

# Performance fire design for industrial structures

## Analisi avanzate con i moderni metodi di calcolo prestazionale nel dimensionamento delle strutture resistenti al fuoco

Ing. Davide Giuriola<sup>1</sup>, Ing. Daniele Andriotto<sup>2</sup>, Prof.Ing. Davide Grandis<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Società di Ingegneria – MezzadrIngegneria S.r.l., Ferrara

<sup>2</sup> Master Sicurezza Antincendio & Fire Engineering – SAFEng, Ferrara

<sup>3</sup> **Master SAFEng** – Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

email: grndvd@unife.it

Web: <http://endif.unife.it/it/didattica/post-laurea/master-ing>

<http://www.unife.it/formazione-postlaurea/master-perfezionamento-formazione/offerta-formativa-anniprecedenti/2013-2014/master/safeng/sicurezza-antincendio-e-fire-engineering-safeng>

<https://it-it.facebook.com/MasterSAFEng>

Collaborazione per le modellazioni dell'incendio: Ing. Barbara Cerchiai

## Summary

Practical experiences gained using Straus7 software for structural analysis and Pyrosim software for fire modelling are presented in this article with new methods of fire resistance analysis for steel elements built in industrial structures. The new analysis method for efficient response, for the attention to low cost of peculiar steel structures designed “without protection” for fire resistance are explained with examples and detail on design process and with innovative approaches.

European performance based design became also for the Italian fire code, the reference for the study of the behavior of all structures at elevated temperatures. The new construction of a single-story industrial building of Toyota Group is presented with the control of those structural performance and details for design in case of fire. The equilibrium of temperature distribution inside the structure elements as a function of time, is calculated with finite element solver Straus7 with attention to all the different boundary conditions with also nonlinear steady state or transient solutions for thermal properties of the materials.

## Keywords

Fire design, Straus7, Pyrosim, fire resistance

## Performance fire design for industrial structures

Con la pubblicazione in Italia del recente Nuovo Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3.08.2015) [1] viene proposto un incisivo impulso ad un percorso iniziato nel 2007 per lo studio secondo metodi prestazionali di edifici complessi che richiedono particolare attenzione alla sicurezza antincendio. L'introduzione di metodi di analisi di moderna concezione che fanno via via riferimento ad approcci sempre più prestazionali ed analitici porta lentamente all'abbandono dei vecchi sistemi nel dimensionamento e verifica delle dotazioni antincendio imposte da precedenti normative di tipo prescrittivo.

L'analisi del comportamento al fuoco delle strutture in acciaio e conglomerato cementizio permette oggi una piena comprensione di sistemi costruttivi integrati in grado di dare una risposta completa a prestazioni avanzate in ambito statico, sismico e di resistenza al fuoco, favorendo interventi dai costi contenuti, dalla elevata flessibilità per le attività produttive in corso e con la riduzione di ripetute ed onerose manutenzioni nel tempo.

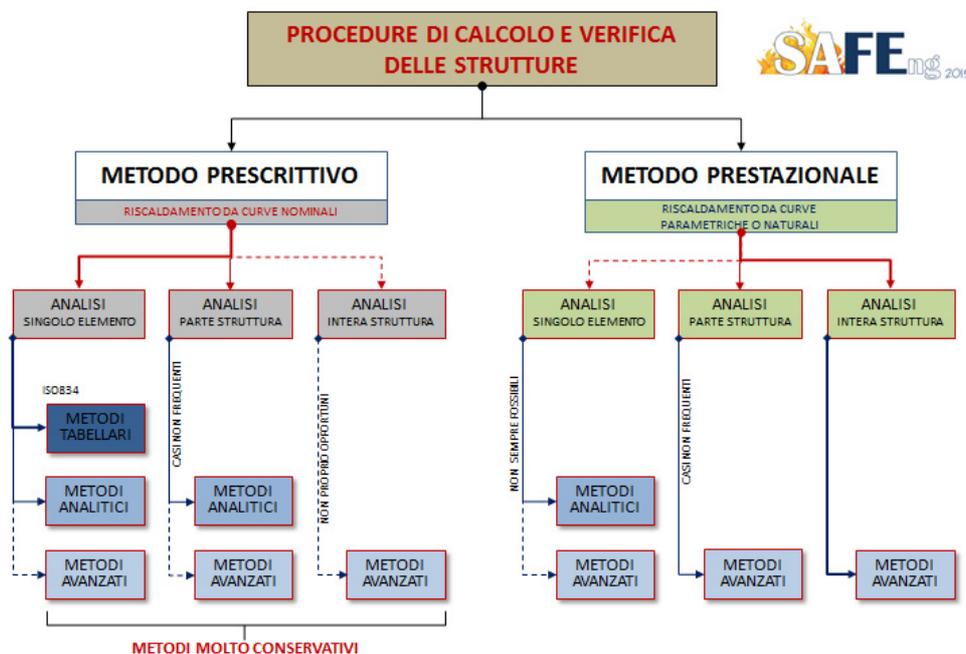


Fig.1: Metodi di calcolo proposti dagli Eurocodici per la resistenza al fuoco delle strutture secondo approccio Prescrittivo e Prestazionale

L'approfondimento dei metodi di calcolo analitici avanzati, secondo i criteri proposti dagli Eurocodici [2] che con l'ausilio di strumenti computazionali sempre più evoluti, trovano oggi giustificazione nella progettazione corrente di strutture ordinarie e complesse, consente ai professionisti di dare risposte particolarmente efficaci alle richieste costruttive che si affacciano nelle "sfide" del mercato delle strutture.

La resistenza al fuoco delle strutture presenta oggi un'influenza particolarmente significativa nel dimensionamento di un gran numero di costruzioni civili ed industriali che risultano soggette al controllo da parte dei Vigili del Fuoco e con una richiesta continua di aggiornamento e specializzazione per i tecnici coinvolti nel processo di pianificazione degli immobili

I metodi prescrittivi ancora in vigore, ma significativi soltanto per le strutture più semplici, fanno riferimento a metodi di riscaldamento degli elementi strutturali legati a curve di tipo Standard Nominale, quale la curva di incendio ISO834 [3], particolarmente conservativa nella interpretazione

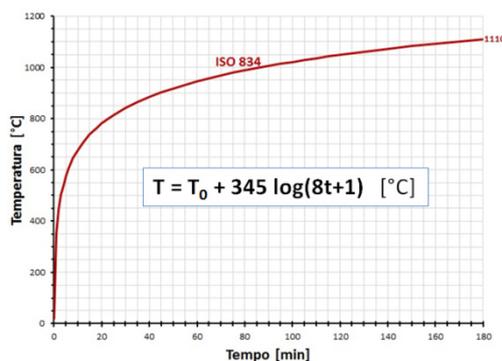


Fig.2: Curva Nominale Standard – ISO834

del fenomeno incendio, mentre i metodi più avanzati fanno riferimento ad una rappresentazione dell'evoluzione dell'incendio e del riscaldamento delle strutture all'interno di un edificio mediante Curve di Incendio Naturali derivanti da uno studio più completo legato ad approfonditi modelli in campo termo-fluido dinamico (CFD) in grado di comprendere posizione per posizione, l'andamento dettagliato delle temperature e conseguentemente del riscaldamento delle strutture.

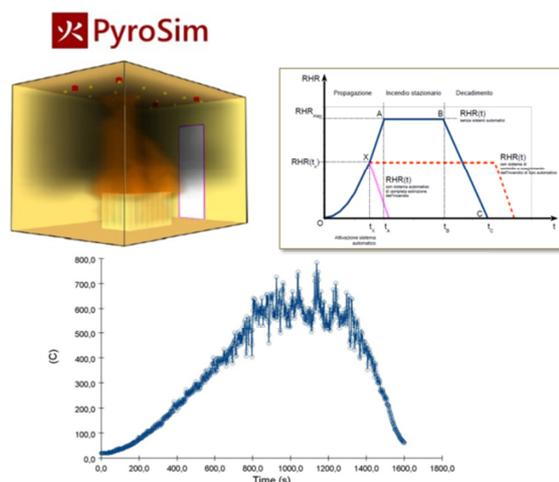


Fig.3: Curva Naturale (Temperatura/tempo) derivante da analisi avanzate dell'incendio

Il presente articolo esamina gli approfondimenti posti alla base della progettazione avanzata di alcune strutture in acciaio progettate con innovativi sistemi di protezione, per fornire l'opportuna resistenza al fuoco richiesta per la costruzione di un nuovo insediamento industriale in grado di garantire sufficiente sicurezza antincendio.

## Descrizione dell'intervento

Nella costruzione di un nuovo ampliamento in uno degli stabilimenti industriali del gruppo Toyota, nella progettazione esecutiva delle strutture si è reso necessario esaminare alcune condizioni particolarmente delicate e significative per le strutture principali:

- dimensionamento di strutture leggere e particolarmente duttili per raggiungere elevati livelli di prestazione in campo dinamico e dare piena risposta alle richieste normative in ambito sismico
- dimensionamento di strutture particolarmente leggere e snelle per limitare al massimo l'impatto in fondazione a seguito della scarsa portanza del terreno ove sorge l'insediamento
- strutture in grado di limitare al massimo l'interferenza durante la loro costruzione con l'area di lavoro dello stabilimento, in pieno funzionamento durante l'avanzamento del cantiere
- raggiungere obiettivi di flessibilità per garantire nel tempo possibili espansioni della costruzione e dare massimo spazio al Committente nell'esercizio della propria attività.

Una soluzione strutturale in grado di garantire leggerezza, duttilità e flessibilità ha orientato i progettisti al dimensionamento di strutture principali in acciaio per le colonne ed in legno lamellare per le travi di copertura con dimensione contenuta e peso ridotto ma con particolare attenzione anche alle condizioni di resistenza al fuoco richieste dalla destinazione d'uso dei locali.

Le prescrizioni imposte dalla normativa antincendio vigente richiedono una classe di resistenza al fuoco minima per le strutture pari a R60, trovando in alcuni casi una difficile applicazione proprio per le strutture in acciaio maggiormente sensibili all'azione del fuoco se non dotate di opportuni accorgimenti di protezione.

L'intervento risulta costituito da un capannone industriale con luce libera pari a 25 metri, altezza sotto trave pari a 7,20 metri e superficie complessiva in pianta superiore a 2000 m<sup>2</sup>, con sviluppo in pianta regolare secondo una disposizione "classica" a capannone mono-campata di pianta rettangolare. Tutte le colonne sono disposte ad interasse pari a circa 6 metri lungo il perimetro a sostegno della copertura formata da travi lamellari ad altezza variabile; il manto di copertura ed il tamponamento perimetrale che costituisce le facciate, risultano organizzati con pannelli tipo sandwich in lana minerale di spessore pari a cm.12 e classe REI120. L'attuale destinazione d'uso del compartimento prevede l'organizzazione di un magazzino intensivo destinato prevalentemente al ricovero di componenti metalliche al servizio della produzione ma con possibilità di un eventuale futuro impiego come vero e proprio reparto di produzione.

A presidio degli effetti derivanti da un eventuale incendio che dovesse insorgere all'interno del capannone sono stati installati impianti di rivelazione e segnalazione di allarme (IRAI) e Controllo dell'incendio, evacuatori di fumo e calore a coperto (EFC) e dotazioni di sicurezza per l'eventuale spegnimento come normalmente richiesto per questo tipo di attività antincendio.[4]

Tenuto conto del numero di addetti presenti, estremamente limitato, non risultano particolarmente stringenti le condizioni di esodo che vengono comunque garantite da un sistema "conforme" ad elevati livelli di prestazione.

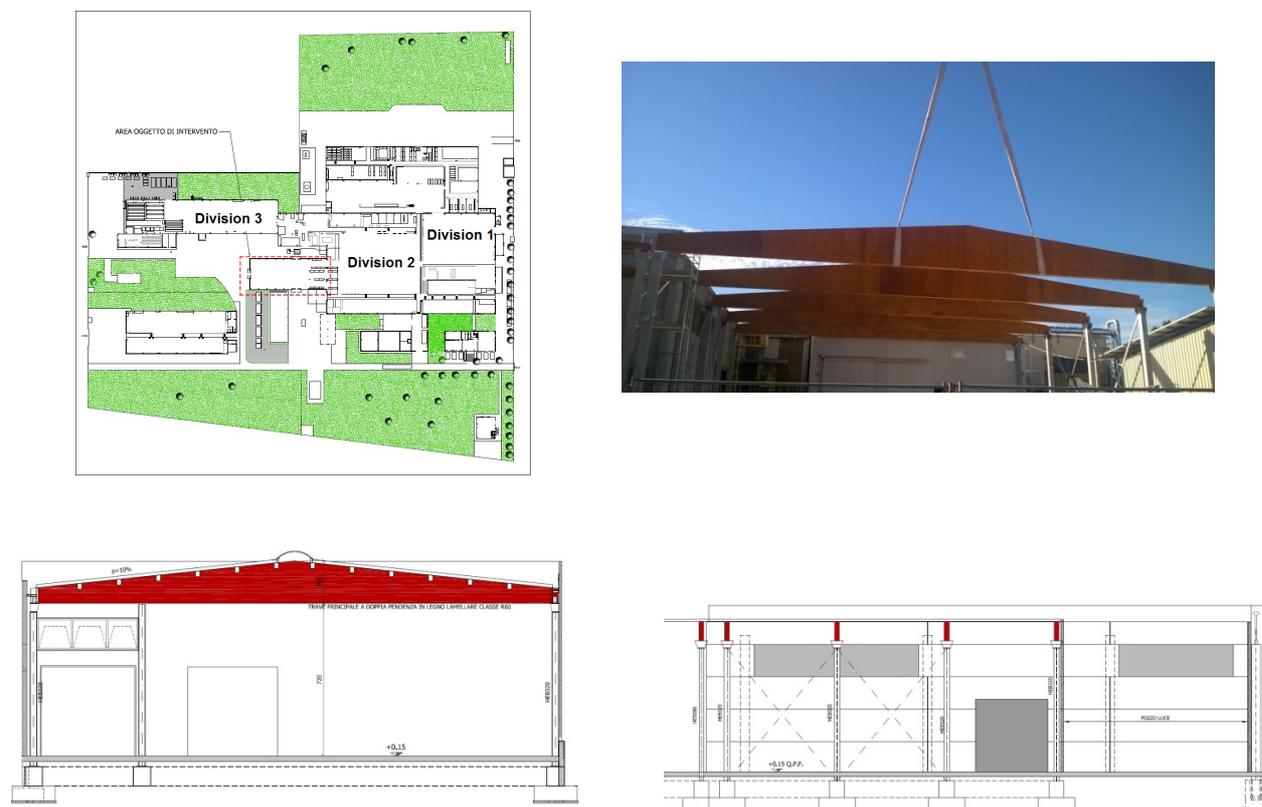


Fig.4: Caratteristiche costruttive intervento – Planimetria e Sezioni

Dopo una serie di confronti preliminari mirati a comprendere quale potesse essere la soluzione strutturale più idonea e competitiva per la nuova costruzione, è emersa in modo costante e ripetitivo l'opportunità nell'adozione di strutture prefabbricate in acciaio realizzate in stabilimento a seguito anche della drastica riduzione dell'impatto del cantiere sullo svolgimento della attività industriale in corso, strutture dal peso particolarmente contenuto, condizione particolarmente favorevole per la natura dei terreni presenti e comunque con una elevata resistenza meccanica ai carichi statici ed alle azioni dinamiche derivanti dal sisma.

Con riferimento anche ai valori riportati nell'Eurocodice 3 parte 1-2 [5] per le strutture in acciaio esposte direttamente all'incendio e quelli propri delle strutture composte acciaio-calcestruzzo presenti nell'Eurocodice 4 parte 1-2 [6] è stato esaminato il comportamento alle alte temperature delle colonne

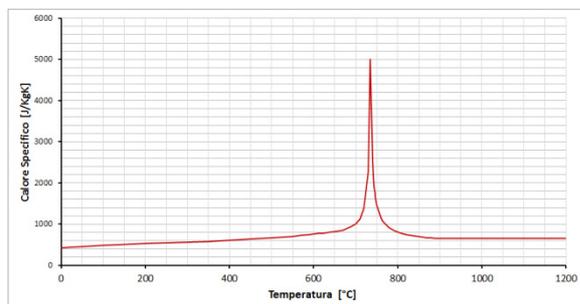


Fig.5: Acciaio - Calore specifico al variare della temperatura

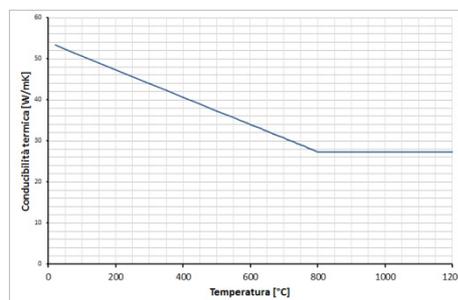


Fig.6: Acciaio - Conducibilità termica al variare della temperatura

principali della costruzione secondo diverse “configurazioni” di installazione:

- resistenza al fuoco di colonne in acciaio (HEB320) esposte all'incendio, **senza alcuna protezione specifica**
- resistenza al fuoco di colonne in acciaio (HEB320) protette – “**partially encased**” – mediante getto di calcestruzzo normale o alleggerito all'interno della sezione contenuta fra le ali
- resistenza al fuoco di **colonne composte acciaio-calcestruzzo** con la sezione in acciaio collaborante con parti in calcestruzzo opportunamente “inglobate”, per aumentarne anche la resistenza meccanico/strutturale

mantenendo sempre particolare attenzione ai criteri “ispiratori” di leggerezza, duttilità e flessibilità.

Dopo un primo dimensionamento strutturale basato sulle analisi statiche e sismiche legate all'area di costruzione (Zona 3) [7] che ha dato origine alla disposizione degli elementi strutturali in pianta ed al loro preliminare dimensionamento, sono state approfondite le tematiche legate all'incidenza della costruzione in fondazione e la sua risposta all'incendio in termini di resistenza al fuoco.

L'analisi termica delle sezioni resistenti prese in esame, è stata svolta in via preliminare seguendo una modellazione estremamente raffinata per ogni configurazione, con elementi finiti 2D fornita da elementi Plate opportunamente impostati per comprendere le caratteristiche geometriche e termiche dei materiali (Figg.5 e 6) esposti alla Curva di incendio “tradizionale” ISO834 e calcolati mediante il solutore termico non lineare “Transient Heat” del software Straus7, in grado di evidenziare i flussi di calore e le conseguenti temperature all'interno della sezione anche per strati di spessore estremamente contenuto.

Le analisi sono state svolte tenendo conto della variazione nel tempo delle temperature, ovvero seguendo in via preliminare, la curva di riscaldamento nominale indicata dalla normativa (ISO834) o in fase di approfondimento, secondo una specifica curva di riscaldamento naturale derivante da avanzati studi di modellazione dell'incendio; è stato inoltre tenuto conto della variazione nel tempo delle proprietà termiche dei materiali costituenti la sezione ( $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ) secondo le indicazioni fornite dagli Eurocodici o note in letteratura per i principali materiali impiegati nel campo strutturale dopo averle importate nel codice di calcolo Straus7.[8]

Si riportano alcune immagini del riscaldamento delle diverse soluzioni costruttive dopo 60 minuti di esposizione all'incendio nominale.

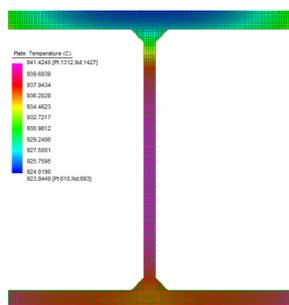


Fig.7: Profilo senza protezione

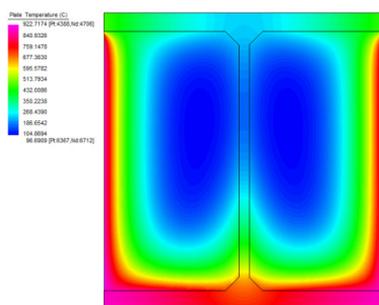


Fig.8: Sezione partially encased con calcestruzzo ordinario

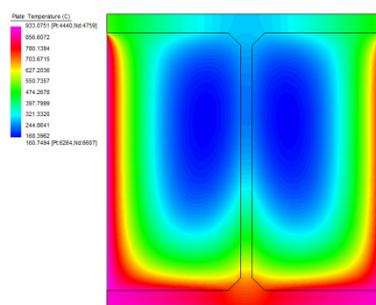


Fig.9: Sezione partially encased con calcestruzzo leggero



Fig.10: Sezioni partially encased con calcestruzzo ordinario in fase di allestimento in cantiere

Le prime analisi preliminari evidenziano temperature massime all'interno della sezione in acciaio delle colonne, nella configurazione senza alcuna protezione, pari a 941 °C con una diffusione all'interno dell'elemento praticamente omogenea e conseguentemente con temperature minime del tutto analoghe. Tali valori risultano del tutto incompatibili con il mantenimento di sufficienti condizioni di resistenza nell'elemento strutturale esposto all'incendio (la sezione resistente riscaldata dalla curva ISO834 in tale caso subisce un degrado superiore al 90%).

Riprendendo gli studi consolidati da un'ampia campagna di prove di laboratorio [9] e mirati a verificare la perdita di resistenza dell'acciaio strutturale all'aumentare della temperatura, si riscontra che la variazione del Modulo di elasticità (E) dell'acciaio inizia quando la sezione resistente raggiunge una temperatura prossima ai 150°C mentre la resistenza meccanica della sezione in acciaio inizia il proprio degrado quando si raggiungono valori di temperatura superiori a circa 400°C [10].

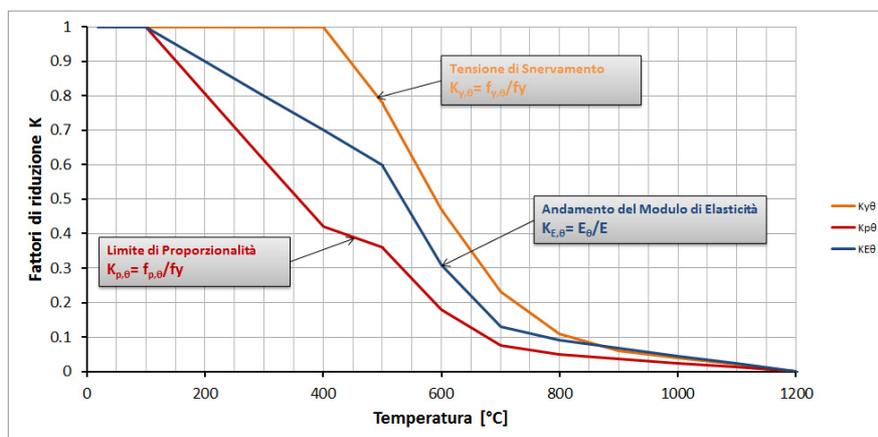


Fig.11: Acciaio – Variazione dei parametri meccanici all'aumentare della temperatura

La modellazione agli elementi finiti ha consentito di esaminare in modo approfondito anche il comportamento di sezioni formate da materiali diversi, con variazione delle loro proprietà termiche legata all'andamento della temperatura nel tempo e verificando il livello di riscaldamento subito dall'intera sezione esposta alla Curva di Incendio Nominale – ISO834.

Nella configurazione “partially encased”, con il profilo in acciaio completato nella parte interna fra le ali mediante getto in calcestruzzo ordinario ( $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ ), le temperature massime della sezione raggiungono valori pari a  $923 \text{ }^\circ\text{C}$  e con temperature minime notevolmente distanti e pari a  $97^\circ\text{C}$ . In tale caso la sezione interna in acciaio beneficia di una consistente protezione termica dettata dalla presenza del calcestruzzo e con un degrado dettato dalle alte temperature significativamente contenuto.

In particolare, prendendo come riferimento le porzioni della sezione che risultano a temperatura inferiore a  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  e che perciò presentano invariata la tensione di snervamento rispetto alla condizione “a freddo”, si ritrova la seguente condizione:

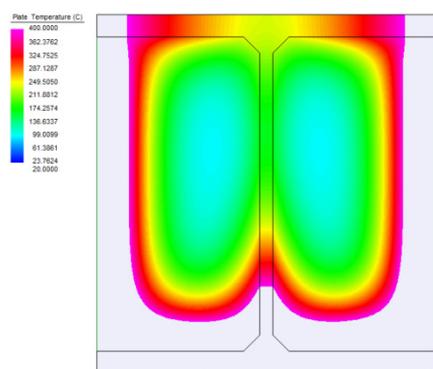


Fig.12: Isotherma 400 per sezione con calcestruzzo ordinario

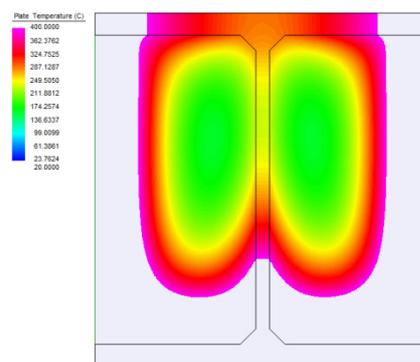


Fig.13: Isotherma 400 per sezione con calcestruzzo leggero

Riduzione percentuale della sezione corrispondente all'ala superiore: 16%

Riduzione percentuale della sezione corrispondente all'anima: 20%

Nella configurazione “partially encased” ove il profilo della sezione in acciaio risulta protetto da getto in calcestruzzo leggero ( $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$ ), le temperature massime raggiungono valori pari a  $933^\circ\text{C}$  e con temperature minime pari a  $161 \text{ }^\circ\text{C}$  ed ove i benefici dettati dalla protezione possono essere riassunti in:

Riduzione percentuale della sezione corrispondente all'ala superiore: 32%

Riduzione percentuale della sezione corrispondente all'anima: 28%

Il riscaldamento della sezione protetta con calcestruzzo leggero ha evidenziato una peggiore capacità nello smaltimento del calore nonostante i benefici derivanti da una maggiore qualità isolante e comportando un maggiore riscaldamento della porzione interna formata dal profilo portante HEB320 in acciaio.

Successivamente alle prime analisi termiche poste in campo sono stati eseguiti ulteriori approfondimenti per diversi aspetti legati alle diverse soluzioni di costruzione ed ai particolari costruttivi di installazione:

- E' stata esaminato il comportamento al fuoco dettato da una sezione composta – acciaio/calcestruzzo – valutandone le differenze di comportamento e resistenza rispetto ad una sezione in acciaio “semplicemente” protetta
- Tenuto conto della posizione perimetrale dei pilastri e della presenza di un pannello di tamponamento realizzato con elementi sandwich in lana di roccia di classe REI120, le sezioni

portanti delle colonne in acciaio (HEB320) sono state esaminate anche con modalità di esposizione all'incendio che tenessero conto degli effetti di protezione dettati dal pannello

- E' stata esaminata la differente rigidezza dei pilastri nella risposta della sezione protetta al fuoco anche all'azione del sisma ed in generale del comportamento strutturale "a freddo"
- E' stata valutata inoltre la diffusione del calore all'interno della sezione nella direzione di sviluppo del profilo con particolare attenzione ai dettagli costruttivi ed al capitello di sommità a diretto sostegno delle travi principali

La prima parte delle analisi sono state dedicate ad approfondire l'efficacia di una soluzione costruttiva realizzata con la protezione in calcestruzzo collaborante con la sezione HEB, a formazione di una vera e propria sezione composta [11], rispetto alla stessa soluzione costruttiva che però prevedesse lo strato di calcestruzzo unicamente come protezione e la capacità portante affidata unicamente al profilo di acciaio, anche con attenzione alla risposta in campo sismico ed all'incremento degli oneri nella "formazione" della sezione composta.

L'esame del beneficio fornito dall'incremento di capacità portante associato ad una sezione composta risulta in piccola parte ridotto da effetti termici legati alla necessità di disporre all'interno della sezione in calcestruzzo barre di armatura che concorrono al confinamento del calcestruzzo stesso e concorrono ad aumentarne la resistenza ultima della sezione composta.

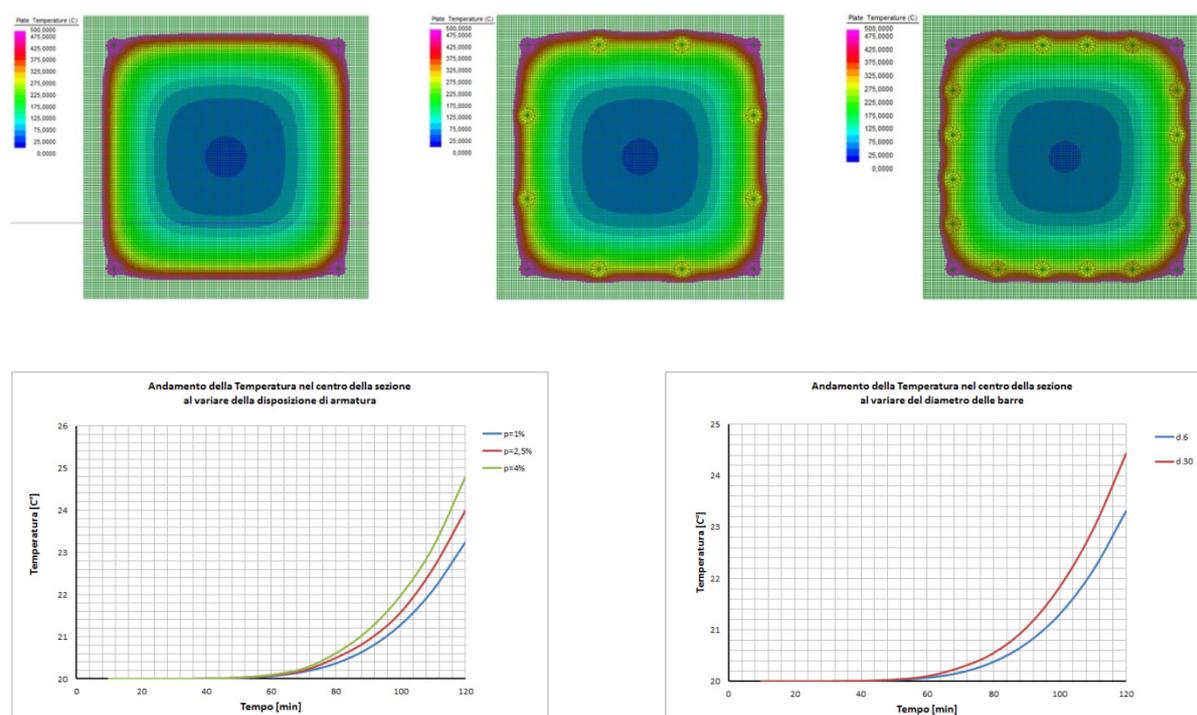


Fig.14: Confronti sul comportamento al fuoco di sezioni in calcestruzzo diversamente armate

Occorre evidenziare che la "sensibilità" al riscaldamento della parte più interna della sezione di calcestruzzo dovuta alla quantità di armatura presente o al diametro delle barre adottato, non risulta particolarmente significativa per tempi di esposizione all'incendio contenuti (60 min) e si manifesta con innalzamenti limitati della temperatura interna dopo esposizioni particolarmente prolungate.

Un ulteriore approfondimento ha previsto l'analisi termica della sezione composta, tenendo conto anche dell'interazione fornita dal pannello di tamponamento presente in facciata, per verificare le condizioni di riscaldamento o raffreddamento delle colonne eventualmente fornite dai particolari costruttivi. In particolare tenendo conto della disposizione perimetrale delle colonne portanti in

acciaio, l'ala esterna del profilo HEB320 non risulta direttamente esposta all'azione dell'incendio perché rivolta all'esterno del compartimento e schermata dai pannelli REI120 che formano la facciata stessa.

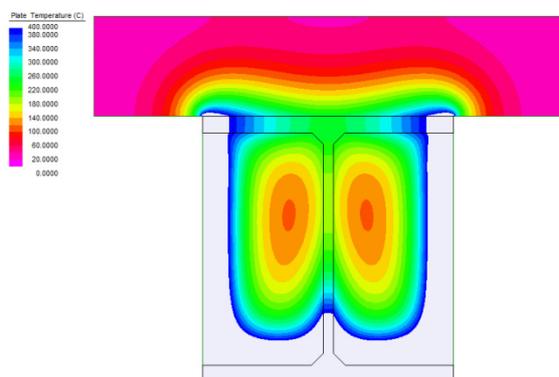


Fig.15: Profilo con pannello non investito dall'incendio

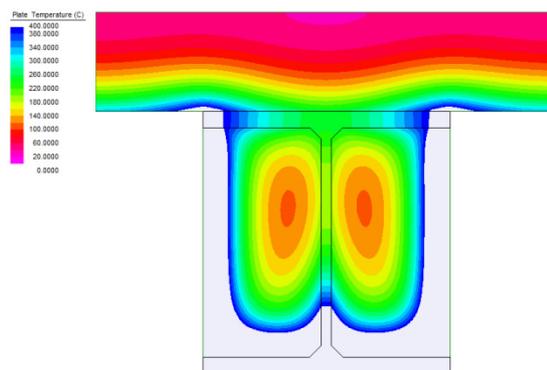


Fig.16: Profilo con pannello non investito dall'incendio e dotato di lamierino

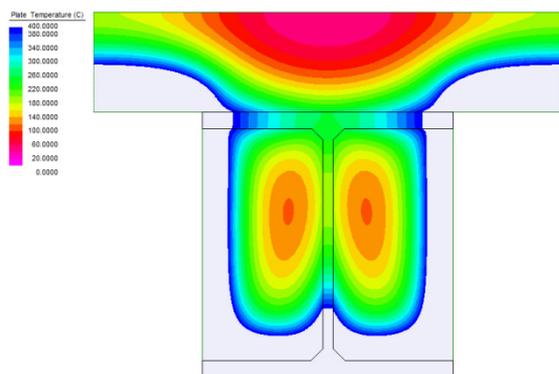


Fig.17: Profilo con pannello investito dall'incendio

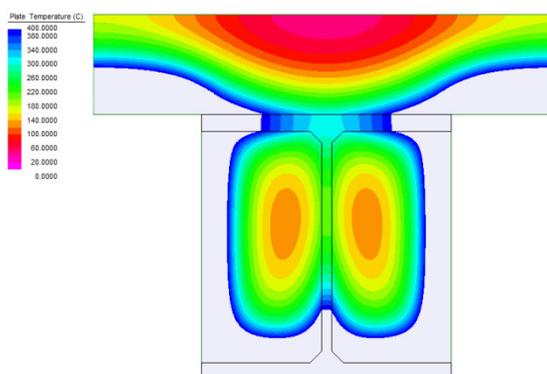


Fig.18: Profilo con pannello investito dall'incendio e dotato di lamierino

Le analisi termiche svolte in campo non lineare hanno evidenziato che la presenza del pannello di facciata costituisce adeguata protezione all'ala esterna del profilo, nel caso il pannello stesso non sia interamente investito dal fuoco. In tale caso l'esaltazione dei diversi strati che formano il pannello di facciata con la modellazione anche del lamierino metallico che costituisce la parte più superficiale del pannello mostra un'incidenza sul degrado dell'ala con variazioni pari a circa il 4% e non particolarmente rilevanti. Nel caso invece il pannello risulti investito anch'esso dall'incendio, il suo contributo al degrado dell'ala della colonna risulta maggiormente significativo con valori pari a circa il 32% sull'intero sviluppo dell'ala superiore. In tale caso esaminando però la diffusione del calore lungo l'asse del profilo HEB si nota che, ad una breve distanza dalla superficie del profilo direttamente esposta all'incendio, le temperature risultano notevolmente inferiori ed in gran parte con valori minori di 400°C. Tale condizione evidenzia che qualora si manifestassero anche piccole variazioni nell'intensità dell'incendio, si ritroverebbero forti riduzioni nel riscaldamento delle strutture e conseguentemente nel degrado delle sezioni resistenti.

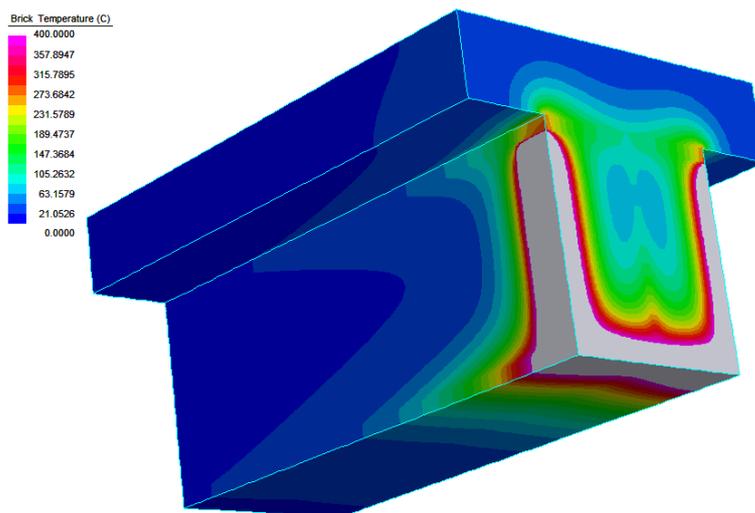


Fig.19: Vista assonometrica del profilo posto in opera con il pannello di facciata – modellazione tridimensionale eseguita con elementi brick

Con riferimento anche agli studi approfonditi in campo europeo [12], le condizioni di degrado della sezione in acciaio della colonna sono state esaminate tenendo conto della contemporanea perdita di resistenza ( $f_y$ ) subita dalla sezione e del decadimento del Modulo di Young (E) all’innalzamento delle temperature (Fig.11) nel tempo.

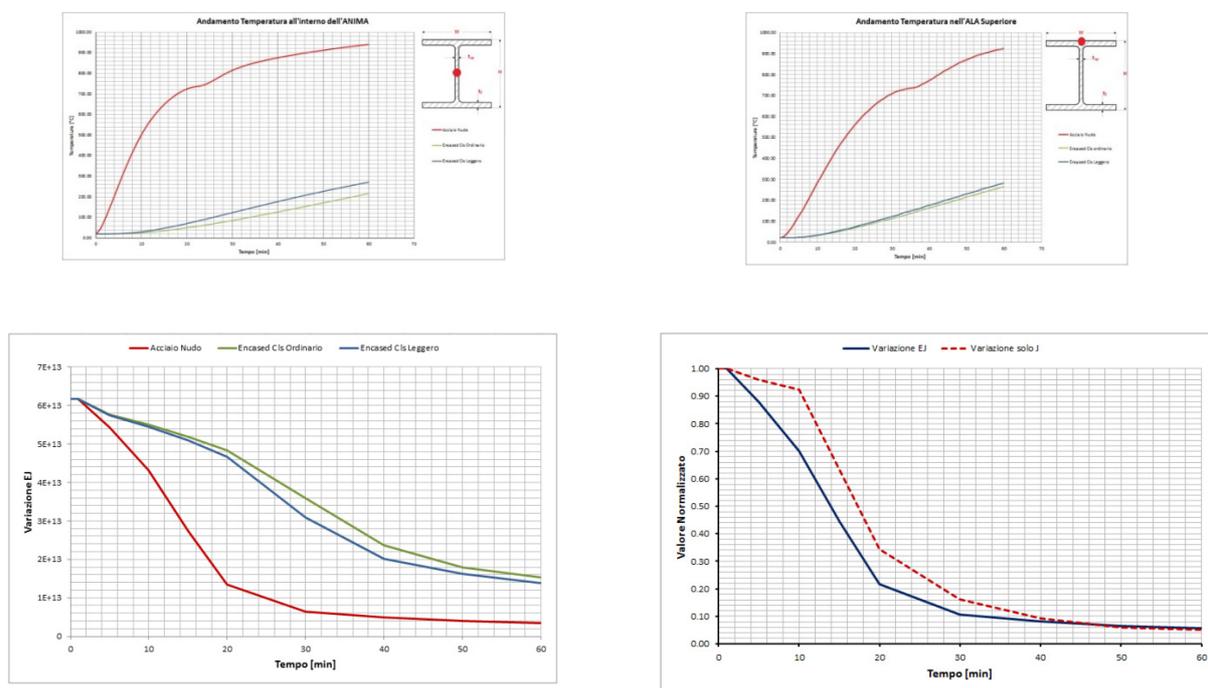


Fig.20: Variazione di EJ al riscaldamento delle diverse soluzioni costruttive

La valutazione del degrado contemporaneo fra la resistenza ed il modulo elastico trova particolare significato negli elementi compressi come le colonne ove aspetti legati alla instabilità dell’equilibrio ed in generale effetti del II ordine risultano rilevanti. Il degrado dell’acciaio nudo risulta ovviamente notevolmente superiore a quello delle sezioni “encased” che manifestano limitate differenze nel caso si adotti protezione con calcestruzzo ordinario o leggero (Fig.20). Occorre evidenziare che al variare della temperatura, tenere conto della sola variazione della resistenza meccanica (indirettamente associata alla riduzione della sezione resistente o di J) non risulta appropriato, in particolare in

elementi compressi come le colonne ove fenomeni di instabilità dell'equilibrio sono strettamente legati anche all'andamento del Modulo Elastico; nel grafico appena riportato è possibile apprezzare la differente incidenza della variazione alle alte temperature del solo parametro  $J$  rispetto alla variazione del valore  $EJ$ ; per bassi innalzamenti di temperatura ovvero per i primi minuti di sviluppo dell'incendio si riscontrano differenze anche pari al 20% e perciò non trascurabili. Tale differenza tende poi ad annullarsi per prolungati riscaldamenti della struttura perdendo di significato per l'elevato degrado presente che alle alte temperature annulla completamente l'efficienza della sezione.

In ultimo pensando alla possibile propagazione dell'incendio all'interno del deposito in esame e ritenendo notevolmente conservativa l'assunzione di una Curva di Incendio Nominale come quella fornita dalla ISO834, è stato esaminato il riscaldamento della sezione in acciaio lungo il proprio asse mediante una modellazione tridimensionale con il software Straus7 mediante l'adozione di elementi solidi tipo Brick per verificare le potenzialità dello stesso profilo nel disperdere calore, raffreddandosi nelle parti non direttamente investite dall'incendio, con particolare attenzione in prossimità del capitello di sommità.

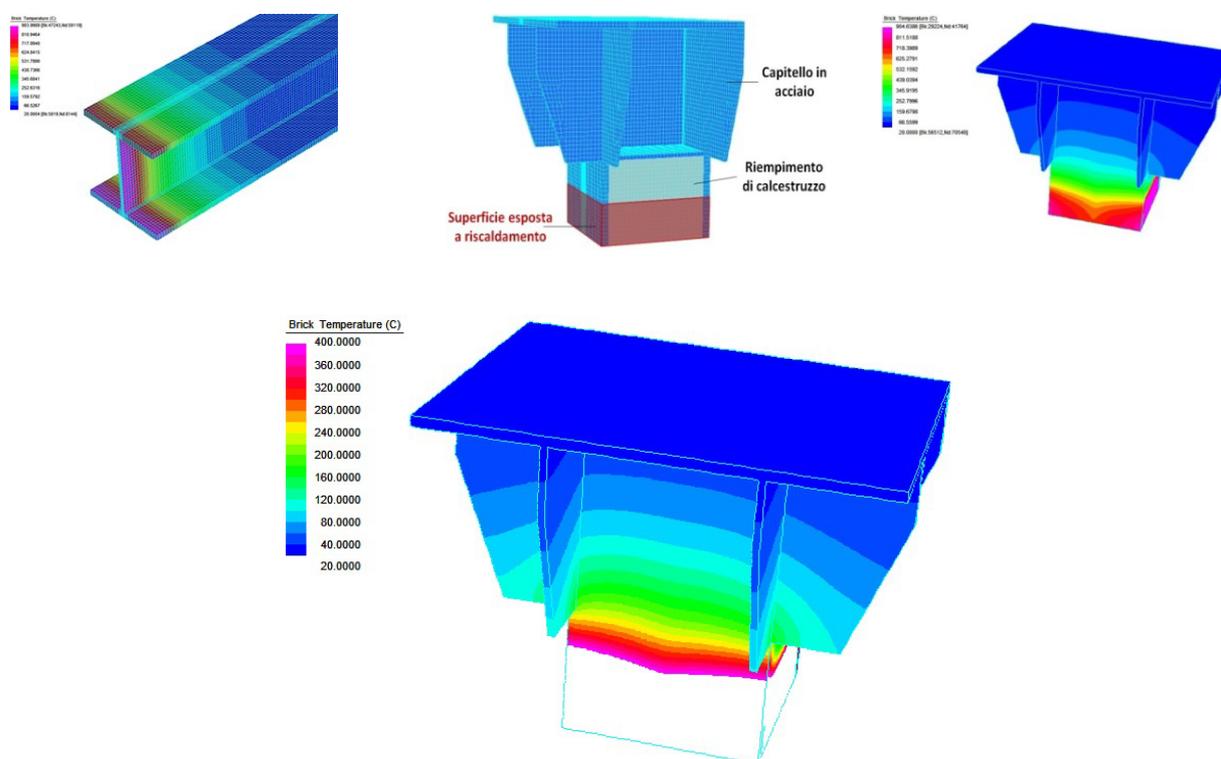


Fig.21: Modello tridimensionale del capitello di sommità con individuazione dell'isoterma 400 °C

Già a breve distanza (4/5 cm) dalla superficie direttamente investita dal riscaldamento derivante dalla Curva di Incendio ISO834, la sezione presenta un raffreddamento significativo e tale da evidenziare temperature inferiori a 400°C. le diverse condizioni di irraggiamento e di esposizione diretta all'incendio che si possono manifestare nel reale svolgimento della attività del compartimento, costituiscono perciò condizione significativa per il degrado subito dalla sezione resistente in funzione delle temperature massime raggiunte

### Modellazione dell'Incendio

Tutte le modellazioni mirate a comprendere il "reale" riscaldamento degli elementi metallici, hanno seguito inizialmente criteri piuttosto conservativi e propri di un approccio prescrittivo, riproducendo l'azione dell'incendio secondo una fase post-flashover [13] ove le temperature raggiunte dall'incendio

all'interno dell'edificio presentano i loro valori massimi e soprattutto con distribuzione omogenea per l'intero volume del "compartimento" in esame.

A fronte però delle ampie dimensioni presenti in pianta, della pronunciata altezza del compartimento e della disposizione del carico di incendio, è stata esaminata anche l'evoluzione di un incendio sulla base di diversi scenari specifici [14] ed in particolare:

- Scenario con analisi di un focolare diffuso all'intera superficie in pianta del compartimento e rappresentativo di condizioni prossime all'incendio generalizzato Post-flashover
- Scenario di incendio localizzato con focolare rappresentativo dell'innesco di un contenitore presente nel deposito e posto in prossimità della base della colonna
- Scenario di incendio localizzato con focolare rappresentativo dell'innesco di un contenitore presente nel deposito ma posto sulla sommità delle scaffalature e conseguentemente in corrispondenza del capitello delle colonne

Per interpretare in modo dettagliato ed approfondito gli scenari specifici sono state svolte alcune analisi con modelli di computational fluid dynamics (CFD) mediante il software FDS [15] redatto dal NIST [16] nella sua applicazione PyroSim, interfaccia grafica di gestione dei dati di input.

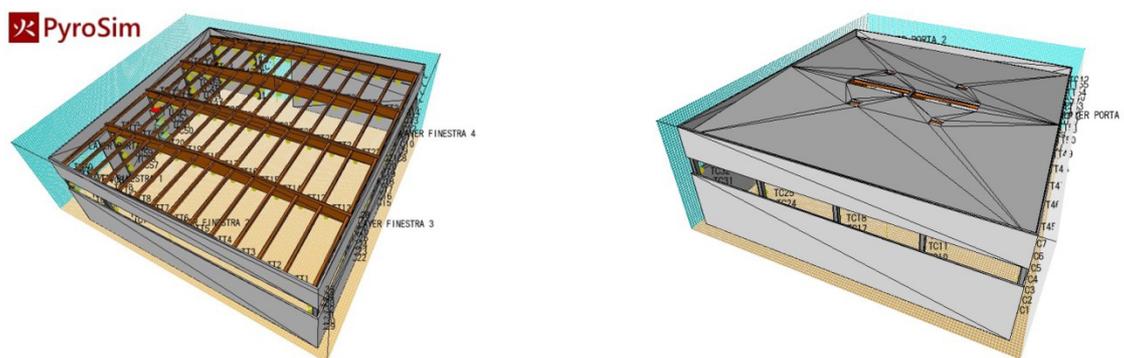


Fig.22: Modello tridimensionale del capannone per l'analisi dello sviluppo dell'incendio

Il primo scenario "generalizzato" ha evidenziato l'influenza dell'ampio volume del compartimento con caratteristiche di ventilazione e sviluppo dell'incendio non in grado di raggiungere temperature così elevate come quelle "prescritte" dalla Curva ISO834

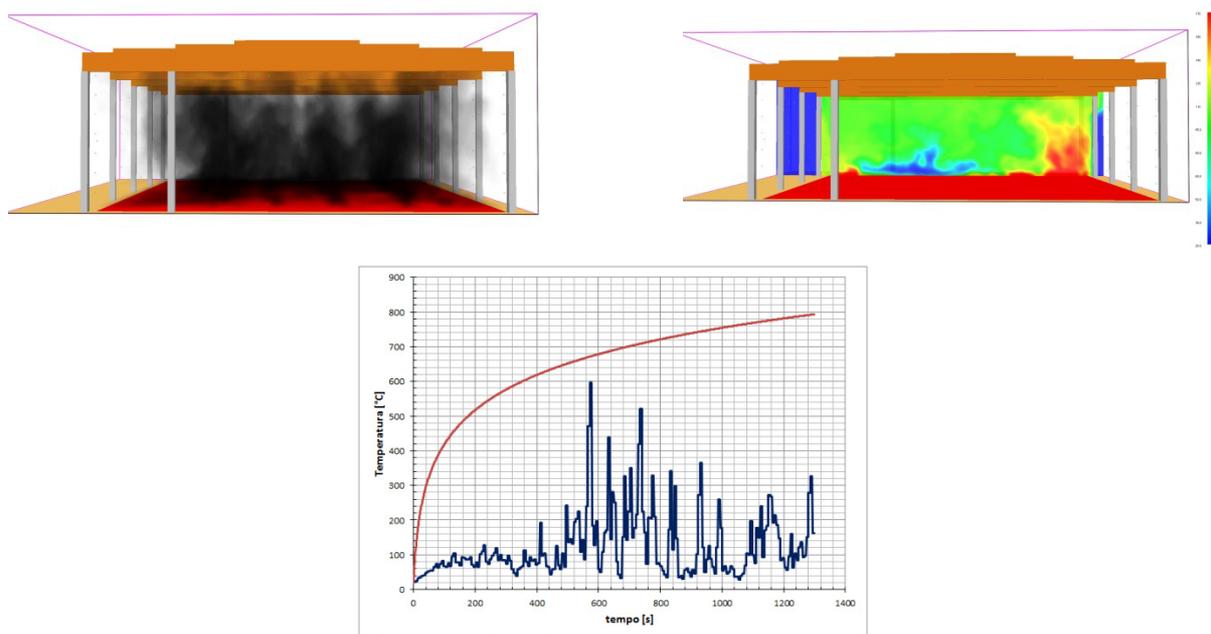


Fig.23: Scenario di Incendio "a" - confronto curva naturale con curva ISO834

La temperatura massima (nel caso estremo di esaminare anche i valori di picco) raggiunta dal presente scenario risulta notevolmente inferiore a quella derivante dalla curva ISO834 e pari a circa 600°C con valore tale da non risultare preoccupante per la stabilità della struttura per tutta la durata dell'incendio.

I valori di picco esposti dall'analisi CFD costituiscono un valore di bilancio matematico/energetico e non del tutto rappresentativi del reale andamento delle temperature all'interno del compartimento; ben più significativa risulta invece l'interpretazione della temperatura massima media pari in questo caso a circa 284°C

Nel caso invece si esaminino i risultati derivanti dall'analisi del secondo scenario "b", con focolare posto alla base delle colonne di acciaio per verificare se un incendio di potenza HRR contenuta ma estremamente ravvicinato all'elemento strutturale, influenzi comunque in modo significativo la resistenza delle colonne nell'esposizione all'azione dell'incendio.

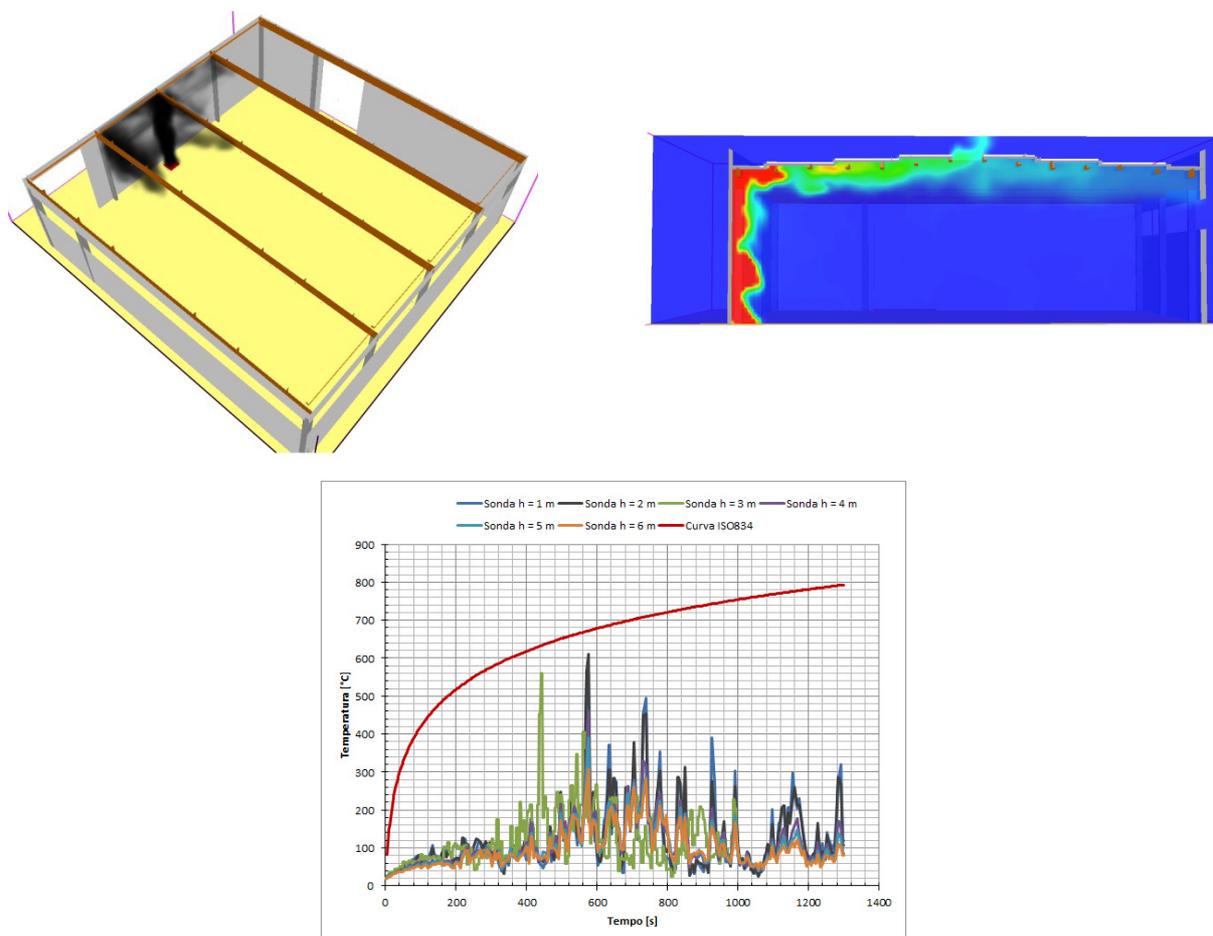


Fig.24: Scenario di Incendio "b" - confronto curva naturale con curva ISO834

Anche in tale caso la temperatura massima (nel caso estremo di prendere in considerazione i valori di picco) raggiunta dal presente scenario risulta notevolmente inferiore a quella derivante dalla curva ISO834 e prossima a circa 600°C con valore che non comporta un riscaldamento significativo per la stabilità della struttura.

In questo specifico caso la temperatura misurata alla base della colonna presenta un valore massimo medio (depurato dei valori di picco) pari a 367°C in prossimità della termocoppia di rilevamento delle temperature posta ad una altezza pari a 2 metri dal pavimento.

Infine con l'esame del terzo scenario "c" vengono esaminate le condizioni di esposizione all'incendio della parte più alta delle colonne, prossima al capitello di sostegno delle travi principali in legno lamellare.

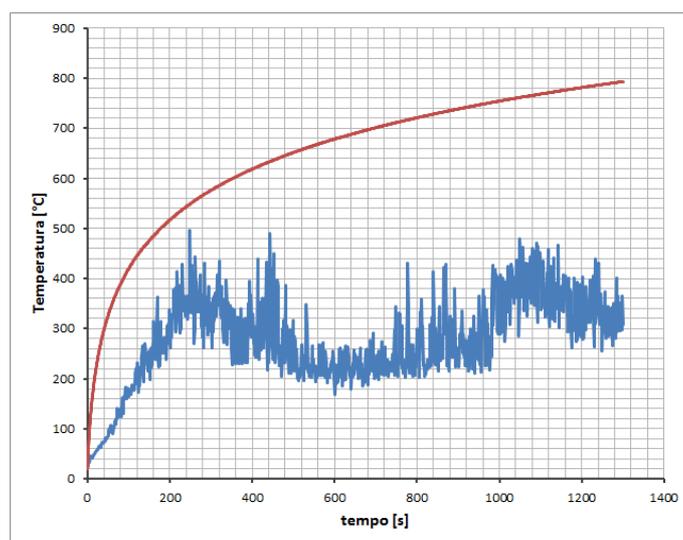
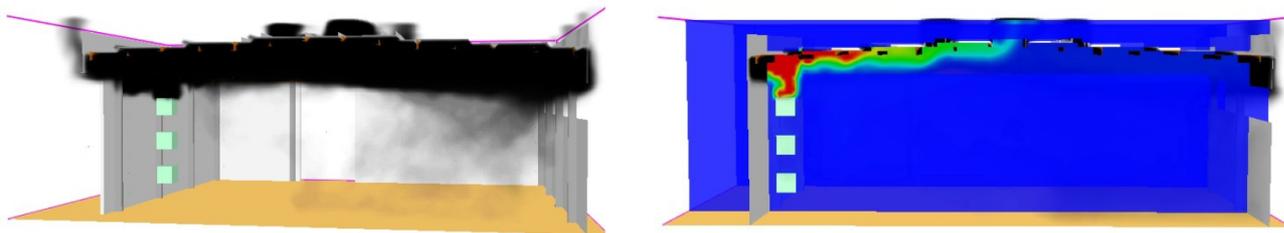


Fig.24: Scenario di Incendio "c" - confronto curva naturale con curva ISO834

In questo specifico scenario le temperature massime (sempre nel caso estremo di prendere in considerazione i valori di picco) raggiunte dall'incendio in prossimità del capitello presentano valori inferiori ai 500°C per tutta la durata dell'incendio, quando invece seguendo le indicazioni fornite dalla Curva ISO834, dopo 60 minuti di esposizione all'incendio, la struttura avrebbe subito un degrado derivante dall'esposizione ad una temperatura pari a 945°C ben superiore ai valori riscontrati negli incendi naturali

## Conclusioni

Lo studio avanzato della resistenza al fuoco delle strutture consente oggi di poter affrontare analisi e verifiche maggiormente approfondite rispetto al passato; la crescita delle conoscenze specifiche nel settore e l'evoluzione dei software di modellazione e calcolo fornisce al progettista strumenti in grado di consentirgli scelte sempre più consapevoli e mirate anche verso materiali da costruzione ritenuti un tempo non del tutto adeguati a rispondere alle sollecitazioni termiche indotte da un incendio.

La costruzione di un nuovo edificio industriale destinato a magazzino intensivo, all'interno di uno degli stabilimenti del Gruppo Toyota ha previsto analisi avanzate per la verifica della resistenza al fuoco di strutture in acciaio mostrando l'efficacia delle soluzioni progettuali se opportunamente ragionate anche per materiali "sensibili" all'azione del fuoco.

In particolare l'adozione di opportuni accorgimenti nella protezione al fuoco delle strutture in acciaio consente "agevolmente" di poter garantire prestazioni strutturali per tempi non inferiori a 60 minuti di esposizione alla Curva nominale ISO834 e comunque con ampio margine di sicurezza per l'intera durata di un incendio naturale specifico per la maggior parte dei depositi in ambito industriale. La protezione fornita dai getti "integrativi" di calcestruzzo ordinario o alleggerito, che vengono agevolmente eseguiti direttamente in cantiere, consente di mantenere le temperature della parte più interna della sezione entro valori non significativi per il degrado delle strutture in acciaio, con costi iniziali del tutto in linea con le opere "tradizionali" e riducendo significativamente l'impegno dei cicli di manutenzione a cui potrebbe essere soggetta la struttura nel tempo.

Le analisi termiche in campo non lineare svolte con il software Straus7 in riferimento all'evoluzione nel tempo del comportamento al fuoco del calcestruzzo ordinario e leggero e degli elementi in acciaio hanno evidenziato il beneficio fornito da soluzioni strutturali poste in opera con protezione secondo la configurazione "partially encased", con impegno costruttivo particolarmente contenuto, con incremento dei pesi non particolarmente significativo e con elevata prestazione anche alle azioni dinamiche derivanti dal sisma e dalle azioni statiche tipiche della area di installazione.

L'ulteriore approfondimento dell'evoluzione dell'incendio all'interno di edifici industriali mediante modellazione CFD, consente inoltre di dare maggiore risalto allo studio della resistenza al fuoco delle strutture secondo metodi prestazionali e di fornire soluzioni particolarmente efficienti per gli obiettivi dell'ingegneria strutturale.

## References

- [1] D.M.Interno (3.08.2015) "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n.139" – G.U. n.192 del 20.08.2015
- [2] UNI EN 1991-1-2 - Eurocodice 1 "Azioni sulle strutture. Parte 1-2 Azioni in generale – Azioni sulle strutture esposte al fuoco", 2004
- [3] International Standards Organization, ISO 834 "Fire-Resistance test elements of building construction" Geneva, 1999
- [4] Grandis D., "Fire safety engineering e il codice di prevenzione incendi (RTO): le nuove frontiere per affrontare la sicurezza antincendio" SAIE Built Academy, 2014
- [5] UNI EN 1993-1-2 - Eurocodice 3 "Design of steel structures. Part 1-2 General Rules Structural fire design", 2005
- [6] UNI EN 1994-1-2 - Eurocodice 4 "Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2 General Rules Structural fire design", 2005
- [7] D.M.Infrastrutture 14.01.2008 (NTC 2008) "Norme Tecniche per le Costruzioni"
- [8] Strand7 "Theoretical manual – Theoretical background to the Strand7 finite element analysis system" G+D Computing, 2004
- [9] BRE "Results and observations from full-scale fire test at BRE Cardington", 2004
- [10] Bailey C.G.: "The influence of thermal expansion of beams on structural behavior of columns in steel-framed structure during fire", Eng. Struct. 22 755-768, 2003
- [11] D'Elia P., Materazzi A.L., Nigro E., "la verifica di colonne composte acciaio calcestruzzo in caso di incendio: quadro normativo e metodi semplificati" V Workshop Italiano sulle Strutture composte

- [12] Franssen J.M., Zaharia R., “Design of steel structures subjected to fire” Les éditions de l’Université de Liège , 2005
- [13] Buchanan A.H. “Structural Design for fire safety”, John Wiley & Sons, 2001
- [14] DiNunno PJ. et al., “The SFPE handbook of Fire Protection Engineering” (4<sup>th</sup> edition) NFPA Massachusetts, 2012
- [15] McGrattan k., Klein B., Hostikka S., Floyd J., “Fire Dynamic Simulator: User’s Guide” NIST Special publication 1019-5 Washington, 2009
- [16] NIST - National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce