

24. Progettazione delle strutture di acciaio di capannoni industriali mediante l'applicazione dei metodi di ingegneria della sicurezza antincendio

A cura di:





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

La **Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso d'Incendio** è un gruppo di lavoro costituito il 20 gennaio 2006, su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio con la partecipazione del Ministero dell'Interno, composto da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale e da docenti universitari. Esso si propone i seguenti principali obiettivi:

- costituire un tavolo tecnico per la valutazione dei risultati della ricerca nazionale ed europea;

- analizzare tecnicamente la norma nazionale, con i necessari riferimenti alle norme vigenti nell'ambito della Comunità Europea;
- fornire strumenti tecnici aggiornati agli operatori di controllo (VVF e collaudatori) per la valutazione della sicurezza delle strutture in acciaio;
- fornire strumenti tecnici per l'aggiornamento professionale.

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

Premessa

Il tema della progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di edifici industriali è stato oggetto di numerose attività di ricerca condotte in ambito europeo, centrate in particolare sull'applicazione dei criteri di valutazione della sicurezza mediante approccio prestazionale. Questo tema è stato affrontato in recenti attività della Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in Caso di Incendio nei documenti “: *“Progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali – Modellazione termo-fluidodinamica di scenari di incendio”* e *“Progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali - Modellazione termo-meccanica di scenari di incendio”*, avendo come riferimento i criteri di applicazione della normativa nazionale, in particolare il Decreto Ministeriale 3 agosto 2015, che sull'argomento è stato fautore di importati novità. Il presente lavoro si propone di riassumere i risultati di queste recenti attività.

Questa memoria fa parte delle attività dedicate allo studio della sicurezza antincendio di capannoni industriali di acciaio, condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita da Fondazione Promozione Acciaio.

Progettazione delle strutture di acciaio di capannoni industriali mediante l'applicazione dei metodi di ingegneria della sicurezza antincendio

Sandro Pustorino, Paola Princi – Structura Engineering srl

Emidio Nigro, Anna Ferraro – D.I.ST. - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Napoli “Federico II”

Franco Bontempi, Chiara Crosti – Università degli studi di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Luca Ponticelli, Claudio Mastrogiuseppe – Corpo Nazionale Vigili del Fuoco

Il presente lavoro è frutto delle attività 2014 e 2015 condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita e sostenuta da Fondazione Promozione Acciaio.

Sommario

Il tema della progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di edifici industriali è stato oggetto di numerose attività di ricerca condotte in ambito europeo [1], [2], centrate in particolare sull'applicazione dei criteri di valutazione della sicurezza mediante approccio prestazionale. Questo tema è stato affrontato in recenti attività della Commissione Tecnica [7] (qui riproposto come allegato tecnico), [8], [9], avendo come riferimento i criteri di applicazione della normativa nazionale, in particolare il Decreto Ministeriale 3 agosto 2015, che sull'argomento è stato oggetto di importati novità.

Il presente lavoro si propone di riassumere i risultati di queste recenti attività.

INTRODUZIONE

La progettazione in caso di incendio di un capannone industriale deve essere condotta tenendo in considerazione i livelli di prestazione minimi fissati per le strutture portanti dalla normativa nazionale vigente [3]. In questa sono indicati i criteri applicabili per la determinazione dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture portanti (soluzioni conformi, approccio prescrittivo) o, in via alternativa, delle prestazioni della struttura portante in condizioni di incendio (approccio ingegneristico).

Facendo riferimento al caso specifico dei capannoni industriali monopiano, una volta verificate alcune caratteristiche geometriche e funzionali dell'attività, le disposizioni normative specificano il livello di prestazione II, individuando l'obiettivo della sicurezza in caso di incendio nel mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.



Fig. 1 - Esempio di struttura portante in acciaio di un edificio industriale monopiano

L'evoluzione dei criteri normativi definiti per la valutazione delle prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture di acciaio, in particolare delle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici, e degli strumenti di calcolo a disposizione dei progettisti, consente oggi la possibilità di progettare la struttura portante degli edifici in caso di incendio eseguendo la verifica puntuale di queste prestazioni.

Nel presente lavoro, come anticipato in precedenza, sono state analizzate alcune procedure di calcolo previste per la progettazione strutturale di questi edifici mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico. Questa analisi è stata condotta facendo specifico riferimento ai risultati di due recenti progetti di ricerca europei [1], [2] e tenendo in considerazione i criteri normativi in vigore per la progettazione degli edifici industriali in ambito nazionale, in particolare il Decreto Ministeriale 03 agosto 2015 [3].

ATTIVITÀ DI RICERCA SULLA SICUREZZA IN CASO DI INCENDIO DEGLI EDIFICI INDUSTRIALI IN ACCIAIO

Introduzione

Di seguito sono riassunti alcuni risultati di due recenti progetti di ricerca europei [1] e [2] sulla sicurezza in caso di incendio di edifici industriali realizzati con struttura di acciaio.

Analisi della sicurezza in caso di incendio di capannoni industriali realizzati con struttura di acciaio

Nel progetto di ricerca "*FLUMILOG – Essai d'incendie dans un entrepôt en construction métallique*" [2] è stata svolta un'ampia indagine sulla sicurezza in caso di incendio dei capannoni industriali realizzati con struttura di acciaio adibiti a deposito. Questa ricerca è stata condotta anche con l'ausilio di verifiche sperimentali di incendio in grande scala.



Fig. 2 - FLUMILOG [2], la verifica sperimentale di incendio in grande scala

In questo lavoro è stato eseguito uno studio parametrico per valutare l'influenza relativa delle diverse misure tecniche di prevenzione incendi sulla sicurezza dei capannoni industriali. Gli edifici oggetto dello studio sono edifici monopiano, realizzati con struttura di acciaio, utilizzati come deposito di materiali di tipo cellulosico o di tipo plastico.

Il criterio impiegato per l'analisi della sicurezza degli occupanti è basato sul confronto tra:

- RSET, Required Safe Escape Time, tempo richiesto per il movimento degli occupanti dalla loro posizione iniziale fino all'esterno dell'edificio o fino ad una posizione sicura;
- ASET, Available Safe Escape Time, tempo a disposizione nei riguardi dei livelli prestazionali, sia relativi ai livelli di tossicità, sia ai livelli termici che a quelli del collasso strutturale.

Il calcolo di RSET è eseguito mediante la somma dei seguenti fattori:

- tempo di rilevazione,
- tempo di allarme,
- tempo di evacuazione, intesa come somma del tempo di pre-movimento (tempo di riconoscimento + tempo di risposta) e del tempo di percorrenza.

Le soglie di prestazione per definire ASET sono relative ai seguenti fenomeni:

- oscuramento della visibilità da fumo;
- gas tossici;
- calore (temperatura massima sugli occupanti);
- calore (irraggiamento sugli occupanti);
- collasso della struttura di acciaio.

Nell'ambito dello studio parametrico la soglia di prestazione relativa al collasso strutturale è stata definita facendo riferimento al valore di temperatura in corrispondenza della struttura di copertura pari a 650°C. Questa ipotesi deriva dalla constatazione che questo valore di temperatura della struttura di acciaio sia compatibile con le verifiche di sicurezza condotte su strutture di acciaio non protette adeguatamente progettate in condizioni di incendio con i criteri di applicazione dell'approccio ingegneristico.

E' interessante notare come i criteri di valutazione dei parametri dell'esodo e le normative di riferimento per la valutazione dei livelli prestazionali impiegati nella ricerca siano conformi ai criteri di riferimento riportati nella normativa nazionale vigente [3].

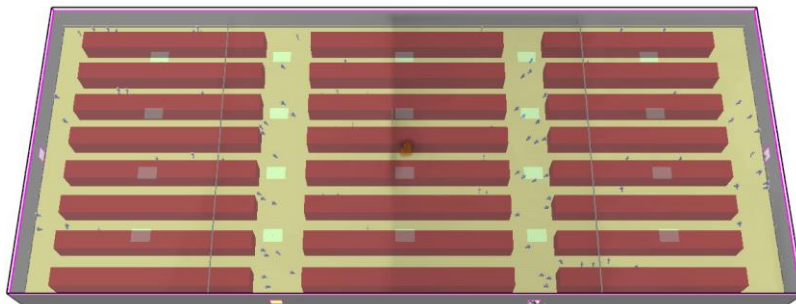


Fig. 3 - Il modello di riferimento per lo studio parametrico

Nello studio sono stati considerati i seguenti parametri:

- area del compartimento (1.000, 3.000, 6.000, 10.000 m²);
- altezza del compartimento (6, 12, 16 m);
- altezza delle scaffalature;
- numero e superficie degli evacuatori di fumo in copertura (1, 2, 5, 10, e 25% dell'area della copertura);
- altezza degli schermi di fumo (1 o 2 m);
- posizione del focolaio di ignizione (centro o angolo del deposito);
- tipo di materiali depositati nelle scaffalature (cellulosico o plastico);
- numero di uscite per compartimento;
- numero di occupanti;
- presenza di persone disabili.

La calibrazione del modello è fatta sulla base di un test di incendio in grande scala su un deposito avente superficie pari a 850 m² e altezza pari a 12 m. Nel test il carico di incendio è costituito da 310 t di pallets di legno stoccati in 5 racks di 30 m di lunghezza e 10 m di altezza.

Alcuni risultati sperimentali registrati nella prova sono stati:

- sviluppo dell'incendio in cima al primo rack, dopo 7 min;
- sviluppo dell'incendio nel rack opposto, dopo 10 min;
- aperture degli evacuatori di fumo, tra 11 e 12 min;

- flashover, dopo 15 min, tempo nel quale l'altezza di interfaccia tra fumi caldi superiori e fumi freddi inferiori era di circa 7 m.

I risultati dello studio parametrico sono stati riassunti nella figura seguente, in cui sono indicati diversi parametri che hanno influenza sul tempo di evacuazione.

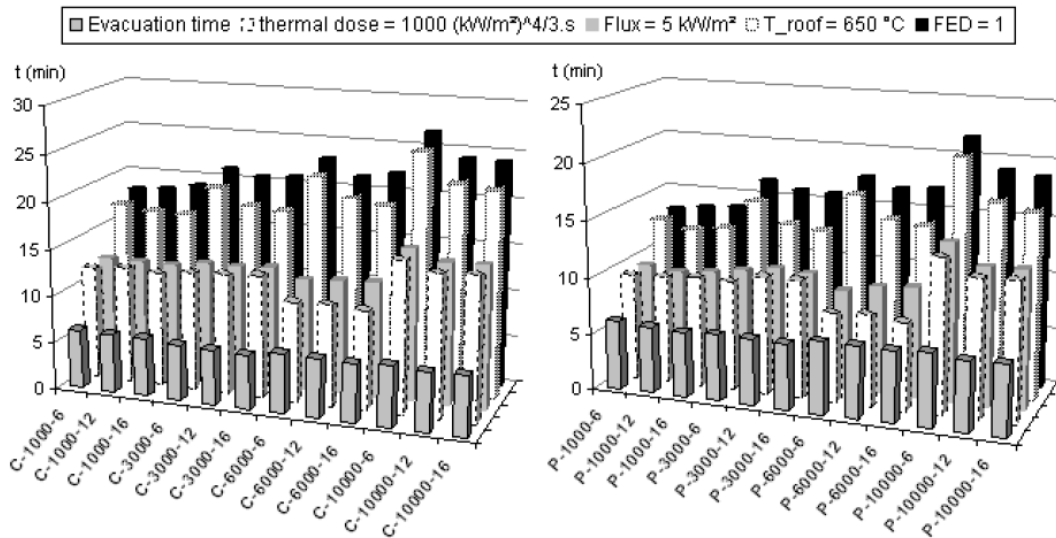


Fig. 3. Evacuation and tenability times, scenarios with cellulosic materials

Fig. 4. Evacuation and tenability times, scenarios with plastic materials

Fig. 4 - Risultati dello studio parametrico

Le principali conclusioni riportate dagli studi effettuati sono state le seguenti:

- in tutti i casi analizzati il rischio per le persone dovuto agli effetti termici dell'incendio è molto più severo rispetto a quello del collasso strutturale;
- i limiti di tossicità ed i limiti di stabilità strutturale sono stati raggiunti dopo che nel deposito si verifica il flashover;
- tra tutte le misure tecniche di prevenzione incendi analizzate, le misure più efficaci per aumentare la sicurezza delle persone in caso di incendio sono state l'incremento delle aree di evacuatori di fumo e l'impiego di impianti per la rilevazione e allarme d'incendio.

Analisi della sicurezza in caso di incendio di capannoni industriali realizzati con struttura di acciaio

Nell'ambito del progetto di ricerca "3D simulation of Industrial Hall in case of fire. Benchmark between ABAQUS, ANSYS and SAFIR" [1], è stata eseguita l'analisi del comportamento in caso di incendio della struttura portante di acciaio di un tipico edificio industriale, impiegando i modelli di calcolo ANSYS, ABAQUS, e SAFIR, con l'obiettivo di esaminare le capacità operative dei diversi software e di confrontarne i risultati. I modelli di calcolo sono stati confrontati mediante un benchmark condotto da 4 diversi utilizzatori, due dei quali hanno usato il modello ABAQUS.

Il benchmark è stato eseguito sulla struttura mostrata nella figura seguente. La struttura è costituita da un doppio portale in acciaio con travi e colonne realizzate mediante profili ad anima piena.

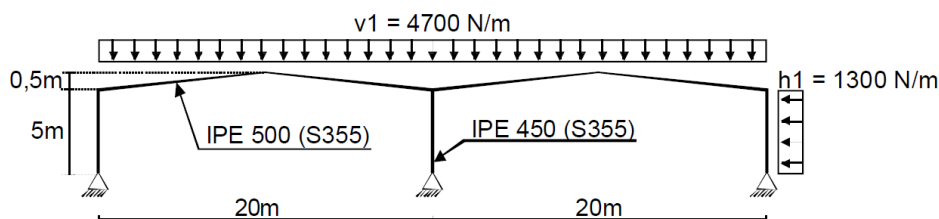


Fig. 5 - Schema della struttura portante di un edificio industriale

Le analisi strutturali sono state condotte in conformità a quanto previsto nelle parti fuoco degli Eurocodici [4], [5], sia per quanto riguarda le proprietà termiche e meccaniche dei materiali, sia per quanto riguarda la combinazione dei carichi in caso di incendio.

L'azione dell'incendio è stata schematizzata con la curva di incendio ISO. L'analisi strutturale dell'edificio in caso di incendio è stata condotta su modelli strutturali differenti, che sono schematizzati nella Figura 6.

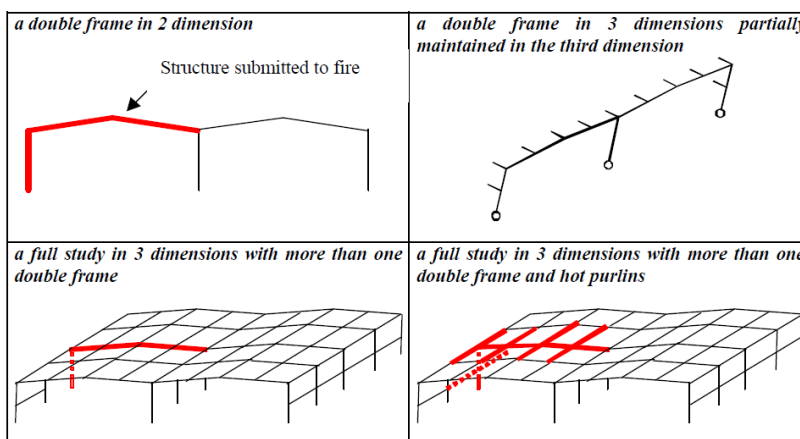


Fig. 6 - Modelli strutturali analizzati in condizioni di incendio

Di seguito sono riportati alcuni dei principali risultati ottenuti nelle analisi svolte con il quarto modello, che comprende l'intera struttura con riscaldamento di un telaio e degli arcarecci adiacenti (Figura 7).

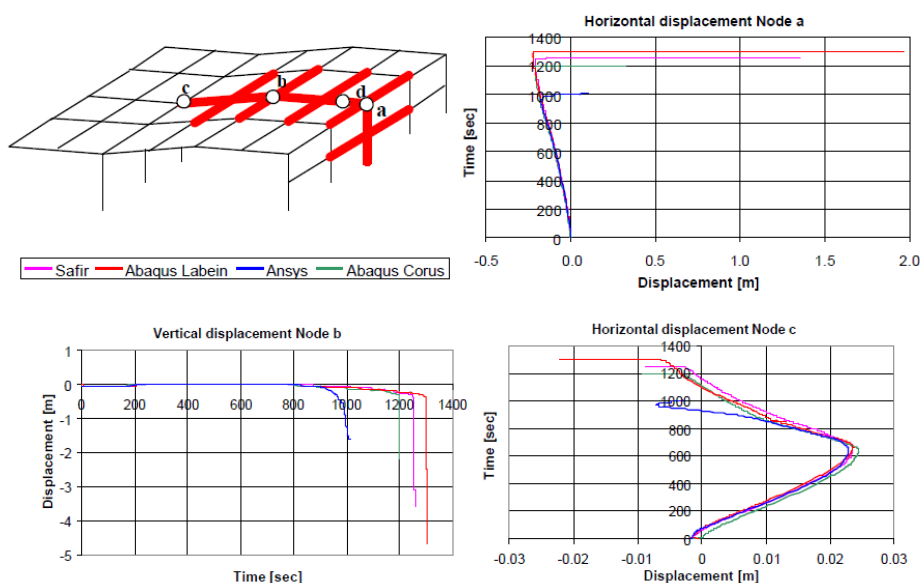


Fig. 7 - Modello strutturale e spostamenti dei nodi di riferimento

I risultati ottenuti nell'ambito della ricerca hanno mostrato come i modelli di calcolo implementati con i software considerati nello studio (ANSYS, ABAQUS e SAFIR) consentano di analizzare compiutamente e in modo concorde il comportamento globale 3D della struttura in caso di incendio, fino al completo collasso in presenza di grandi spostamenti. Con queste analisi è possibile:

- simulare il meccanismo di rottura della struttura;
- prevedere l'influenza di rotture locali sul comportamento globale della struttura;
- seguire eventuali collassi progressivi della struttura.

I risultati ottenuti hanno mostrato anche come mediante queste analisi sia possibile superare la semplificazione, operata nell'ambito della progettazione con approccio prescrittivo, di limitare la

verifica al tempo di collasso locale della struttura, assumendolo come il tempo di resistenza al fuoco dell'intera struttura.

APPLICAZIONE DEI METODI DI INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO

Introduzione

Una delle più significative novità introdotte dal D.M. 03-08-2015 è stata la definizione dei metodi di ingegneria dell'incendio nelle norme tecniche di prevenzione incendi. Nei seguenti paragrafi sono riportati i risultati di alcune applicazioni di questa metodologia al caso della progettazione delle strutture di acciaio di un capannone industriale conformemente ai criteri normativi previsti dal suddetto decreto [3].

Prime analisi delle prestazioni delle strutture portanti di acciaio in condizioni di incendio

Introduzione

Una prima analisi del comportamento strutturale in condizioni di incendio è stata condotta studiando la risposta della struttura di acciaio di un capannone industriale soggetta alla curva di incendio standard.

Queste analisi, condotte con riferimento ai risultati della ricerca riferiti nel paragrafo 2.3, hanno consentito di analizzare i criteri prestazionali che devono essere verificati nell'ambito della normativa nazionale e la capacità di risposta della struttura di acciaio sotto esame a temperature elevate.

Queste attività sono state illustrate in [7] e sono di seguito riepilogate.

Tipologia strutturale degli edifici e livelli di prestazione

La struttura portante dell'edificio è composta da un doppio portale in acciaio con travi e colonne costituite da profili a sezione piena. Le travi e le colonne sono tra loro incastrate mentre le colonne sono incernierate alla base. Ogni campata del portale ha luce di 20 m e i portali si trovano a distanza di 7.5 m l'uno dall'altro.

I carichi considerati sono stati definiti analogamente a quanto fatto in [1], definendo quindi la combinazione dei carichi in caso di incendio per un capannone industriale conformemente alla normativa europea.

La struttura portante dell'edificio è mostrata in Figura 8.

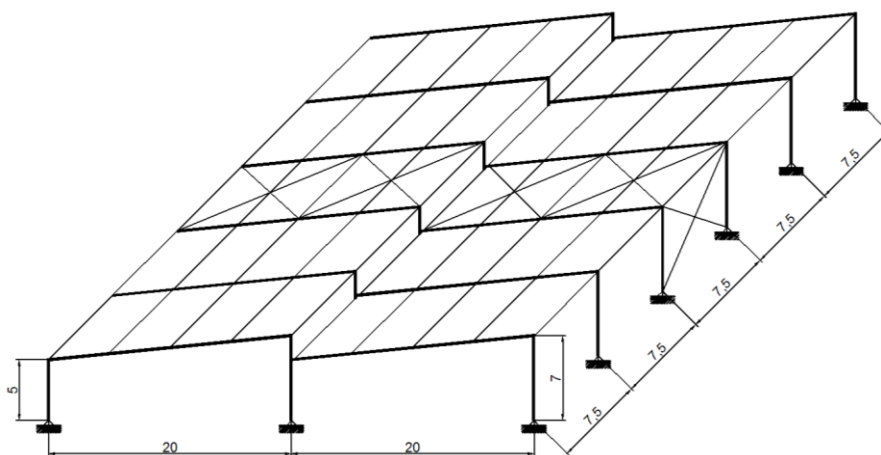


Fig. 8 - La struttura portante in acciaio dell'edificio

Per verificare gli obiettivi della sicurezza in caso di incendio le analisi strutturali sono state indirizzate all'esame delle seguenti prestazioni in caso di incendio:

- a) individuazione del tempo di mantenimento della stabilità strutturale;
- b) mantenimento della stabilità strutturale nei compartimenti adiacenti al compartimento in cui si verifica l'incendio per tutta la durata dell'evento;
- c) assenza di crolli della struttura portante verso l'esterno della costruzione.

Lo scenario d'incendio

L'edificio analizzato è composto da due compartimenti, individuati mediante una separazione longitudinale presente in corrispondenza della colonna centrale del telaio trasversale di acciaio. Analogamente alla ricerca [1], l'analisi delle prestazioni della struttura di acciaio in condizioni di incendio è stata condotta schematizzando l'incendio con la curva standard ISO 834.

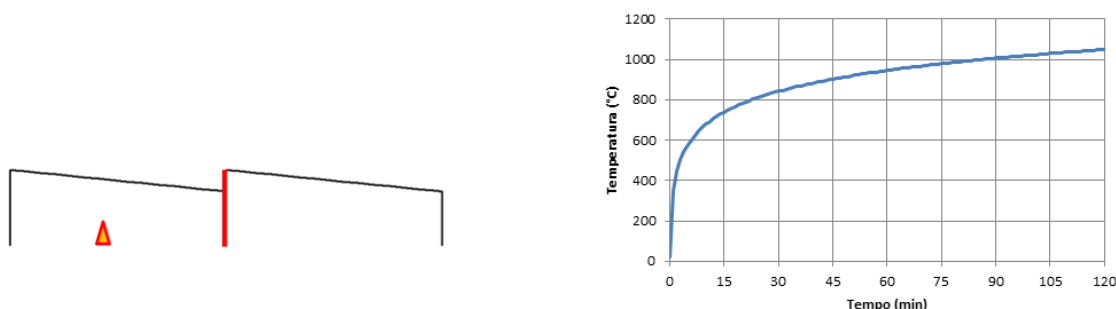


Fig. 9 - Scenario di incendio

Analisi delle prestazioni della struttura portante di acciaio in condizioni di incendio

L'analisi delle prestazioni in condizioni di incendio è stata condotta mediante un modello agli elementi finiti dell'intera struttura eseguito con il programma di calcolo Safir, sviluppato presso l'Università degli Studi di Liegi. Questo programma 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, come richiesto negli Eurocodici per le analisi strutturali in caso di incendio condotte con metodo avanzato.

Questo modello completo della struttura consente di tenere conto delle azioni indirette che si generano nella struttura a causa delle variazioni di temperatura.

L'analisi condotta è di tipo dinamico, in modo che sia possibile valutare il comportamento strutturale anche in condizioni di rotture o plasticizzazioni localizzate.

Per quanto riguarda il primo livello di prestazione, le analisi strutturali in condizioni di incendio hanno permesso di verificare che la stabilità della struttura portante viene mantenuta per un tempo pari a circa 17 minuti, a cui corrisponde una temperatura sulla trave principale di circa 650°C (Figura 10).

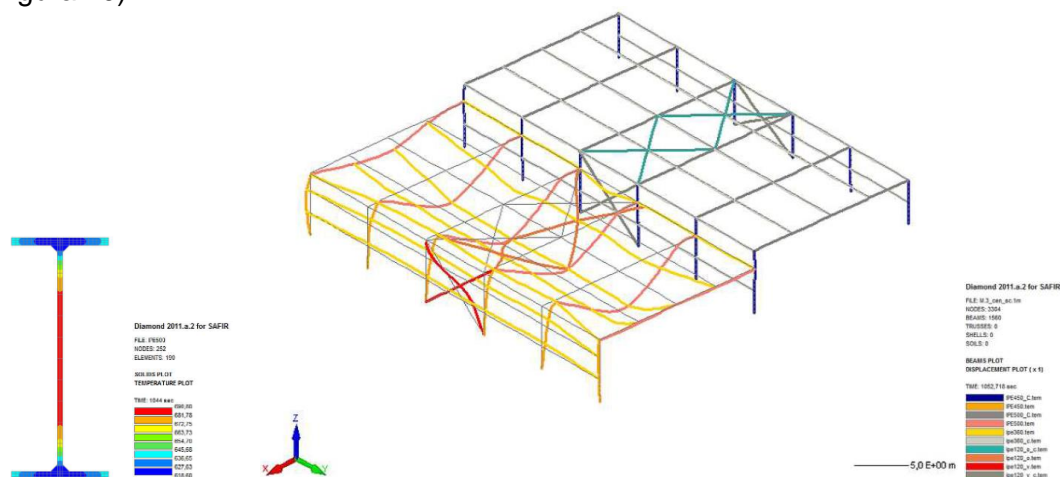


Fig. 10 - Temperatura della trave principale e deformazioni della struttura di acciaio in fase di rottura

Dall'analisi delle deformazioni della struttura di acciaio si può notare come gli effetti sulla struttura del compartimento adiacente a quello in cui si è sviluppato l'incendio sono modesti: al termine dell'analisi nel primo compartimento le travi si sono ormai inflesse con grandi spostamenti, mentre le strutture del secondo compartimento hanno subito spostamenti molto piccoli. Infine l'analisi del modello strutturale consente di riconoscere il tipo di collasso della struttura durante l'evoluzione dell'incendio, che avviene con un crollo verso l'interno dell'edificio (Figura 11).

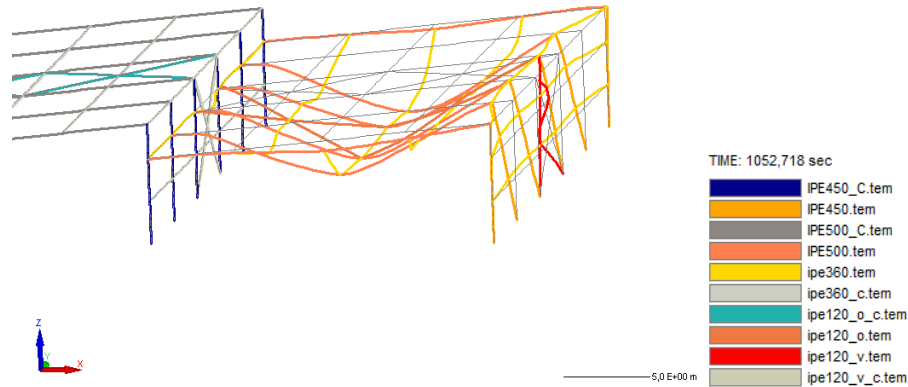


Fig. 11 - Deformazione a rottura della struttura

Le attività oggetto di studio

L'applicazione dell'approccio ingegneristico è stata condotta sul capannone di acciaio definito nei paragrafi precedenti. Sono state considerate due destinazioni d'uso differenti:

- deposito di materiale di tipo celluloso;
- officina meccanica.

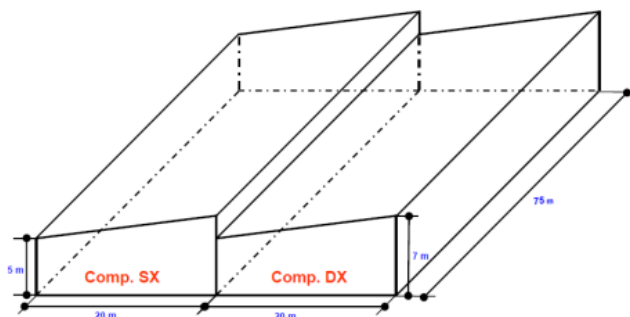


Fig. 12 - Dimensioni dell'edificio



Fig. 13 - Deposito: scaffalature e aree di deposito di materiale di tipo celluloso

Calcolo degli incendi naturali di progetto

Scenari di incendio prestazionali

Per ogni destinazione d'uso considerata sono stati analizzati due incendi localizzati ed un incendio generalizzato che si propaga a tutto il compartimento.

Gli incendi di tipo localizzato sono stati così definiti:

- posizione del focolaio in prossimità di una colonna;
- posizione del focolaio in prossimità della mezzera della trave.

Nel caso del deposito l'incendio generalizzato è stato studiato analizzando la propagazione dell'incendio a partire dall'innesco di una pila alta 5.4 m (traveling fire). In tal caso lo scenario è

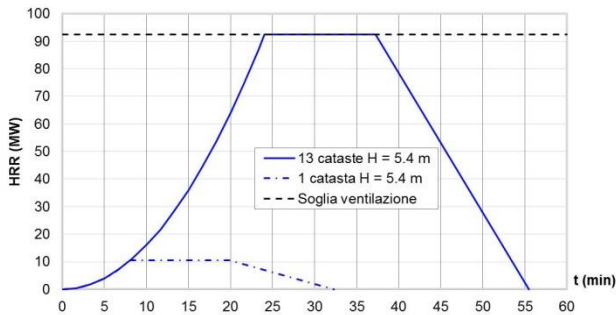
stato studiato assumendo che si verifichi l'ignizione a una certa distanza dal focolaio iniziale quando la temperatura dei pallet ha raggiunto 275°C.

Nel caso dell'officina meccanica l'incendio generalizzato è stato studiato con un modello a zone, mediante il quale è stata analizzata sia la fase pre-flashover, sia la fase post-falshover dell'incendio.

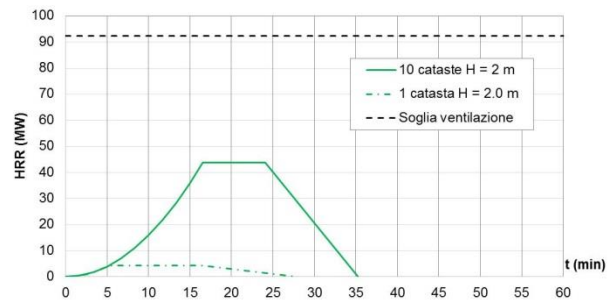
Curve RHR di progetto

Nel caso della destinazione d'uso del deposito le curve RHR relative agli scenari di incendio di progetto sono state definite sulla base della relazione di Krasner, tratta dalla norma NFPA 92 e dal testo SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2008), documenti a cui fa riferimento il D.M. 03/08/2015 al punto M.2.8. L'impiego di questa relazione si è dimostrato compatibile con i criteri previsti dagli Eurocodici, fornendo risultati simili.

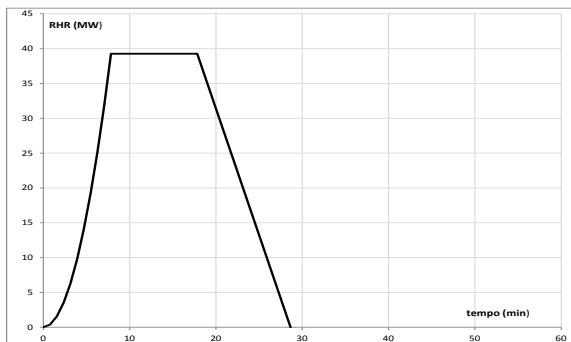
Nel caso della destinazione d'uso dell'officina meccanica la curva RHR è stata definita conformemente ai criteri riportati nel D.M.Int. 03/08/2015 (Tabella M.2-2) assumendo i seguenti valori: $t_{\alpha} = 75$ s e $RHR_f = 500$ kW/m².



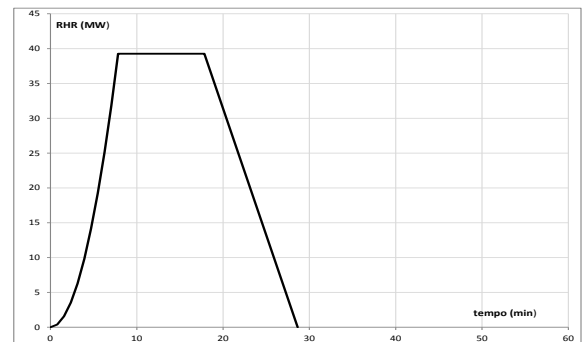
Incendio localizzato (caso deposito, scenario rif. colonna)



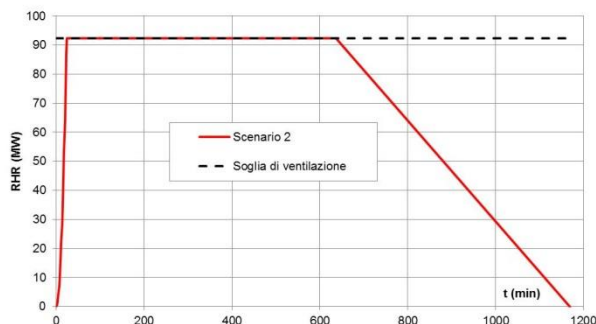
Incendio localizzato (caso deposito, scenario rif. trave)



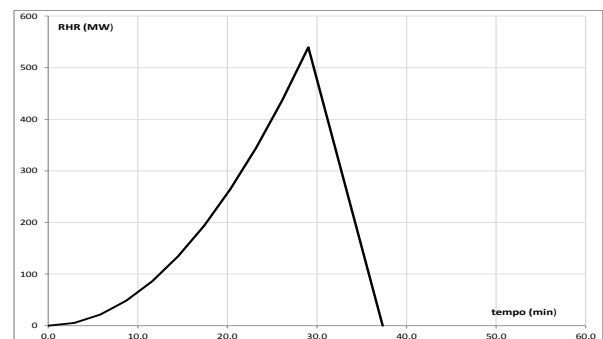
Incendio localizzato (caso officina, scenario rif. colonna)



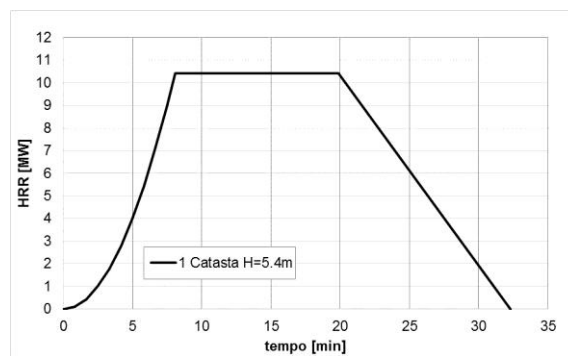
Incendio localizzato (caso officina, scenario rif. trave)



Incendio generalizzato (caso deposito)



Incendio generalizzato (caso officina)



Traveling fire (caso deposito)

Fig. 14 - Curve RHR dei diversi scenari di incendio

Analisi termo-fluidodinamiche

MODELLI DI INCENDIO

Nell'analisi prestazionale della sicurezza strutturale in caso di incendio l'azione termica è definita mediante l'impiego di modelli semplificati o avanzati previsti per la determinazione degli incendi naturali [4], [5].

Nel caso del deposito le analisi di simulazione degli incendi naturali di progetto sono state fatte con modelli di campo fluidodinamico (FDS¹, usato dal gruppo di UniRoma), con modelli a zone (Cfast², usato dal gruppo di UniNA, e Ozone³, usato dal gruppo di StruEng) e con modelli semplificati per lo studio di incendi localizzati (EN1991-1-2). Nel caso dell'officina meccanica le analisi sono state fatte con modelli a zone (Cfast e Ozone) e con modelli di incendio localizzato (EN1991-1-2).

PRIMA DESTINAZIONE D'USO: DEPOSITO

L'analisi degli incendi naturali di tipo localizzato è stata finalizzata alla determinazione della massima temperatura nelle colonne e nella mezzeria delle travi dell'edificio.

Nello scenario di incendio localizzato riferito alla colonna (Scenario 1A) è stata calcolata una temperatura massima di circa 1100°C dopo 20 minuti, sulla colonna prossima all'incendio, mentre nello scenario riferito alla trave (Scenario 1B_{rid}) è stata calcolata una temperatura di circa 1000°C sulla trave sopra il focolaio dopo circa 17 minuti.

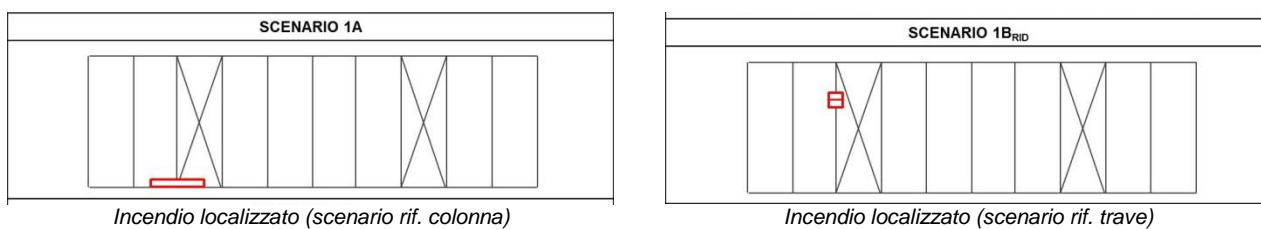


Fig. 15 - Schemi degli scenari di incendio localizzati

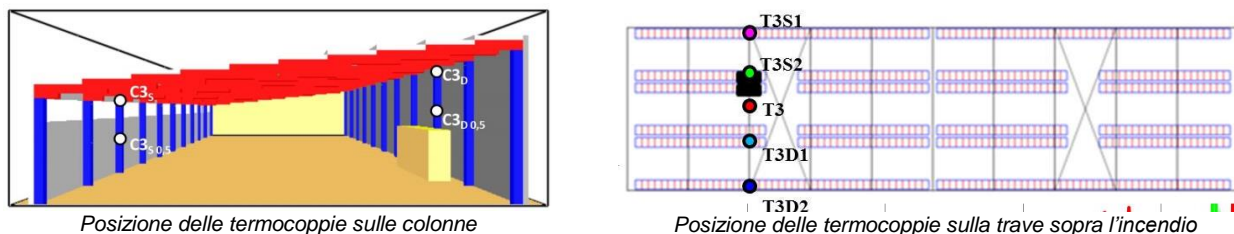
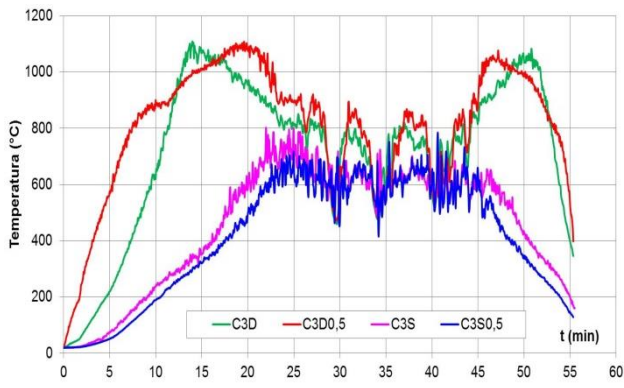


Fig. 16 - Posizione delle termocoppie sugli elementi della struttura

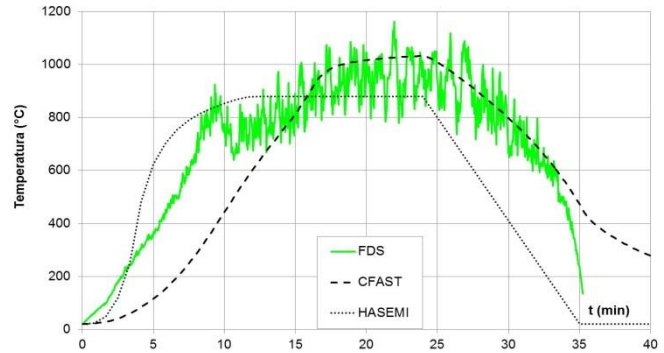
¹ FDS, sviluppato dall'Istituto Nazionale di Standard e Tecnologie (NIST)

² CFAST, sviluppato dall'Istituto Nazionale di Standard e Tecnologie (NIST)

³ OZONE, sviluppato dall'Università di Liegi



Incendio localizzato (scenario rif. colonna)
Adiabatic surface temperature col. destra e sinistra



Incendio localizzato (scenario rif. trave)
Confronto della temperatura in asse al focolaio tra FDS, CFAST e Hasemi

Fig. 17 - Temperature dei gas ottenute negli scenari di incendio localizzati

L'analisi degli incendi generalizzati è stata condotta per individuare l'andamento delle temperature dei gas nello scenario in cui è stata ipotizzata la propagazione dell'incendio su tutta la superficie del compartimento.

Il diagramma delle temperature dei gas ottenute con i modelli a zone è riportato in Figura 18.

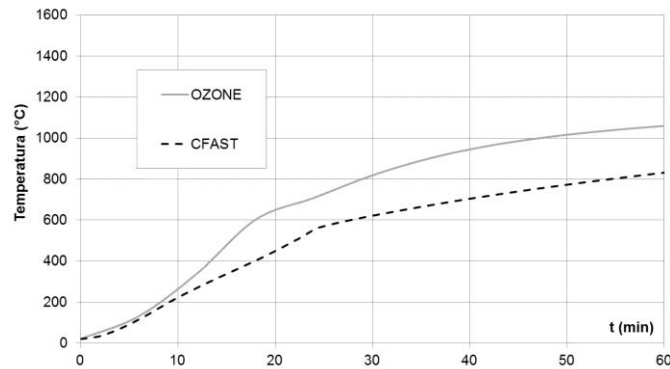


Fig. 18 - Incendio generalizzato: temperatura dei gas (CFAST e Ozone)

Alcuni risultati dell'analisi dello scenario di incendio generalizzato in cui è stato applicato il criterio del traveling fire sono riportati in Figura 19, in cui è rappresentato l'andamento delle temperature nella colonna di destra del compartimento in cui si verifica l'incendio, che raggiungono 1100°C dopo 7 minuti circa dall'inizio dello scenario di incendio.

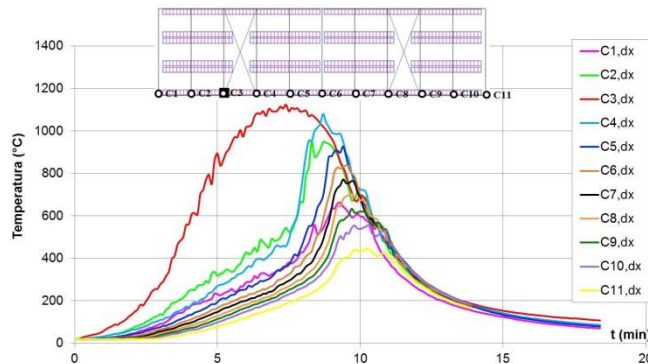


Fig. 19 - Incendio generalizzato: travelling fire - Andamento delle temperature per la colonna a destra

SECONDA DESTINAZIONE D'USO: OFFICINA MECCANICA

Le analisi termo-fluidodinamiche hanno consentito di determinare gli incendi naturali corrispondenti agli scenari di incendio di progetto di tipo localizzato, definiti in modo da ottenere la massima temperatura nelle colonne e nella mezzeria delle travi dell'edificio, e quelli corrispondenti agli scenari di incendio di tipo generalizzato.

Gli incendi naturali di progetto sono rappresentati nelle Figure 21 e 22.

Con il programma Ozone, nel caso degli scenari localizzati in asse al focolaio, la temperatura dei gas calcolata è pari a circa 700°C, mentre con il programma Cfast è pari a circa 750°C. Nel caso dell'incendio generalizzato la temperatura massima è di circa 920°C dopo 75 minuti di esposizione all'incendio (Ozone).

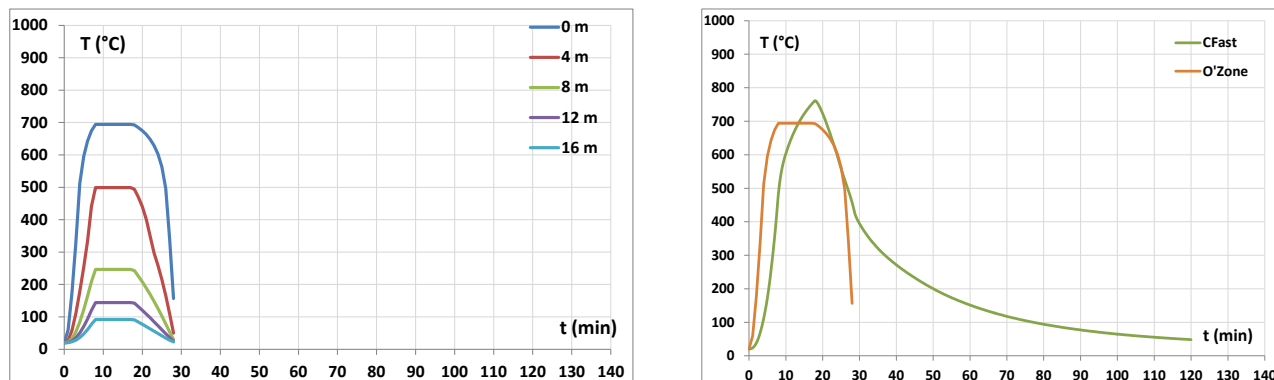


Fig. 20 - Incendio localizzato (rif. trave) - Temperature a varie distanze (Ozone) ed in asse al focolaio (Ozone/CFast)

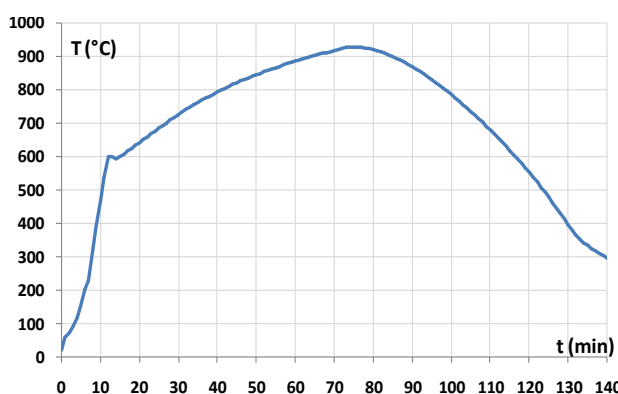


Fig. 21 - Incendio generalizzato – Temperature dei gas (OZone)

Valutazione preliminare dei tempi di esodo

Nell'ambito dei lavori condotti per il calcolo degli incendi naturali di progetto sono state fatte alcune analisi preliminari finalizzate alla valutazione dei tempi richiesti per l'evacuazione dell'edificio. Questa valutazione è necessaria sia per la verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture portanti, come sarà messo in evidenza nel successivo paragrafo 3.2.6, sia per la verifica delle prestazioni di esodo, definite nei criteri riportati nel D.M.Int. 03-08-2015 per le soluzioni alternative.

Questa analisi preliminare è stata condotta in accordo ai criteri semplificati previsti dal D.M.Int. 03-08-2015. In particolare, in caso di assenza di impianto di rilevazione ed allarme degli incendi, assumendo come riferimento per il calcolo RSET quanto riportato dalla norma ISO/TR 16738:2009, si ottengono i valori riportati in Tabella 1.

SCENARIO	t Rilev(sec)	t Allarme (sec)	t Pre-mov (sec)	t Percor (sec)	RSET (sec)	RSET (min)
1A	146,55	0	210	35,42	391,97	6,53
1B1rid	145,96	0	210	35,42	391,38	6,52
TRAVELING FIRE	150,01	0	210	47,92	407,93	6,80

Tabella 1 - RSET per i differenti scenari

Analisi delle prestazioni della struttura portante in caso di incendio

L'analisi del comportamento strutturale per ognuno degli scenari di incendio prestazionali definiti, è stata condotta soltanto nel caso del capannone industriale adibito ad officina meccanica. Essa è stata svolta mediante l'impiego di due modelli di calcolo agli elementi finiti sviluppati per l'analisi

del comportamento strutturale in caso di incendio, Safir⁴, usato dal gruppo di StruEng, e Abaqus⁵, usato dal gruppo di UniNA.

Negli scenari di incendio di tipo localizzato le analisi condotte con Safir hanno mostrato come la struttura portante dell'edificio sia capace di resistere per tutta la durata dell'incendio di progetto. In Figura 22 sono mostrate le configurazioni deformate nella fase più severa dell'incendio (circa 8 cm di spostamento orizzontale massimo). Queste analisi hanno mostrato come i livelli di prestazioni della struttura portante già indagati nel paragrafo "Tipologia strutturale degli edifici e livelli di prestazione", mantenimento della stabilità per un tempo sufficiente all'evacuazione degli occupanti, assenza di danni nei compartimenti adiacenti a quello in cui si sviluppa l'incendio e crollo delle strutture verso l'interno del capannone, risultano soddisfatti.

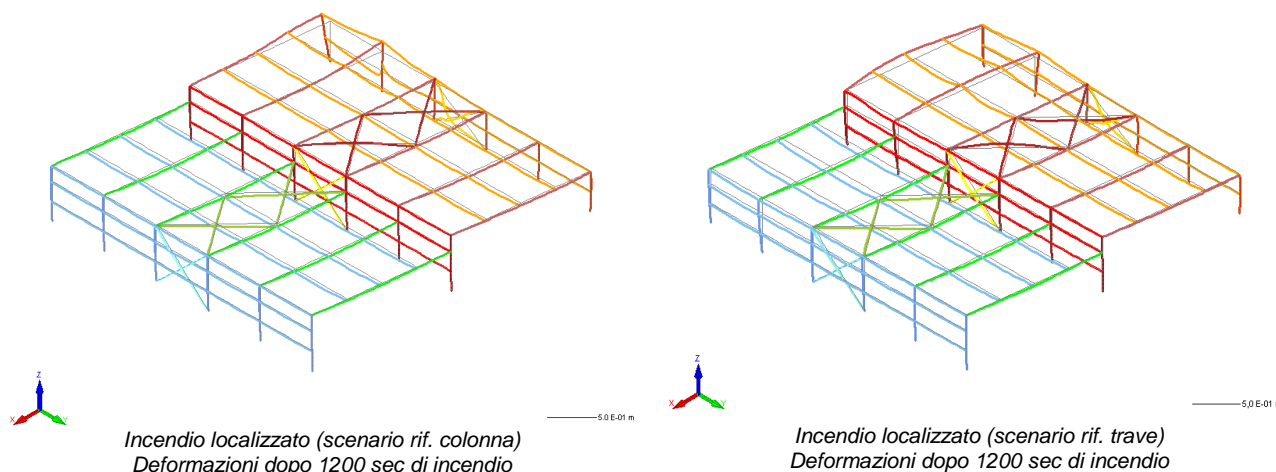
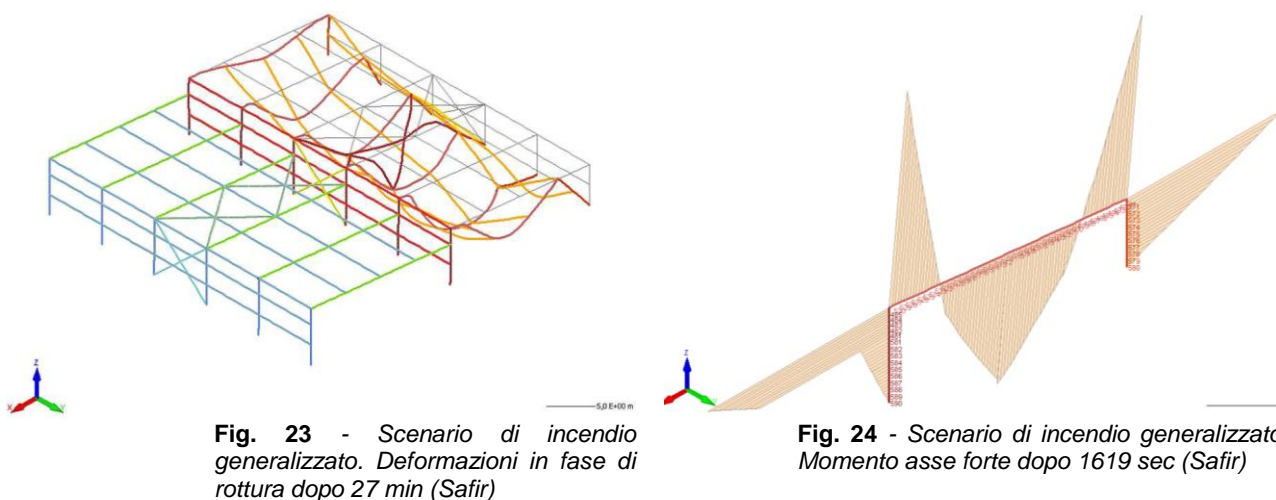


Fig. 22 - Comportamento strutturale negli incendi localizzati (Safir)

Nelle Figure 23 e 24 sono riportati alcuni dei risultati che descrivono il comportamento strutturale nel caso dello scenario di incendio di tipo generalizzato, ottenuti con il programma Safir. L'analisi eseguita ha mostrato che si verifica la rottura della struttura dopo circa 27 min, con crollo delle pareti verso l'interno dell'edificio, per effetto della perdita di resistenza e rigidità di una trave principale in corrispondenza della sezione di collegamento con la colonna di estremità. Inoltre il cinematismo che si attiva, coinvolge solo il compartimento in cui si è verificato l'incendio, pertanto è verificata l'assenza di crolli nel compartimento adiacente.



I risultati di queste analisi sono state confermate dai risultati delle analisi condotte con Abaqus. Alcune delle verifiche fatte con questo modello di calcolo sono riportate nelle Figure 25 e 26.

⁴ Safir, sviluppato presso l'Università di Liegi

⁵ Abaqus, sviluppato da ABAQUS Inc. Dassault Systemes

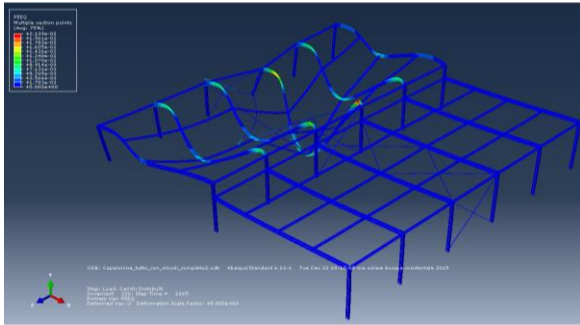


Fig. 25 - Comportamento strutturale nell'incendio generalizzato - Deformazioni finali (Abaqus)

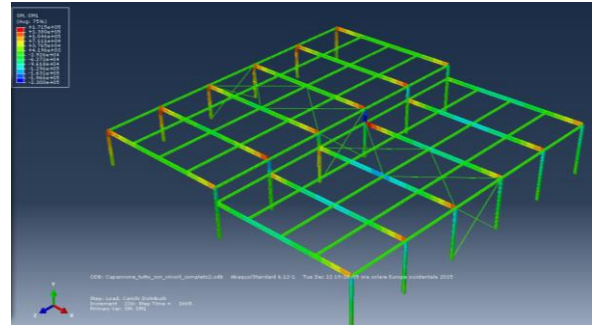


Fig. 26 - Incendio generalizzato - Momento flettente asse forte dopo 1665 sec (Abaqus)

Nelle figure 27 e 28 sono riportati i grafici degli spostamenti in testa alla colonna ottenuti con i due programmi di calcolo Abaqus e Safir.

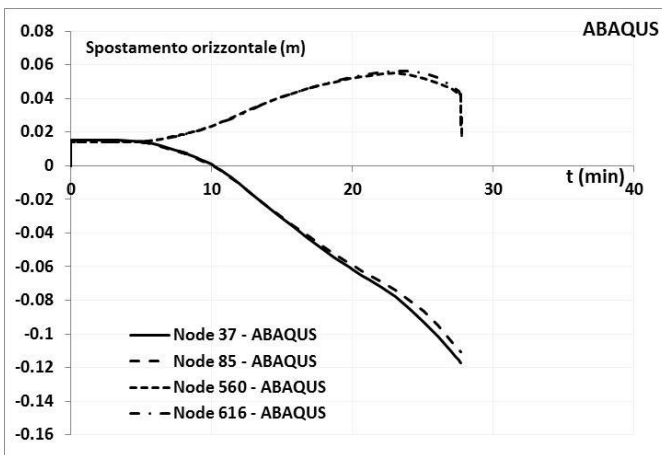


Fig. 27 - Spostamento testa colonna: Abaqus (si utilizza la stessa numerazione di Safir)

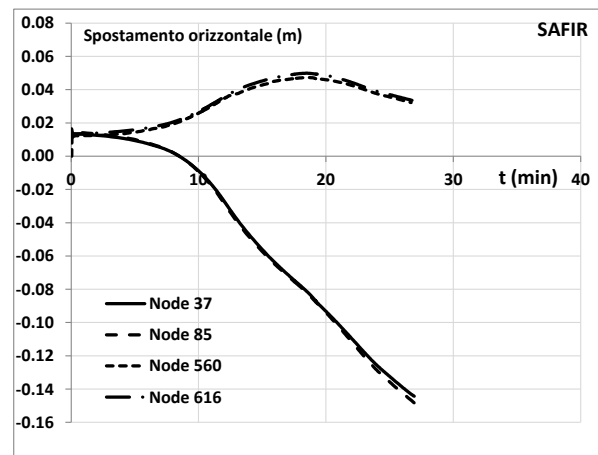


Fig. 28 - Spostamento testa colonna: Safir

Si può notare come i due modelli forniscono risultati simili tra loro: la struttura collassa dopo 27 min di esposizione all'incendio per attingimento del limite di deformazione plastica in corrispondenza delle sezioni della trave riscaldata sollecitate a momento negativo.

Per migliorare il livello di prestazione fino a 30 min di esposizione allo scenario d'incendio generalizzato, è necessario modificare la sezione delle travi principali, passando da IPE 500 ad HEA 450. In tal modo si ottiene un collasso della struttura sempre con lo stesso cinematismo, ma dopo 32 min di esposizione all'incendio. In tal caso tutti e tre i livelli di prestazione indagati risultano verificati.

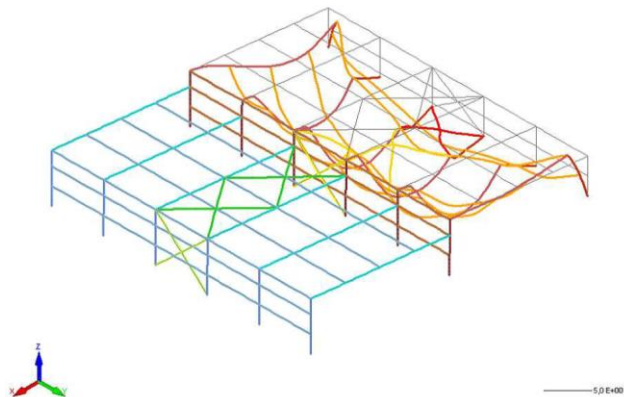


Fig. 29 - Modello strutturale rinforzato nello scenario di incendio generalizzato (Safir)

Verifica dei livelli di prestazione

Seguendo i criteri definiti nel D.M.Int. 03-08-2015 per la misura antincendio della resistenza al fuoco, nel caso analizzato del capannone industriale adibito ad officina meccanica è possibile eseguire la verifica dei livelli di prestazione dei due compartimenti presenti nell'attività.

Ad ogni compartimento è attribuito il profilo di rischio R_{vita} come riportato in Tabella 2.

Denominazione	Destinazione d'uso	δ_{occ}	δ_a	R_{vita}
Compartimento 1	Officina meccanica	A	3	A3
Compartimento 2	Officina meccanica	A	3	A3

Tabella 2 – Attribuzione del profilo di rischio R_{vita} ai diversi compartimenti

Pertanto ad ogni compartimento può essere attribuito il:

- livello di prestazione II

e di conseguenza sono individuate le prestazioni che devono essere soddisfatte dalla struttura portante per ognuno degli scenari di incendio prestazionali definiti:

- assenza di danneggiamento nei compartimenti in cui non si verifica l'incendio;
- mantenimento della capacità portante della struttura in condizioni di incendio per un periodo sufficiente per l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione; la capacità portante deve essere comunque tale da garantire un margine di sicurezza t_{marg} non inferiore a 100% e comunque non inferiore a 30 minuti.

Per quanto illustrato al paragrafo *Analisi delle prestazioni della struttura portante in caso di incendio* le prestazioni della struttura portante in acciaio inizialmente definita non sono in tutto adeguate per verificare il livello di prestazione II (collasso dopo 27 minuti). La stessa struttura, dopo le modifiche descritte nello stesso paragrafo, è invece in grado di verificare tutte le prestazioni richieste per il livello di prestazione II e quindi i criteri di sicurezza in caso di incendio.

Oltre alle prestazioni necessarie per verificare la misura antincendio della resistenza al fuoco, l'analisi del comportamento strutturale in condizioni di incendio effettuata in precedenza consente la verifica di un'altra prestazione della struttura portante:

- negli scenari di incendio prestazionali definiti il collasso della struttura avviene verso l'interno dell'edificio.

Questa prestazione è utile per verificare un'altra misura antincendio dell'attività definita nel D.M. 03-08-2015, l'operatività antincendio.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state analizzate alcune applicazioni dei metodi di ingegneria dell'incendio previsti dalla nuova normativa vigente [3] al caso delle strutture di acciaio impiegate per la realizzazione di capannoni industriali monopiano.

Dapprima sono state analizzate alcune metodologie di calcolo disponibili per l'analisi delle prestazioni delle strutture di acciaio in caso di incendio di capannoni industriali, che sono state oggetto di verifica sia numerica che sperimentale nell'ambito della ricerca europea [1]. Si è così potuto constatare come i modelli di calcolo implementati con i software considerati nello studio (ANSYS, ABAQUS e SAFIR) consentano di analizzare compiutamente e in modo concorde il comportamento globale 3D della struttura in caso di incendio, fino al completo collasso in presenza di grandi spostamenti.

Inoltre sono stati esaminati i risultati di uno studio parametrico [2] condotto su una costruzione in acciaio adibita a deposito monopiano, verificato anche grazie a prove di incendio in grande scala, in cui è stata messa a confronto l'influenza delle diverse misure tecniche di prevenzione incendi sulla sicurezza di questi edifici in caso di incendio. Le conclusioni di questo studio hanno segnalato come in tutti i casi analizzati il rischio per le persone dovuto agli effetti termici dell'incendio sia molto più severo rispetto a quello del collasso strutturale e come, tra tutte le misure tecniche di prevenzione incendi analizzate, le misure più efficaci per aumentare la sicurezza delle persone in

caso di incendio siano state l'incremento delle aree di evacuatori di fumo e l'impiego di impianti per la rilevazione e l'allarme d'incendio.

Successivamente i metodi di ingegneria dell'incendio sono stati applicati con riferimento alle strutture di acciaio di un tipico capannone industriale monopiano, caratterizzato da diverse destinazioni d'uso. I risultati di queste applicazioni hanno dimostrato come questi metodi consentano efficacemente di verificare il raggiungimento di tutti i livelli prestazionali fissati in accordo alla normativa nazionale vigente [3].

Questi nuovi criteri di analisi della sicurezza in caso di incendio, grazie alla possibilità di controllo del comportamento strutturale per ognuna delle prestazioni richieste, consentono una maggiore affidabilità delle soluzioni progettuali definite e forniscono nuove possibilità di progettazione delle strutture di acciaio per questa tipologia di edifici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L.G. Cajot, O. Vassart, M. O'Connor, Y. Shenkai, C. Fraud, B. Zhao, J. De la Quintana, J. Martinez de Aragon, J.M. Franssen, F. Gens "3D simulation of Industrial Hall in case of fire Benchmark between ABAQUS, ANSYS and SAFIR".
- [2] B. Zhao, M.S. Sakji, C. Thauvoye, J. Kruppa «FLUMILOG – Essai d'incendie dans un entrepôt en construction métallique".
- [3] D.M. 3 agosto 2015 "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139", GU n. 192 del 20/8/2015 – S.O. n. 51.
- [4] EN 1991-1-2 (2002), "Azioni sulle strutture. Parte 1-2: Azioni in generali – Azioni sulle strutture esposte al fuoco", 1 Novembre 2002.
- [5] EN 1993-1-2 (2005), "Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-2:Regole generali – progettazione strutturale contro l'incendio", 1 Luglio 2005.
- [6] Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le norme tecniche per le costruzioni" 2009. Hoepli Editore, Milano.
- [7] S. Pustorino, P. Princi, C. Crosti, L. Ponticelli, E. Nigro, "Analisi delle prestazioni in condizioni di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali mediante l'applicazione dei metodi di ingegneria". Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in Condizioni di Incendio, attività 2014 – Pubblicato come allegato tecnico al presente documento.
- [8] F. Bontempi, C. Crosti, E. Nigro, A. Ferraro, S. Pustorino, P. Princi, L. Ponticelli, C. Mastrogiuseppe, "[Progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali – Modellazione termo-fluidodinamica di scenari di incendio](#)". Commissione Tecnica per la Sicurezza delle costruzioni di Acciaio in condizioni di Incendio, attività 2015.
- [9] E. Nigro, A. Ferraro, S. Pustorino, P. Princi, F. Bontempi, C. Crosti, L. Ponticelli, C. Mastrogiuseppe, "[Progettazione in caso di incendio delle strutture di acciaio di capannoni industriali – Modellazione termo-meccanica di scenari di incendio](#)". Commissione Tecnica per la Sicurezza delle costruzioni di Acciaio in condizioni di Incendio, attività 2015.



Sopra e in copertina: Stabilimento SIRIO spa – Foto: EFFEBI srl

ALLEGATO TECNICO

ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN CONDIZIONI DI INCENDIO DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO DI CAPANNONI INDUSTRIALI MEDIANTE L'APPLICAZIONE DEI METODI DI INGEGNERIA





Autori

Sandro Pustorino¹, Paola Princi¹, Chiara Crosti², Emidio Nigro³, Luca Ponticelli⁴

Sommario

Per una certa tipologia di edifici industriali, in particolare quelli monopiano, l'approccio ingegneristico fornisce una valida alternativa all'approccio prescrittivo per verificare la sicurezza strutturale in caso di incendio. L'evoluzione dei criteri normativi e degli strumenti di calcolo oggi a disposizione dei progettisti consentono di verificare le prestazioni che la struttura portante deve garantire per verificare la sicurezza in caso di incendio.

Facendo riferimento ai risultati di un recente progetto di ricerca europeo [1], nel presente lavoro è stata condotta l'analisi strutturale in caso di incendio di un edificio industriale al fine di verificare l'applicazione dell'approccio ingegneristico nell'ambito della normativa nazionale vigente.

1. INTRODUZIONE

La progettazione in caso di incendio di un capannone industriale deve essere condotta tenendo in considerazione i livelli di prestazione minimi fissati per le strutture portanti nelle disposizioni previste dal Decreto 9 marzo 2007. In queste sono indicati i criteri di valutazione applicabili per la determinazione dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture portanti (approccio prescrittivo) o, in via alternativa, delle prestazioni della struttura portante in condizioni di incendio (approccio ingegneristico).

Facendo riferimento al caso specifico di capannoni industriali monopiano, una volta verificate alcune caratteristiche geometriche e funzionali, il decreto specifica il livello di prestazione II, individuando quindi l'obiettivo di sicurezza in caso di incendio nel mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti.



Figura 1 - La struttura portante in acciaio di un edificio industriale monopiano

L'evoluzione dei criteri normativi, in particolare le cosiddette parti fuoco degli Eurocodici, e degli strumenti di calcolo a disposizione dei progettisti consente oggi la possibilità di analizzare una struttura in caso di incendio e di verificare il soddisfacimento o meno di queste prestazioni.

Nel presente lavoro questa procedura di calcolo viene analizzata facendo specifico riferimento ai risultati di un recente progetto di ricerca europeo [1].

¹ Structura Engineering (I)

² Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

³ Università degli Studi di Napoli "Federico II"

⁴ Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

2. I RISULTATI DEL PROGETTO DI RICERCA EUROPEO [1]

Nell'ambito del progetto di ricerca [1] è stata eseguita l'analisi del comportamento in caso di incendio della struttura portante di acciaio di un tipico edificio industriale, impiegando i modelli di calcolo ANSYS, ABAQUS, e SAFIR, con l'obiettivo di analizzare le capacità operative dei diversi software e di confrontarne i risultati. I modelli di calcolo sono stati confrontati mediante un benchmark condotto da 4 utilizzatori, due dei quali hanno usato il modello ABAQUS.

Il benchmark è stato eseguito sulla struttura mostrata in Figura 2. La struttura è costituita da un doppio portale in acciaio con travi e colonne realizzate mediante profili ad anima piena.

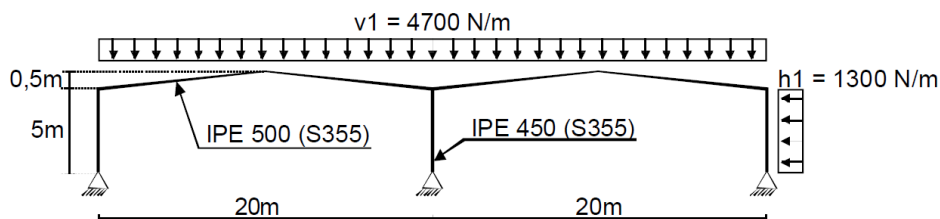


Figura 2 - Schema della struttura portante di un edificio industriale

Le analisi strutturali sono state condotte in conformità a quanto previsto nelle parti fuoco degli Eurocodici, sia per quanto riguarda le proprietà termiche e meccaniche dei materiali, sia per quanto riguarda la combinazione dei carichi in caso di incendio.

L'azione dell'incendio è stata schematizzata con la curva di incendio ISO, mentre l'analisi termica dei profilati di acciaio è stata condotta mediante i metodi di calcolo semplificato previsti dalla parte fuoco dell'Eurocodice 3, considerando quindi una distribuzione di temperatura uniforme nella sezione trasversale di acciaio.

L'analisi strutturale dell'edificio in caso di incendio è stata condotta su modelli strutturali differenti, che sono schematizzati nella Figura 3.

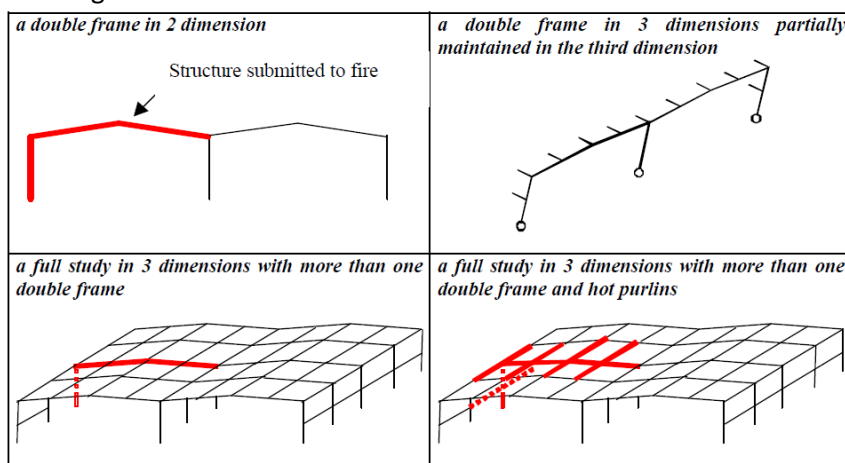


Figura 3 - Modelli strutturali analizzati in condizioni di incendio

Nel modello n. 4, in cui la struttura completa è stata analizzata considerando un telaio e due campi di arcarecci adiacenti riscaldati dalla curva ISO 834, è stato possibile analizzare anche il comportamento della struttura dopo la rottura per instabilità degli arcarecci.

Di seguito sono riportati i grafici dei principali risultati ottenuti nelle analisi svolte con il Modello n. 4 (struttura completa, schema 2).

La Figura 4 riporta la deformata della struttura al termine dell'analisi, che mette in evidenza grandi deformazioni localizzate del telaio e degli arcarecci riscaldati.

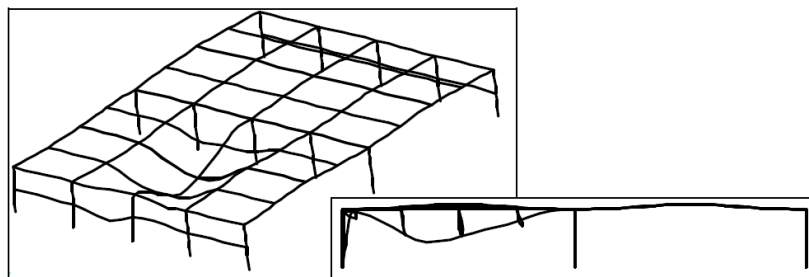


Figura 4 - Modello n. 4 – Deformata a rottura

I grafici degli spostamenti dei nodi della struttura permettono di verificare che la trave principale del telaio riscaldato subisce inflessioni molto grandi, che portano la colonna a inclinarsi verso l'interno del compartimento, mentre le colonne della parete centrale subiscono deformazioni inferiori a 5 cm: questo dimostra che quando la parte di struttura riscaldata è giunta a collasso il resto della struttura non subisce danneggiamenti.

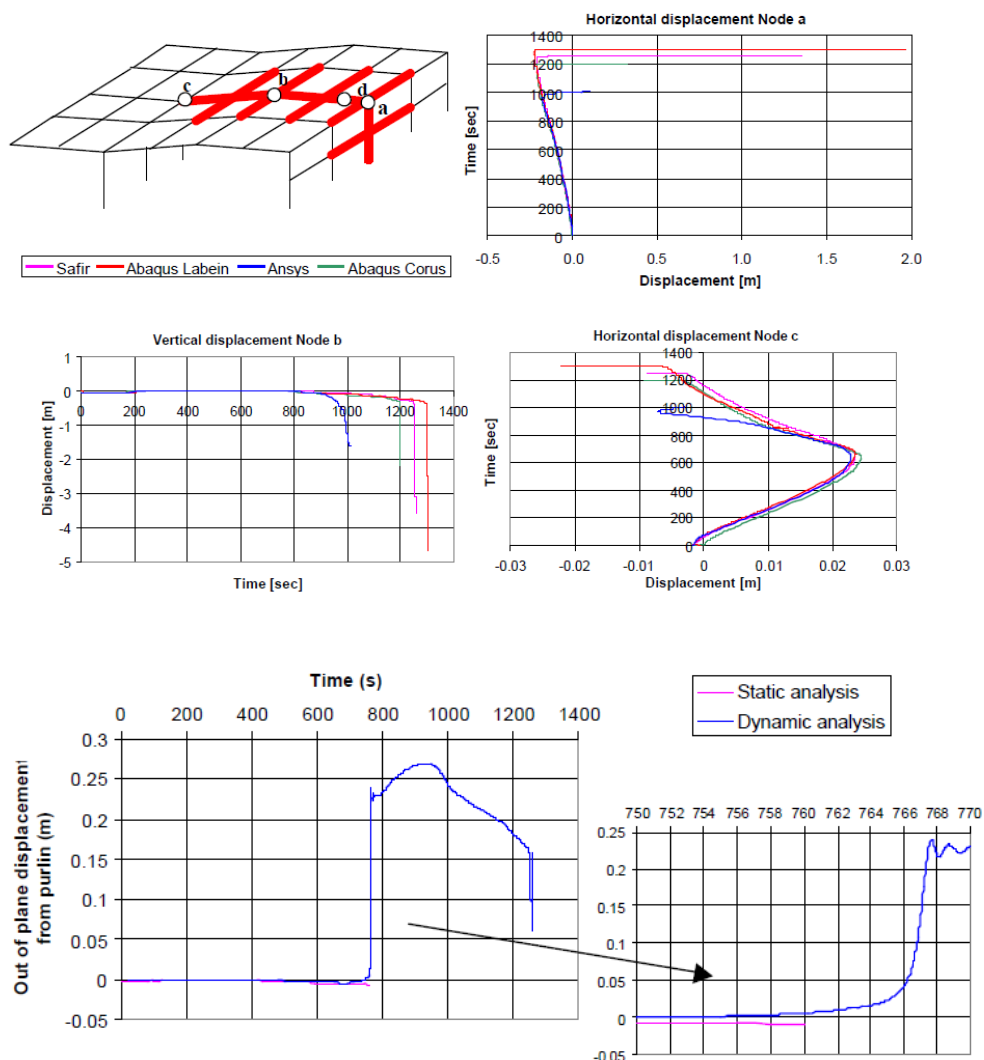


Figura 5 - Modello n. 3 – Spostamenti dei nodi di riferimento

Il grafico degli spostamenti fuori piano degli arcarecci mostra che essi raggiungono l'instabilità flessor-torsionale dopo 790 sec. Nonostante lo svergolamento degli arcarecci l'analisi dinamica non si interrompe. In Figura 6 sono riportate le azioni assiali esercitate dalla parte di struttura riscaldata sulla colonna appartenente alla parete centrale e sugli arcarecci freddi. Si può notare che la rottura degli arcarecci comporta una variazione immediata delle sollecitazioni sugli arcarecci vicini.

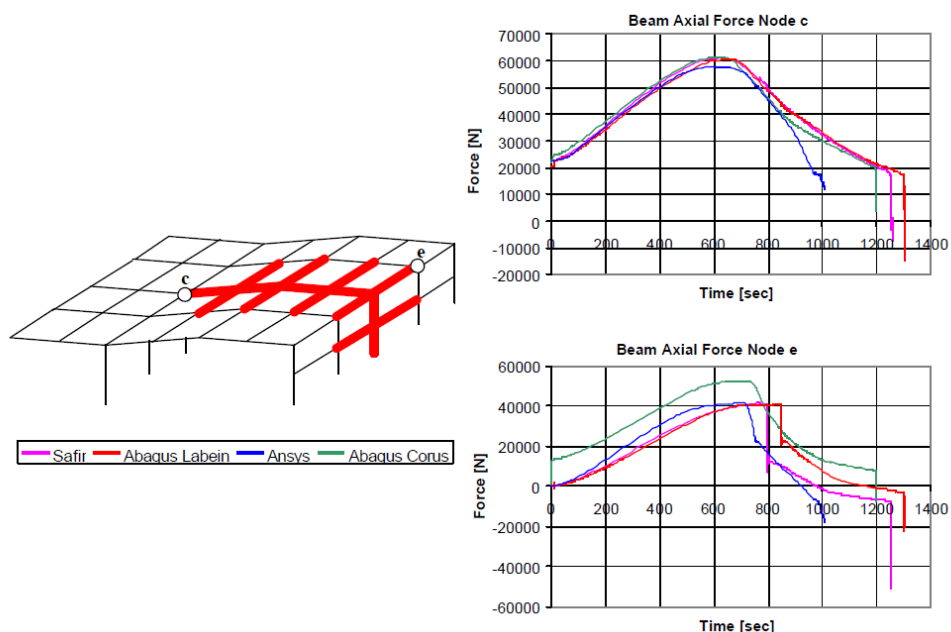


Figura 6 - Modello n. 4 – Azione sulla struttura non riscaldata

I risultati ottenuti nelle analisi condotte nell'ambito della ricerca hanno mostrato come i tre modelli di calcolo analizzati (ANSYS, ABAQUS e SAFIR) consentano di analizzare compiutamente e in modo concorde il comportamento globale 3D della struttura in caso di incendio, fino al completo collasso in presenza di grandi spostamenti, permettendo di:

- simulare il meccanismo di rottura della struttura;
- prevedere l'influenza di rotture locali sul comportamento globale della struttura;
- seguire eventuali collassi progressivi della struttura.

Può essere così superata la semplificazione, spesso accettata nei calcoli convenzionali, secondo cui il tempo di collasso locale della struttura è interpretato come il tempo di resistenza al fuoco dell'intera struttura.

3. ANALISI DELLE PRESTAZIONI DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO IN CASO DI INCENDIO

3.1 Introduzione

Le analisi strutturali presentate nel paragrafo precedente sono state condotte su una struttura analoga a quella studiata in [1], in modo tale che quello studio possa essere un utile riferimento nell'analisi dei risultati ottenuti. La struttura analizzata è rappresentata in Figura 7.

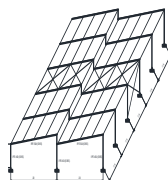


Figura 7 - La struttura portante dell'edificio

3.2 Le prestazioni della struttura in caso di incendio

L'obiettivo dell'analisi strutturale è la verifica delle seguenti prestazioni in caso di incendio:

- a) mantenimento della stabilità strutturale per un determinato periodo di tempo;
- b) assenza di collassi progressivi causati dalla crisi dei primi elementi strutturali;
- c) mantenimento della funzione di separazione in presenza di più compartimenti nell'edificio;
- d) assenza di crolli verso l'esterno della struttura portante.

L'analisi della prestazione c) è qui limitata al comportamento strutturale e non al comportamento degli altri elementi della compartimentazione.

3.3 La struttura di acciaio

La struttura portante dell'edificio è composta da un doppio portale in acciaio con travi e colonne costituite da profili a sezione piena. I carichi considerati sono riassunti nel seguito:

- peso strutturale: 325 N/m²
- permanenti portati: 300 N/m²
- vento: 860 N/m²
- $\psi_{2i} = 0$ per la neve
- $\psi_{2i} = 0.2$ per il vento

Tali carichi comportano un'utilizzazione dei profili a temperatura ambiente, nella combinazione dei carichi per la situazione eccezionale di incendio, pari a:

- trave, coefficiente di utilizzazione $\mu_0=0.36$;
- colonna perimetrale, coefficiente di utilizzazione $\mu_0=0.23$;
- colonna intermedia, coefficiente di utilizzazione $\mu_0=0.31$.

3.4 Lo scenario d'incendio

L'edificio è composto da due compartimenti, essendo presente una separazione longitudinale in corrispondenza della colonna centrale. Lo scenario di incendio prevede quindi che l'incendio si sviluppi in una sola parte dell'edificio.

Per semplicità anche in questo caso, come in [1], l'analisi viene svolta facendo riferimento alla schematizzazione dell'incendio mediante la curva ISO standard, tenendo presente che le procedure applicate hanno piena validità anche nel caso di schematizzazione dell'incendio mediante una curva di incendio naturale.

Il riscaldamento delle aste è stato determinato attraverso modelli termici 2D agli elementi finiti delle singole sezioni trasversali delle aste.

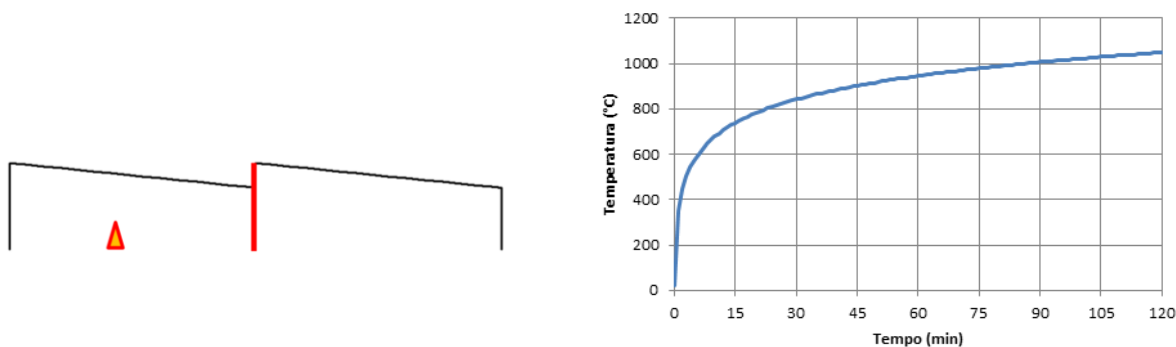


Figura 8 - Scenario di incendio

3.5 Il modello strutturale

L'analisi delle prestazioni della struttura in condizioni di incendio è condotta su un modello completo della struttura agli elementi finiti analizzato con il programma di calcolo Safir, sviluppato presso l'Università degli Studi di Liegi. Il programma di calcolo permette di tenere conto degli effetti dei grandi spostamenti, delle non-linearità del materiale e delle variazioni delle caratteristiche del materiale in funzione della temperatura, come stabilito negli Eurocodici per le analisi strutturali in caso di incendio condotte con metodo avanzato.

Il modello completo della struttura permette di tenere conto delle azioni indirette che si generano nella struttura a causa delle variazioni di temperatura.

L'analisi condotta è di tipo dinamico, che permette di valutare il comportamento strutturale anche in condizione di rotture o plasticizzazioni localizzate.

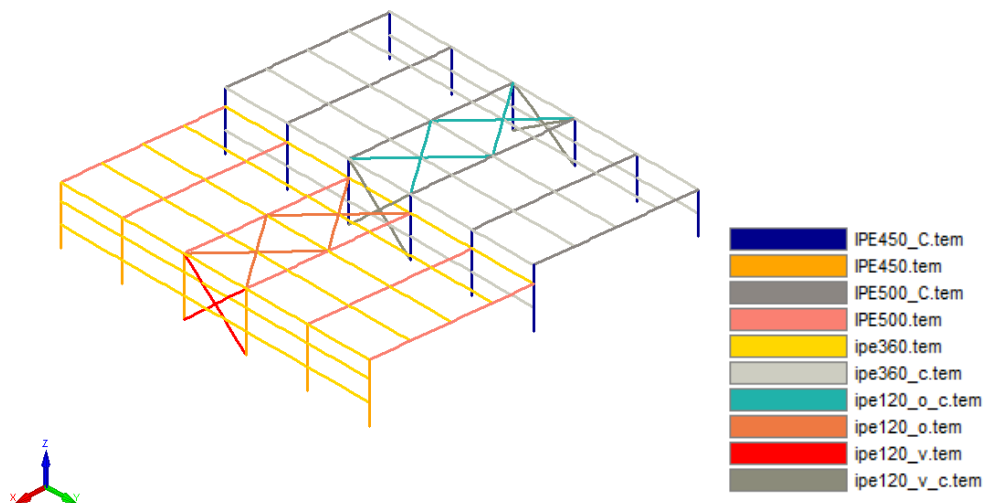


Figura 9 - Il modello di calcolo

3.6 La verifica delle prestazioni in caso di incendio

L'analisi strutturale in caso di incendio del modello implementato consente di verificare i tempi di mantenimento della stabilità della struttura portante, che nel caso qui analizzato sono risultati pari a circa 1050 sec. Nella Figura 10 è riportata la deformazione della struttura a rottura.

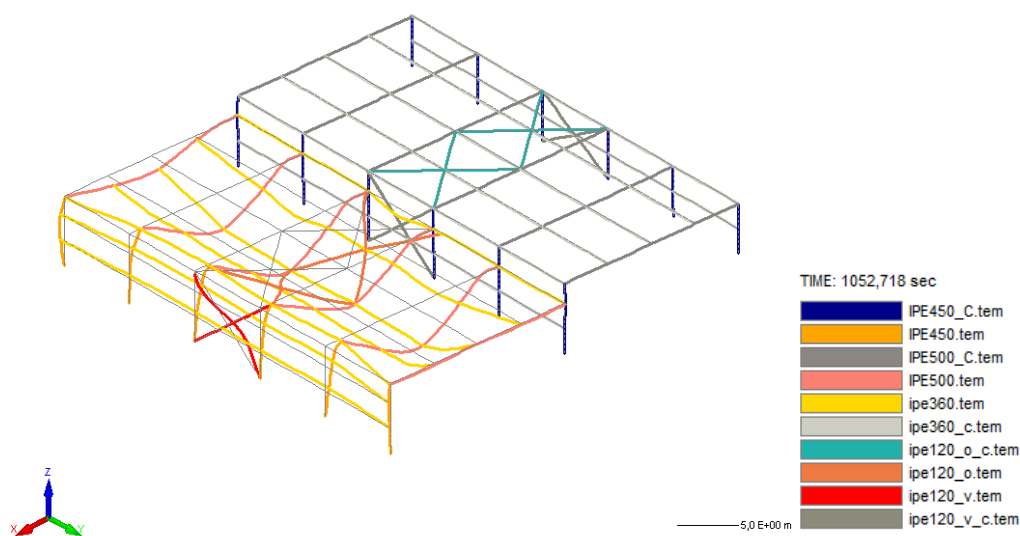


Figura 10 - Deformazioni della struttura in fase di rottura

Nonostante le azioni esercitate dalla struttura del compartimento incendiato sulla struttura di quello freddo, esso risulta non danneggiato: al termine dell'analisi infatti nel compartimento dove si verifica l'incendio le travi si sono ormai inflesse con grandi spostamenti (Figura 11) mentre le colonne della parete centrale hanno subito spostamenti non superiori a 1 cm (Figura 12).

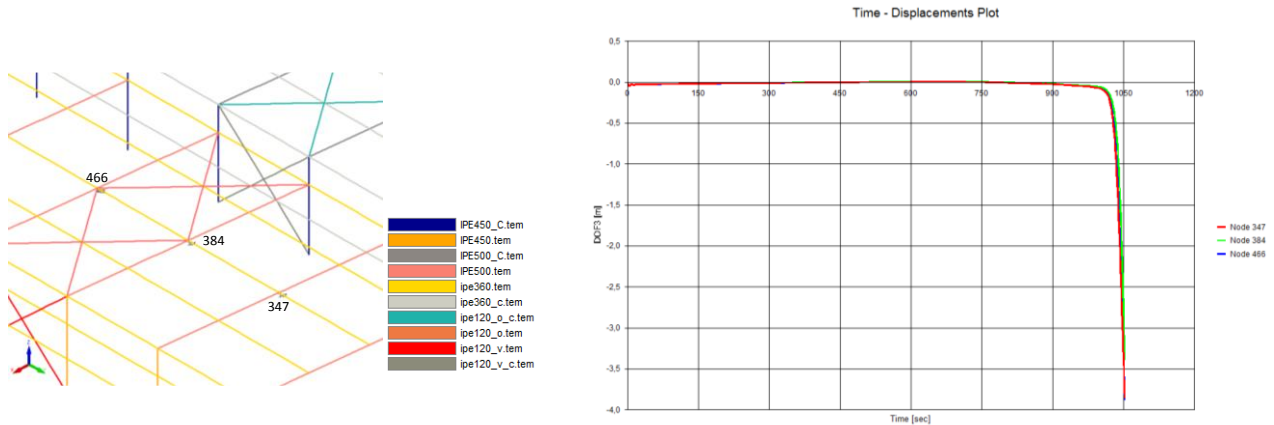


Figura 11 - Nodi di riferimento (mezzeria delle travi) e spostamenti verticali

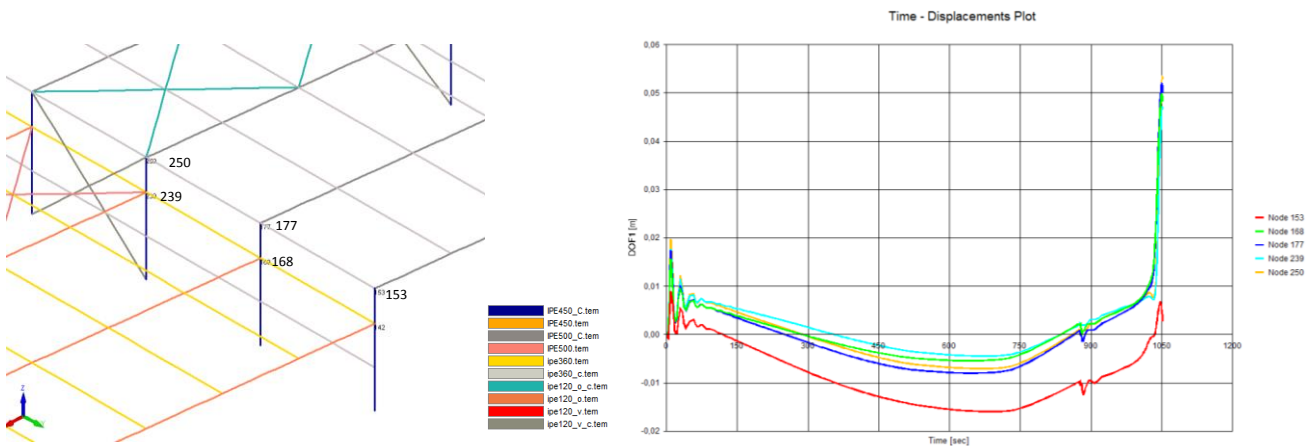


Figura 12 - Nodi di riferimento (parete di separazione) e spostamenti orizzontali

La verifica della parete di separazione in corrispondenza della compartimentazione richiede il controllo delle forze che la struttura in condizioni di incendio esercita sulla struttura che rimane a bassa temperatura. Mediante l'analisi di queste azioni nel modello implementato, rappresentate in Figura 13, si può determinare la spinta massima che la struttura del compartimento incendiato esercita sulla struttura del compartimento vicino in corrispondenza della parete di separazione: $N_{max} = 40'000$ N.

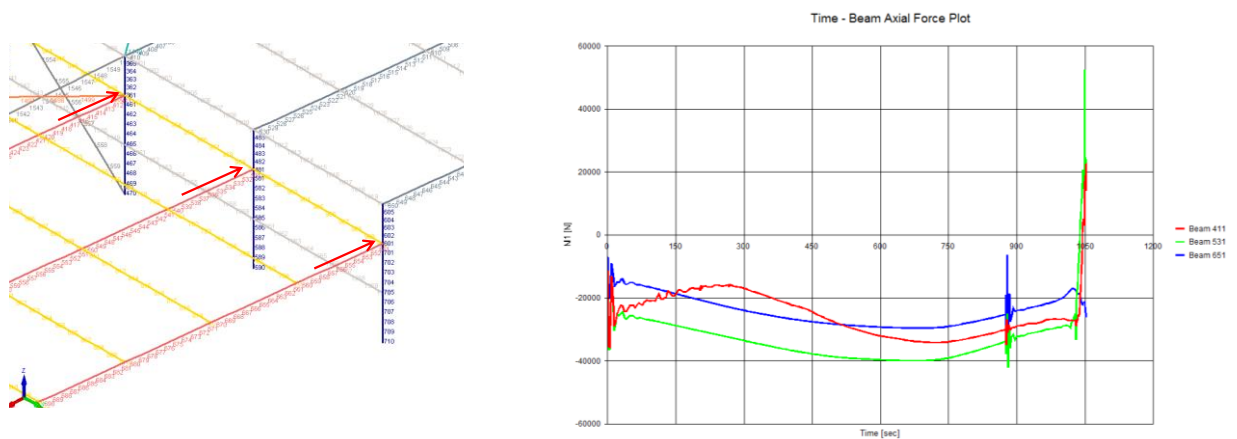


Figura 13 - Spinta delle travi sul compartimento non riscaldato

Infine l'analisi del modello implementato consente di riconoscere il comportamento della struttura perimetrale durante l'evoluzione dell'incendio, che comporta il crollo verso l'interno dell'edificio. Questo fenomeno è sottolineato anche dal grafico degli spostamenti dei nodi di sommità delle colonne perimetrali

(Figura 15): tali nodi inizialmente si spostano verso l'esterno dell'edificio (spostamento massimo ≈ 20 cm), successivamente si verificano grandi spostamenti verso l'interno dell'edificio.

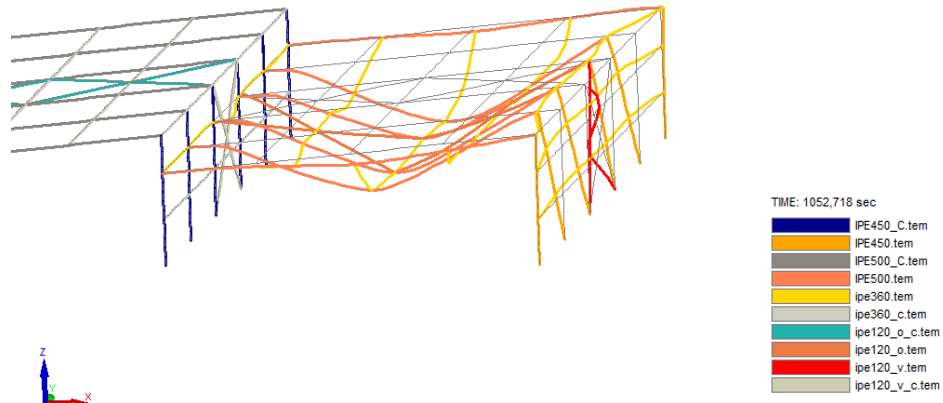


Figura 14 - Deformazione a rottura della struttura

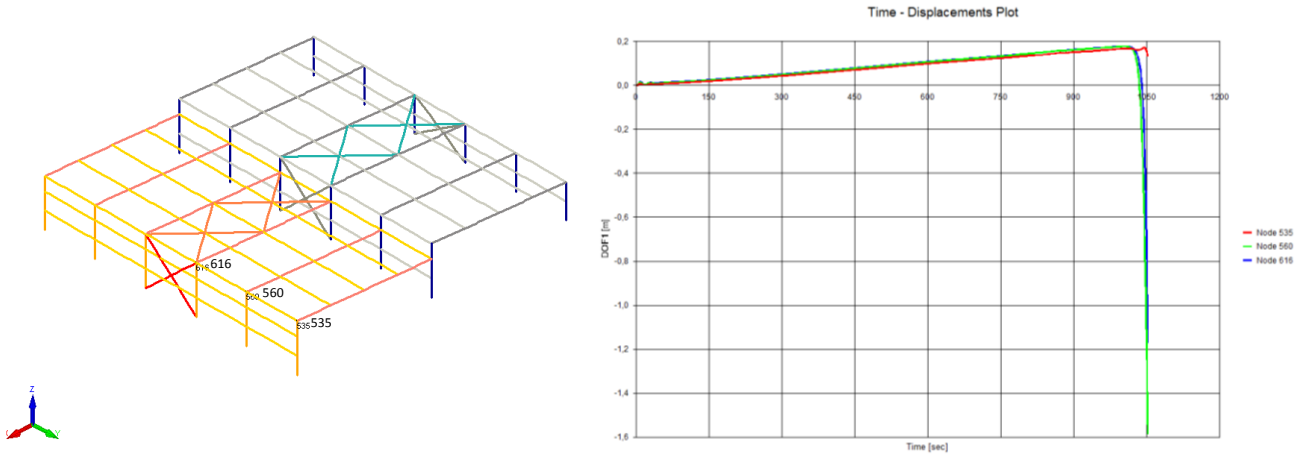


Figura 15 - Nodi di riferimento (616, 560, 535) e spostamenti orizzontali

Nello scenario di incendio analizzato si ha il riscaldamento contemporaneo, secondo la curva di incendio convenzionale adottata, di tutte le strutture del compartimento. In tal modo è difficile apprezzare la capacità portante della struttura dopo la crisi di singoli elementi. Nel modello strutturale 4 riportato nel paragrafo 2, in cui il riscaldamento interessa solo una fila di arcarecci e i telai adiacenti, si può apprezzare la capacità della struttura di mantenere la stabilità anche dopo la crisi per instabilità degli arcarecci interessati dall'incendio. Questo risultato è stato verificato anche nella struttura qui analizzata, che è stata studiata con il modello rappresentato in Figura 16.

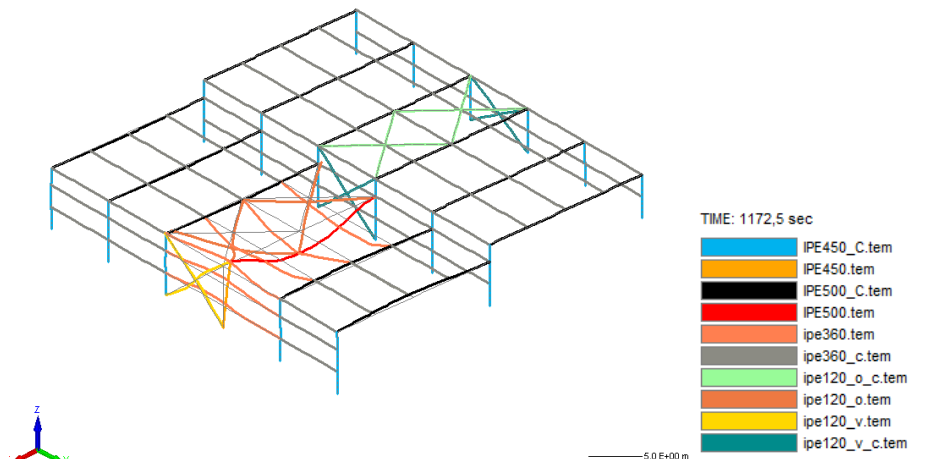


Figura 16 - Modello di calcolo con riscaldamento localizzato – Deformazioni a rottura

4. CONCLUSIONI

Facendo riferimento ai risultati di un recente progetto di ricerca europeo [1], in questo lavoro sono state analizzate le procedure di applicazione dell'approccio ingegneristico previste dalla normativa nazionale per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio di capannoni industriali monopiano.

Esse hanno mostrato come sia possibile analizzare il meccanismo completo di collasso della struttura portante in condizioni di incendio e prevedere l'influenza di rotture locali sul comportamento globale della struttura.

Queste conclusioni appaiono oggi ancora più significative per la progettazione delle strutture di acciaio alla luce della possibilità di impiego di queste procedure nell'ambito della nuova normativa vigente, D.M.Int. 03-8-2015, in cui non sono più presenti le restrizioni vigenti nel vecchio quadro normativo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L.G. Cajot, O. Vassart, M. O'Connor, Y. Shenkai, C. Fraud, B. Zhao, J. De la Quintana, J. Martinez de Aragon, J.M. Franssen, F. Gens "3D simulation of Industrial Hall in case of fire Benchmark between ABAQUS, ANSYS and SAFIR".
- [2] EN 1991-1-2 (2002), "Azioni sulle strutture. Parte 1-2: Azioni in generali – Azioni sulle strutture esposte al fuoco", 1 Novembre 2002.
- [3] EN 1993-1-2 (2005), "Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-2:Regole generali – progettazione strutturale contro l'incendio", 1 Luglio 2005.
- [4] D. MIN. INT. (9-03-2007), "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco", GU n. 74 del 29 marzo 2007.
- [5] D. MIN. INT. (09-05-2007), "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio", Ministero dell'Interno 9 maggio 2007.
- [6] Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le norme tecniche per le costruzioni" 2009. Hoepli Editore, Milano.