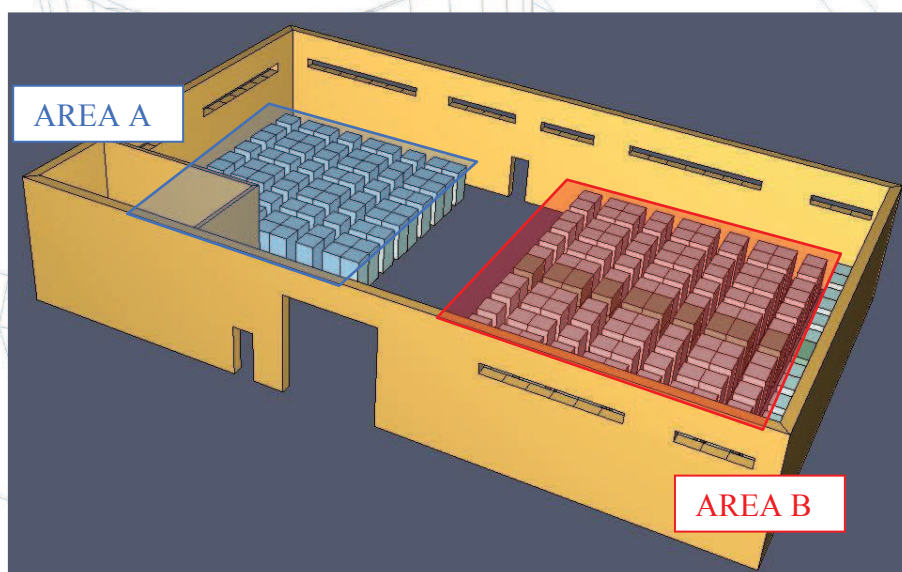


Fig. 26 – Volume di calcolo della simulazione fluidodinamica.

L'incendio simulato vede l'innesco dei materiali mediante la definizione delle proprietà di un bruciatore, conforme all'analisi di validazione, posto in corrispondenza della superficie di un macroelemento rappresentativo del materiale stoccato, alla base di quest'ultimo.

Il bruciatore è stato definito come una pompa di calore di potenza termica pari a 250 kW/mq che in relazione alla tipologia del materiale e alla relativa pezzatura e condizione di stoccaggio, tipiche dello specifico magazzino in oggetto, rappresenta l'energia necessaria per innescare il materiale.

Per gli scenari S2a e S2b, l'innesco è stato posto, secondo quanto già stabilito dagli scenari d'incendio individuati, in corrispondenza della superficie inferiore di un elemento solido collocato in posizione centrale rispetto a ciascuna area di stoccaggio (*Area A* e *Area B*). Tale posizione dell'innesco è stata scelta per conferire un ulteriore carattere conservativo alla simulazione in quanto capace di massimizzare l'azione termica per effetto di una maggiore propagazione dei materiali lungo lo sviluppo orizzontale.



Fig. 27 – Collocazione in pianta dell'innesco termico per gli scenari d'incendio S2a e S2b all'interno del volume di calcolo della simulazione.

Per lo scenario S2c l'innesco è stato localizzato in corrispondenza della corsia di manovra dei carelli elevatori, in posizione centrale tra le *Aree A* e *B*.



Fig. 28 – Collocazione in pianta dello scenario d'incendio S2c all'interno del volume di calcolo della simulazione.

In linea con le modalità gestionali dell'attività, le condizioni di **ventilazione** introdotte nel modello sono associate alla prevalente apertura dei portoni. Inoltre, un ulteriore contributo deriva dall'apertura delle finestre asservite all'attivazione del sistema di rivelazione automatica.

A tal proposito si precisa che ai fini delle successive simulazioni fluidodinamiche l'impianto di rivelazione ed allarme verrà considerato esclusivamente dal punto di vista analitico mediante il tempo $t_{det} + t_1 = 180s$ che, per il magazzino indagato, è l'intervallo massimo che può intercorrere tra il principio d'incendio e la diffusione dell'allarme previsto come da *Codice di Prevenzione Incendi* commentato a cura di F. Dattilo e C. Pulito.

Dispositivi di controllo - Termocoppie

Nel volume di indagine sono state introdotte delle *termocoppie* capaci di catturare nella globalità l'azione termica sviluppata dall'incendio ed a cui sottoporre le strutture ai fini della verifica del mantenimento della capacità portante. Tali dispositivi sono così predisposti:

- n.1 termocoppia (**THCP_6.3**) per monitorare la temperatura raggiunta in corrispondenza dell'intradosso della struttura di copertura a 6.3m da terra;
- n.4 termocoppie (**THCP_dx**; **THCP_sx**; **THCP_sopra**; **THCP_sotto**) collocate in pianta rispettivamente alla distanza di 1,5m a destra, a sinistra, sopra e sotto l'innesco di modo da monitorare la temperatura nell'intorno del cimento termico, mantenendone la quota in corrispondenza dell'intradosso della trave di copertura (6.3m da terra);
- al fine di indagare gli effetti di propagazione da un'area di stoccaggio all'altra, n.3 termocoppie (**THCP_Area A/B**; **THCP1_Area A/B**; **THCP2_Area A/B**) in corrispondenza dell'Area A oppure dell'Area B a seconda della posizione dell'innesco: nel caso lo scenario d'incendio si trovi nell'Area A le termocoppie saranno in corrispondenza dell'Area B e viceversa, posizionate alla quota dell'intradosso della struttura portante (a 6.3m da terra);
- n.8 termocoppie (**P_1**; **P_2**; **P_3**; **P_4**; **P_5**; **P_6**; **P_7**; **P_8**) in corrispondenza dei pilastri del deposito, collocate a una quota intermedia rispetto all'altezza complessiva del magazzino (a 3m da terra).

Le termocoppie collocate alla quota di 6,3m (**THCP_6.3**, **THCP_dx**; **THCP_sx**; **THCP_sopra**; **THCP_sotto**), per la loro collocazione in corrispondenza dell'intradosso della trave e per la loro posizione sopra la zona interessata dall'incendio (si vedano le **Figure 29, 30 e 31**), permettono di registrare gli effetti diretti dell'incendio sulla struttura portante e pertanto attestare il mantenimento della capacità portante della stessa sotto la specifica azione termica del fuoco.

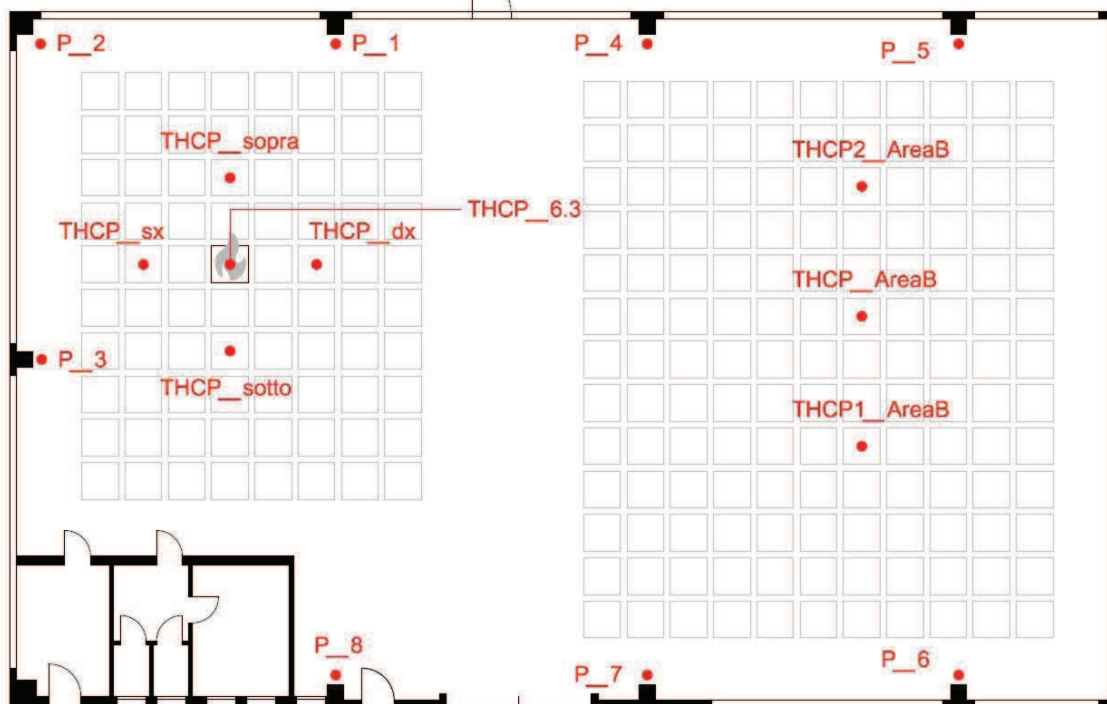


Fig. 29 – Collocazione in pianta delle termocoppie per lo scenario d'incendio collocato nell'Area A.

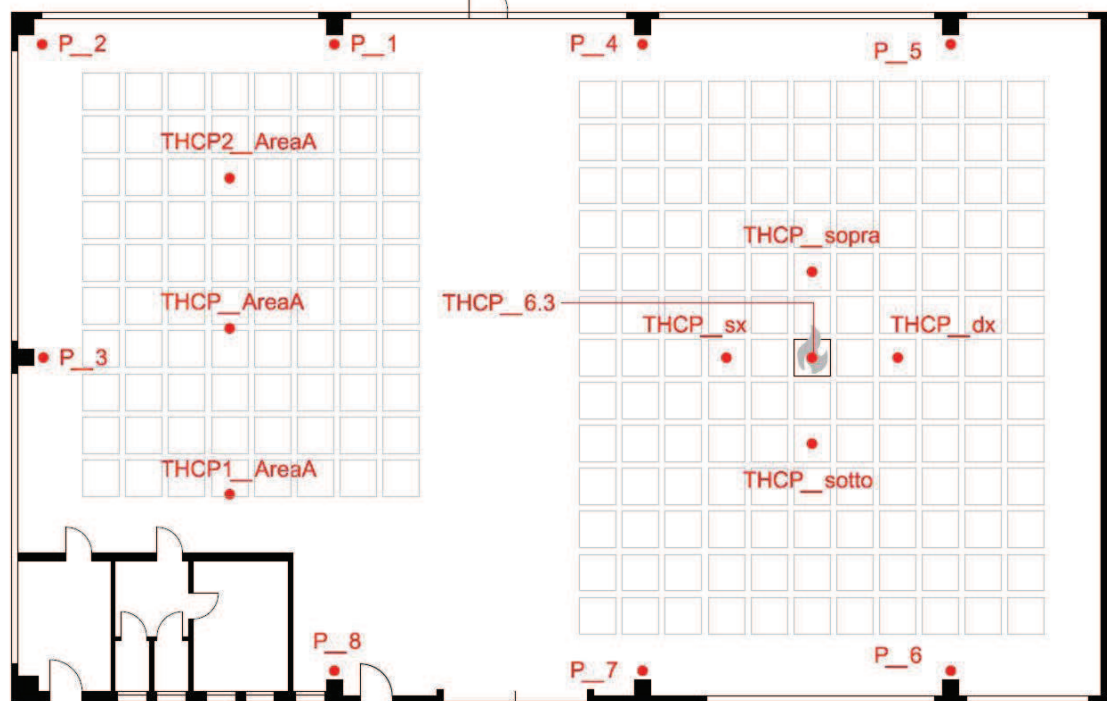


Fig. 30 – Collocazione in pianta delle termocoppie per lo scenario d'incendio collocato nell'Area B.

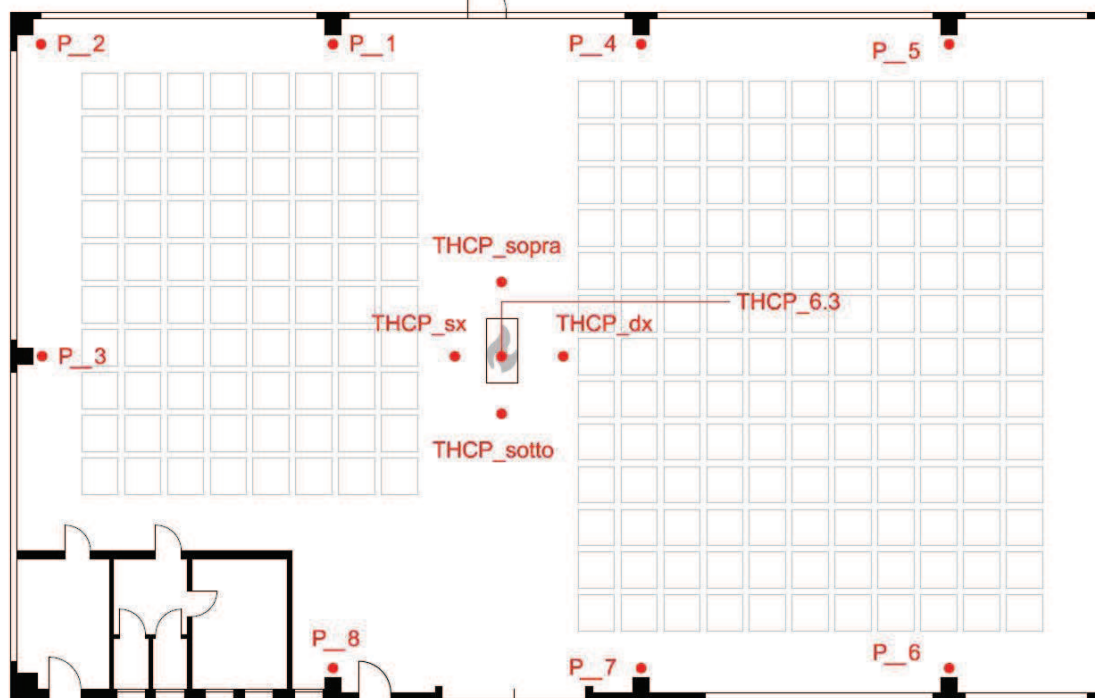


Fig. 31 – Collocazione in pianta delle termocoppie per lo scenario d'incendio collocato nell'area operativa dei mezzi dei carrelli elevatori.

Impianto di spegnimento sprinkler

Nel volume d'indagine è stato modellato un sistema di spegnimento automatico sprinkler, conforme alla NFPA 13 ed equivalente a quello installato all'interno dell'attività, avente le caratteristiche già individuate nel paragrafo 2.5 – *Sistema di spegnimento sprinkler*. Tale sistema verrà riprodotto nel modello attraverso un numero di testine corrispondente all'area operativa cui risulta sottesa la porzione di materiali combustibili in cui ha luogo l'innesco termico.

CARATTERISTICHE IMPIANTO SPRINKLER	
Tipo di testina	Pendent
Tempo di risposta	Standard ($RTI = 80 \sqrt{m \times s}$)
T attivazione	68 °C
Nominal K Factor	115,2 (8.0)
Area operativa	232 m ²
Portata	16,3 l/min x m ²
Pressione operativa	0,134 bar
Durata di alimentazione	90 min (= 5400s)

Di seguito si riporta il layout delle testine sprinkler introdotte nel modello per tutti gli scenari considerati (nell'Area A, nell'Area B o lungo la corsia di manovra dei carrelli elevatori) e rispetto ai quali vengono valutati i tempi di attivazione e l'area di influenza degli stessi.

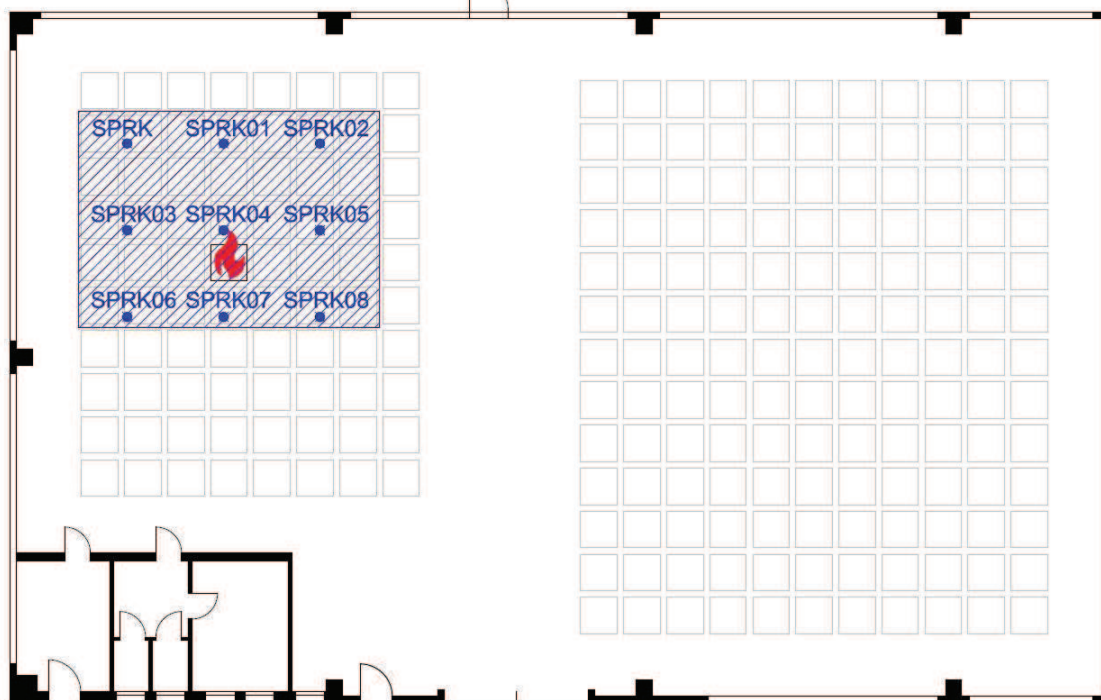


Fig. 32 – Collocazione in pianta delle testine sprinkler per lo scenario d'incendio collocato nell'Area A.

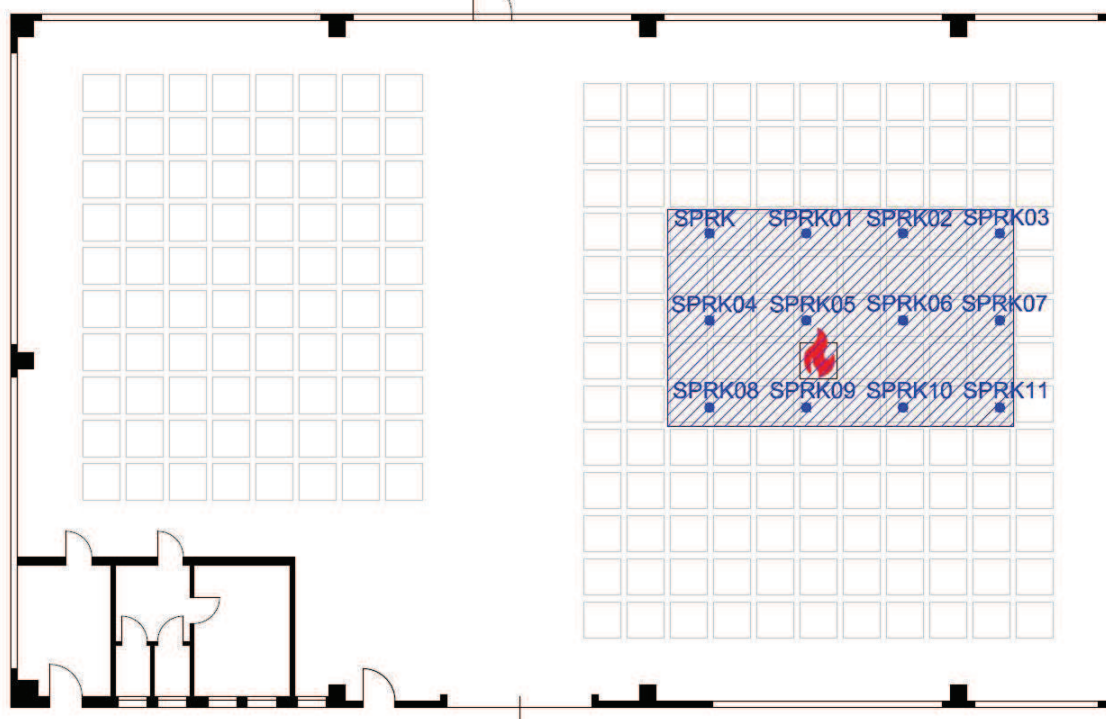


Fig. 33 – Collocazione in pianta delle testine sprinkler per lo scenario d'incendio collocato nell'Area B.

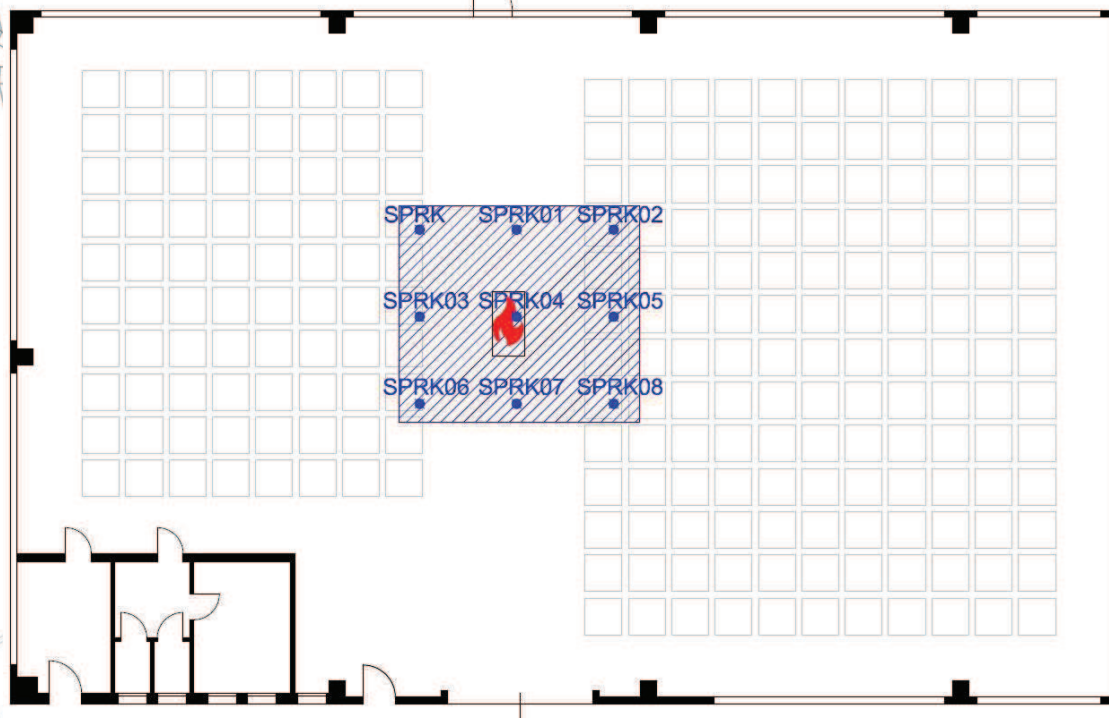


Fig. 34 – Collocazione in pianta delle testine sprinkler per lo scenario d'incendio collocato nell'area di movimentazione dei carrelli elevatori.

PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE

La definizione dei parametri della simulazione, insieme alla definizione delle condizioni geometriche ed al contorno, costituiscono la fase principale della modellazione

Le condizioni rappresentative dei dati in input alla base dell'impostazione del modello, sono riportati in funzione dei parametri relativi alle opzioni di tempo, opzione ambiente ed alle caratteristiche dei materiali.

➤ Opzioni di tempo

PARAMETRI – OPZIONI DI TEMPO		Valore
Tempo di inizio calcolo	0 s	
Tempo di fine calcolo	max 8400 s	
Possibilità di arresto e di riavvio del calcolo	No	
Sincronizzazione calcolo	Si	
Non permettere cambiamenti nel passo di calcolo	No	
Passo di calcolo della fase solida	1	

➤ Opzioni ambiente

PARAMETRI – OPZIONI AMBIENTE		Valore
Temperatura d'ambiente iniziale	20 °C	
Pressione d'ambiente	101325 Pa	
Umidità relativa	40	
Ambient Oxygen Mass fraction	0.23 kg/kg	
Ambient Carbon Dioxide mass Fraction	$5,95 \times 10^{-4}$	
Livello del suolo	0	
Massima visibilità	30 m	
Fattore di visibilità	3,0	
Velocità iniziale del vento	0 m/s	
Costante di gravità	$-9,81 \text{ m/s}^2$	

➤ Caratteristiche materiale

Descrizione	Valore
Nome materiale	PET on wood pallet
Temperatura Interna del Solido	20 °C
Temperatura Posteriore del Solido	Air Gap
Temperatura dell'aria	20 °C
Velocità di combustione per unità di area	0.033 Kg/(m² x s)
Parametri di accensione	Burn at 350°C
Coefficiente di Estinzione	0.000 s
Calore specifico	2.0 kJ/kg K
Conduttività	0.4 W/mK
Rimuovi gli oggetti bruciati	SI
Attiva emissione di particelle	SI

Le caratteristiche dei materiali vengono descritte in funzione del campo di validazione dei parametri introdotti nella modellazione ed a quanto riscontrato da vari studi e fonti di letteratura, come già specificato nel paragrafo *Analisi di sensitività e validazione del modello*.

Parametri in input nel modello:

- Burning rate: 0,033 kg/(m²s)
- Specify heat 2,0 kJ/kg K
- Thermal conductivity 0,4 W/mK

Descrizione	Valore
Nome materiale	CARRELLO ELEVATORE
Tasso di rilascio di calore per unità di area = HRR per m²	4880 kW/m²

Per le caratteristiche termofisiche ed i parametri inerenti allo sviluppo dell'incendio è stato fatto riferimento ai seguenti studi: "*RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests*" è stato condotto dalla *Lund University, Department of Fire Safety Engineering, Sweden Institute of Technology*"

➤ Caratteristiche del bruciatore

La superficie bruciatore risulta caratterizzata dai valori riportati in tabella:

Descrizione	Valore
Nome materiale	BRUCIATORE
Tasso di rilascio di calore	250 kW
Dimensioni	0,5 x 0,5 m
Emissività	0.9

3.5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI FLUIDODINAMICHE

In relazione alla verifica del mantenimento della capacità portante della struttura per il perseguimento della Soluzione alternativa prevista per il Livello III di Prestazione per la *Misura S2_Resistenza al fuoco*, le modellazioni sono state sviluppate per un periodo pari a tutta la durata dell'incendio.

Gli **Scenari S2a, S2b e S2c**, indagati al fine di verificare le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture, verranno analizzati valutando la dinamica evolutiva dell'incendio in relazione alla presenza di impianto di spegnimento automatico sprinkler.

Si precisa che il contributo dell'impianto di spegnimento sprinkler sarà valutato secondo il principio per cui il valore di potenza termica $RHR(x)$ raggiunto all'istante t_x di entrata in funzione dell'impianto, essendo il sistema a controllo, verrà stabilizzato e solo in una fase successiva abbattuto (**Fig. 35**).

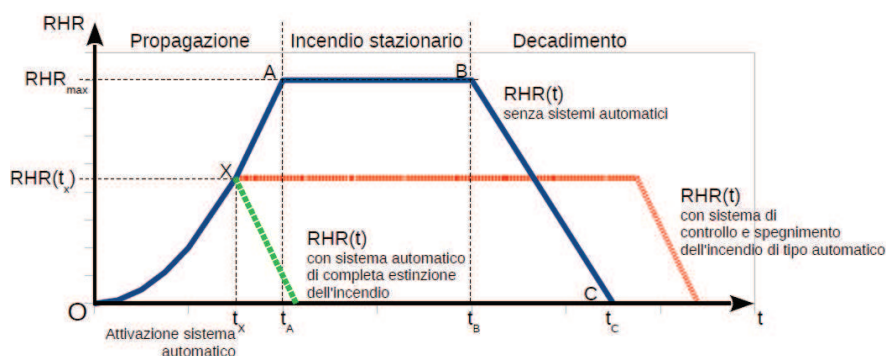


Fig. 35 – Andamento dell' $RHR(t)$ per effetto del contributo dell'impianto sprinkler.

Il contributo della potenza termica rispetto alla quale valutare il mantenimento della capacità portante secondo soluzione alternativa alla misura *S.2 Resistenza al fuoco* è stato considerato prevedendo che la presenza dell'impianto sprinkler non consenta il raggiungimento del valore RHR_{max} . Esso infatti risulta pari al valore $RHR(x)$ raggiunto all'istante t_x di attivazione dello sprinkler e rimane costante per un intervallo di tempo pari alla durata di funzionamento dell'impianto (come da progettazione specialistica), in seguito alla quale si assiste ad una fase di decrescita, associata al controllo dell'incendio. Rispetto a tale logica verranno condotte delle modellazioni preliminari atte a valutare il tempo di attivazione dello sprinkler e rispetto al quale determinare la successiva evoluzione della curva da fornire in input al modello, mediante modello FSE, della suddetta curva.

Di seguito verranno prospettati i risultati ottenuti per gli scenari d'incendio indagati (**Scenari S2a, S2b e S2c**), per quanto attiene la verifica della resistenza al fuoco delle strutture, rispetto all'azione termica riferita alla *curva naturale* d'incendio, ai fini del perseguimento della *soluzione alternativa* prescelta.

Si precisa che, tutte le modellazioni condotte si basano su una curva prettamente conservativa in termini di sviluppo dell'incendio e di potenza termica rilasciata, la quale è stata considerata massimizzando gli effetti e le sollecitazioni termiche dell'innesco sulla struttura portante prima che l'attivazione dell'impianto sprinkler possa garantire il contenimento dell'incendio e limitare i possibili danni dovuti alla sua propagazione. Queste simulazioni, di tipo conservativo, massimizzano i tempi di intervento e ritardano l'effetto di controllo e contenimento del fuoco. Pertanto, al fine di avvalorare le analisi effettuate, sono state condotte delle modellazioni preliminari che prendono a riferimento la stima realistica dei tempi di attivazione e dell'evoluzione dell'incendio.

In particolare, la conservatività della curva risiede nel prevedere che l'azione di riduzione e contenimento dell'impianto sprinkler venga esplicitata al raggiungimento di un valore cautelativo pari a **2,5 MW**.

In relazione a tali considerazioni e al fine di utilizzare il software perfettamente nel suo campo di impiego e applicazione, nonché condurre un'analisi conservativa, le modellazioni preliminari che sono state condotte esclusivamente al fine di comprovare le reali tempistiche di attivazione dello sprinkler, hanno mostrato che l'entrata in funzione dell'impianto automatico, posto pari a quello di attivazione del secondo erogatore, avviene come riportato di seguito:

Scenari d'incendio	t ₁ – tempo di attivazione primo erogatore	t ₂ – tempo di attivazione sprinkler (secondo erogatore)	RHR (t ₂) – potenza termica al tempo di attivazione t ₂
Scenario S2a	145 s	183 s	2332 kW
Scenario S2b	185 s	195 s	1982 kW
Scenario S2c	183 s	253 s	1743 kW
Tempo medio	171 s	210 s	

Al tempo di attivazione del sistema di spegnimento sprinkler nel modello (posto pari a quello di attivazione del secondo erogatore – t₂) corrispondono valori di potenza termica rilasciata inferiori rispetto a quelli considerati per la valutazione dell'efficacia dell'impianto automatico di spegnimento (2332 kW < **2,5 MW** per lo scenario S2a; 1982 kW < **2,5 MW** per lo scenario S2b e 1743 kW < **2,5 MW** per lo scenario S2c).

SCENARIO S2 – innesco A

Lo *Scenario S2a* risulta rappresentativo di un incendio che ha origine alla base del materiale stoccato all'interno dell'*Area A*.

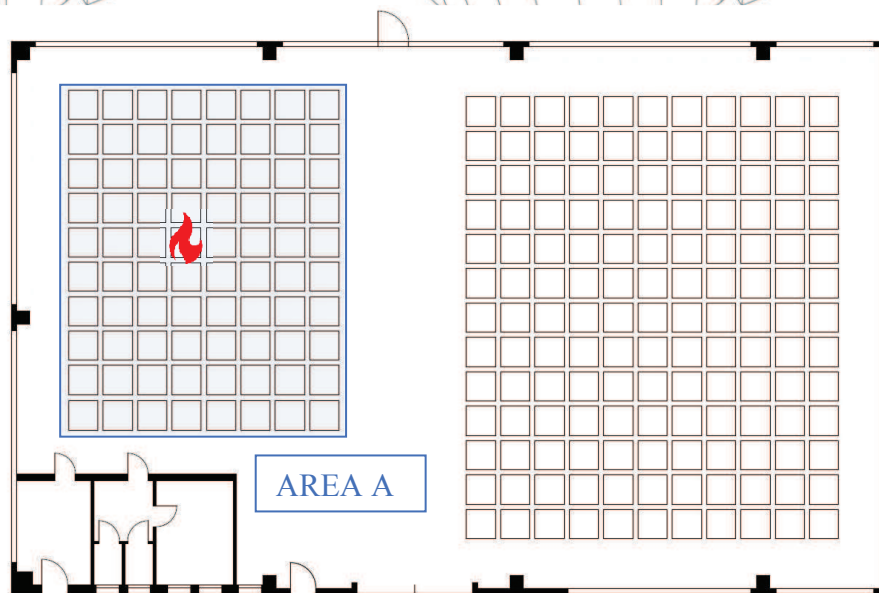


Fig. 36 – Posizione dell'innesco nello scenario d'incendio S2a all'interno dell'*Area A*.

La dinamica dell'incendio, rappresentativa di uno sviluppo dello stesso, ha mostrato, in termini di RHR - *potenza rilasciata nel tempo*, un rapido coinvolgimento del materiale combustibile cui corrisponde un significativo sviluppo del fuoco e rilascio di fumi, infatti il materiale plastico genera una rapida crescita della fiamma, così come un consistente quantitativo di prodotti della combustione (a tal proposito si prenda come riferimento il valore di Soot Yield Y_s pari a 0,06).

Parte del contributo dell'azione termica è legato alla produzione dei gas e dei fumi di combustione che riscaldano l'ambiente e gli elementi strutturali, tuttavia, l'intervento del sistema sprinkler contiene il rilascio sia in termini di RHR che di temperatura.

I valori di potenza RHR medi registrati sono pari a $RHR_{(t=200 \text{ sec})} = 2500 \text{ kW}$.

Andamento della potenza termica in assenza dell'impianto sprinkler

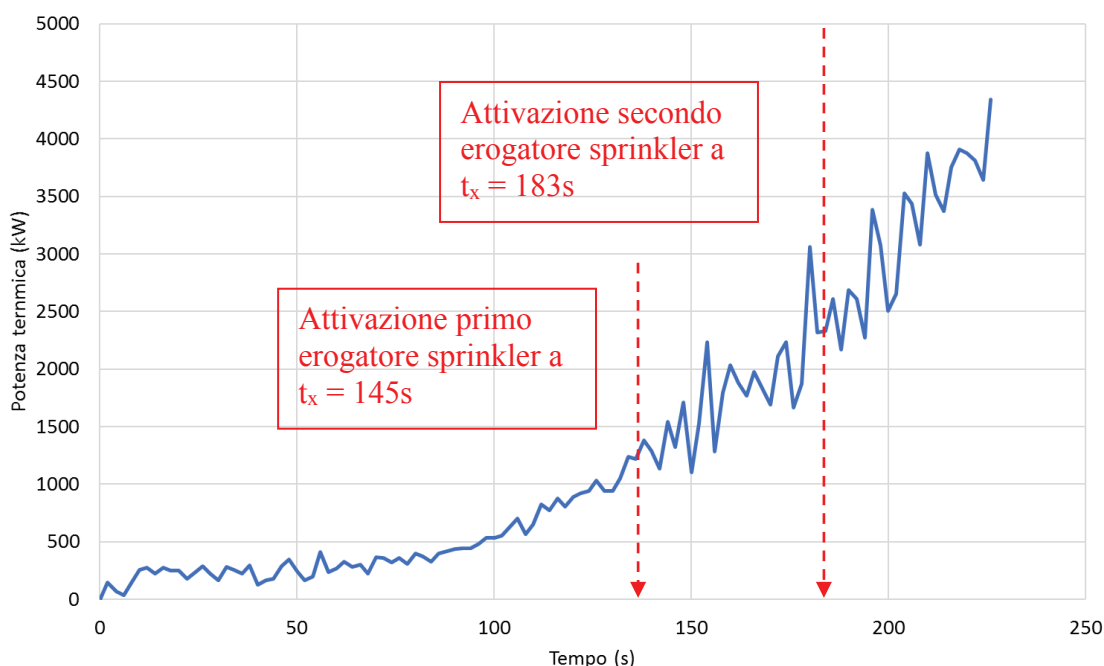


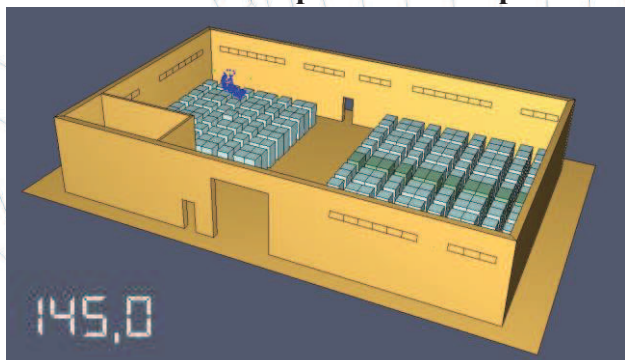
Fig. 37 – Curva RHR – andamento della potenza termica nel tempo in assenza dell'impianto sprinkler.

La dinamica evolutiva dell'incendio, sviluppata mediante simulazioni fluidodinamiche preliminari, ha evidenziato una fase di crescita iniziale piuttosto veloce, con il raggiungimento di un valore di RHR pari a circa 2500 kW già nei primi 200 secondi. Al tempo $t_2 = 183s$ si assiste all'attivazione della seconda testina sprinkler.

L'andamento precedentemente descritto è confermato dalle immagini fornite dallo strumento *Smokeview*, descrittive della fase di crescita dell'incendio, fino all'entrata in funzione del sistema automatico sprinkler, per raggiungimento della relativa temperatura di attivazione ($68^\circ C$).

ATTIVAZIONE SPRINKLER

t_1 = attivazione della prima testina sprinkler



t_2 = attivazione della seconda testina sprinkler

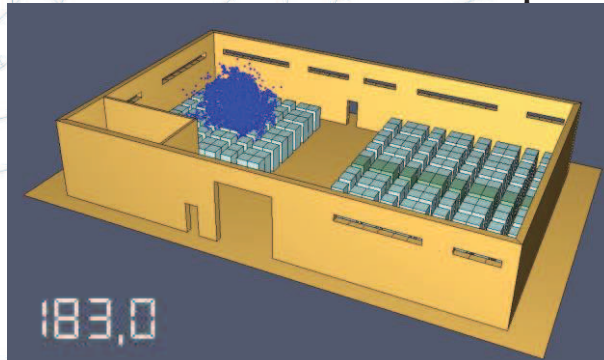


Fig. 38 – Attivazione della prima testina sprinkler al tempo $t_1 = 145s$ e della seconda testina sprinkler al tempo $t_2 = 183s$.

In relazione a tali considerazioni e al fine di utilizzare il software perfettamente nel suo campo di impiego e applicazione, nonché condurre un'analisi conservativa, la curva RHR - tempo verrà valutata come di seguito: il tempo di attivazione del **secondo erogatore** si rileva ad un tempo di 183s – temperatura di attivazione $68^\circ C$; tuttavia si assume cautelativamente che la potenza termica continui

ancora limitatamente a crescere, fino al raggiungimento, ad un tempo di 200s, di un valore pari ad almeno 2500 kW, valore a cui si associa cautelativamente la piena entrata in funzione dell'impianto automatico. Successivamente, dopo l'attivazione delle prime due testine sprinkler ed applicando anche un ulteriore ritardo fino al raggiungimento del suddetto valore di RHR, la potenza termica non continua più a crescere ma subisce una fase di costanza per tutta la durata di alimentazione dell'impianto.

Dall'andamento del rilascio di energia termica deriva conseguentemente l'azione termica cui sono sottoposte le strutture e rispetto alla quale valutare il raggiungimento dell'obiettivo di sicurezza (mantenimento della capacità portante delle strutture per tutta la durata dell'incendio) all'interno del magazzino indagato. Inoltre, la scelta di considerare come tempo di piena entrata in funzione dell'impianto sprinkler non quello associato all'attivazione del secondo erogatore, pari a 183s, ma al raggiungimento di una potenza termica pari a **2,5MW** (a un tempo $t = 200s$) permette di poter considerare, cautelativamente, più elevati valori di RHR e conseguentemente più elevati valori di temperatura ai quali poter sottoporre la struttura in fase di crescita dell'incendio.

Andamento della potenza termica in presenza dell'impianto sprinkler

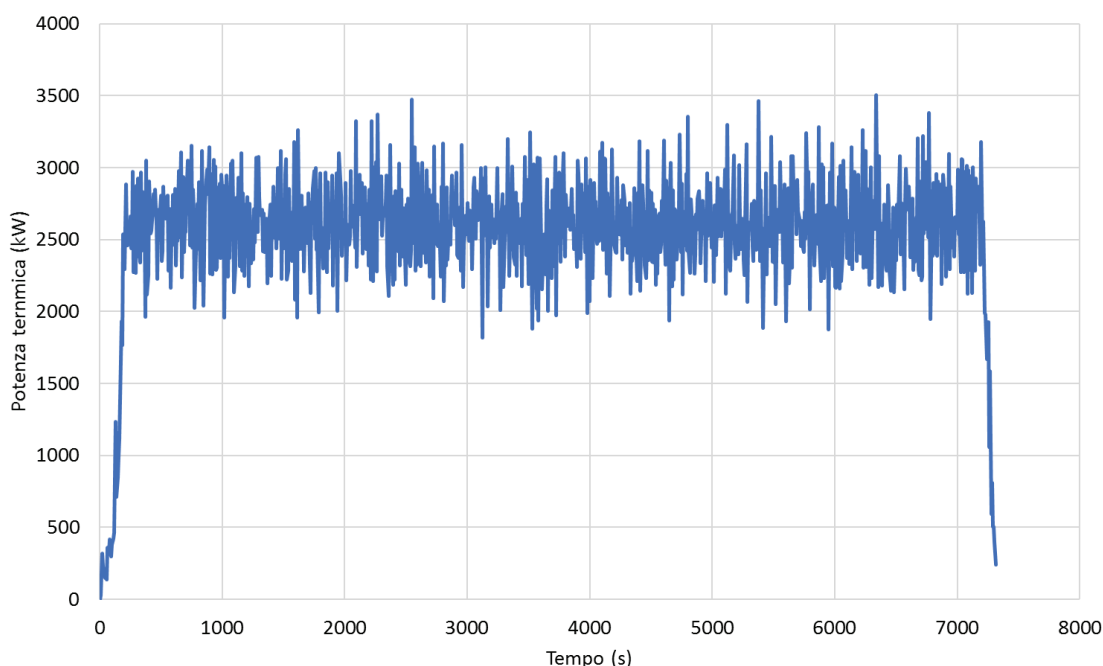


Fig. 39 – Curva RHR – andamento della potenza termica nel tempo in presenza dell'impianto sprinkler la cui piena entrata in funzione avviene al tempo $t = 200$ s al raggiungimento di 2,5MW.

Lo sviluppo progressivo dell'incendio viene avvalorato dalle immagini di output ottenute tramite lo strumento *smokeview* del software utilizzato, le quali sono state estrapolate a vari intervalli di tempo. In particolare, viene registrato il graduale estendersi e addensarsi dei prodotti della combustione all'interno del deposito. Al tempo di 180s l'apertura automatizzata degli infissi adibiti allo smaltimento fumo e calore asservita al sistema di rivelazione ed allarme, contribuisce, unitamente al contenimento operato dallo sprinkler, ad allontanare verso l'esterno i prodotti della combustione.

T= 60 - l'innesco è già avviato e inizia a prendere corpo la prima colonna di fumo;

T= 120 - il fumo inizia a propagarsi all'interno del magazzino;

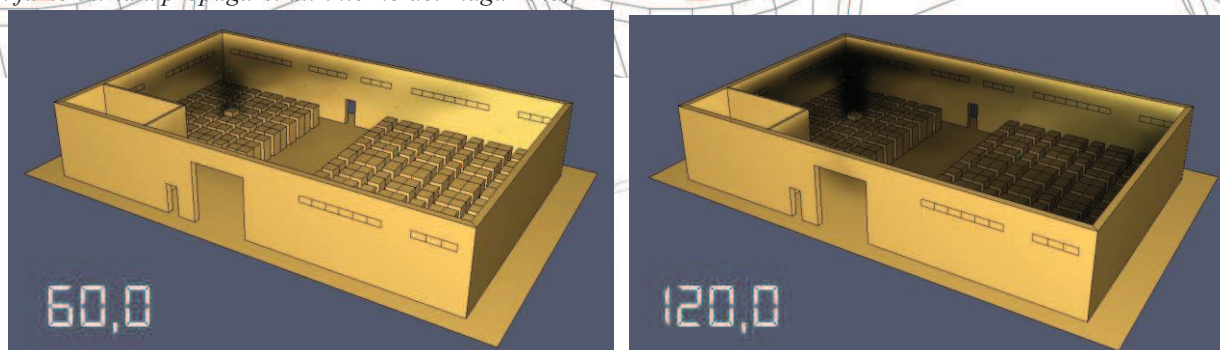


Fig. 40 – Immagini fornite dallo strumento **smokeview** rappresentative della progressiva produzione e smaltimento dei fumi associata alla propagazione dell'incendio, nell'intervallo di tempo considerato.

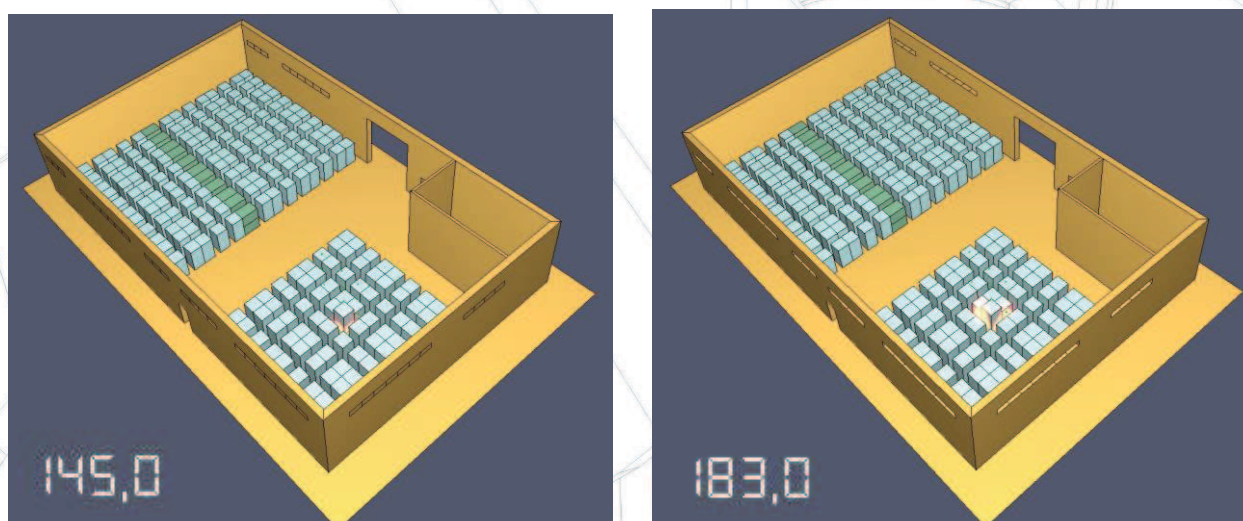


Fig. 41 – Propagazione dell'innesco all'attivazione della prima testina sprinkler al tempo $t_1 = 145s$ e della seconda testina sprinkler al tempo $t_2 = 183s$.

Le diverse termocoppie introdotte hanno consentito di monitorare l'andamento delle temperature e i relativi effetti sugli elementi strutturali (quota intradosso della trave pari a 6,3m). Tra le suddette termocoppie si riscontrano andamenti distinti in funzione della relativa vicinanza al fuoco.

La termocoppia **THCP_sopra** registra l'azione termica più gravosa per gli elementi di copertura nell'intorno dell'innesco e per lo scenario in oggetto: tale andamento nel tempo risulta contenuto per effetto dell'intervento del sistema automatico sprinkler a valori medi di 140°C, attestato al di sotto di quelli per i quali si verificano le tensioni e deformazioni di rottura per le strutture in calcestruzzo, come attestato dall'Allegato I Analisi delle strutture portanti.

THCP_sopra

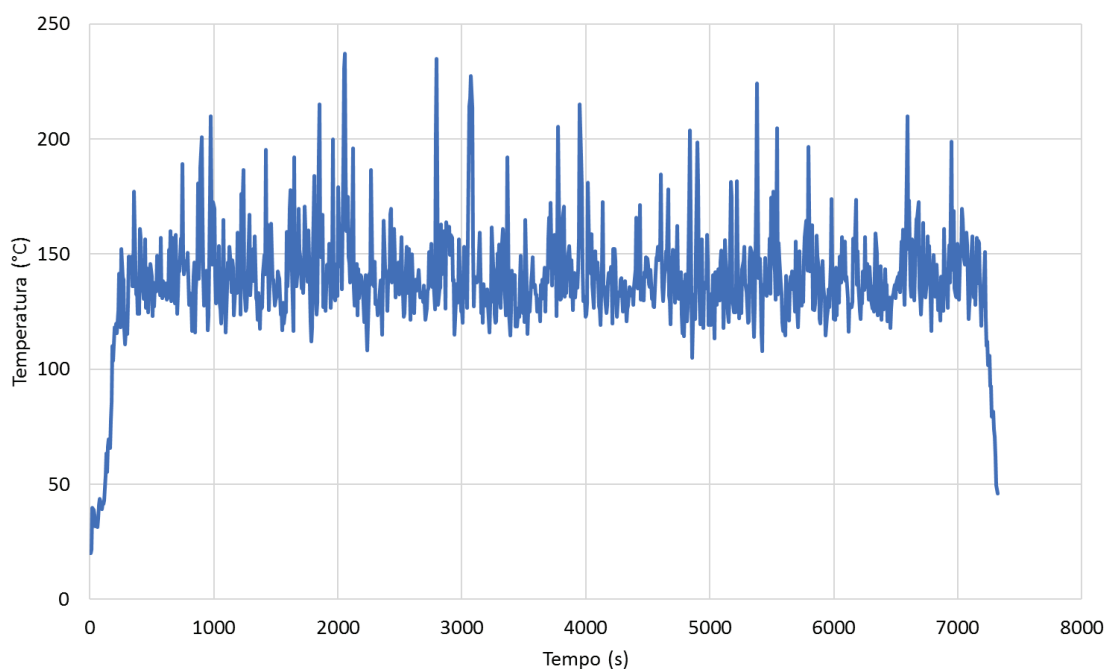


Fig. 42 – Andamento nel tempo della temperatura della termocoppia posizionata a quota intradosso trave sopra la fonte d'innesco.

Nello specifico, è possibile notare come la temperatura registrata dalla termocoppia **THCP_sopra**, posta in pianta a 1,5m al di sopra del modulo di stoccaggio oggetto d'innesco, mostri una rapida crescita, dovuta ai materiali plastici (polietilene e polipropilene), fino a un valore prossimo ai 140°C a circa 200 secondi, che corrisponde al tempo di attivazione dell'impianto sprinkler (tempo in cui si verifica il raggiungimento di 2,5MW di potenza termica). In seguito, per effetto dell'azione di contenimento esercitata dall'impianto di spegnimento, l'andamento della temperatura risulta pressoché stabile senza che i valori si discostino molto da quello medio di 130/140°C.

La temperatura rimane contenuta anche per effetto degli infissi adibiti allo smaltimento fumi e calore che, in seguito alla loro parziale apertura, asservita alla rivelazione dei fumi, permettono l'uscita in massa di una grande quantità di gas caldi di combustione, permettendo il ricircolo dell'aria più fresca dal basso.

Le termocoppie nell'interno dell'innesco e quella posta esattamente sopra lo stesso (**THCP_6.3**; **THCP_sx**; **THCP_sopra**; **THCP_sotto**) collocate alla quota dell'intradosso della trave, pari a 6.3m da terra, mostrano invece valori medi compresi tra i 100 e i 160°C, mantenuti costanti per effetto dell'entrata in funzione del sistema automatico sprinkler (200 s), a meno di picchi localizzati. Gli effetti termici registrati da tali termocoppie risultano moderatamente più contenuti o in linea con la termocoppia **THCP_sopra**.

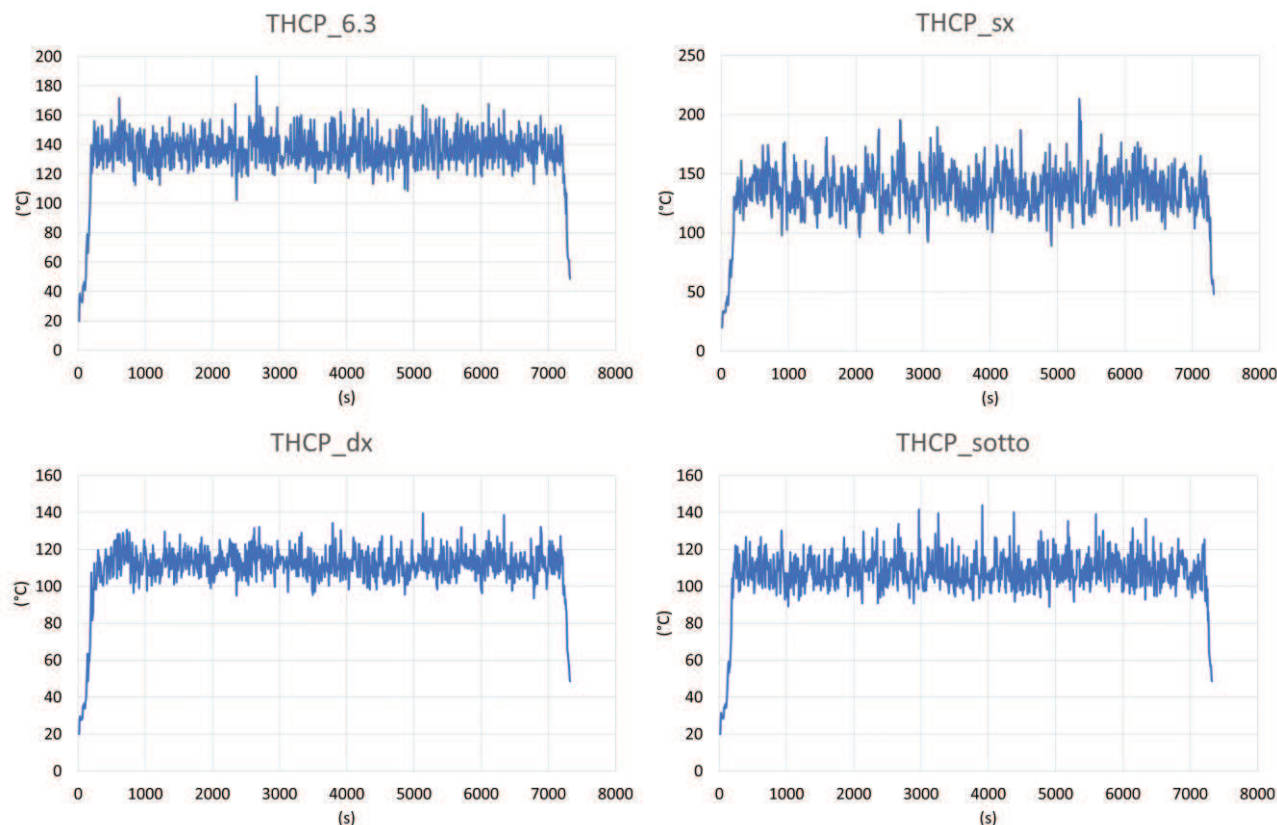


Fig. 43 – Andamento dei grafici temperatura/tempo delle termocoppie poste nell'intorno dell'innescò.

Si riportano di seguito le temperature delle termocoppie in corrispondenza dell'Area B (**THCP_Area B; THCP1_Area B; THCP2_Area B**) collocate alla quota dell'intradosso della trave, pari a 6.3m da terra, al fine di indagare gli effetti della propagazione da un'area di stoccaggio all'altra. Tra le suddette termocoppie quella che registra i valori più elevati in termini di temperatura è la THCP_AreaB, la quale, per effetto dell'attivazione dell'impianto sprinkler non supera valori medi di 70°C. Analogamente la THCP1_AreaB e la THCP2_AreaB mostrano valori del tutto in linea con quelli della THCP_AreaB, mantenuti costanti per effetto dell'entrata in funzione del sistema automatico sprinkler.