

MAGAZZINI DI LOGISTICA INDUSTRIALE - LIMITI DI EFFICACIA DEI SISTEMI DI PROTEZIONE PASSIVA ED ANALISI DI UN CASO REALE

Ing. Gabriele Vigne¹, Ing. Gianluca Vigne², Ing. Mario Galliani³

^{1 2 3} AREATECNICA S.r.l., Viale Dolomiti 24, 32025 Mas di Sedico (BL), info@areatecnica.org

SOMMARIO

La costruzione di magazzini di logistica industriale è in continua crescita ed è uso ormai comune a molte società costruire stabilimenti per la ricezione, lo stoccaggio e la spedizione di merci varie, che si estendono su superfici molto ampie, aventi rilevante altezza e realizzati con strutture in cemento armato precompresso. La semplificazione della movimentazione delle merci impone, inoltre, l'esigenza di ridurre al minimo il numero di compartimentazioni interne.

Tutto ciò comporta come conseguenze che:

- si allungano eccessivamente i percorsi d'esodo;
- i fumi ed il calore si propagano rapidamente in tutto l'ambiente rendendo proibitive le condizioni di lavoro degli addetti al contenimento e allo spegnimento dell'incendio;
- risulta difficile prevedere la modalità di esposizione ed il comportamento della struttura soggetta all'effetto del calore dell'incendio;
- non è possibile quantificare l'efficacia degli interventi preventivi e protettivi da realizzare o che sono già stati posti in opera.

La sperimentazione, condotta su un caso reale, riguarda lo studio del rischio incendio all'interno di un magazzino di logistica industriale di circa 40.000 m² recentemente costruito per stoccare piccoli elettrodomestici, oggetti di cartoleria e prodotti per l'igiene personale. In particolare con un approccio di tipo ingegneristico, condotto avvalendosi del supporto di un programma di fluidodinamica computazionale noto come Fire Dynamic Simulator (FDS), sviluppato presso il Building and Fire Research Laboratory (BFRL) ed il National Institute of Standards and Technology (NIST), si intende:

- dimostrare i limiti dell'efficacia dei sistemi di protezione passiva (compartimentazioni, filtri tra i compartimenti, portoni tagliafuoco) e attiva (impianti sprinkler, evacuatori di fumo e calore, ecc.) qualora vengano utilizzati senza precisi criteri di progettazione funzionale;
- studiare e migliorare la conformazione e l'ubicazione dei percorsi per rendere sicuro l'esodo degli occupanti;
- valutare come viene compromessa la resistenza meccanica delle strutture per effetto del calore sprigionato da un incendio di origine accidentale o dolosa.

Ad esempio si può facilmente comprendere che una parete di tipo REI alta più di 12 m e lunga diverse decine di metri quando si deforma per effetto delle dilatazioni termiche genera momenti flettenti che ne compromettono la stabilità qualora non sia opportunamente vincolata e rinforzata nei punti critici. I filtri di separazione tra i compartimenti, invece, risultano superflui o inefficaci se collocati in posizioni scorrette. Inoltre, se abbiamo la contemporanea presenza di evacuatori di fumo e calore e di un impianto sprinkler, si ha che l'efficacia degli evacuatori può essere sensibilmente compromessa dall'entrata in funzione degli sprinkler, che provocano un allungamento dei tempi di apertura e la spinta verso il basso dei fumi.

A seguito di un attento esame di uno dei compartimenti del magazzino, che misura circa 6.900 m², lo studio va articolandosi nella seguente maniera:

- si individuano i punti critici in cui condurre le simulazioni d'incendio;
- si procede con la ricostruzione tridimensionale del dominio di simulazione, con particolare attenzione alla scelta delle proprietà dei materiali immagazzinati e di quelli che costituiscono la compartimentazione;
- si collocano le misure di prevenzione passiva e attiva che risultano già installate nell'edificio.

Attraverso la misura e la visualizzazione dei vari parametri (temperature, calore, concentrazione dei fumi, visibilità, propagazione dell'incendio agli elementi circostanti, ecc.) rilevati durante la simulazione dell'incendio effettuata con FDS è possibile compiere una scelta ottimale dei sistemi attivi e passivi di prevenzione e protezione dell'edificio e scegliere la loro corretta dislocazione.

E', inoltre, possibile stimare la concentrazione dei fumi tossici in diversi punti del compartimento per valutare se gli occupanti siano in grado di muoversi e vedere le vie d'uscita nei vari stadi dell'incendio.

1.0 INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO: MODELLI DI CALCOLO

Per lo studio della dinamica evolutiva di un incendio sono di grande aiuto i modelli computazionali che altro non sono che solutori di equazioni algebriche o differenziali utilizzate nei bilanci di massa, energia e materia.

Tutti i modelli di calcolo possono essere suddivisi in due distinte categorie:

- modelli *a parametri concentrati* (o *parametrici* o *a zone*) in cui vengono risolte in modo esatto equazioni algebriche (stato stazionario o quasi stazionario) o differenziali (stato transitorio) di tipo approssimato;
- modelli *a parametri distribuiti* (o *numerici* o *di campo*) in cui vengono risolte in modo approssimato equazioni differenziali esatte.

Si prestano assai bene al caso in esame i modelli a parametri distribuiti che sono implementati in software di fluidodinamica computazionale (CFD). Infatti la loro estrema flessibilità ne consente l'utilizzo in ambiti molto diversi tra loro (ossia in tutte quelle applicazioni in cui vi sia un qualsivoglia fenomeno di trasporto) ed in cui vi siano geometrie anche estremamente complesse. La possibilità di un'indagine puntuale delle proprietà intensive (temperatura, pressione, concentrazione delle specie, potenza termica rilasciata, ecc.), la capacità di modellare le turbolenze (come il caso di un incendio con propagazione e dispersione dei prodotti di combustione), la rappresentazione grafica dei campi vettoriali e scalari, la possibilità di eseguire delle animazioni dell'evoluzione dell'incendio rendono tali modelli dei preziosi strumenti di indagine.

Nel presente lavoro è stato utilizzato il Fire Dynamic Simulator (FDS) [1], [2] sviluppato presso il Building and Fire Research Laboratory (BFRL) ed il National Institute of Science and Technology (NIST) americani. Tale programma di calcolo è stato scelto per l'elevata affidabilità dei risultati (che rispettano i dati empirici con una precisione del 20%) ottenuta con più di venticinque anni di sviluppo e di revisione critica.

1.1 Il Fire Dynamic Simulator (FDS)

Le fasi con cui si articola il processo di modellazione del Fire Dynamic Simulator (FDS) sono tre.

In una prima fase viene inserita la geometria del dominio di calcolo (comprensiva di tutti gli oggetti, le aperture di ventilazione, i sistemi di protezione attiva e passiva in esso contenuti e della definizione di tutti i materiali presenti) e viene fatta una "discretizzazione spaziale" del dominio attraverso una griglia opportunamente scelta.

In una seconda fase si assegnano le condizioni iniziali ed al contorno e si definiscono i tempi della simulazione, gli intervalli di campionamento e l'intervallo in cui devono essere scritti i valori nei file di uscita.

Al termine dell'integrazione numerica delle equazioni differenziali, compiuta dal solutore interno al programma, si passa alla terza fase in cui vengono elaborati e visualizzati i risultati. Il post-processore deputato alla visualizzazione di tali risultati fa parte integrante di FDS ed è denominato Smokeview [3].

Tra i molti dati di ingresso che occorre fornire al programma, particolare attenzione va dedicata alla scelta e alla definizione della potenza termica totale rilasciata nell'ambiente in funzione del tempo, comunemente indicata in letteratura con il termine di curva HRR (Heat Release Rate). Da tale curva dipende, infatti, la velocità con cui viene rilasciata l'energia termica e da essa dipendono la temperatura massima e la portata di fumo e dei gas nocivi che si liberano durante la combustione.

2.0 SIMULAZIONE NUMERICA

La simulazione è stata condotta all'interno di un compartimento che misura circa 6.880m² e facente parte di un magazzino di logistica industriale con superficie complessiva di 37.600m². Il compartimento in oggetto è adibito all'imballo e allo stoccaggio di materiale per l'igiene personale e di oggetti di cartoleria, contenuti in confezioni di cartone incellofanate ed accatastate su pallets di legno. Per la tipologia del materiale stoccato e per la densità di

stoccaggio il compartimento scelto risulta avere un elevato carico d'incendio (che plausibilmente ammonta a $111 \text{ kg}_{\text{legnaequi}}/\text{m}^2$).

2.1 Geometria del compartimento in esame

L'intero compartimento, che funge da dominio di calcolo, confina ad ovest e a sud con altri compartimenti analoghi e ha forma di parallelepipedo con le seguenti dimensioni: lunghezza (x) 85 m, larghezza (y) 80 m e altezza (z) 12 m. All'interno del compartimento ci sono 13 coppie di scaffalature e 2 scaffalature singole addossate rispettivamente alle pareti est ed ovest.

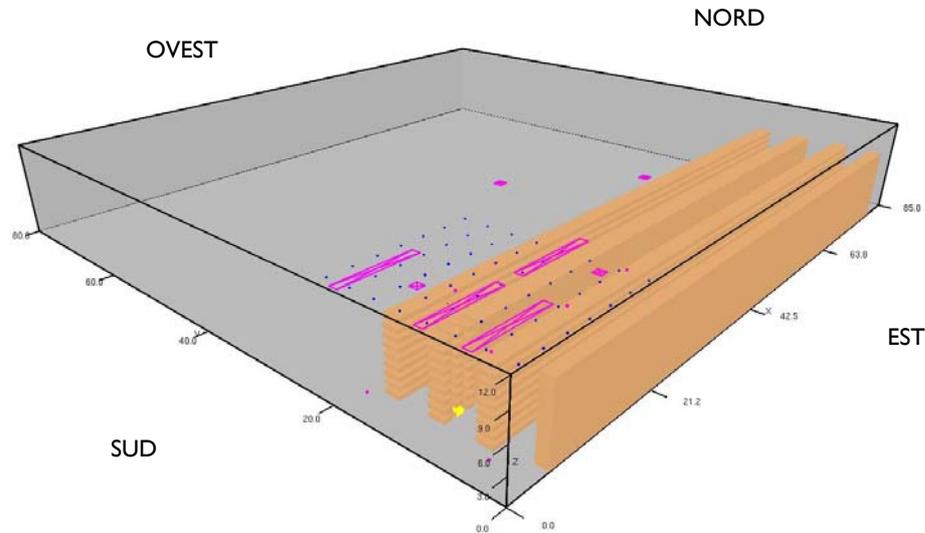


Figura 1- Rappresentazione del compartimento oggetto della simulazione

La griglia con cui è stato scomposto il dominio è formata da celle cubiche (elementi finiti) che fungono da sottodomini di integrazione. Al diminuire della dimensione delle celle, si ha un aumento dell'attendibilità dei risultati, pur a fronte di un più elevato onere computazionale. La necessità di agganciare ogni oggetto alla griglia fa sì che le dimensioni degli oggetti stessi debbano essere multipli interi della cella, per cui si andranno ad arrotondare o per eccesso o per difetto le quote degli oggetti, delle aperture, ecc. senza però alterare le superfici ed i volumi reali.

L'intero compartimento è stato considerato realizzato con pareti, pavimento e soffitto in calcestruzzo prefabbricato con *Spessore* 0,1 m, *Densità* $\rho=2.100 \text{ kg} / \text{m}^3$, *Calore specifico* $c_p=0,88 \text{ kJ} / (\text{kg} \times \text{K})$, *Conducibilità termica* $k_T=1 \text{ W} / (\text{m} \times \text{K})$ e *Temperatura di ignizione* $T_{\text{ign}}=5.000 \text{ }^\circ\text{C}$. Al fine della simulazione sono state considerate le scaffalature presenti nell'area sud-est in quanto tale zona risulta essere quella in cui i percorsi d'esodo presentano lunghezze più rilevanti e quindi la più sfavorita ai fini dell'esodo in emergenza. L'aver riportato solo 4 file di scaffalature ha consentito di ridurre grandemente l'onere computazionale senza alterare eccessivamente la dinamica dell'incendio. (Fig.1). E', infatti, ben visibile durante la simulazione che i fumi ed il calore si accumulano e si stratificano a soffitto propagandosi su tutto il compartimento indipendentemente dalla presenza o meno delle scaffalature. Questo fenomeno è possibile in quanto lo spazio, di circa 3m, presente tra il soffitto e la parte superiore della scaffalatura è sufficiente per la libera propagazione dei prodotti della combustione. Nella simulazione vi sono 3 scaffalature doppie, complessivamente larghe 2m, alte 8,5m, che ricoprono in lunghezza quasi tutta l'estensione del compartimento ed una scaffalatura singola, addossata lungo tutta la parete est del compartimento, che è larga 1m ed alta 9m. La distanza tra due file di scaffalature adiacenti è di 3,5 m. Schematicamente si è assunto che le scaffalature siano costituite da blocchi di materiale combustibile aventi superficie in Polimetil-Metacrilato PMMA.

La scaffalatura singola e la coppia di scaffali in cui si ha l'origine dell'incendio sono rappresentate come un blocco pieno mentre le due file di scaffali adiacenti all'incendio presentano delle feritoie (ognuna di altezza 0,5 m) tra i vari piani di stoccaggio. Il fatto di aver riportato le aperture tra i piani di pallets, come avviene nella realtà, ha lo scopo di permettere ai prodotti della combustione di

propagarsi orizzontalmente da un percorso d'esodo all'altro profittando degli spazi presenti tra i pallets.

Parametri di Input per FDS		
Categoria	Parametro	Valore
Edificio:	Dimensioni	Lunghezza (x)=85 m; Larghezza (y)=80 m; Altezza (z)=12 m
	Pareti laterali	Calcestruzzo prefabbricato (Spessore=0,1 m)
	Soffitto	Calcestruzzo prefabbricato (Spessore=0,1 m)
	Pavimento	Calcestruzzo liscio (Spessore=0,1 m)
Simulazione	Dimensione griglia	170 u x 160 u x 24 u
	Temperatura ambiente	20 °C
	Dimensione cella (u)	0,5 m x 0,5 m x 0,5 m
	Tempo di simulazione	720 s
Combustibile	Tipo	Pallets contenenti materiali plastici collocati su scaffalature
	Dimensioni pallets	Larghezza (Δx) = 1 m; Profondità (Δy) = 2 m; Altezza (Δz) = 0,5 m
	Materiale	Polimetil-Metacrilato PMMA + fondo in legno di abete
	Temperatura di ignizione	380 °C (PMMA) – 360 °C (legno d'abete)
	Spessore	0,15 m (PMMA) – 0,028 m (legno d'abete)
	Densità	1.190 kg / m ³ (PMMA) – 450 kg / m ³ (legno d'abete)
	Calore di vaporizzazione	1.620 kJ / kg (PMMA) – 500 kJ / kg (legno d'abete)
	Calore di combustione	25.200 kJ / kg (PMMA)
	Calore specifico	1,42 kJ / (kg x K) (PMMA) - 1,2÷3 kJ / (kg x K) (legno abete)
	Conducibilità termica	0,19 W / (m x K) (PMMA) - 0,13÷0,29 W / (m x K) (legno abete)
Sprinkler	Tempo di risposta (RTI)	50 (m x s) ^{0,5}
	Temperatura di attivaz.	74 °C
	Pressione operativa	5,2 bar
	Area di azione testina	≤ 9 m ²
Lucernari	Tipo	In vetroresina antigocciolamento
	Dimensioni	1 m x 10 m
	Temperatura di apertura	405 °C
	Tempo di risposta (RTI)	132 (m x s) ^{0,5}
Evacuatori	Dimensioni	1 m x 1 m
	Tempo di risposta (RTI)	132 (m x s) ^{0,5}
	Temperatura di attivaz.	68 °C (con una temperatura ambiente iniziale di 20 °C)

Sorgente d'ignizione	Tipo	Combustione di due facce di un pallet in PMMA che bruciano con reazione stechiometrica – Sorgente continua ed inesauribile
	Potenza termica rilasciata per unità di superficie *	800 kW / m ²

* E' stato necessario considerare una potenza termica di rilascio pari a 800 kW / m² per un totale di 2000 kW per poter simulare un incendio completamente sviluppato (sviluppo generalizzato); tale potenza, come evidente, risulta estremamente sovradimensionata se consideriamo ad esempio che equivale ad un bruciatore funzionante a gas propano con un consumo orario pari a 78 m³/h.

Tabella 1- Prospetto riassuntivo dei parametri di input per FDS

Nell'intera zona circostante l'incendio sono stati rappresentati i singoli pallets di forma parallelepipedica in cui le 4 facce laterali e la faccia superiore sono costituite di Polimetil-Metacrilato PMMA (materiale tipicamente utilizzato per oggetti di cartoleria e per prodotti per l'igiene personale) mentre la faccia inferiore è costituita da legno di abete.

Il volume e l'opacità dei fumi originati dalla combustione del PMMA e del legno di abete cercano di approssimare al meglio la combustione del materiale presente all'interno del compartimento in oggetto. A soffitto sono stati riportati, nelle esatte posizioni, gli evacuatori di fumo e calore (EFC) ed i lucernari effettivamente presenti nell'area del compartimento interessata dall'incendio. Per valutare l'apporto dei lucernari fissi, al centro di essi è stata collocata una termocoppia virtuale in modo da poter valutare il momento in cui il traslucido fonde (405°C). La rilevazione da parte della termocoppia della temperatura di 405°C comporta, ai fini del calcolo, il considerare l'apertura completa del

lucernario corrispondente (nella situazione reale se il lucernario viene investito dalle fiamme, alla temperatura di circa 405°C brucia senza gocciolare liberando l'intera luce).

Collocata al centro di ogni EFC è, invece, prevista una termocoppia virtuale che, una volta raggiunta la temperatura di 68°C, comporta l'apertura del corrispondente EFC. L'utilizzo della termocoppia viene fatto al fine di simulare il reale comportamento degli EFC la cui apertura è comandata da un dispositivo individuale di tipo automatico termosensibile.

Anche se visivamente non appare nella simulazione, l'apertura degli EFC ed eventualmente dei lucernari comporta la fuoriuscita dei prodotti della combustione e del calore.

Nella simulazione è stata riprodotta la reale distribuzione spaziale della rete degli sprinkler collocati ad un'altezza di 11,90m. Infine, per monitorare le temperature, il livello di visibilità, l'altezza dei fumi in vari punti significativi del compartimento (ad esempio in corrispondenza dei percorsi d'esodo) o per valutare le temperature raggiunte in copertura o in corrispondenza delle mensole di sostegno del pilastro che si trova in prossimità dell'incendio, il programma prevede il posizionamento di sensori e di termocoppie che, pertanto, sono stati collocati sia a 2m di altezza nei percorsi d'esodo sia a soffitto (Fig.2). I valori misurati dai sensori e l'ausilio visivo offerto dal rilievo punto per punto di quantità quali le temperature dell'aria e dei muri, la visibilità, ecc. consentono di valutare in modo semplice e diretto le problematiche relative all'esodo sicuro delle persone e le sollecitazioni termiche delle strutture.

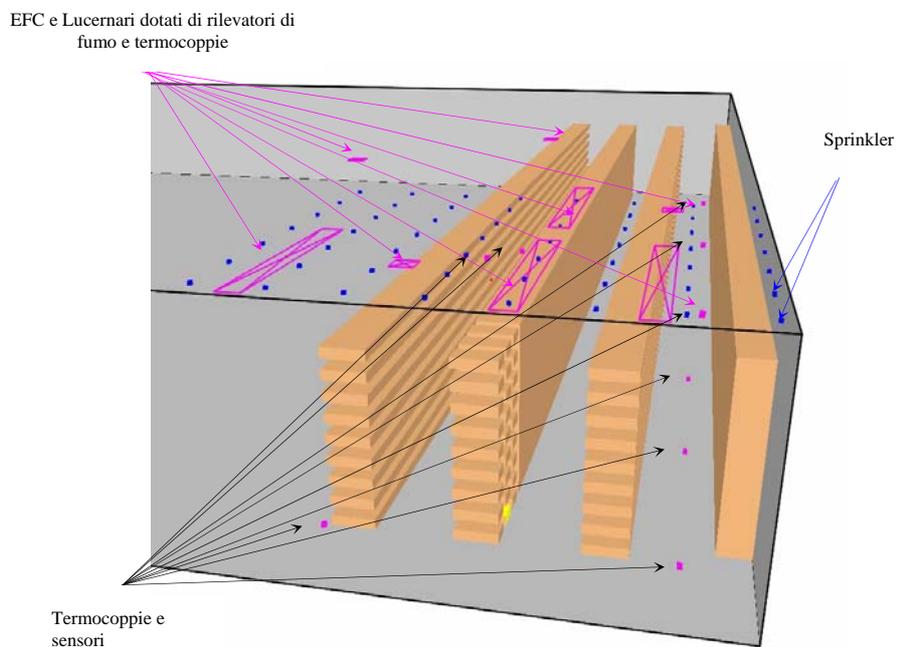


Figura 2 – Individuazione dei dispositivi di protezione attiva e dei sensori per il monitoraggio di temperatura, visibilità e altezza dei fumi

2.2 Modellazione dell'incendio

Si è ipotizzato che l'innesco del focolare sia localizzato all'estremità della terza fila di scaffali a partire dalla parete est del compartimento ed interessi un pallet. Tale pallet è collocato alla base della scaffalatura (Fig.3).

La scelta di collocare l'incendio in tale posizione è dettata dal fatto di porsi nella condizione peggiore per quanto riguarda la propagazione dei fumi lungo i percorsi d'esodo. Infatti, come si può notare anche dalla simulazione, nell'angolo del compartimento i fumi tendono a ristagnare e ad abbassarsi interessando i percorsi d'esodo per effetto del ceiling jet e del raffreddamento che gli stessi subiscono allorché incontrano le pareti fredde del compartimento. Inoltre il ristagno di calore localizzato nell'angolo comporta un intervento più rapido degli sprinkler che, come effetto negativo, tendono a raffreddare e a spingere verso il basso i fumi.

La curva di crescita HRR è stata scelta in modo tale da generare uno sviluppo quasi istantaneo dell'incendio. In particolare si è assunta come sorgente di ignizione una fiamma sprigionata dalla faccia superiore e dalla faccia laterale del pallet (facce evidenziate in giallo nelle figure). Una tale

circostanza sarebbe come ipotizzare che le due facce del pallet siano cosparse di sostanza infiammabile. Man mano che la fiamma sprigionata dal pallet incendiato investe gli altri pallets e allorché viene raggiunta la temperatura di ignizione, pari a 360°C per il legno d’abete e a 380°C per la plastica PMMA, si verifica l’accensione ad “effetto domino” di tutto il materiale combustibile circostante.

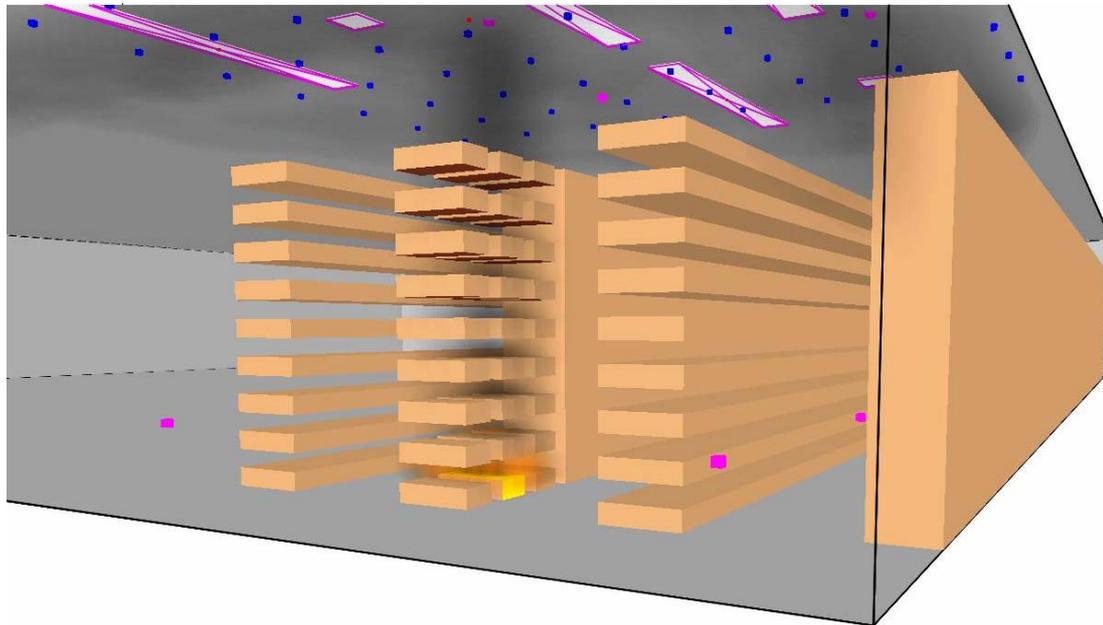


Figura 3 – Individuazione del principio di innesco localizzato in corrispondenza di un pallet alla base della terza scaffalatura

Tutti i pallets, come già anticipato, partecipano alla combustione come dei corpi solidi di materiale plastico PMMA e con fondo in legno. I dati caratteristici di tali materiali risultano implementati nel software FDS. L’incendio che si ottiene è di tipo “veloce” ed ha una potenza termica massima rilasciata $HRR_{max}=8.550$ kW che essendo distribuita su 9 piani di scaffalatura potrà essere considerata come una potenza termica massima distribuita su ogni piano pari a $HRR_{max,distrib}= 8.550kW/9 = 950$ kW.

Grazie alla raffinata tecnica di modellazione utilizzata da FDS, il materiale delle scaffalature circostanti a quella interessata dall’incendio interagisce con l’incendio stesso assorbendo e, a sua volta, irraggiando calore.

3.0 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Scopo principale della simulazione è quello di verificare la dinamica dell’incendio monitorando le temperature, il livello dei fumi e la visibilità (in metri) lungo i percorsi d’esodo al fine di constatare se le persone riescano ad evacuare dal locale in sicurezza. Si vanno, inoltre, a rilevare le temperature a soffitto per valutare il livello di sollecitazione termica a cui vengono sottoposte le strutture. Pertanto considerando che, grazie all’effetto dell’intervento degli impianti di protezione attiva, il fenomeno non evolve in modo significativo, la simulazione è stata condotta per i primi 720s ottimizzando così le risorse di calcolo.

Come si osserva durante le varie fasi dalla simulazione (Fig.4), l’incendio coinvolge esclusivamente il materiale accatastato sulla scaffalatura in cui si trova il focolare iniziale, senza propagarsi alle scaffalature adiacenti. I fumi ed il calore, d’altra parte, invadono molto rapidamente gli strati alti del compartimento provocando l’apertura dell’EFC nonché l’azionamento degli sprinkler (Fig.8). Solo quando i fumi incontrano le pareti del compartimento tendono a propagarsi verso il basso, per il fenomeno del ceiling jet e del raffreddamento degli stessi, cominciando ad interessare l’area dei percorsi d’esodo dopo circa 340 secondi.

In figura 5 sono rappresentati i livelli di visibilità lungo due percorsi d’esodo schematizzati attraverso due superfici virtuali alte 2 metri, di cui una distante 1,5m dalla parete sud ed una al centro tra la prima

e la seconda scaffalatura, che simulano l'ambiente in cui si trova a dover fuggire un eventuale persona presente. I due percorsi d'esodo individuati iniziano a presentare una visibilità ridotta (con una profondità di visibilità di circa 14m) per un'estensione di circa 20m dopo un tempo di circa 660s.

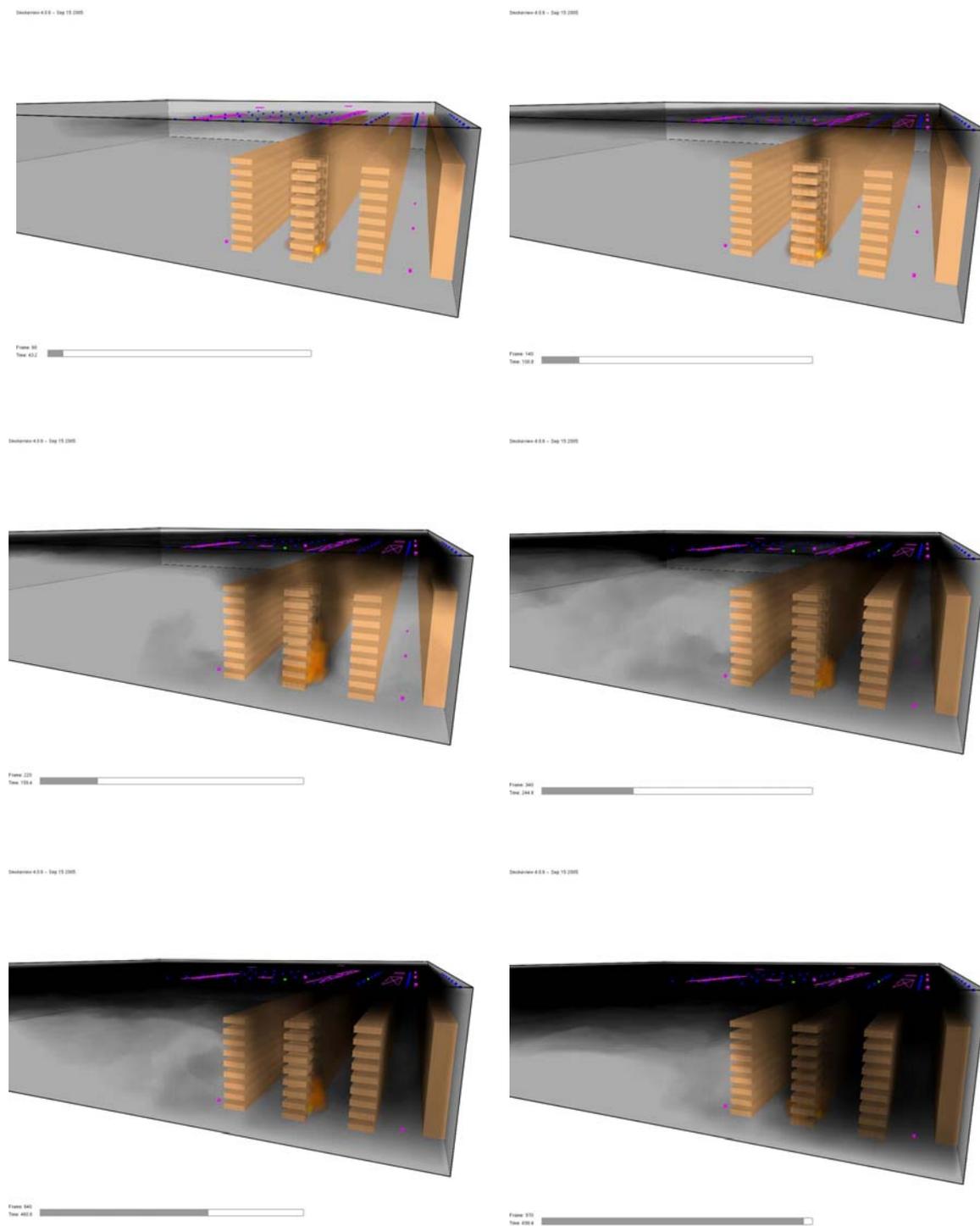


Figura 4 – Fasi di evoluzione dell'incendio e propagazione dei fumi negli istanti $t=43$ s, $t=101$ s, $t=158$ s, $t=245$ s, $t=461$ s e $t=696$ s

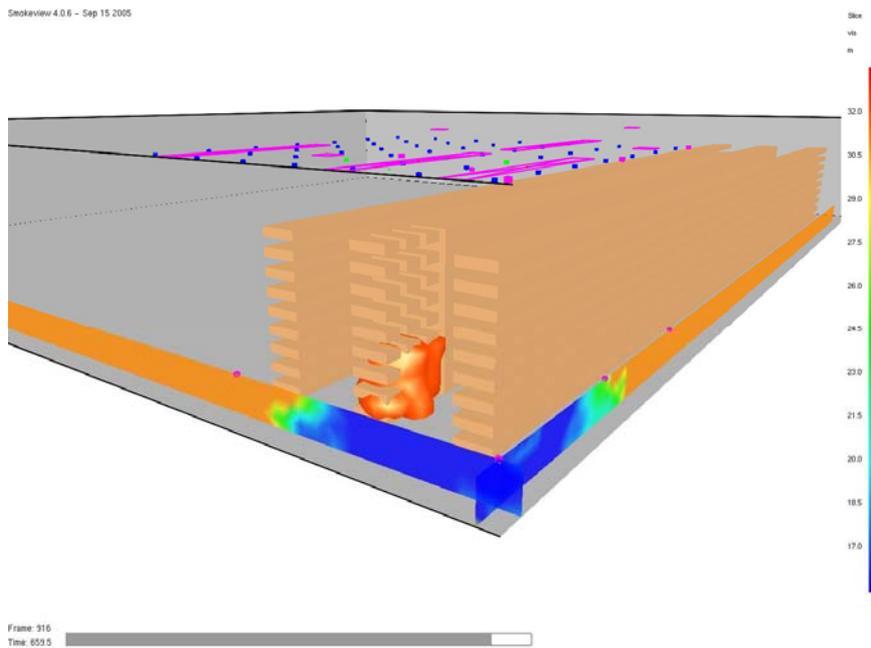


Figura 5 – Superfici alte 2 m che fungono da percorsi d’esodo in cui vengono schematizzati i livelli di visibilità (in metri). Sulla destra è riportata la scala cromatica che associa ai diversi colori una certa profondità di visibilità in metri. La situazione illustrata si riferisce al tempo $t=660$ s

In figura 6 è, invece, riportato l’andamento delle temperature su due superfici alte 2 metri collocate lungo due distinti percorsi d’esodo. Come si può notare la temperatura più alta, rilevata nel percorso d’esodo che fiancheggia l’incendio ad una distanza di 1,5 m dalla parete sud, non supera mai i 34°C . Ciò è plausibilmente dovuto all’ ”effetto camino” prodotto dal focolare d’incendio che tende a convogliare aria dagli strati più bassi verso gli strati più alti dell’edificio facendo sì che la temperatura in prossimità della base del focolare non raggiunga mai livelli elevati.

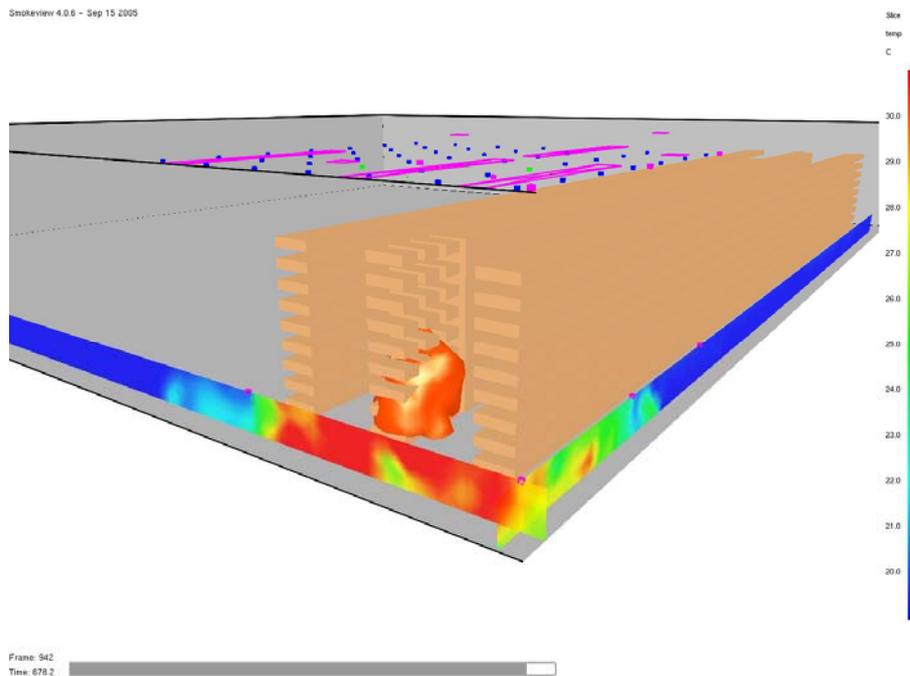


Figura 6 – Superfici alte 2 m che fungono da percorsi d’esodo in cui vengono schematizzati i livelli temperatura (in $^{\circ}\text{C}$). Sulla destra è riportata la scala cromatica che associa ai diversi colori una certa temperatura in gradi centigradi. La situazione illustrata si riferisce al tempo $t=678$ s

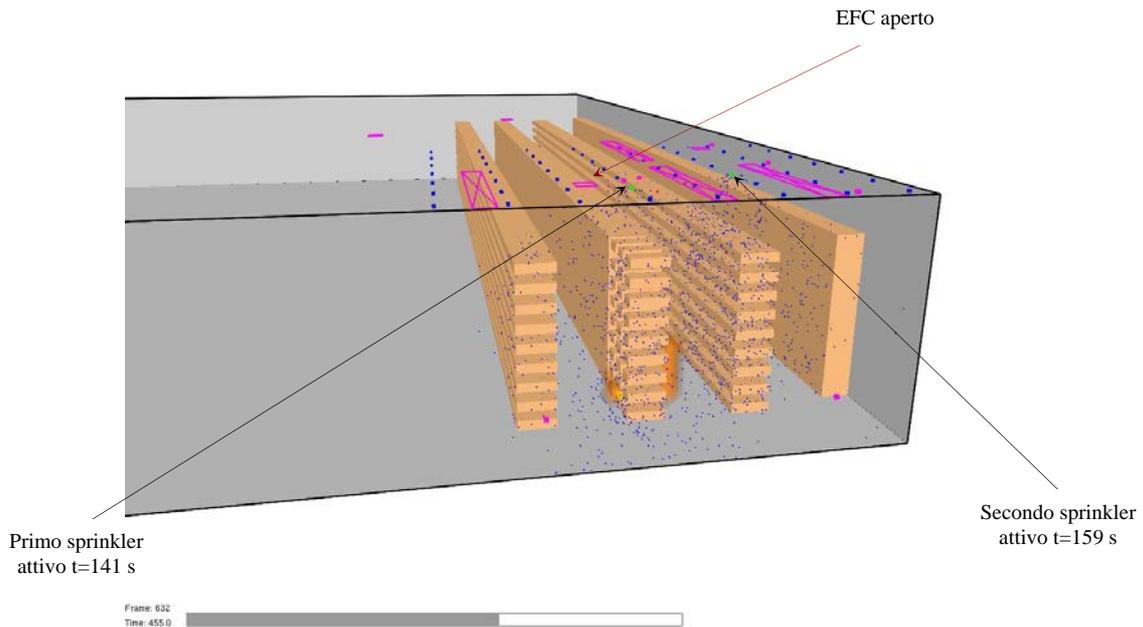


Figura 7 – Apertura degli EFC e attivazione degli sprinkler

L'attivazione del primo sprinkler, che viene investito direttamente dal plume incandescente, avviene nell'istante $t=141s$ (Fig.7). Si osserva, a questo punto, che l'effetto benefico dello sprinkler, che è quello di raffreddare i fumi ed irrorare le superfici di acqua rallentandone l'accensione o sopprimendone la combustione, comporta come effetto negativo la produzione di vapore che, a causa del repentino aumento di volume (l'acqua si espande circa 1700 volte nel passaggio di stato da liquido a vapore), oltre a comprimere verso il basso i fumi, compromette l'efficacia degli evacuatori di fumo e calore (EFC).

L'evacuatore di fumo e calore (EFC) che si trova più vicino al plume dell'incendio si apre (al tempo $t=150s$) comandato dalla termocoppia virtuale posta al centro di esso. In copertura durante tutta la durata della simulazione non si raggiunge mai la temperatura di ignizione ($405^{\circ}C$) del lucernario in vetroresina collocato sopra l'incendio che pertanto risulterà sempre chiuso.

Il contenimento delle temperature a soffitto è dovuto all'operazione congiunta degli EFC e degli sprinkler. Gli EFC, infatti, espellono il fumo e il calore accumulatisi in copertura mentre gli sprinkler, oltre ad abbassare la temperatura dei prodotti della combustione, intervengono direttamente sul focolare riducendone l'intensità ed evitando la propagazione dell'incendio.

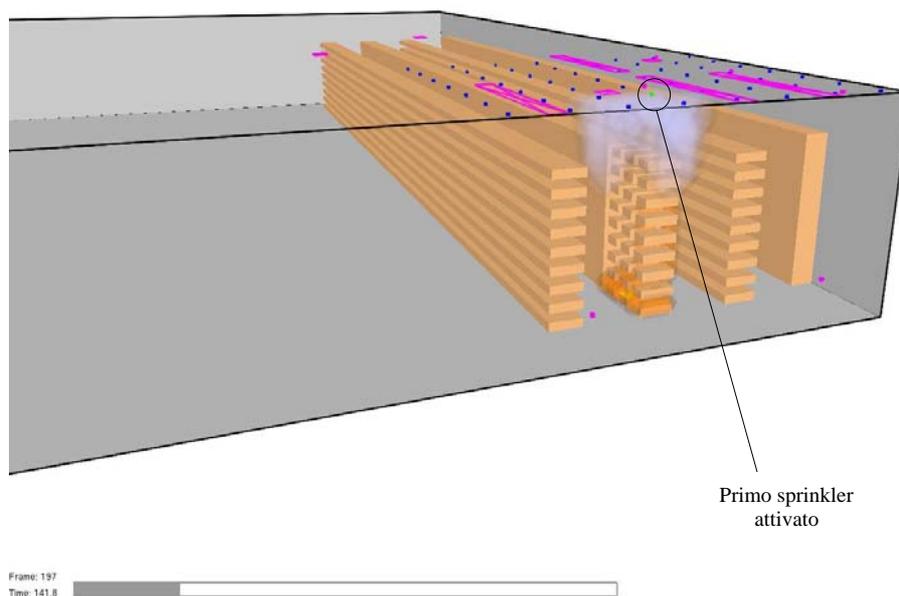


Figura 8 – Attivazione del primo sprinkler al tempo $t=141s$ e produzione di vapore

In figura 10 sono riportate le curve di temperatura in funzione del tempo misurate delle termocoppie Tc1, Tc3, Tc5 e Tc7 che si trovano lungo i percorsi d'esodo ad un'altezza di 2 m. Si può notare che le temperature in corrispondenza delle termocoppie Tc1, Tc3 e Tc7 cominciano ad incrementare dopo che sono trascorsi circa 180s e continuano a crescere mantenendosi comunque al di sotto la soglia dei 34°C. Per quanto riguarda la posizione della termocoppia Tc5 non si osservano apprezzabili scostamenti rispetto alla temperatura iniziale dell'ambiente (che è stata assunta pari a 20°C). In figura 11, analogamente, sono riportate le curve di temperatura in funzione del tempo misurate delle termocoppie Tc2, Tc4, Tc6 e Tc9 anch'esse collocate in corrispondenza dei percorsi d'esodo, ma ad un'altezza di 11,95 m (eccezion fatta per la termocoppia Tc9 che si trova in prossimità della colonna di sostegno delle architravi della copertura ad un'altezza di 11 m). In questo caso si osserva che le temperature in corrispondenza delle termocoppie Tc2, Tc4 e Tc6 aumentano, mantenendosi comunque al di sotto della soglia di 85°C, fin quando non interviene il primo sprinkler al tempo t=141s. Lo sprinkler raffredda i prodotti della combustione portando le temperature a soffitto sotto la soglia di 40°C. Un temporaneo aumento dell'incendio fa sì che agli istanti t=510s e t=620s le temperature in copertura abbiano un ulteriore picco che si attesta a circa 60°C. In corrispondenza della termocoppia Tc9 posta in prossimità della colonna non vengono mai superati i 50°C. In figura 12 è, invece, riportata la curva di temperatura in funzione del tempo misurata dalla termocoppia Tc8 che è stata collocata sopra i pallets incendiati per monitorare la sollecitazione termica che devono sopportare i tegoli ed i lucernari della copertura. La temperatura, in questo caso, raggiunge il valore massimo di 180°C al tempo t=170s per poi decrescere, a valori comunque inferiori ai 110°C, in conseguenza dell'intervento dell'impianto sprinkler.

La rappresentazione grafica delle posizioni delle termocoppie Tc1, Tc2, ..., Tc9 è riportata in figura 9. In corrispondenza delle termocoppie Tc1, Tc3 e Tc5 sono stati collocati dei sensori che rilevano la profondità di visibilità (in metri) (Fig.13) e misurano l'altezza media dello strato dei fumi. Per quanto concerne la visibilità, come già anticipato, essa si riduce a circa 14m solo dopo un tempo di circa 660s nella zona più critica che risulta essere quella in prossimità dell'angolo del compartimento dove è stato collocato il sensore Tc1.

In figura 14 sono riportati i valori della potenza termica totale (HRR) rilasciata dal focolare d'incendio. Come si può notare l'incendio progredisce aumentando di intensità (e raggiungendo il picco di 8.550 kW) fin quando non interviene lo sprinkler che abbatte l'incendio provocando la repentina riduzione della potenza termica rilasciata. L'incendio si rinforza d'intensità in due brevi intervalli di tempo ossia dai 418s ai 505s (dove si raggiunge il picco di HRR=5.400 kW) e poi ancora dai 605s ai 678s (dove si raggiunge un ulteriore picco di HRR=8.200 kW).

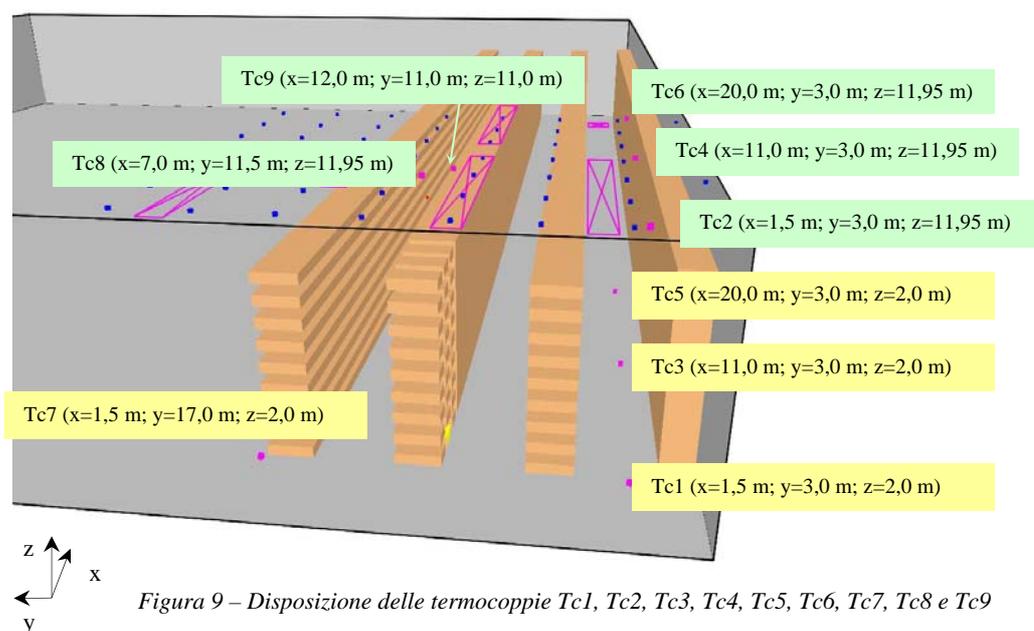


Figura 9 – Disposizione delle termocoppie Tc1, Tc2, Tc3, Tc4, Tc5, Tc6, Tc7, Tc8 e Tc9

Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie Tc1, Tc3, Tc5 e Tc7 ad un'altezza di 2 m

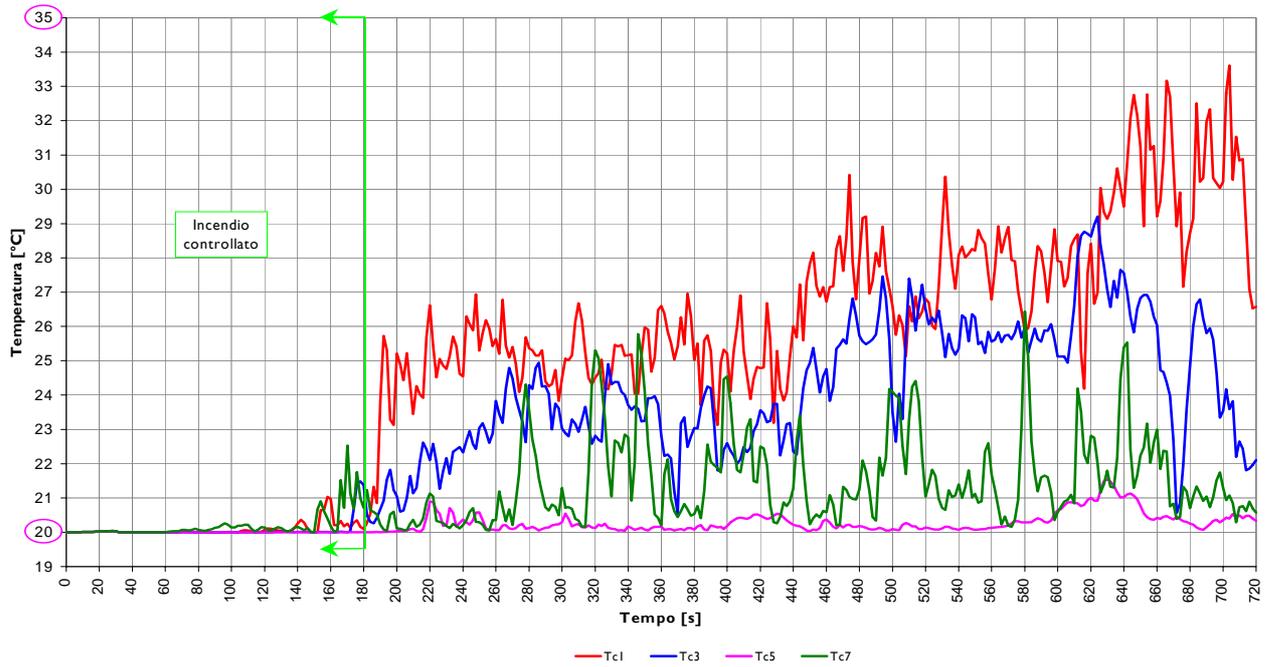


Figura 10 - Curve di temperatura in funzione del tempo misurate delle termocoppie Tc1, Tc3, Tc5 e Tc7 che sono collocate lungo i percorsi d'esodo ad un'altezza di 2 m

Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie Tc2, Tc4, Tc6 ad un'altezza di 11,95 m e da Tc9 ad un'altezza di 11 m

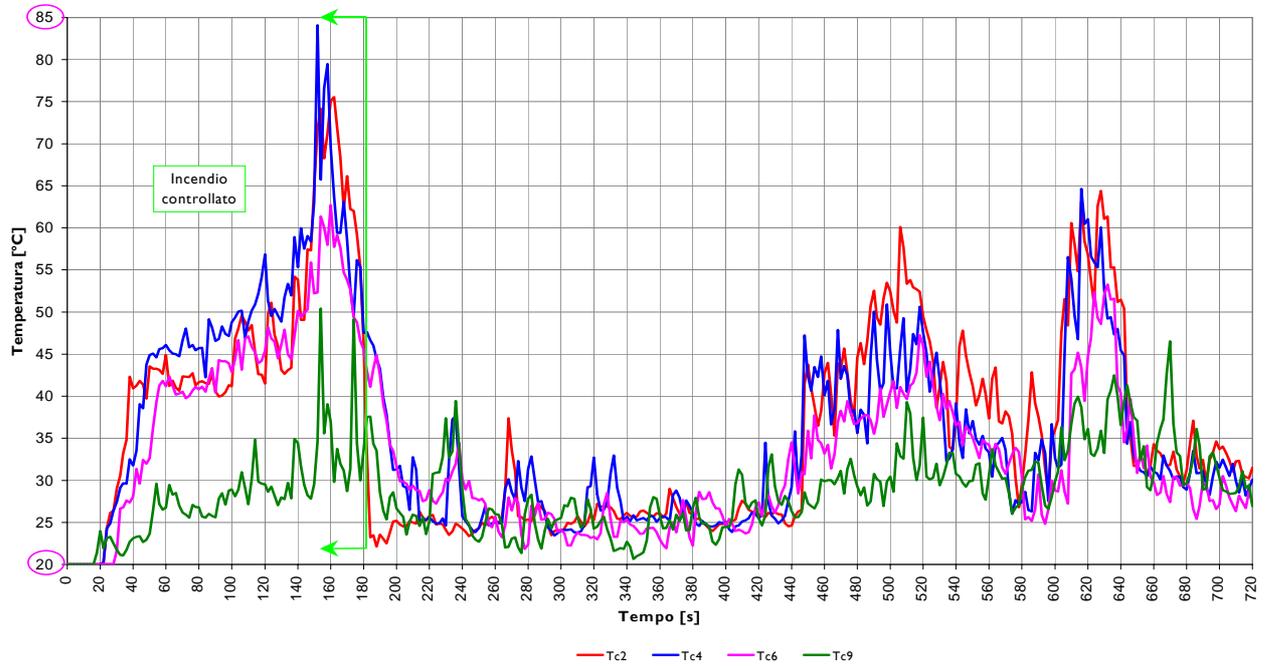


Figura 11 - Curve di temperatura in funzione del tempo misurate delle termocoppie Tc2, Tc4, Tc6 che sono collocate lungo i percorsi d'esodo ad un'altezza di 11,95 m e Tc9 che è collocata in corrispondenza della colonna di sostegno della copertura ad un'altezza di 11 m

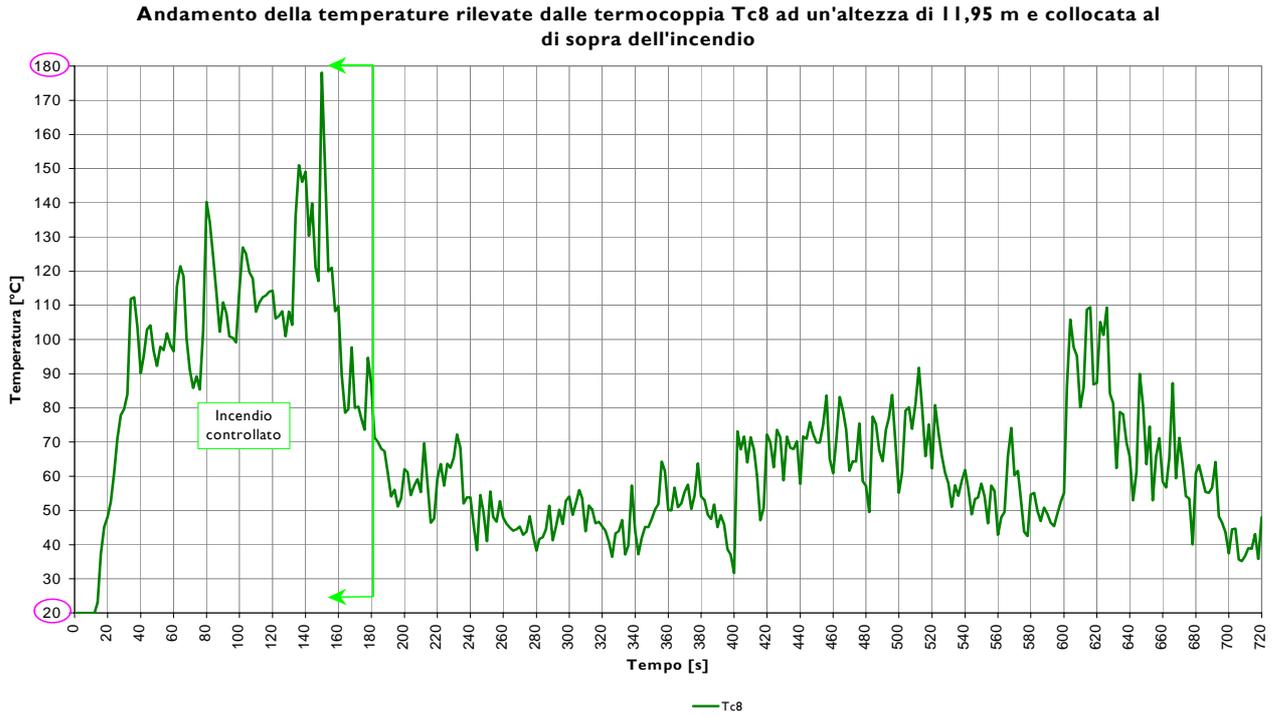


Figura 12 - Curva di temperatura in funzione del tempo misurata della termocoppia Tc8, che è collocata al di sopra dei pallets interessati ad un'altezza di 11,95 m

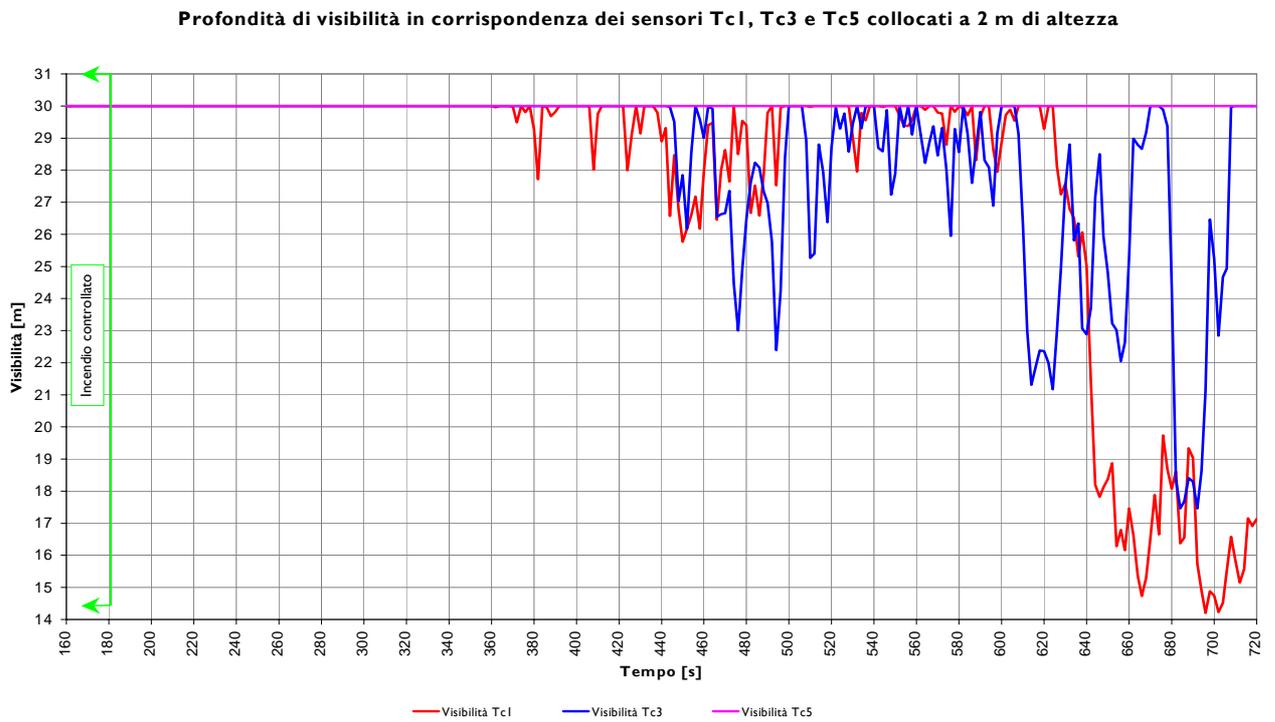


Figura 13 – Andamento della profondità di visibilità in funzione del tempo rilevata in corrispondenza dei sensori Tc1, Tc3 e Tc5 ad un'altezza di 2m

Andamento della potenza termica totale (HRR) rilasciata dal focolare in funzione del tempo

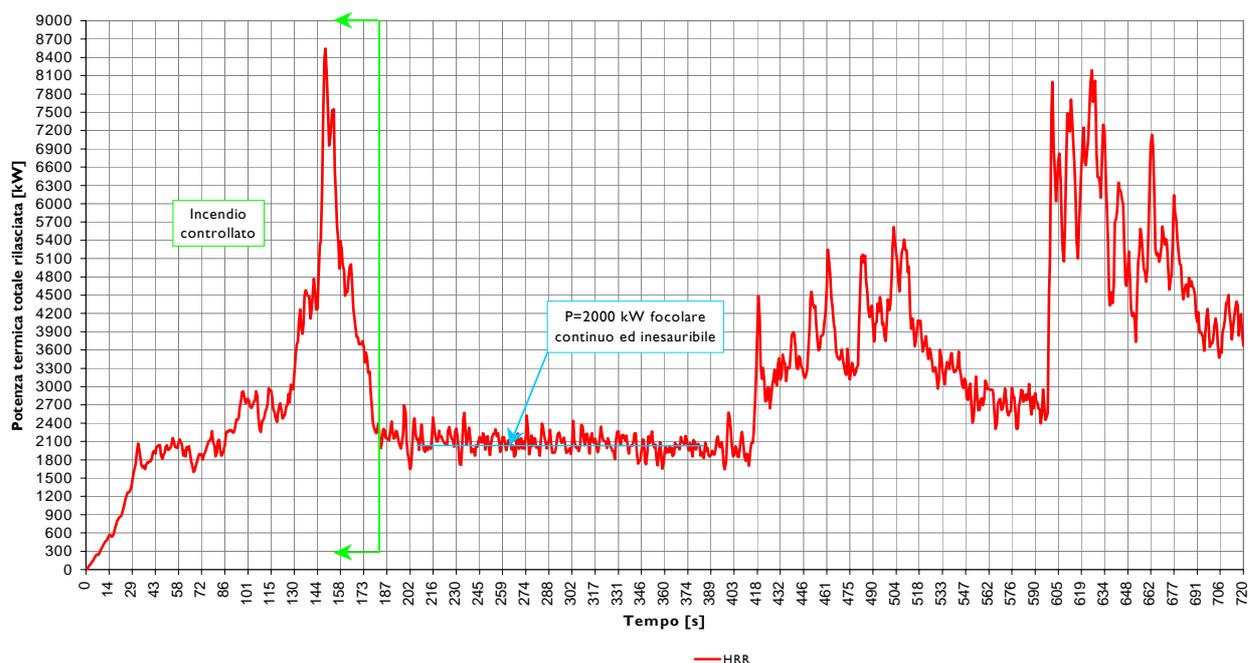


Figura 14 – Andamento della potenza termica (HRR) rilasciata dal focolare d’incendio in funzione del tempo

4.0 CONCLUSIONI

La simulazione condotta all’interno del compartimento si è dimostrata molto sensibile alla puntuale definizione di alcuni parametri di input (quali la curva HRR, la presenza degli impianti di spegnimento a sprinkler e degli evacuatori di fumo e calore), ma soprattutto alla definizione dei materiali interessati dall’incendio. L’aver scelto, infatti, come materiale solido combustibile il Polimetil-Metacrilato (PMMA) ha fatto sì che la produzione di fumi densi interessasse in maniera rapida l’intero volume del compartimento a partire dagli strati superiori e spostandosi via via negli strati inferiori per effetto della spinta verso il basso prodotta dall’attivazione degli sprinkler. Nonostante ciò si è potuto constatare che le temperature, i livelli di visibilità, l’altezza dei fumi raggiunti in corrispondenza dei percorsi d’esodo sono tali da non pregiudicare l’esodo sicuro degli occupanti.

Dalla simulazione si evidenzia la necessità di segnalare in modo chiaro (ad esempio tramite segnaletica orizzontale fotoluminescente) le vie di esodo lungo le quali i sistemi di illuminazione potrebbero risultare inefficaci per la presenza di fumi stratificati. I fumi, infatti, cominciano ad interessare l’area dei percorsi d’esodo dopo circa 340s, tuttavia occorre che trascorrono circa 660s prima che la densità e la concentrazione di tali fumi inizi a ridurre la visibilità. Si osserva comunque che la riduzione della visibilità è un fenomeno localizzato e limitato alla zona prospiciente l’incendio ossia laddove entrano in funzione gli sprinkler.

La simulazione dimostra, inoltre, che le misure di prevenzione e protezione incendi, solitamente consigliate dall’Ente approvatore, possono talvolta risultare inefficaci. Spesso l’utilizzo contemporaneo di sistemi di protezione attiva, quali sprinkler ed evacuatori di fumo e calore non assicura un’adeguata protezione per l’esodo sicuro degli occupanti dato che la ridondanza degli stessi, se non è supportata da un adeguato sistema di coordinamento, può addirittura risultare peggiorativa. L’effetto non coordinato degli evacuatori di fumo e calore e degli sprinkler, infatti, comporta una stratificazione dei prodotti della combustione impattando in maniera consistente sui sistemi di esodo e rendendo inefficaci gli evacuatori stessi.

Si vede peraltro come anche la compartimentazione passiva e, come nel caso in esame, l’inserimento di separazioni tra compartimenti attraverso filtri a prova di fumo possono risultare ininfluenti ai fini antincendio e comportare limitazioni all’uso della struttura e cospicue spese di realizzazione e manutenzione della stessa.

Attraverso questo studio si evidenzia che, per compartimenti di grande volume ed altezza utilizzati come magazzini di materiale normalmente combustibile, risultano sufficientemente efficaci compartimentazioni passive fino a 3.5 m da terra.

Per quanto concerne le strutture si è potuto rilevare che l'intervento degli sprinkler mantiene entro limiti accettabili (180°C) le temperature a soffitto ed in corrispondenza degli elementi portanti della struttura.

L'aver considerato, infine, un innesco doloso ed una curva veloce di incendio ha consentito di ridurre i tempi della simulazione rendendo tuttavia estremamente rapida la dinamica degli eventi con un innalzamento assai rapido del plume dell'incendio e con un pronto intervento degli sprinkler e degli EFC investiti dal calore.

La presente elaborazione dimostra quanto sia di grande ausilio, sia per la verifica della praticabilità dei percorsi d'esodo, sia per il dimensionamento delle strutture, in caso d'incendio, un approccio di tipo prestazionale ed ingegneristico, che consideri la reale evoluzione di un incendio, rispetto a quello deterministico basato sulla curva nominale standard ISO 834.

5.0 BIBLIOGRAFIA

[1] Kevin B.McGrattan, *Fire Dynamic Simulator (FDS) (Version 4) – Technical Reference Guide*, NIST Special Publication 1018 (March 2006) Ed. National Institute of Standards and Technology;

[2] Kevin B.McGrattan, Glenn P.Forney, *Fire Dynamic Simulator (FDS) (Version 4) – User's Guide*, NIST Special Publication 1017 (August 2004) Ed. National Institute of Standards and Technology, Building And Fire Research Laboratory;

[3] Kevin B.McGrattan, Glenn P.Forney, *Smokeview Version 4 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data – User's Guide*, NIST Special Publication 1017 (August 2004) Ed. National Institute of Standards and Technology, Building And Fire Research Laboratory;

[4] Kevin B.McGrattan, Anthony Hamins, David Stroup, *Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Interaction - Large Scale Experiments and Model Development*, NISTIR 6196-1 (September 1998), Ed. National Institute of Standards and Technology, Building And Fire Research Laboratory;

[5] R.W.Bucowski, *How to evaluate alternate designs that are based on fire modeling*, 1994;

[6] Gianluca Vigne, Stefano Marsella, *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio nel sistema normativo italiano*. Rivista Antincendio, anno 53 - n° 1 – gennaio 2001, Roma, editrice EPC;

[7] Gianluca Vigne, Stefano Marsella, *L'approccio ingegneristico alla protezione dagli incendi*, Rivista Antincendio, anno 51 - n° 11 - novembre 1999, Roma, editrice EPC;

[8] A. La Malfa, *Ingegneria della Sicurezza Antincendio* - 2003, Ed. Legislazione tecnica.