

16. Le prestazioni delle strutture in acciaio per la sicurezza in caso di incendio negli edifici adibiti a deposito e ad attività industriale

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

Per una certa tipologia di edifici industriali, in particolare quelli monopiano, la sicurezza strutturale in caso di incendio dipende da alcune specifiche prestazioni della struttura portante. L'evoluzione dei criteri normativi e degli strumenti di calcolo a disposizione dei progettisti consente oggi il pieno controllo di queste prestazioni e la possibilità di progettare in maniera completa soluzioni strutturali in acciaio sicure in caso di incendio.

Nel presente lavoro questa procedura di calcolo è stata analizzata, facendo riferimento alle recenti disposizioni normative introdotte in Europa per l'applicazione dell'approccio ingegneristico al caso degli edifici adibiti a deposito e ai risultati delle analisi condotte sul comportamento strutturale 3D di strutture in acciaio mediante l'applicazione di tre software FEM (ANSYS, ABAQUS e SAFIR).

Le prestazioni delle strutture in acciaio per la sicurezza in caso di incendio negli edifici adibiti a deposito e ad attività industriale

Sandro Pustorino – Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in Caso di Incendio (Coordinatore)

Olivier Vassart – ArcelorMittal Luxembourg

Luca Ponticelli - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

Il presente lavoro è frutto delle attività 2012 condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita e sostenuta da Fondazione Promozione Acciaio.

Sommario

Per una certa tipologia di edifici industriali, in particolare quelli monopiano, la sicurezza strutturale in caso di incendio dipende da alcune specifiche prestazioni della struttura portante. L'evoluzione dei criteri normativi e degli strumenti di calcolo a disposizione dei progettisti consente oggi il pieno controllo di queste prestazioni e la possibilità di progettare in maniera completa soluzioni strutturali in acciaio sicure in caso di incendio.

Nel presente lavoro questa procedura di calcolo è stata analizzata, facendo riferimento alle recenti disposizioni normative introdotte in Europa per l'applicazione dell'approccio ingegneristico al caso degli edifici adibiti a deposito e ai risultati delle analisi condotte sul comportamento strutturale 3D di strutture in acciaio mediante l'applicazione di tre software FEM (ANSYS, ABAQUS e SAFIR).

LA SICUREZZA IN CASO DI INCENDIO NEGLI EDIFICI ADIBITI A DEPOSITO ED ATTIVITA' INDUSTRIALE

La sicurezza strutturale in caso di incendio secondo la normativa nazionale

Nell'ambito del quadro normativo nazionale, la sicurezza strutturale in caso di incendio degli edifici adibiti a deposito o ad attività industriale è definita secondo quanto previsto dal Decreto del Ministero dell'Interno 9 marzo 2007 qualora gli stessi ricadano in una delle fattispecie specifiche di cui al DPR 151 del 1 agosto del 2011 (Attività n. 24, 25, 26, 27, 28, 34, 36, 43, 44, 46, 47, 70, solo per citarne alcune). Questo decreto definisce i criteri di valutazione applicabili per la determinazione della classe di resistenza al fuoco delle strutture portanti degli edifici (approccio prescrittivo) o, in via alternativa, le prestazioni che la struttura portante degli edifici deve soddisfare in caso di incendio (approccio ingegneristico).

- Approccio prescrittivo

Per la tipologia di edifici qui analizzata, una volta verificate alcune caratteristiche geometriche e funzionali generali, il decreto individua il livello di prestazione II, stabilendo quindi l'obiettivo di sicurezza strutturale in caso di incendio corrispondente al mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti. Seguendo questo approccio sono specificate le classi minime di resistenza al fuoco necessarie per garantire questo livello di prestazione, in funzione del numero dei piani dell'edificio, in particolare:

- 30, per costruzioni ad un piano fuori terra, senza interrati;
- 60, per costruzioni fino a due piani fuori terra ed un piano interrato.

Eventuali requisiti di resistenza al fuoco inferiori possono essere determinati mediante un metodo convenzionale definito nel decreto stesso, basato principalmente sulla definizione del carico di incendio specifico di progetto che caratterizza l'attività che si svolge nell'edificio.

- Approccio ingegneristico

Le prestazioni delle strutture portanti degli edifici per la sicurezza in caso di incendio possono essere verificate anche mediante l'applicazione del cosiddetto approccio ingegneristico. In tal caso la progettazione strutturale deve essere condotta al fine di dimostrare che gli obiettivi della sicurezza in caso di incendio siano verificati. Come sopra ricordato, per la tipologia di edifici qui trattata è stato individuato il livello di prestazione II, per il quale l'obiettivo di sicurezza è definito come "il mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione".

L'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio è regolata dalla normativa vigente e richiede il rispetto di alcune condizioni di applicazione, di seguito riepilogate:

- la capacità portante deve essere verificata rispetto all'azione termica della curva naturale di incendio, applicata per l'intervallo di tempo necessario al ritorno alla temperatura ordinaria (D.M. 09/03/2008);
- deve essere eseguita la verifica della capacità portante degli elementi costruttivi rispetto all'azione termica della curva di incendio nominale standard, determinando le classi di resistenza richieste in funzione del carico di incendio specifico di progetto secondo una regola convenzionale definita dal decreto stesso (Tabella 5 del D.M. 09/03/2008).

E' stato già notato in [13] come queste due condizioni di applicazione in generale non consentano la progettazione delle strutture di un capannone industriale mediante l'approccio ingegneristico. E' infatti sufficiente che l'edificio sia caratterizzato da discreti livelli di carico di incendio specifico di progetto, come spesso avviene nella realtà, affinché i due criteri sopra riportati conducano a richieste di resistenza al fuoco sovrabbondanti rispetto agli obiettivi di sicurezza dichiarati per questi edifici, quasi sempre non applicabili in una reale progettazione.



Figura 1 – La struttura portante in acciaio di un edificio industriale (Cajot et Al., 2004)

L'approccio prestazionale per la progettazione dei capannoni industriali: evoluzione della normativa in Europa.

L'approccio prestazionale per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio degli edifici adibiti a deposito è stato recentemente introdotto nella normativa vigente in Francia, con il decreto ministeriale del 23 dicembre 2008.

L'approccio prestazionale si applica mediante l'applicazione dei criteri di Fire Safety Engineering (FSE) e costituisce un criterio di valutazione alternativo all'approccio prescrittivo. In tal caso l'analisi FSE deve essere condotta con l'obiettivo di dimostrare che tutto il personale presente abbia il tempo sufficiente per abbandonare l'edificio prima che si verifichi il crollo della struttura e che il comportamento strutturale dell'edificio verifichi determinate prestazioni in caso di incendio, ossia:

- un collasso locale in un compartimento non deve comportare il collasso a catena dell'intero edificio;
- il collasso della struttura non deve verificarsi con un crollo verso l'esterno dell'edificio.



Figura 2 – Verifica del comportamento strutturale in caso di incendio in una campagna di prove sperimentali condotta su edifici adibiti a deposito [8]

OBIETTIVI DELLA SICUREZZA STRUTTURALE IN CASO DI INCENDIO PER L'APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO INGEGNERISTICO ALLA PROGETTAZIONE DEI CAPANNONI INDUSTRIALI

Come ricordato nel paragrafo precedente, per una ben definita categoria di edifici di tipo industriale, il decreto Ministeriale 9 marzo 2007 individua l'obiettivo di sicurezza strutturale in caso di incendio con il livello di prestazione II. Per questa tipologia di costruzioni possono essere riepilogati gli obiettivi di sicurezza in caso di incendio individuati dal decreto:

- a) mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti;
- b) gli eventuali crolli totali o parziali della costruzione non arrechino danni ad altre costruzioni;
- c) gli eventuali crolli totali o parziali della costruzione non compromettano l'efficacia degli elementi di compartimentazione e di impianti di protezione attiva che proteggono altre costruzioni;

Questi obiettivi di sicurezza possono essere controllati mediante l'applicazione dei criteri FSE. Ad esempio, essi possono essere verificati mediante il controllo delle seguenti prestazioni della struttura portante dell'edificio:

- criterio di "nessun collasso progressivo"
consiste nella verifica che nel caso di un incendio che si sviluppa in uno dei compartimenti dell'edificio, il collasso localizzato della struttura del compartimento non provoca il collasso dei compartimenti adiacenti;
- criterio del "mantenimento della compartimentazione"
consiste nella verifica che nel caso di un incendio che si sviluppa in uno dei compartimenti dell'edificio, non sia compromessa la funzione degli elementi della compartimentazione;
- verifica dei tempi di evacuazione degli occupanti
consiste nella verifica che il personale presente dentro l'edificio disponga del tempo sufficiente per abbandonare l'edificio prima che si verifichi il crollo della struttura.

A questi criteri di verifica, sembra appropriato aggiungere un ulteriore criterio di verifica:

- criterio di "nessun collasso verso l'esterno dell'edificio"
mirato alla sicurezza dell'intervento delle squadre di soccorso impegnate all'esterno della costruzione nello spegnimento dell'incendio.

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLE STRUTTURE PORTANTI IN CASO DI INCENDIO

Introduzione

Come visto nei paragrafi precedenti, la verifica della sicurezza in caso di incendio di una certa categoria di capannoni industriali richiede il controllo di una serie di prestazioni della struttura portante dell'edificio. Nasce da qui l'interesse della ricerca ai criteri di applicazione FSE al caso del comportamento strutturale dei capannoni in caso di incendio. Di seguito riferiamo dei principali risultati di un recente progetto di ricerca [9]

riguardante i criteri di calcolo FSE per la verifica della sicurezza strutturale in caso di incendio con riferimento alle soluzioni costruttive della costruzione in acciaio per la realizzazione dei capannoni industriali. Trattando specificatamente del caso di un edificio industriale o di un deposito, la valutazione del comportamento 3D della struttura portante e l'analisi del comportamento della struttura dopo i primi crolli locali causati dall'incendio consentono di verificare se la sicurezza strutturale in caso di incendio sia soddisfatta o meno. Questo è possibile individuando la presenza o meno di un collasso progressivo della struttura e le modalità del tipo di collasso. Nella pratica la valutazione del rischio applicata a questa tipologia di edifici mostra che una corretta valutazione dei fenomeni "assenza di collasso progressivo" e "tipo di crollo" consente di verificare se la sicurezza degli occupanti e delle squadre di soccorso in caso di incendio sia assicurata o meno.

Applicazione dei criteri FSE allo studio del comportamento strutturale di un capannone industriale

L'applicazione dei criteri FSE al caso di un capannone industriale richiede la capacità di analizzare due principali aspetti della sicurezza in caso di incendio: da un lato gli effetti del flusso di calore e dei fumi sulle persone e sugli edifici circostanti, dall'altro l'analisi delle prestazioni della struttura nelle diverse condizioni di incendio.

Flusso termico in caso di incendio in un edificio adibito a deposito

Per l'applicazione dei criteri FSE al caso di un capannone industriale, nell'ambito di un progetto nazionale [8] in Francia è stato sviluppato un metodo di valutazione del flusso termico e delle sue conseguenze sulle persone e sugli edifici circostanti. Questo metodo tiene conto delle caratteristiche specifiche di un capannone industriale che possono influenzare l'evoluzione dell'incendio, come ad esempio l'influenza del collasso della copertura o delle pareti. Esso è stato validato mediante una serie di 8 prove sperimentali su un edificio industriale di 100 m² e una in grande scala su un edificio di 850 m².

Il metodo si applica al caso di un generico deposito e comprende l'analisi del rischio che è richiesta nel caso di magazzini caratterizzati dallo stoccaggio di importanti quantità di combustibile.

I principali dati di input necessari per l'applicazione del metodo sono:

- i dati relativi al compartimento, come la lunghezza, la larghezza e l'altezza della struttura e le caratteristiche delle pareti e della copertura;
- i dati relativi all'area di deposito, come la misura e il numero di livelli delle scaffalature e le modalità di stoccaggio;
- i dati relativi ai materiali combustibili, compreso le dimensioni e la composizione di eventuali pallets.

Per i casi trattati, il metodo prevede la valutazione dei seguenti effetti di un incendio:

- radiazione emessa dalle fiamme su potenziali obiettivi intorno all'edificio, come le persone o altri edifici;
- la tossicità dei fumi e la loro propagazione.

Il metodo prevede il calcolo delle distanze associate al flusso di calore di 3 e 5 kW/m² nel caso in cui l'incendio è pienamente sviluppato all'interno di un compartimento.

Uno schema generale di applicazione del metodo di calcolo è rappresentato nella figura sottostante:

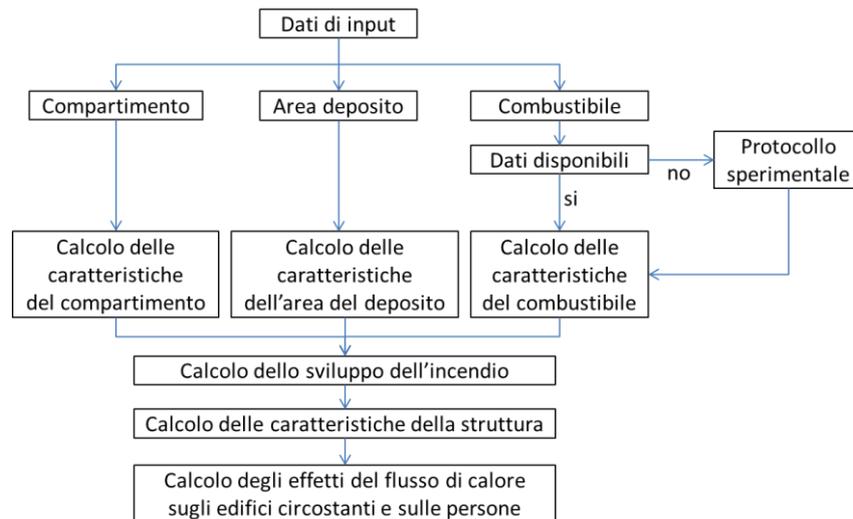


Figura 4 - Schema generale per la valutazione degli effetti del flusso termico in caso di incendio in un edificio adibito a deposito.

Analisi del comportamento strutturale in caso di incendio

Il caso di un capannone industriale

Prendiamo ad esempio il caso della struttura a telaio doppio riportata nelle figure seguenti, in cui è supposta la presenza di separazione longitudinale tra i due compartimenti lungo le colonne centrali del telaio.

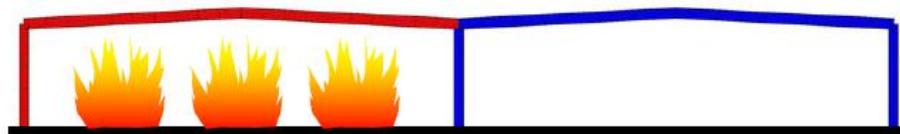


Figura 5 – Le condizioni di incendio

Il comportamento della struttura in condizioni di incendio può essere diviso in due fasi successive. Nella prima fase si verifica l'espansione termica degli elementi riscaldati. In questa fase si possono osservare i seguenti fenomeni:

- un incremento progressivo dello spostamento laterale verso l'esterno del compartimento dell'estremità superiore della colonna che porta i carichi della copertura;
- un incremento progressivo delle forze interne (sforzi di compressione aggiuntivi) nelle travi riscaldate; queste forze di compressione sono dovute al vincolo esistente contro gli allungamenti termici costituito dalla parte fredda della struttura.

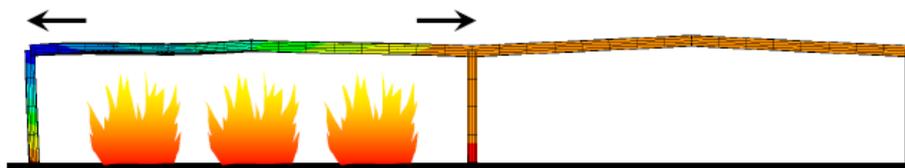


Figura 6 – Deformata durante la fase di espansione

La seconda fase corrisponde al collasso della parte riscaldata della struttura. Nell'ipotesi che le colonne intermedie, poste in corrispondenza di una parete di separazione, rimangano a bassa temperatura, in questa fase si possono osservare i seguenti fenomeni:

- la trave cambia progressivamente da uno stato sollecitazione combinata di compressione e flessione a uno stato di trazione semplice;
- dall'inizio di questa fase gli spostamenti delle estremità del compartimento cambiano verso: l'estremità della colonna perimetrale si muove verso la posizione iniziale e prosegue collassando verso l'interno del compartimento.



Figura 7 – Deformata durante la fase di collasso

Nell'ambito dell'applicazione di un approccio prestazionale questi comportamenti devono essere controllati e le prestazioni della struttura portante in caso di incendio devono essere verificate. A questo scopo deve essere verificata la capacità di simulazione dei software impiegati, che devono essere in grado di analizzare il comportamento 3D della struttura, compresi gli effetti membrana e di vincolo, i modi di collasso e il comportamento della struttura successivo alle prime crisi locali.

Un esempio di applicazione

Con l'obiettivo di analizzare le capacità operative di alcuni software per l'analisi del comportamento strutturale in caso di incendio di un tipico edificio adibito a deposito, nel progetto [9] è stata eseguita l'analisi strutturale impiegando i modelli di calcolo ANSYS, ABAQUS, e SAFIR. I modelli di calcolo sono stati confrontati mediante un benchmark, in cui due differenti utilizzatori hanno usato il modello ABAQUS. Il benchmark è stato eseguito sulla struttura mostrata in Figura 8.

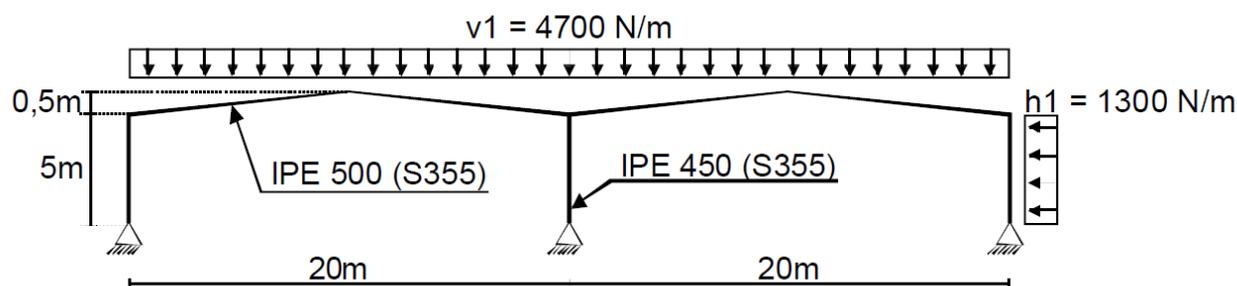


Figura 8 – Schema della struttura portante di un edificio adibito a deposito

Le proprietà termiche e meccaniche dei materiali sono state definite in accordo alle parti fuoco di EC3. L'azione dell'incendio è stata considerata conformemente alla curva di incendio ISO. La valutazione delle curve di riscaldamento dei profilati di acciaio è stata calcolata mediante i metodi di calcolo semplificato previsti dalla parte fuoco di EC3, considerando quindi una distribuzione di temperatura uniforme nella sezione trasversale di acciaio.

I tre modelli di calcolo sono stati messi a confronto analizzando differenti schemi strutturali, partendo da uno schema del doppio telaio rappresentato in due dimensioni, fino ad uno schema completo in 3 dimensioni costituito da una serie di telai doppi e dagli arcarecci tra essi interessati dall'incendio. Quest'ultimo caso è rappresentato in Figura 9.

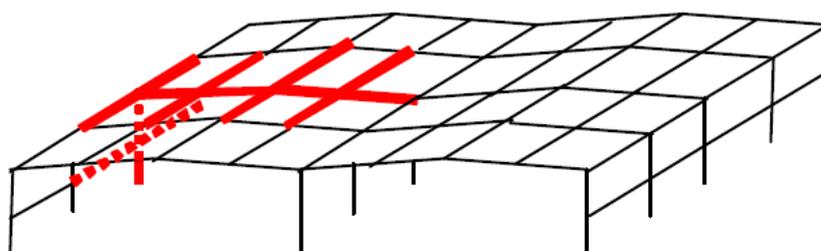


Figura 9 – Schema della struttura portante e degli elementi in condizioni di incendio

La struttura analizzata comprende una serie di doppi telai collegati tra loro mediante gli arcarecci. L'incendio interessa alcuni un telaio posto nel compartimento in cui si verifica l'incendio e gli arcarecci di collegamento con gli altri telai.

A causa dell'instabilità laterale di un arcareccio, che avviene dopo circa 790 secondi, l'analisi statica si interrompe in corrispondenza di questo evento. L'analisi dinamica consente di seguire il fenomeno di instabilità e così la fase successiva al primo collasso locale può essere analizzata (Figura 10).

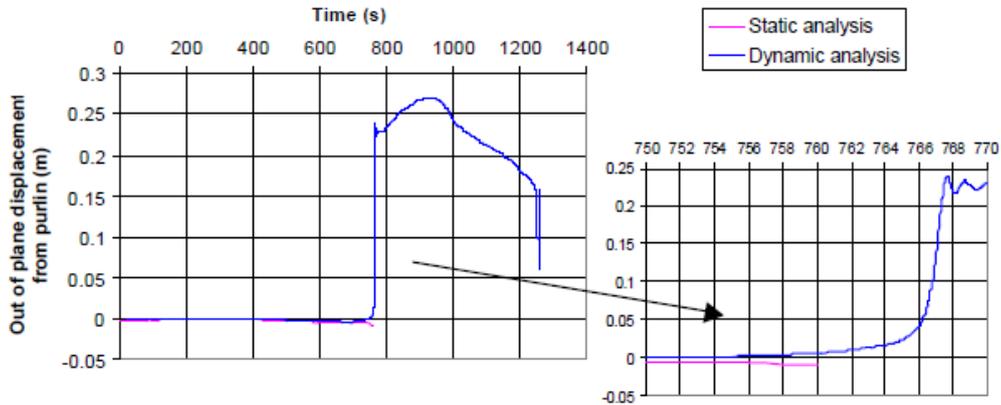
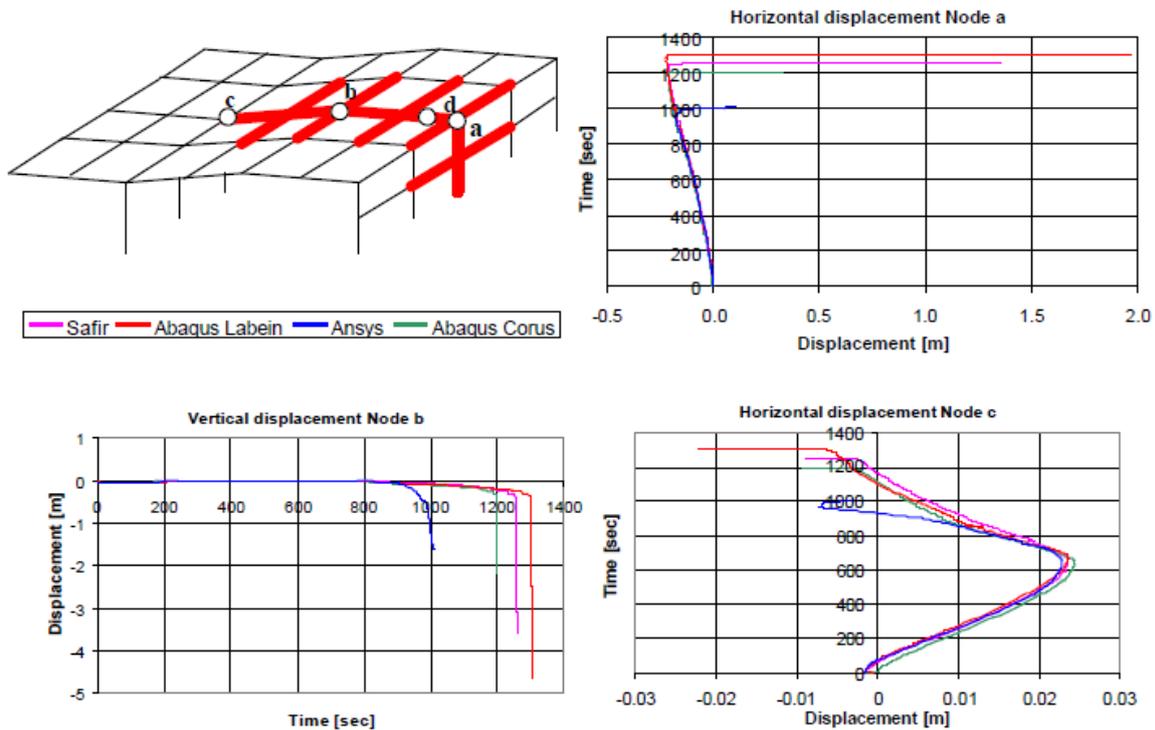


Figura 10 – Risultati dell'analisi statica e dell'analisi dinamica

Nella Figura 11 sono rappresentati gli spostamenti dei nodi più significativi del telaio interessato dall'incendio (il nodo d rappresentato nella figura è posto a 1/4 della lunghezza della prima trave).



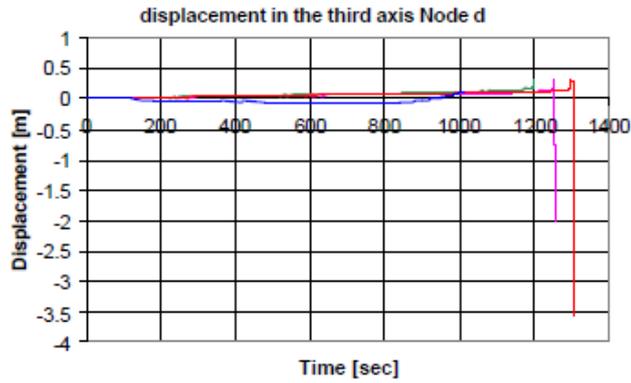


Figura 11 – Andamento degli spostamenti durante la fase di incendio

Nella Figure 12 è riportata l'evoluzione nel tempo della forza normale esercitata dalla trave soggetta all'incendio verso la colonna del telaio posta in corrispondenza della compartimentazione e nel punto di contatto tra la parte fredda e gli arcarecci soggetti all'incendio. Si può notare come nella fase finale la parte calda della struttura tira la parte fredda ma il valore di queste forze rimane accettabile, tale da non determinare danni alla restante parte della struttura.

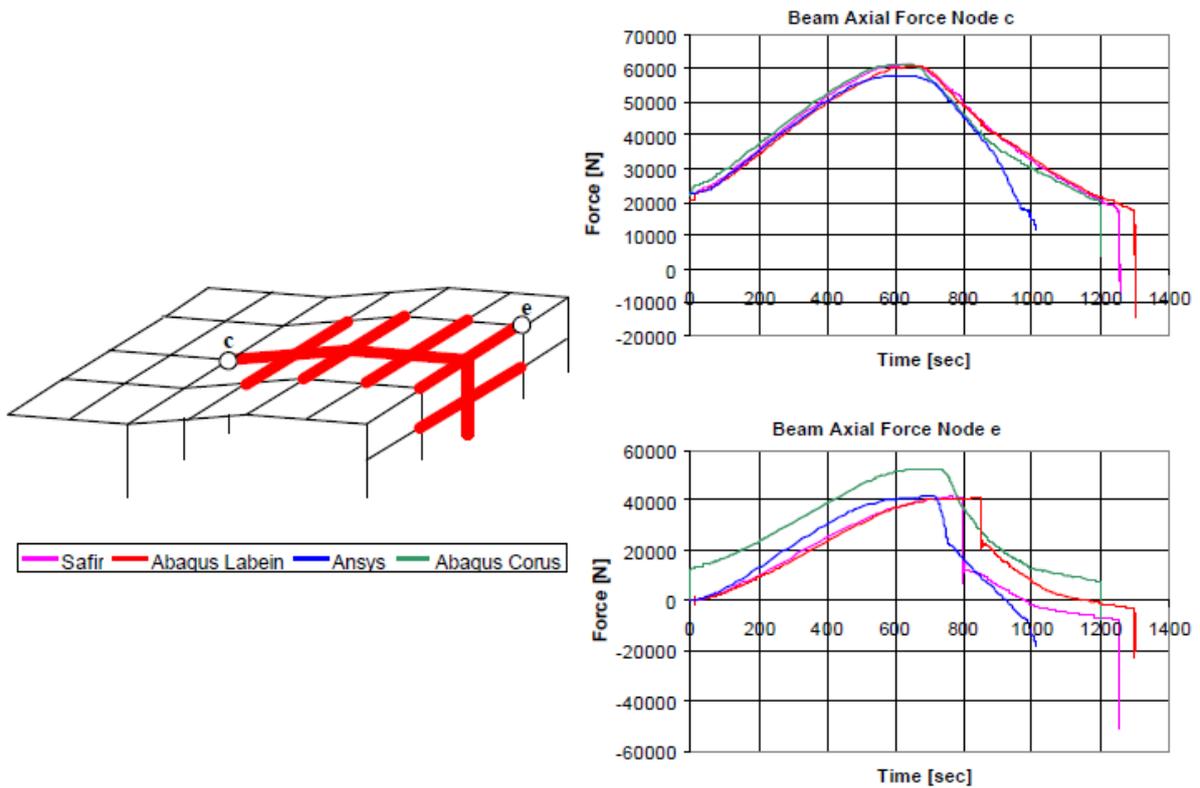


Figura 12 – Evoluzione della forza normale sulle parti fredde della struttura

Il disegno della struttura deformata, senza amplificazione delle deformazioni, è rappresentato in Figura 13.

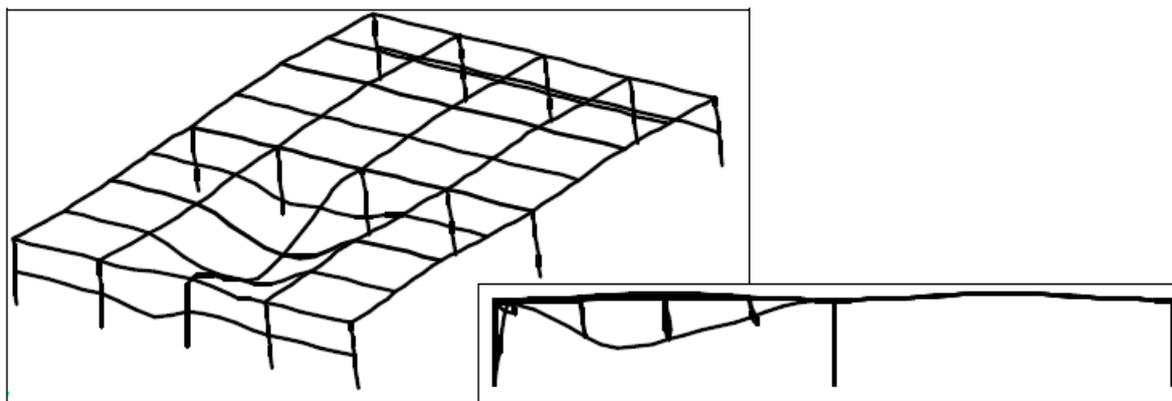


Figura 13 – Deformazione della struttura in condizioni di incendio

I risultati ottenuti dimostrano come i tre modelli di calcolo analizzati (ANSYS, ABAQUS e SAFIR) consentono di simulare il comportamento globale 3D della struttura fino al completo collasso in presenza di grandi spostamenti. Così le prestazioni della struttura dei capannoni industriali che oggi alcune nuove normative chiedono di controllare (crollo della struttura verso l'interno e assenza di collassi progressivi) possono essere compiutamente verificate. In tal modo il tempo di resistenza al fuoco di queste strutture è ora realmente determinato, superando l'approccio semplificato spesso accettato in passato in cui il tempo di collasso locale della struttura veniva interpretato come il tempo di resistenza al fuoco dell'intera struttura.

CONCLUSIONI

Gli edifici adibiti a deposito ed attività industriale sono da sempre frequentemente realizzati con soluzioni strutturali tipiche della costruzione in acciaio. Per una certa tipologia di questi edifici, in particolare quelli monopiano, la sicurezza strutturale in caso di incendio dipende da alcune specifiche prestazioni della struttura portante, come l'assenza di collassi durante la prima fase dell'incendio, di collassi progressivi e di crolli della struttura verso l'esterno dell'edificio. L'evoluzione dei criteri normativi e degli strumenti di calcolo a disposizione dei progettisti consente oggi il pieno controllo di queste prestazioni e la possibilità di progettare in maniera completa soluzioni strutturali in acciaio sicure in caso di incendio.

Recenti studi hanno confrontato i risultati delle analisi 3D di strutture di acciaio in condizioni di incendio condotte con diversi software FEM (ANSYS, ABAQUS e SAFIR). Essi hanno mostrato come i tre software consentano di analizzare il meccanismo di collasso di una struttura di acciaio fornendo risultati simili in tutte le analisi 3D condotte. Come previsto da recenti disposizioni normative, è stata quindi mostrata la possibilità di verificare le prestazioni della struttura di acciaio necessarie per la sicurezza in caso di incendio di questa tipologia di edifici.

Queste conclusioni, considerate insieme a quanto concluso nel lavoro [13], segnalano l'importanza di una revisione della normativa nazionale riguardante l'applicazione dell'approccio ingegneristico al caso dell'edilizia industriale.

Bibliografia

- [1] Decreto del Ministero dell'Interno del 16 febbraio 2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n. 87);
- [2] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 marzo 2007 "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n.87);
- [3] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio" (G.U. n. 117 del 22-5-2007);
- [4] Norme Tecniche per le Costruzioni, supplemento ordinario della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 4 febbraio 2008, n.29;
- [5] EN 1991.1.2 (Eurocodice 1) "Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco";

- [6] EN 1993.1.2 (Eurocodice 3) "Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [7] Arrêté du 23 décembre 2008 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts relevant du régime de la déclaration au titre de la rubrique no 1510 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement;
- [8] Flumilog – Essai d'incendie dans un entrepot en constuction metallique. Reference CTICM SRI-09/50 BZ-MSS-CT-JK/NB, 15-06-2009;
- [9] Fire safety of industrial halls, RFCS Contract n. RFS2-CT-2007-00032, 2010;
- [10] Nigro E., Cefarelli G., Pustorino S., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio", Hoepli, 2010;
- [11] Pustorino S., Nigro E., Giomi G., Cirillo V., "Le procedure per la progettazione della sicurezza strutturale in caso di incendio nell'ambito della normativa nazionale vigente", Rivista Antincendio n°9-2011;
- [12] Zhao B., Henneson N., Pustorino S., "La sicurezza in caso di incendio degli edifici adibiti a deposito e le prestazioni delle strutture portanti in caso di incendio", 2012;
- [13] Pustorino S., Nigro E., Ponticelli L., "La sicurezza strutturale in caso di incendio negli edifici adibiti a deposito e ad attività industriale", Rivista Antincendio n. 8-2012.