

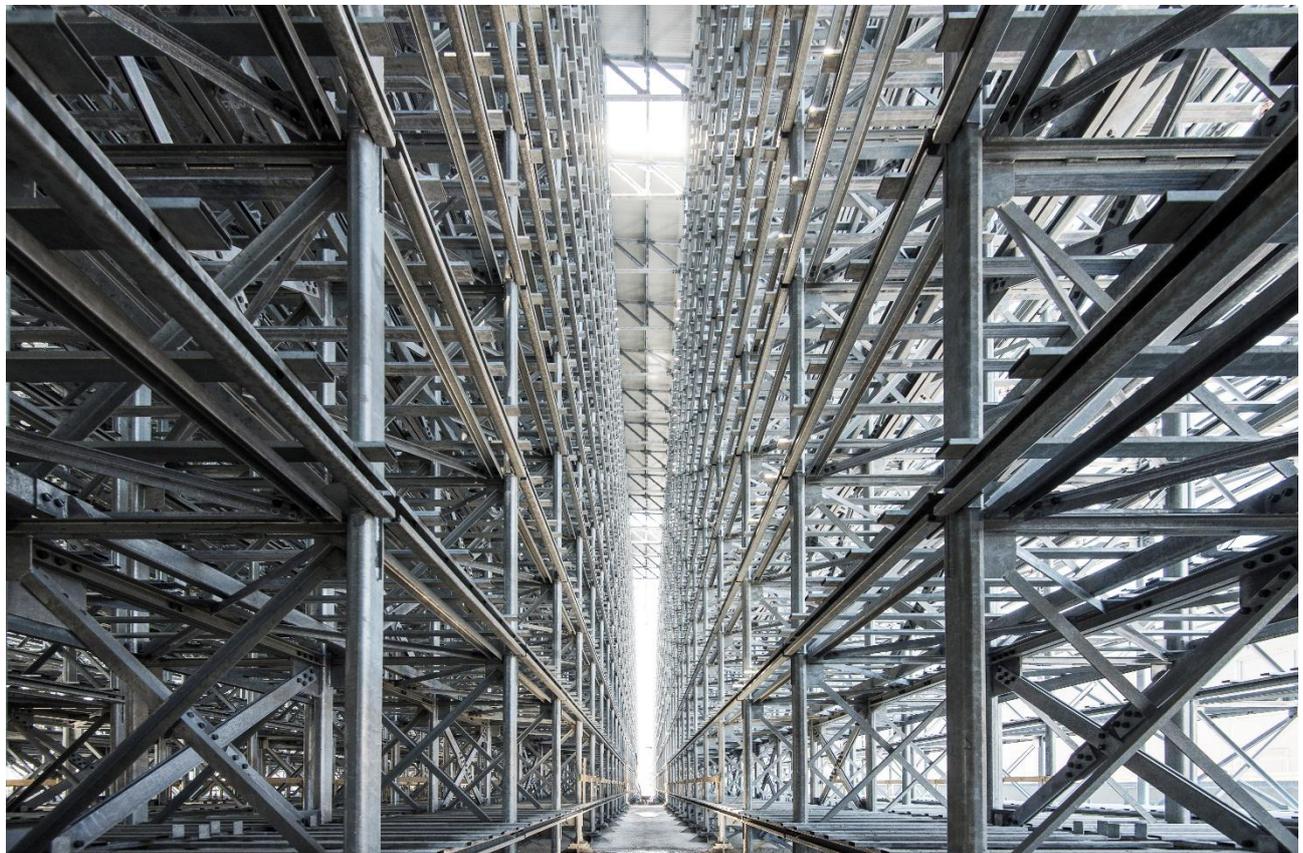
I MAGAZZINI AUTOPORTANTI AUTOMATIZZATI

Verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco
mediante l'applicazione dei metodi dell'ingegneria
della sicurezza antincendio

Documento a cura di:



Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'Incendio



I magazzini autoportanti automatizzati

(A. Marino, E. Nigro, P. Princi, S. Pustorino, C. Thauvoye)



Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'Incendio

Il presente articolo è frutto delle attività della Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio. Il Tavolo Tecnico-Scientifico permanente è stato istituito il 20 gennaio 2006 su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco ed è finalizzato a valutare i risultati della ricerca nazionale ed europea, all'analisi tecnica della norma nazionale e confronto con quella europea al fine di fornire contributi tecnici per un suo aggiornamento. La Commissione fornisce strumenti appropriati all'organo di controllo per la valutazione della sicurezza delle strutture in acciaio in caso di incendio e volti a garantire l'aggiornamento professionale dei tecnici impegnati nell'attività di prevenzione incendi.

La Commissione è composta da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale, da docenti universitari e da liberi professionisti:

- Prof. Ing. Emidio Nigro (Coordinatore) - Ordinario di Strutture Speciali e Tecnica delle Costruzioni Università Federico II di Napoli;
- Ing. Mauro Caciolai – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco;
- Ing. Andrea Marino – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco;
- Ing. Sandro Pustorino – Libero professionista

Prestano la loro collaborazione su aspetti specifici in merito alla sicurezza strutturale e alla protezione attiva:

- Ing. Luca Ponticelli – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ing. Piergiacomo Cancelliere – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ing. Armando De Rosa – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

Per tutte le informazioni sulle attività della Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso d'Incendio e di Fondazione Promozione Acciaio: www.promozioneacciaio.it

© Documento di proprietà di Fondazione Promozione Acciaio.
Diritti di riproduzione riservati
Pubblicazione: Gennaio 2025

I MAGAZZINI AUTOPORTANTI AUTOMATIZZATI

Verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco

mediante l'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio

AUTORI

A. Marino, Corpo nazionale dei Vigili del fuoco

E. Nigro, Università di Napoli "Federico II"

P. Princi, SIS Ingegneria

S. Pustorino, SIS Ingegneria

C. Thauvoye, CTICM France

SOMMARIO

La normativa di prevenzione incendi vigente, a partire dal DM 03-08-2015, comprende un nuovo livello di prestazione della resistenza al fuoco: il livello I, assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale. Questo livello di prestazione trova frequente applicazione nel caso dei magazzini intensivi, quando essi sono utilizzati senza la presenza permanente di personale operativo. Un recente documento [18] promosso da AISEM è stato prodotto con l'obiettivo di verificare l'applicazione dei metodi di calcolo disponibili nell'ambito della normativa vigente, che consentono di progettare questa prestazione delle strutture di acciaio. In particolare, è stata eseguita un'applicazione al caso studio delle strutture di acciaio di un magazzino autoportante automatizzato. L'utilizzo dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio al progetto delle strutture di acciaio, in questo caso progettuale, è particolarmente interessante, perché in molti casi la soluzione conforme non è di facile realizzazione.

Nel presente articolo sono sintetizzati e commentati i contenuti di questo report, illustrando il caso studio analizzato e le procedure di calcolo eseguite.

1. I MAGAZZINI AUTOPORTANTI AUTOMATIZZATI E LE PRESTAZIONI DI RESISTENZA AL FUOCO

Il caso studio individuato è un magazzino autoportante automatizzato destinato al deposito di materiali cellulosici e/o plastici. La struttura del magazzino è in acciaio ed è composta da profili sagomati a freddo (Tab. 1). Viste le caratteristiche di questi elementi, di piccolo spessore, e le caratteristiche dello stoccaggio, con presenza di importanti quantitativi di materiale combustibile in prossimità delle strutture, i tempi di resistenza al fuoco di questi magazzini sono abbastanza ridotti.

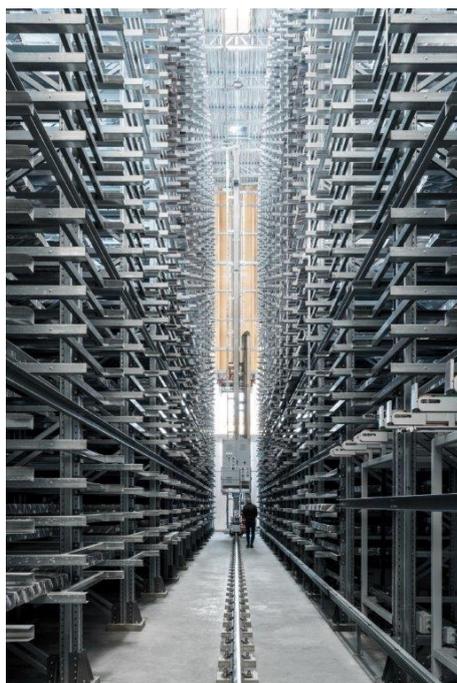


Fig. 1. Foto di magazzino autoportante automatizzato

I principali livelli di prestazione di resistenza al fuoco previsti dalla normativa nazionale vigente [1] sono i seguenti:

- livello I, assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale;
- livello II, mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione;
- livello III, mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.

La tipologia di magazzini oggetto dello studio viene realizzata in genere con prestazioni di resistenza al fuoco corrispondenti al livello I o al livello II. In generale, la richiesta di prestazione di resistenza al fuoco è limitata al livello di prestazione I nei casi in cui la strategia antincendio non comprende la sicurezza di operatori presenti all'interno dell'attività, al livello di prestazione II (comprese ovviamente anche le prestazioni del livello I) quando la strategia antincendio comprende anche la sicurezza degli operatori presenti all'interno dell'attività, al livello di prestazione III quando la strategia antincendio non può essere limitata alla sola sicurezza di operatori presenti all'interno dell'attività.

2. IL CASO STUDIO

La struttura portante dell'edificio è costituita dalle scaffalature predisposte per lo stoccaggio delle merci, in modo da permettere il massimo sfruttamento della superficie disponibile con un'elevata densità di stoccaggio e la movimentazione delle merci totalmente automatizzata.

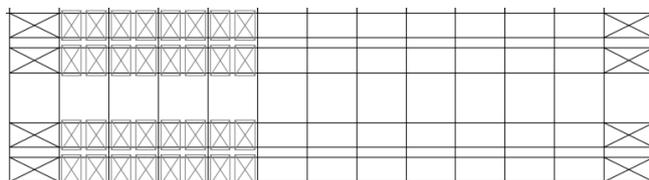


Fig. 2. – Strutture di acciaio: pianta

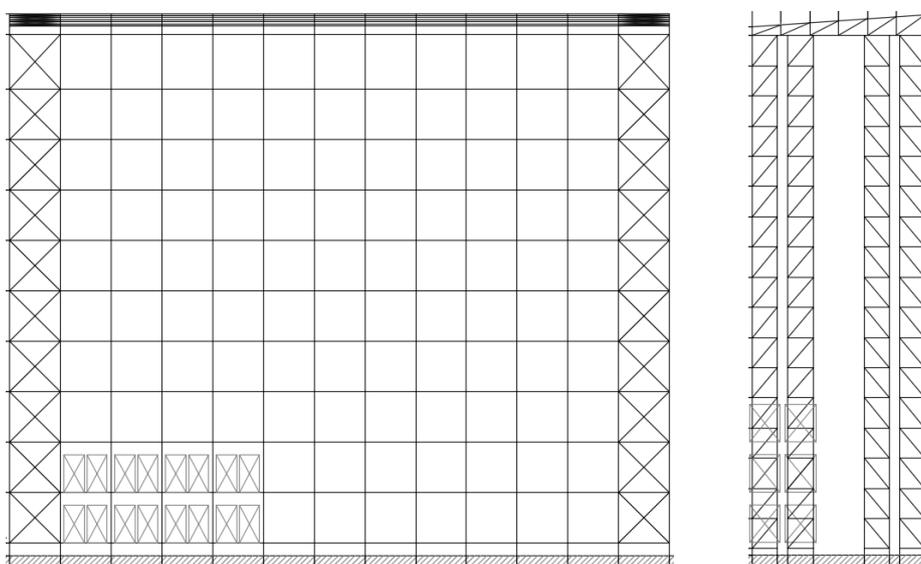


Fig. 3. – Strutture di acciaio: sezione longitudinale – sezione trasversale

Tutti gli elementi strutturali sono profili di acciaio, tipo S350, sagomati a freddo. Essi sono stati dimensionati da AISEM [18] in accordo alla normativa vigente per la verifica delle azioni previste in accordo a [3], ad eccezione delle verifiche in caso di incendio, che sono eseguite nel report [18].

I collegamenti degli elementi strutturali di acciaio non sono stati specificamente definiti, ma per essi sono stati individuati i criteri di verifica, tenendo conto che la loro prestazione è molto importante, se non fondamentale, per la verifica del livello di prestazione dell'intera struttura.

3. I CRITERI DI CALCOLO E DI VERIFICA

L'obiettivo dell'analisi quantitativa è:

- verificare che il meccanismo di collasso della struttura portante in caso di incendio sia verso l'interno della costruzione, nel caso in cui la verifica sia limitata al livello di prestazione I;
- in aggiunta a quanto previsto dal punto precedente, determinare anche i tempi di stabilità della struttura portante in acciaio, nel caso in cui la verifica sia eseguita per il livello di prestazione II.

L'analisi quantitativa è eseguita mediante i criteri previsti dalla normativa vigente [2] per le soluzioni alternative. A questo scopo sono definiti un certo numero di scenari di incendio di progetto, determinati ad hoc per gli obiettivi e le prestazioni che devono essere verificati.

L'analisi di ogni scenario di incendio di progetto è eseguita in due fasi:

- analisi dell'incendio naturale di progetto, mediante modelli di calcolo di tipo avanzato previsti dalle norme [2], [5], [7];
- analisi del comportamento termico e meccanico della struttura di acciaio, mediante l'impiego di modelli di calcolo agli elementi finiti, secondo quanto previsto dalle norme [6], [7]. Questa analisi è eseguita con riferimento alle sottostrutture determinate ad hoc (normativa vigente "analisi di parti della struttura"), in cui le condizioni al contorno sono individuate in modo tale che sia correttamente determinato il loro comportamento all'interno della struttura.

L'analisi di ogni scenario di incendio di progetto è stata condotta con due diversi approcci. Il primo, più generale, è eseguito mediante l'applicazione dei seguenti modelli:

- per l'analisi degli incendi naturali di progetto, modelli di fluidodinamica computazionale;
- per l'analisi del collasso strutturale, modelli agli elementi finiti di collasso progressivo della struttura, rientranti tra i modelli di calcolo avanzato previsti dalle norme [5], [6], [7].

Il secondo approccio, valido sotto opportune ipotesi che, caso per caso, devono essere verificate, è eseguito mediante l'applicazione dei seguenti modelli:

- per l'analisi degli incendi naturali di progetto, applicazione dei modelli di incendio di tipo localizzato, in combinazione con i modelli di incendio a zone [5], [6], [7];
- per analisi delle strutture di acciaio in condizioni di incendio, applicazione di modelli agli elementi finiti rientranti tra i modelli di calcolo avanzato [5], [6], [7].

4. GLI SCENARI DI INCENDIO DI PROGETTO

4.1 Introduzione

Come previsto dai criteri definiti per la progettazione delle soluzioni alternative, per verificare le prestazioni della struttura di acciaio sono individuati un certo numero di scenari di incendio di progetto, determinati ad hoc per gli obiettivi e le prestazioni che devono essere verificati.

4.2 Scenari di progetto n. 1-2-3-4

Gli scenari di incendio di progetto determinati sono sinteticamente rappresentati nella Figura 5.

Si tratta di n. 4 scenari di incendio di progetto, ognuno dei quali è stato determinato con le sue caratteristiche e la sua posizione, fornendo i motivi per cui ognuno di esso in questo progetto rappresenta una situazione particolarmente impegnativa per gli obiettivi e le prestazioni che devono essere verificati.

Nello scenario di incendio di progetto n. 1, l'incendio inizia in uno dei pallet che si trova alla base di uno dei montanti centrali. Questo scenario è significativo, perché porta al collasso della struttura quando il focolaio d'incendio interessa per primi i montanti più sollecitati in una posizione centrale della struttura.

Per motivi di sintesi sono riportati solo i risultati delle analisi dello scenario di incendio di progetto n. 1.

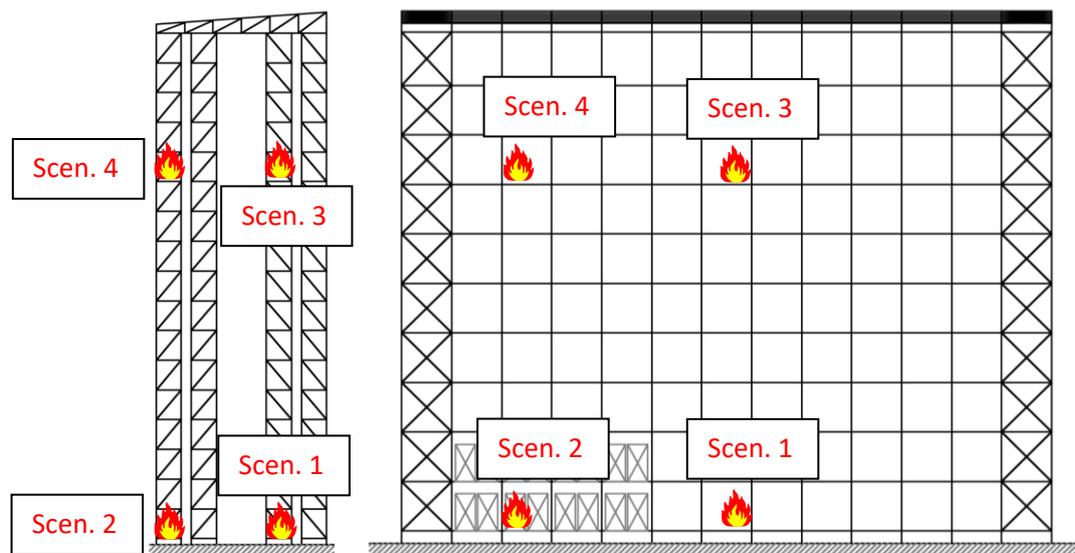


Fig. 4.– Posizione dell'incendio – Sezione trasversale e longitudinale

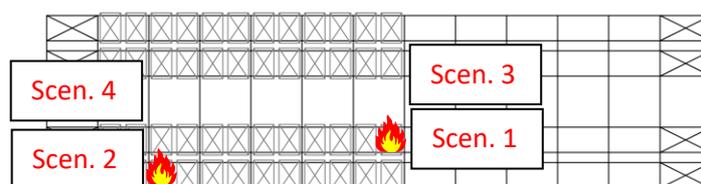


Fig. 5.– Posizione dell'incendio – Pianta

5. SCHEMI STRUTTURALI E SOTTOSTRUTTURE DI CALCOLO

L'analisi del comportamento della struttura in condizioni di incendio è eseguita mediante l'analisi di sottostrutture (normativa vigente "analisi di parti della struttura"), in cui le condizioni al contorno sono individuate in modo tale che sia correttamente determinato il loro comportamento all'interno della struttura. In particolare, le condizioni al contorno devono permettere di simulare eventuali dilatazioni impedito o interazioni con altre parti della struttura.

Per sviluppare l'analisi strutturale in condizioni di incendio sono state individuate n. 3 sottostrutture:

- una sezione longitudinale (struttura 2D), corrispondente alla sezione longitudinale tipica della struttura;
- una sezione trasversale (struttura 2D), corrispondente ad una sezione trasversale tipica della struttura (Figura 16);
- una porzione della struttura comprendente n. 7 telai trasversali collegati dalle longherine longitudinali e controventati (struttura 3D).

In generale, l'uso delle sottostrutture per gli obiettivi considerati è stato così previsto:

- per l'analisi strutturale eseguita per la verifica del livello I di prestazione, in generale possono essere utilizzate le sottostrutture 2D, sottostrutture n. 1 e n. 2, in quanto i risultati non richiedono l'esatta determinazione dei tempi con cui si verifica il fenomeno, ma solo la tipologia del meccanismo di collasso (collasso della struttura verso l'interno della costruzione);
- per l'analisi strutturale eseguita per la verifica del livello II di prestazione deve essere utilizzata la sottostruttura 3D, n. 3, in quanto è necessaria la valutazione dei tempi di collasso della struttura.

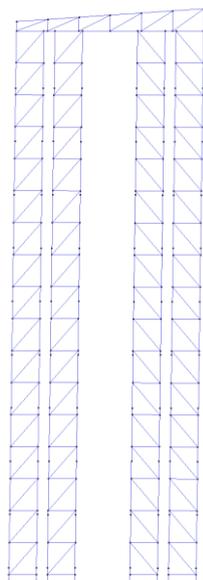


Fig. 6.a– Sottostruttura n. 2

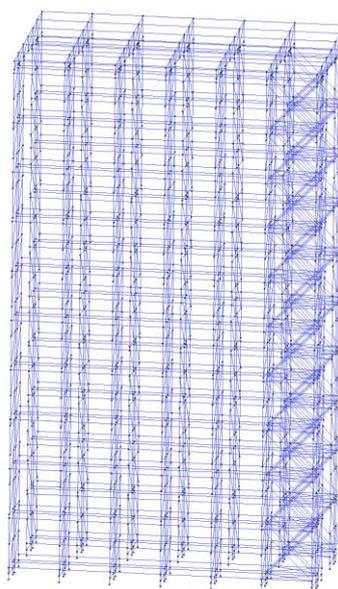


Fig. 6.b– Sottostruttura n. 3

6. ANALISI DEGLI INCENDI NATURALI DI PROGETTO

L'analisi dell'incendio di progetto è stata eseguita mediante due differenti approcci.

Nel primo approccio essa è stata eseguita mediante l'impiego di:

- modelli di campo fluidodinamico.

Nel secondo approccio essa è stata eseguita mediante l'impiego integrato di:

- modelli di incendio localizzato, riferiti in particolare alla fase pre-flashover;
- modelli di incendio a zone, riferiti in particolare alla fase post-flashover dell'incendio di progetto.

6.1 Dati di progetto

L'incendio di progetto è determinato dalla combustione del materiale stoccato nel magazzino.

Le dimensioni, i pesi e la composizione del singolo pallet sono:

- dimensioni (0.8 m x 1.2 m x 1.5 m);
- peso statico 1000 kg;
- composizione pallets 50% plastica, 50% materiale incombustibile.

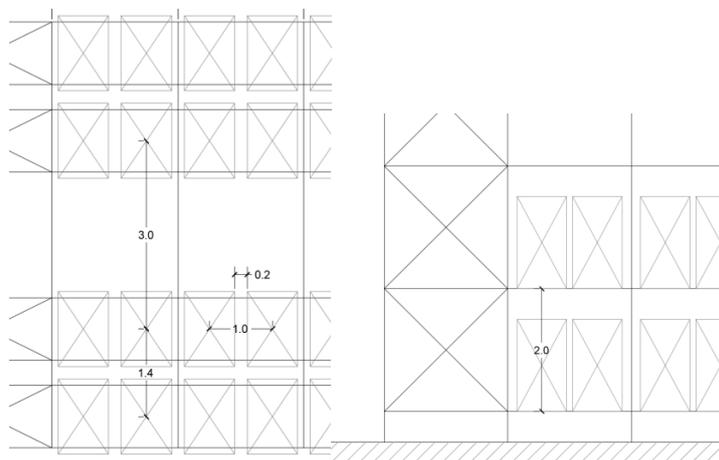


Fig. 7.– Layout dello stoccaggio: Pianta - Sezione

Curva RHR focolaio d'innescò (n. 1 pallet stoccato):

- potere calorifico 30 MJ/kg [11];
- $t_{\square} = 150$ s riferito a singolo pallet (significative quantità di materiali plastici impilati [2]);
- $RHR_f = 1'500$ kW/m² dati sperimentali, bibliografia [10].

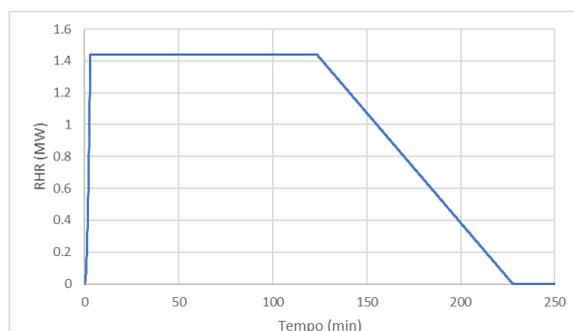


Fig. 8.– Curva RHR (n. 1 pallet)

6.2 Primo approccio: applicazione di modelli di campo fluidodinamico

L'analisi quantitativa degli scenari d'incendio di progetto è sviluppata mediante l'impiego del programma Fire Dynamics Simulator (FDS), sviluppato dal National Institute of Standards and Technology (NIST): si tratta di un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) per il calcolo del flusso fluido dovuto al fuoco.

Va ricordato che nelle simulazioni non sono stati considerati gli effetti dei dispositivi di protezione attiva (sprinkler, ecc.).

Di seguito sono riportati i risultati delle simulazioni relative allo scenario di incendio di progetto n. 1.

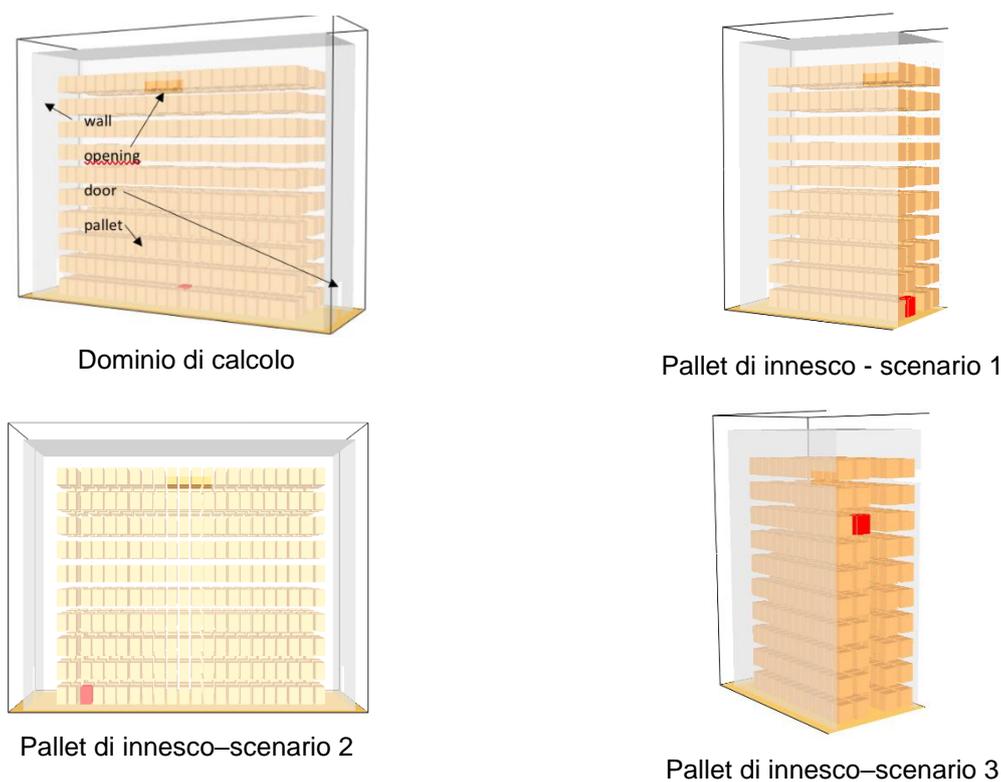


Fig. 9.– FDS dominio e posizione dell'innescò dell'incendio

6.2.1. Scenario di incendio di progetto n. 1

Le figure seguenti mostrano il tasso di rilascio di calore, la propagazione dell'incendio, la rappresentazione dei pallet in fiamme durante l'incendio per questo scenario. Nei primi 300 s la crescita è piuttosto lenta, con una propagazione ai pallet adiacenti a 180 s e 240 s. Ciò è dovuto all'inerzia termica del pallet. In una seconda fase, l'incendio si propaga verticalmente tra 300 s e 900 s. Con il passare del tempo, vengono coinvolti più pallet e il riscaldamento di quelli superiori è più rapido. Infine, le fiamme raggiungono il soffitto e si propagano sia sotto il soffitto sia lateralmente dopo 900 s.

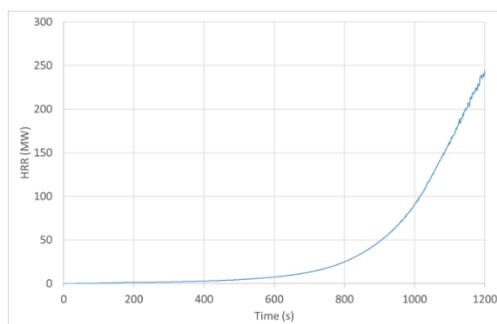


Fig. 10.– Curva RHR

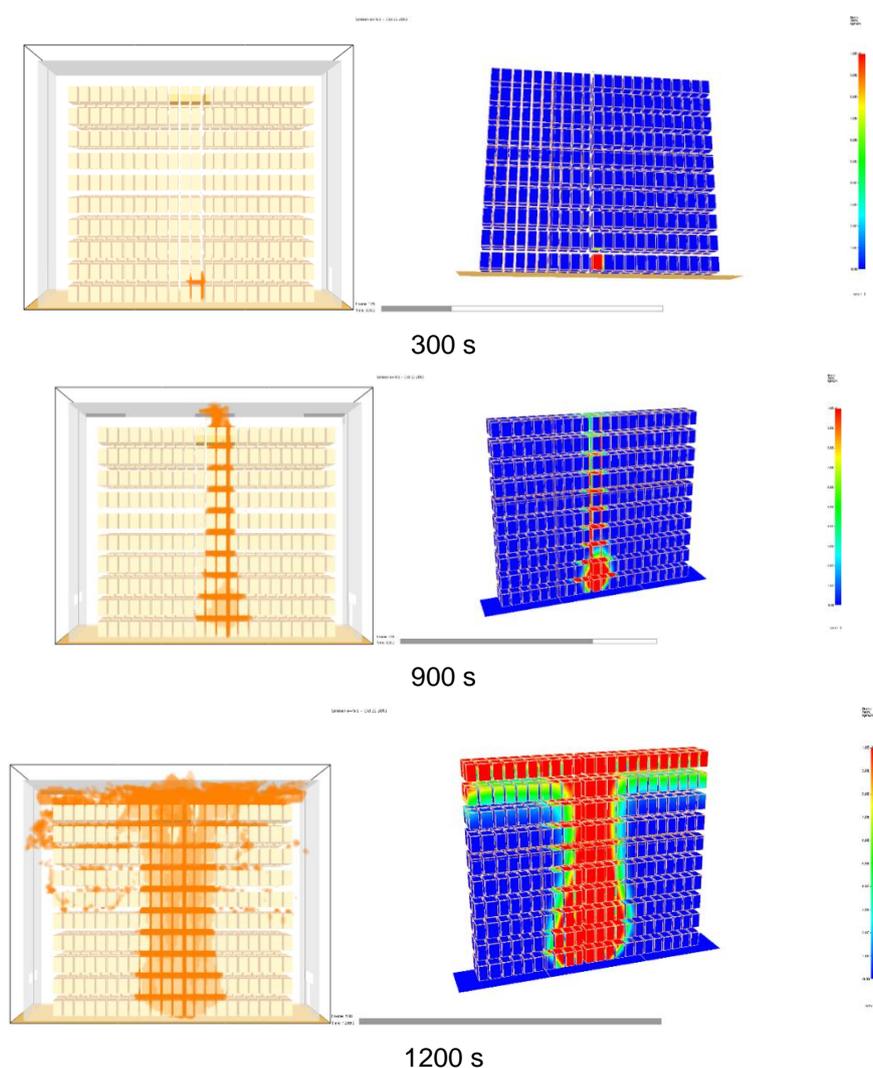


Fig. 11.– Rilascio di calore (a sinistra) – tasso di combustione (a destra)

6.3 Secondo approccio: combinazione di modelli di incendio localizzato e modelli a zone

Tenendo conto delle ipotesi con cui si può schematizzare il caso di un incendio localizzato, la propagazione tra i pallet è stata determinata sulla base dei seguenti parametri:

- temperatura di accensione pari a 250°C, corrispondente alla temperatura di accensione predefinita del legno (che è il primo elemento combustibile ad accendersi) o raggiungimento dell'altezza della fiamma al livello del pallet superiore, per la combustione dei pallets in altezza (il tempo minore tra i due);
- temperatura di accensione pari a 250°C per la combustione dei pallets in piano.

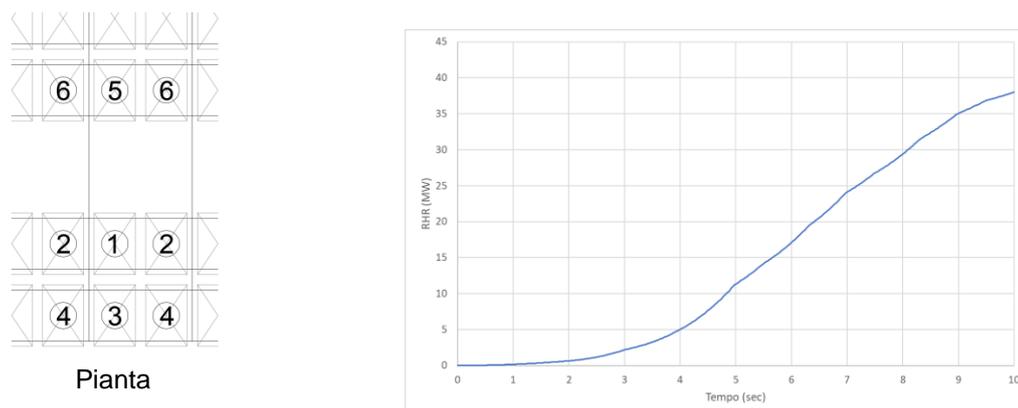


Fig. 12.– Secondo approccio: schemi della propagazione e curva RHR risultante

7. ANALISI TERMICA DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO

7.1 Introduzione

Per la progettazione di una soluzione alternativa, l'analisi termica delle strutture di acciaio deve essere condotta mediante l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato previsti dalla norma UNI EN 1993-1-2 [6].

Nei due approcci essa è eseguita mediante l'applicazione di due diversi modelli agli elementi finiti validati per l'analisi delle strutture di acciaio in condizioni di incendio, come previsto dalla normativa vigente [2], [4], che consentono di eseguire sia l'analisi termica sia quella meccanica in condizioni di incendio, considerando le proprietà termiche e meccaniche dell'acciaio, conformemente a quanto previsto dalle norme UNI EN 1991-1-2 [5] e UNI EN 1993-1-2 [6].

7.2 Primo approccio: analisi strutturale basata sui modelli CFD

Per ogni scenario d'incendio di progetto selezionato, le analisi numeriche sono eseguite in due fasi successive:

- fase 1, viene eseguita un'analisi del trasferimento di calore utilizzando il codice ANSYS per stimare la distribuzione e l'evoluzione nel tempo delle temperature raggiunte dalle membrature strutturali esposte al fuoco;
- fase 2, a partire dai campi di temperatura precedentemente calcolati, si analizza il comportamento al fuoco della struttura in acciaio utilizzando il codice Ls-Dyna. L'approccio di simulazione numerica utilizzato combina fasi di calcolo implicite ed esplicite e consente di ottenere stati deformativi molto avanzati della struttura studiata.

Le analisi del trasferimento di calore vengono eseguite utilizzando le seguenti ipotesi:

- le proprietà termiche dell'acciaio sono quelle indicate nella norma EN 1993-1-2 [6];
- tutte le membrature strutturali sono considerate esposte al fuoco su quattro lati;
- per calcolare i flussi di calore trasmessi alla superficie degli elementi strutturali, si adottano i seguenti coefficienti:
 - emissività del fuoco $\varepsilon_m = 1,0$,
 - emissività dell'acciaio al carbonio $\varepsilon_m = 0,7$,
 - coefficiente convettivo $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Di seguito sono riportati i risultati delle analisi relative allo scenario n. 1.

7.2.1 Scenario di progetto n. 1

Le Figure seguenti mostrano la temperatura del rack per il telaio più vicino ($X = 14,1 \text{ m}$) durante 20 minuti.

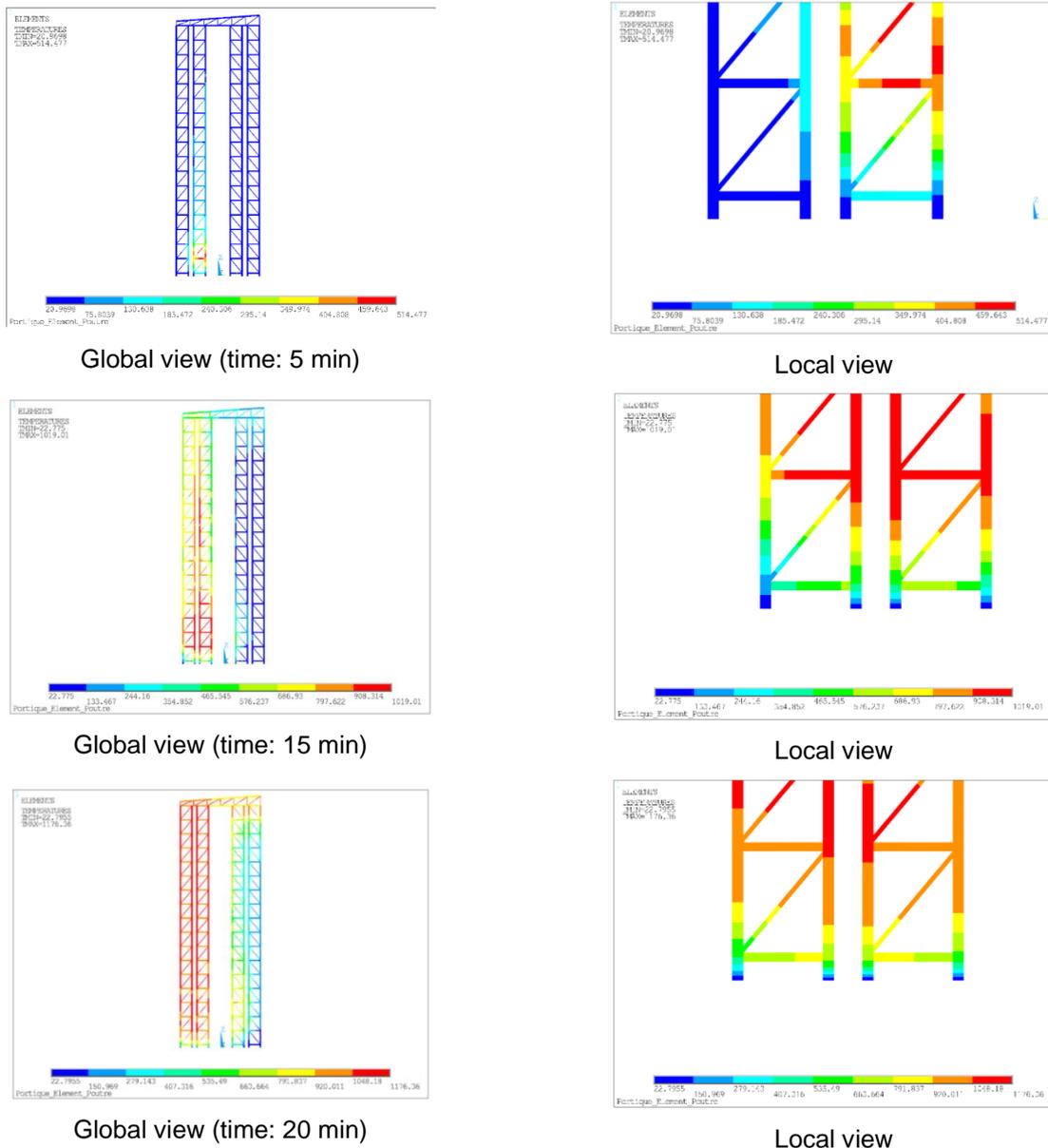


Fig. 13.– Temperature of the rack frame at $X=14.1 \text{ m}$

7.3 Secondo approccio: analisi strutturale basata sui modelli di incendio localizzato

Anche in queste analisi, il comportamento al fuoco della struttura portante del magazzino è valutato in due fasi successive:

- fase 1, è eseguita l'analisi del trasferimento di calore nella struttura di acciaio utilizzando i criteri della trasmissione del calore per irraggiamento, che sono implementati nel codice di calcolo Safir [14];
- fase 2, a partire dai campi di temperatura precedentemente calcolati, è analizzato il comportamento al fuoco della struttura in acciaio, sempre con il modello termomeccanico implementato con Safir.

Le analisi del trasferimento di calore vengono eseguite utilizzando le seguenti ipotesi:

- impiego di modelli bidimensionali agli elementi finiti delle sezioni trasversali dei vari elementi strutturali;
- utilizzo di elementi finiti di superficie a tre o quattro nodi, per rappresentare le sezioni trasversali lungo le membrature studiate e per applicare le azioni termiche;
- implementazione delle proprietà termiche dell'acciaio indicate nella norma EN 1993-1-2 [6];
- tutte le membrature strutturali considerate esposte al fuoco su quattro lati;
- i valori assunti dell'emissività del fuoco e dell'emissività relativa alla superficie dell'acciaio sono quelli indicati nella norma EN 1991-1-2 [4], ossia:
 - emissività del fuoco $\varepsilon_m = 1,0$,
 - emissività dell'acciaio al carbonio $\varepsilon_m = 0,7$,
 - coefficiente convettivo $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

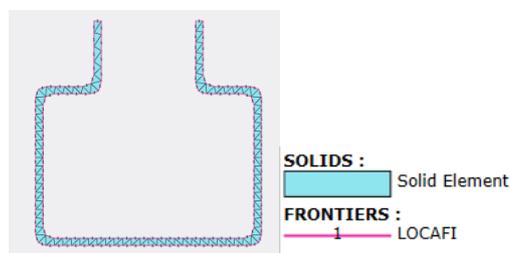


Fig. 14.– Modellazione degli elementi di acciaio nell'analisi termica- Montanti

7.3.1 Scenario di incendio di progetto n. 1

Nelle Figure relative alle analisi termiche si sono adottate le seguenti convenzioni grafiche:

- in rosso, è riportato il contorno che delimita i pallets che sono stati coinvolti nella propagazione dell'incendio di progetto;
- per la sottostruttura analizzata è poi riportato uno schema della numerazione di alcuni elementi assunti significativi, ai fini del confronto tra i risultati ottenuti con i due metodi di calcolo applicato;
- successivamente sono riportati alcuni grafici della temperatura riscontrata in diversi punti della sezione dei montanti verticali della struttura di acciaio, in prossimità del focolaio;
- infine, è riportato l'andamento della temperatura in alcuni elementi significativi della struttura di acciaio.

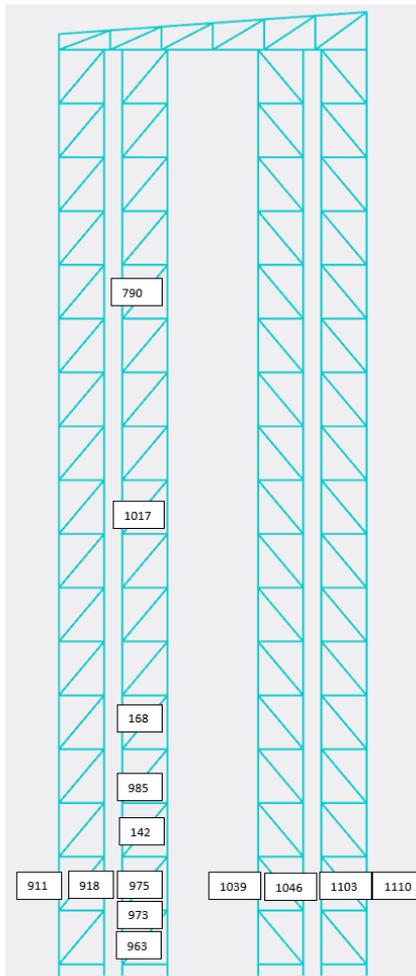


Fig. 15.– Scenario n. 1, numerazione aste, sottostruttura n. 2

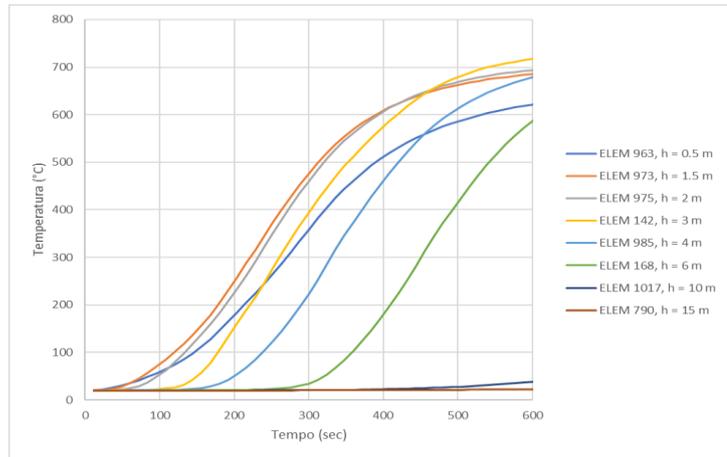


Fig. 15.– Scenario n. 1, T montante più vicino al focolaio (nodo 135), dal più basso (ELEM 963) al più alto (ELEM 790)

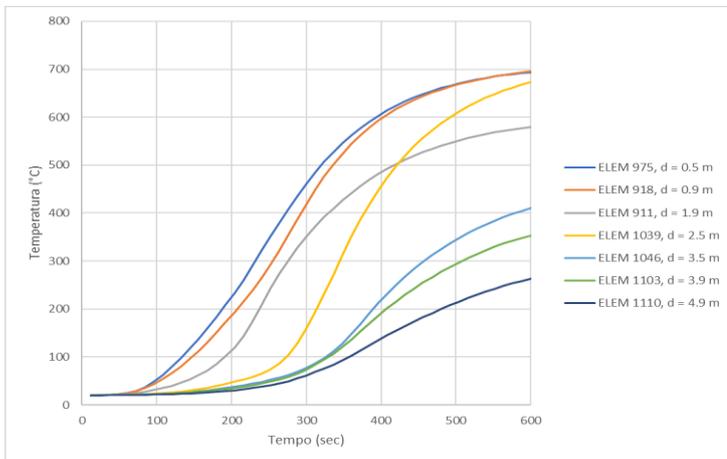


Fig. 15.– Scenario n. 1, T montanti (nodo 135), dal più vicino al focolaio al più lontano (h = 2 m, ELEM 975, ELEM 1110)

7.4 Confronto tra i due approcci

I risultati dell'analisi termica della struttura di acciaio, ottenuti con i due approcci di calcolo, sono stati analizzati e messi a confronto, centrando l'attenzione sui primi 10 minuti dell'incendio di progetto.

I confronti eseguiti hanno permesso di ricavare le seguenti conclusioni:

- la propagazione dell'incendio, nel caso dell'analisi termica eseguita con l'approccio degli incendi localizzati, avviene più velocemente rispetto a quella ottenuta nel caso dell'analisi termica eseguita con l'approccio dei modelli di campo fluidodinamico;
- ciò si verifica soprattutto nei pallets più vicini al focolaio iniziale, mentre nei pallets distanti oltre 10 m in altezza, la propagazione risulta più lenta nell'applicazione semplificata rispetto all'applicazione avanzata.

Ai fini della determinazione dei meccanismi di collasso, queste differenze possono assumere importanza diversa, a seconda del tempo in cui si verifica il collasso della struttura. Ad esempio, le importanti differenze che si riscontrerebbero dopo 20 minuti dall'inizio dell'incendio potrebbero non avere significato, se il collasso avvenisse nei primi 10 minuti dell'incendio.

8 ANALISI TERMO-STRUTTURALI

L'analisi termo-strutturale degli scenari di incendio di progetto è stata condotta mediante l'applicazione di metodi di calcolo avanzato previsti dalla norma UNI EN 1993-1-2 [6] con i suddetti due approcci.

8.1 Analisi termo strutturale basata sull'applicazione dei modelli CFD (primo approccio)

L'analisi termo-strutturale di ogni scenario di incendio di progetto è stata eseguita con i seguenti modelli:

- dapprima con il codice ANSYS [16], per stimare la distribuzione e l'evoluzione nel tempo delle temperature raggiunte dalle membrature strutturali esposte all'incendio;
- poi, a partire dai campi di temperatura calcolati, utilizzando il codice Ls-dyna [17], è stato analizzato il comportamento della struttura in acciaio nella fase di collasso progressivo successiva.

Nel caso in esame, si è ritenuto sufficiente limitare le analisi strutturali allo studio di una struttura 2D, corrispondente ad una sezione trasversale, sulla base delle seguenti considerazioni:

- l'incendio rimane localizzato fino al cedimento delle membrature in acciaio, situate in prossimità della sorgente d'incendio; i sistemi di controventamento sono in numero sufficiente a garantire la stabilità della struttura nella situazione di incendio, evitando così il rischio di collasso progressivo verso l'esterno in direzione longitudinale;
- a causa del loro riscaldamento più rapido, le guide in acciaio che sostengono i pallet hanno una resistenza al fuoco per flessione inferiore rispetto agli elementi in acciaio che formano le spalle degli scaffali; inoltre, quando sono esposte all'incendio, le rotaie dei pallet sviluppano un meccanismo a catenaria, per grande deformazione, che provoca forze assiali di trazione a livello dei loro collegamenti con le spalle degli scaffali.

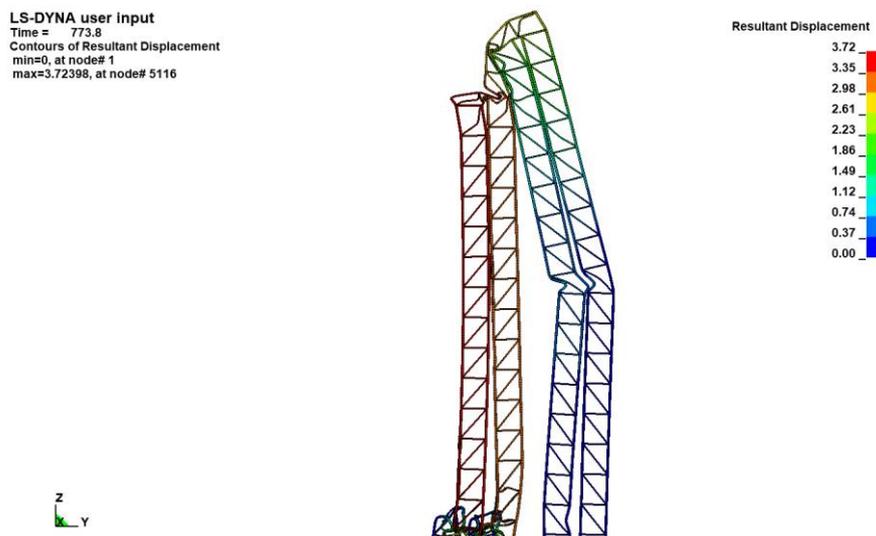
Pertanto, il rischio di crollo verso l'esterno dell'edificio in direzione longitudinale (cioè perpendicolare alle spalle degli scaffali) è stato considerato trascurabile.

Il comportamento meccanico della struttura portante in acciaio a temperatura elevata viene quindi studiato con le seguenti ipotesi:

- le colonne in acciaio sono incernierate alla base;
- le condizioni di vincolo dovute alle parti della struttura non modellate sono prese in considerazione introducendo specifiche condizioni al contorno nei modelli, limitando in modo appropriato i relativi gradi di libertà (spostamenti e rotazioni); queste condizioni sono assunte invariate durante l'esposizione al fuoco;
- le proprietà meccaniche dell'acciaio strutturale a temperatura elevata sono conformi alla norma EN 1993-1-2 [6];
- oltre al peso proprio delle membrature in acciaio, si considerano i carichi permanenti corrispondenti al peso dei pallet (considerati pari a 500 kg) e al peso della copertura; i carichi climatici (vento e neve) non sono considerati, in accordo alla normativa nazionale vigente [3];
- non si tiene conto della caduta dei pallet durante l'incendio.
-

Le figure seguenti mostrano le modalità di cedimento della struttura analizzata nel caso dello scenario di incendio di progetto n. 1.

Il primo cedimento delle membrature in acciaio avviene dopo 10 minuti di esposizione al fuoco, nella parte inferiore della struttura, vicino al focolaio. Il collasso indotto dall'incendio avviene verso l'interno dell'edificio, grazie all'effetto di vincolo esercitato dalla parte più fredda della struttura.



a) hDeformed shape after 773 seconds of fire exposure

Fig. 16.– Modalità di rottura della struttura in acciaio – scenario d'incendio di progetto n°1

8.2 Analisi termo strutturale basata sui modelli di incendio localizzato (secondo approccio)

Il programma di calcolo Safir [14], sviluppato specificatamente per l'analisi delle strutture di acciaio in condizioni di incendio, consente di eseguire sia l'analisi termica che l'analisi meccanica delle strutture di acciaio in condizioni di incendio, considerando le proprietà termiche e meccaniche dell'acciaio conformemente a quanto previsto dalla norma UNI EN 1993-1-2 [6]. In particolare, l'analisi meccanica della struttura consente di tenere conto degli effetti dei grandi spostamenti, delle non-linearità del materiale e delle variazioni delle caratteristiche del materiale in funzione della temperatura per le analisi strutturali in caso di incendio eseguite con i metodi di calcolo di tipo avanzato.

L'analisi strutturale in condizioni di incendio è eseguita tenendo conto anche delle caratteristiche degli elementi di acciaio presenti aventi classe di duttilità IV, ossia di elementi strutturali costituiti da componenti sottili in cui possono verificarsi instabilità locali a livello di sezione trasversale.

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi relativa allo scenario di incendio di progetto n. 1 per la sola sottostruttura n. 2.

Nelle Figure seguenti sono riportate le deformate della struttura nella fase di perdita della stabilità di alcuni montanti, in particolare quelli vicini al focolaio. Questa fase viene raggiunta dopo 412 sec dall'inizio dell'incendio (circa 7 minuti). Le prime rotture si verificano nelle aste di parete dei tralicci verticali in prossimità del focolaio, ma l'analisi prosegue fino alla rottura dei montanti.

Lo spostamento laterale dei nodi di riferimento è circa 5 cm al momento della rottura.

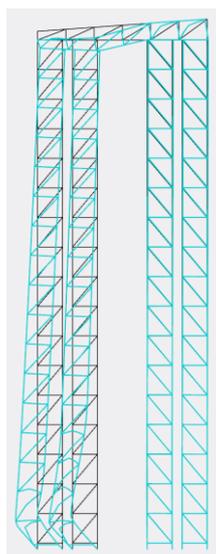


Fig. 17.– Scenario n. 1, deformata della struttura a rottura (x1)

Le analisi eseguite hanno permesso anche di calcolare le sollecitazioni nei collegamenti delle aste (Figura 18), in modo da poter eseguire il loro dimensionamento.

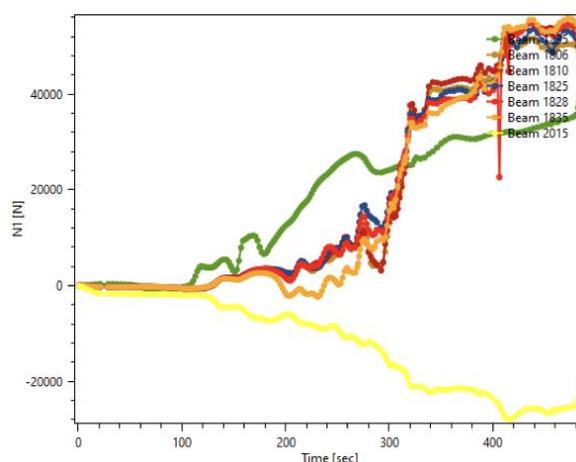


Fig. 18.–Scenario n. 1, sollecitazioni in corrispondenza della cerniera all'estremità dei traversi porta-pallet

9 CONCLUSIONI

Le analisi eseguite hanno permesso di riepilogare alcune conclusioni., che sono di seguito riportate in sintesi. La verifica del livello di prestazione I è possibile mediante la progettazione della soluzione conforme: assicurare nei dintorni del magazzino sufficienti distanze su spazio a cielo libero tali da garantire che il collasso strutturale avvenga senza conseguenze esterne. Qualora non sia possibile garantire tali distanze, la verifica dello stesso livello di prestazione è possibile eseguirla anche con i criteri previsti dalla normativa nazionale per le soluzioni alternative, con le modalità analizzate nel presente documento e di seguito riepilogate.

In presenza di stoccaggi di materiale combustibile, sia di tipo celluloso, sia di tipo plastico, la verifica del livello di prestazione II o III, i quali richiedono rispettivamente classe 30 e classe proporzionata al carico d'incendio specifico di progetto, non è di fatto possibile mediante la progettazione delle soluzioni conformi,

tenendo conto che lo spessore ridotto delle strutture portanti di acciaio esclude la possibilità di impiegare sistemi protettivi antincendio.

Partendo da questi presupposti, le analisi eseguite hanno messo a confronto i risultati delle applicazioni di due approcci progettuali validi per la verifica di soluzioni alternative:

- il primo, basato su analisi eseguite mediante l'applicazione di modelli d'incendio CFD e su conseguenti analisi termo-strutturali dei meccanismi di collasso progressivo delle strutture di acciaio;
- il secondo, basato su analisi eseguite mediante l'applicazione di modelli d'incendio di tipo localizzato e su conseguenti analisi termo-strutturali del comportamento della struttura di acciaio.

Il principale obiettivo di queste analisi è stato quello di comprendere se il secondo approccio, basato sull'applicazione di modelli di calcolo avanzato meno complessi, sia tale da fornire risultati compatibili con la verifica delle prestazioni richieste.

I risultati ottenuti, di seguito riepilogati, sono stati suddivisi per i due principali livelli di prestazione utilizzati per questa tipologia di magazzini, il livello I e il livello II.

Nel caso in cui il livello di prestazione di resistenza al fuoco previsto dalla strategia antincendio dell'attività sia il Livello I, la progettazione delle strutture di acciaio è solitamente finalizzata alla verifica che il collasso strutturale in caso di incendio avvenga con un meccanismo verso l'interno della costruzione. In tal caso le analisi condotte hanno portato alle seguenti conclusioni:

- 1) in tutte e due le analisi eseguite, quella basata sull'applicazione dei modelli CDF e quella basata sull'applicazione dei modelli di incendio localizzato, la crisi strutturale causata dall'incendio è determinata dalla crisi degli stessi elementi strutturali; nel caso dell'applicazione dei modelli di incendio localizzato, la crisi si verifica con un più veloce incremento della temperatura negli elementi che determinano il collasso della struttura: a parità di tempo di sviluppo dell'incendio, le temperature degli elementi sono risultate mediamente 50-100°C più elevate, mentre il collasso strutturale è determinato mediamente con circa 2-5 minuti di anticipo;
- 2) questo minore tempo di resistenza della struttura può essere calibrato mediante una taratura del modello basata sui risultati ottenuti con il programma CFD, in modo da ottenere risultati più precisi;
- 3) la mancata calibrazione porterebbe quindi ad un collasso strutturale più veloce, sulla base del quale il dimensionamento degli elementi vicini al focolaio non subirebbe variazioni, mentre differenze significative potrebbero essere riscontrate negli elementi strutturali disposti più in alto, che si troverebbero ad essere più freddi in fase di collasso;
- 4) seppure i due approcci determinino collassi in tempi differenti, le deformazioni in fase di collasso riscontrate sono rappresentative di un comportamento a rottura sufficientemente simile;
- 5) i modelli d'incendio localizzato, che hanno alcuni limiti di utilizzo insiti nel modello, non riescono a cogliere il riscaldamento delle strutture più lontane dal focolare; le modalità di propagazione non tengono conto dell'influenza e dello stato delle eventuali aperture di ventilazione, risultano quindi non completamente definite e la correttezza dei risultati è affidata maggiormente all'esperienza e alla competenza del progettista rispetto ai risultati derivanti dall'approccio CFD, che conducono a valutazioni tecniche più oggettive;

- 6) in merito al differente riscaldamento della struttura derivante dai due modelli d'incendio, non è di facile valutazione qualitativa l'impatto che ha sui risultati il differente contributo della parte di struttura che resta fredda, differente nei due casi;
- 7) entrambi i metodi applicati hanno permesso di individuare i principali elementi progettuali necessari per verificare che il meccanismo di collasso della struttura di acciaio risulti verso l'interno della costruzione, i quali sono stati:
 - presenza di adeguati elementi di collegamento in copertura degli elementi portanti verticali, nel caso studio analizzato rappresentati dalle travature reticolari presenti in copertura;
 - adeguato dimensionamento in condizione di incendio dei collegamenti degli elementi strutturali di acciaio, che sono determinanti per la verifica del meccanismo di collasso cercato;
 - strutture di controventamento verticali doppie e sufficientemente distanziate tra loro lungo la direzione longitudinale.
- 8) nel caso in cui le due dimensioni in pianta dell'edificio siano maggiori dell'altezza dell'edificio, la verifica di collasso della struttura portante verso l'interno della costruzione è spesso in grado di assicurare l'assenza di danni all'esterno della costruzione stessa;
- 9) nel caso in cui una dimensione in pianta dell'edificio risulti significativamente minore dell'altezza dell'edificio, come nel caso studio analizzato è la dimensione trasversale della pianta del magazzino autoportante automatizzato, le prestazioni delle strutture di acciaio, anche se progettate correttamente per verificare le condizioni di collasso verso l'interno, non sono in grado di verificare l'assenza di danni all'esterno della costruzione; in questi casi questa la verifica prestazionale deve essere completata con valutazioni tecniche integrative.

Nel caso in cui il livello di prestazione di resistenza al fuoco previsto dalla strategia antincendio dell'attività sia il Livello II, la progettazione delle strutture di acciaio deve essere condotta per consentire, oltre a quanto previsto per il livello I in termini di modalità di collasso, che la capacità portante delle strutture di acciaio sia mantenuta per un determinato periodo di tempo. In tal caso le analisi condotte hanno portato alle seguenti conclusioni:

- 1) la metodologia basata sull'analisi degli incendi localizzati richiede una taratura della fase della propagazione, che può essere eseguita facendo riferimento all'applicazione di metodi di campo fluidodinamico, più precisi; tuttavia, in generale, essa determina il raggiungimento di temperature di collasso negli elementi strutturali più vicini al focolaio in tempi più brevi; quindi, a patto di verificare un numero sufficiente di scenari di incendio di progetto, come segnalato precedentemente, potrebbe talvolta risultare un'applicazione conservativa;
- 2) l'analisi termo-strutturale deve essere eseguita su una sottostruttura tridimensionale, in quanto l'analisi di una sottostruttura piana alla volta potrebbe trascurare un effetto di interazione fuori piano non conservativo e quindi non sarebbe in grado di assicurare una corretta valutazione dei tempi di collasso.

Queste conclusioni, come detto in premessa sono state sviluppate con riferimento al caso studio analizzato e solo per esso hanno piena validità: le verifiche eseguite hanno solo lo scopo di indicare un percorso progettuale e, pur illustrando l'applicazione di criteri progettuali coerenti con la normativa vigente, non hanno validità generale, ma valgono soltanto con riferimento al caso analizzato.

Volendo sintetizzare, ciascuno degli approcci seguiti presenta alcuni elementi di criticità:

- il primo fa ricorso a codici di calcolo avanzati, che richiedono tempi di progettazione abbastanza elevati, i cui risultati sono di buona precisione e significativamente influenzati dalle condizioni al contorno;
- il secondo prevede una modellazione dell'incendio in forma significativamente localizzata che non riproduce il cimento termico agente sugli elementi via via più lontani dal focolare, non tiene conto dell'effetto dello stato e della dislocazione delle aperture di aerazione; a fronte di specifica maggiore esperienza e competenza da parte del progettista nella fase della modellazione, da verificare caso per caso, è in grado di fornire risultati conservativi e quindi accettabili.

L'approccio basato sulla modellazione dell'incendio localizzato presenta interessanti prospettive di sviluppo, ma, al momento, al fine di minimizzare gli elementi critici sopra riportati e addivenire a criteri generali di applicabilità progettuale, richiede una taratura generale. Probabilmente, con le attuali conoscenze tecniche e le attuali capacità computazionali, una fattibile e ottimale metodologia di progettazione in soluzione alternativa per la resistenza al fuoco di un MAV potrebbe essere condotta ricorrendo ai modelli di campo per l'analisi quantitativa dei cementi termici associati a ciascuno scenario d'incendio di progetto e a codici di calcolo termo-strutturali avanzati, su sottostrutture in 3D (per tener conto degli effetti fuori piano), in grado di acquisire il campo di temperatura o flusso termico in output dal solutore CFD e di trasferirlo in maniera semi-automatica alla sottostruttura, senza però che vi sia la necessità di ricorrere a quelli che riproducono in maniera esplicita i meccanismi di collasso in ogni scenario.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata dal gruppo AISEM Scaffalature CISI, in particolare dalle aziende Armes-Etermet-Mecalux-Metalcoop-Metalsistem-Modulblok-Rosss-Sacma.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Norme tecniche di prevenzione incendi - DM Interno 03/08/2015;
- [2] Modifiche all'allegato 1 al decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139» - DM Interno 18/10/2019,
- [3] Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 - NTC2018 "Norme tecniche per le costruzioni";
- [4] UNI EN 1991-1-2 (Final draft PT SC1.T1, CEN TC250, ottobre 2017), Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 1-2: Azioni generali -Azioni sulle strutture esposte al fuoco", 2017;
- [5] UNI EN 1993-1-2 "Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [6] Appendici Nazionali EN 1991-1-2, EN 1992-1-2, EN 1993-1-2, Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 31 luglio 2012, G. Uff. del 27 marzo 2013;
- [7] LOCAFI+, ECSC Valorization project, 2018;
- [8] Istruzioni Tecniche – Capacità portante in caso di incendio delle strutture di Acciaio e composte Acciaio-calcestruzzo, su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, 2020.
- [9] DIFISEK+, ECSC (European Coal and Steel Community) Valorization project, 2008;
- [10] OZone, Design fire tools, Version 3.0.2, University of Liege, 2017;
- [11] FRANSSEN J.M., KONDOR V.K.R., MASON J., "User manual for SAFIR: a computer program for analysis of structures submitted to the fire", University of Liege, 2016.
- [12] Flumilog, Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt – Partie A, DRA-09-90977-14553A Version 2, août 2011.
- [13] ANSYS, Theory reference.
- [14] LS-Dyna Keyword User's Manual, Livermore, CA, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [15] S. Pustorino, P. Princi, C. Thauvoye, "Magazzini autoportanti automatizzati – Caso studio. Verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco mediante applicazione dei metodi di ingegneria della sicurezza antincendio", Associazione AISEM - Federazione ANIMA / Confindustria, 03 agosto 2023.

In copertina: MAGAZZINI AUTOPORTANTI VERTICALI CERAMICA SANT'AGOSTINO (Fe)
Progetto Architettonico: Archliving Srl
© Pichler Projects, Alex Filz