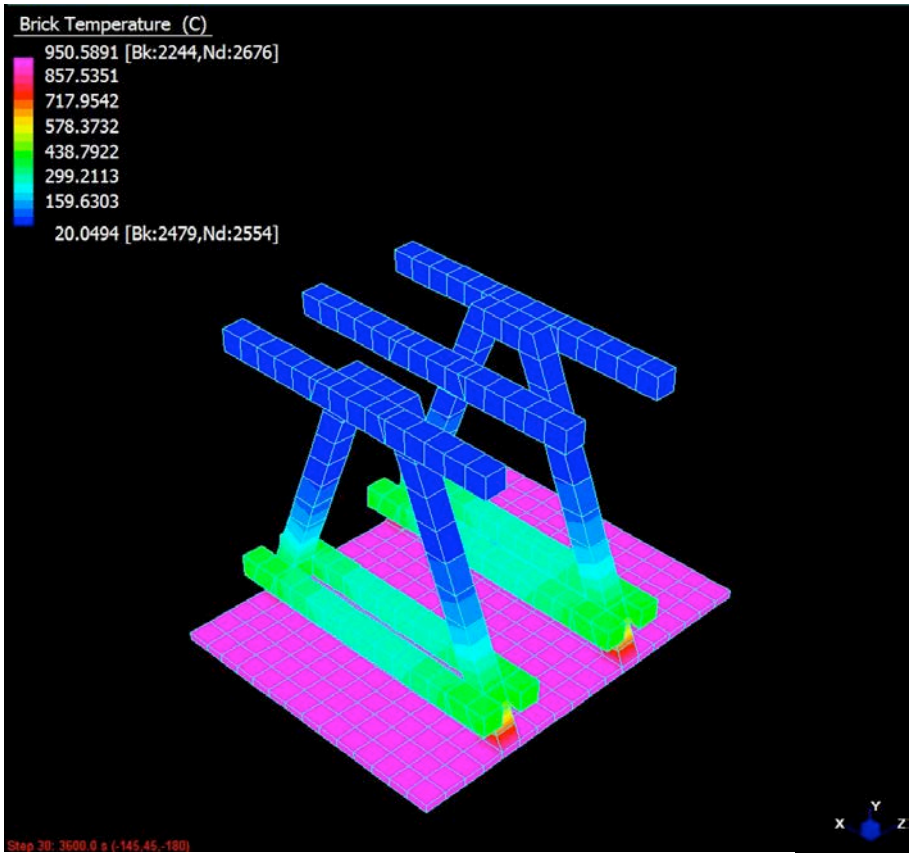


ANALISI TERMICA DI UNA TRAVE TRALICCIATA PREM

Confronto tra modello 3D e 2D

Vito Lavermicocca
Assegnista di Ricerca, Dipartimento ABC - Politecnico di Milano
vito.lavermicocca@polimi.it

Livio Izzo
Ingegnere LP, Membro CT Assoprem e CT Consorzio Produttori Travi REP
livio.izzo@fastwebnet.it

SOMMARIO

L'articolo illustra una ricerca numerica condotta allo scopo di simulare il comportamento termico di una Trave tralicciata PREM con piatto in acciaio. Lo studio prende in considerazione sia il modello bidimensionale (2D) che un modello di comportamento che rappresenti la reale configurazione spaziale degli elementi della trave PREM (modello 3D). L'obiettivo è quello di simulare l'andamento della temperatura nel traliccio d'anima che, nel caso dell'analisi 2D usualmente impiegata in questi casi, è semplificativa e non può che essere una approssimazione del comportamento reale. Infatti, in questo caso, il modello piano non coglie la configurazione spaziale del traliccio che, spesso, viene modellato come collegamento continuo, fra il corrente inferiore ed il corrente superiore del traliccio,

su tutta la lunghezza della trave mentre, nella realtà, è inclinato e convergente sul piatto inferiore solo ad ogni passo.
Ad entrambi i modelli è stato applicato il carico termico, assegnando ai nodi inferiori della piastra d'acciaio la legge di variazione della temperatura nel tempo indicata dalla norma UNI 9503, pressoché equivalente alla ISO 834.

Dal confronto dei risultati dei due modelli è emersa una quasi perfetta corrispondenza di temperatura relativamente al nodo di attacco tra piatto e traliccio d'anima mentre, in corrispondenza delle zone nella mezzeria dell'altezza del traliccio, il modello 2D fornisce dei valori di temperatura più alti, a parità di tempo di esposizione al fuoco, rispetto a quelli ottenuti con il modello 3D. Inoltre, per entrambi i modelli, la temperatura al piede d'anima risulta pressoché pari a quella del piatto d'acciaio ad esso saldato.
Sulla base dei risultati delle analisi si sono potute formulare alcune ipotesi progettuali che, in assenza di trattamento superficiale protettivo del piatto metallico, possono garantire una adeguata resistenza al fuoco dell'elemento.

ABSTRACT
THERMAL ANALYSIS OF A PREM TRUSS BEAM
Comparison between 3D and 2D model

The article illustrates a numerical research conducted to simulate the thermal behavior of a PREM truss beam with a steel plate. The study considers both the hypothesis of operating in two dimensions (2D) and of working with reference to a behavior model that considers the real spatial configuration of the elements of the PREM beam (3D model). In particular, the objective is to simulate the trend of the steel web temperature which, in the case of the 2D approach usually used in this type of analysis, can only be a rough approximation of the real behavior. In fact, in this case, the 2D model does not grasp the spatial configuration of the truss, which is necessarily modeled as a continuous connection between the lower current and the upper current of the truss, along the entire span of the beam while, in reality, it is inclined and converging on the bottom plate only at each step.
The thermal load was applied to both models, assigning to the lower nodes of the steel plate the law of variation in temperature over time suggested by the UNI 9503 standard, almost equivalent to ISO 834.

From the comparison of the results of the two models, an almost perfect temperature correspondence has emerged relative to the connection node between the plate and the steel web while, in correspondence with the zones in the centerline of the truss height, the 2D model gives higher temperature values, at the same time of exposure to fire, compared to those obtained from the 3D model. Moreover, for both models, the steel web foot temperature is almost equal to that of the welded steel plate.

PAROLE CHIAVE | KEYWORDS
trave PREM, trave tralicciata, resistenza al fuoco, analisi 2D, analisi 3D
PREM beam, truss beam, fire resistence, 2D Analysis, 3D Analisys

INTRODUZIONE

L'impiego delle travi miste PREM è ampiamente diffuso in Italia e l'approccio progettuale è ormai consolidato, oltreché inquadrato nell'ambito delle Norme Tecniche [1, 2, 3 e 4].

Il tema della resistenza al fuoco di queste particolari tecnologie costruttive è stato ampiamente affrontato da un punto di vista sperimentale (figura 1) e diversi sono i casi riportati in letteratura [5, 6 e 7].

1. Prova di Resistenza al fuoco su Trave PREM con piatto in acciaio non protetto eseguito presso il Centro Studi ed Esperienze Antincendi Roma-Capannelle nel 1981.

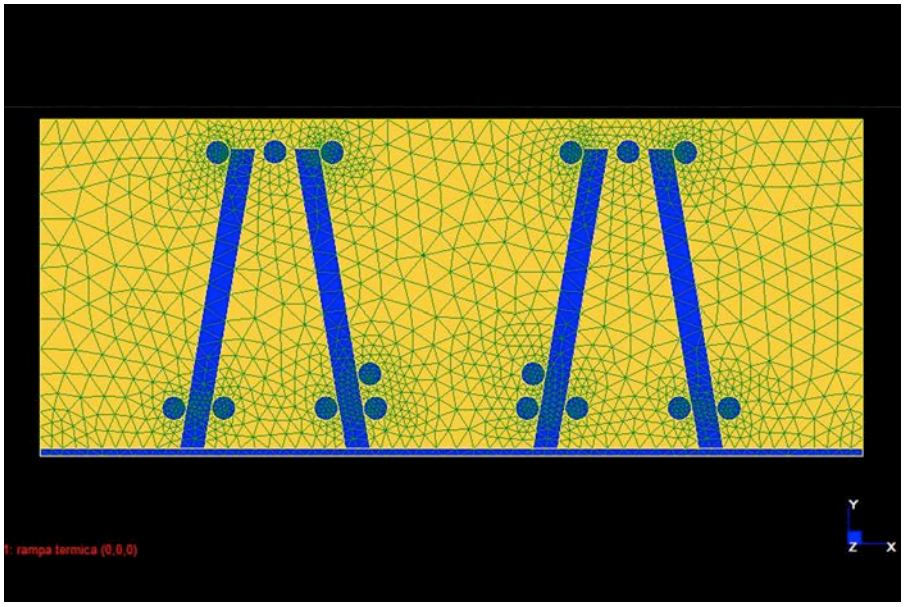
La possibilità di disporre di affidabili modelli di comportamento termo-meccanico del calcestruzzo e dell'acciaio consente di allestire buoni modelli agli elementi finiti di comportamento termo-meccanico di strutture esposte al fuoco ed in particolare di elementi strutturali composti come le travi Prem, con piatto metallico e traliccio d'anima. Questa circostanza rende più agevole la progettazione ottimizzata al fuoco di tali elementi, potendo comprendere con semplici analisi di sensitività il ruolo che possono giocare le scelte progettuali sul loro comportamento termo-meccanico.

L'articolo illustra una ricerca numerica finalizzata ad individuare l'andamento della temperatura all'interno del traliccio d'anima di una trave Prem, composta da calcestruzzo, traliccio d'anima e piatto metallico inferiore.

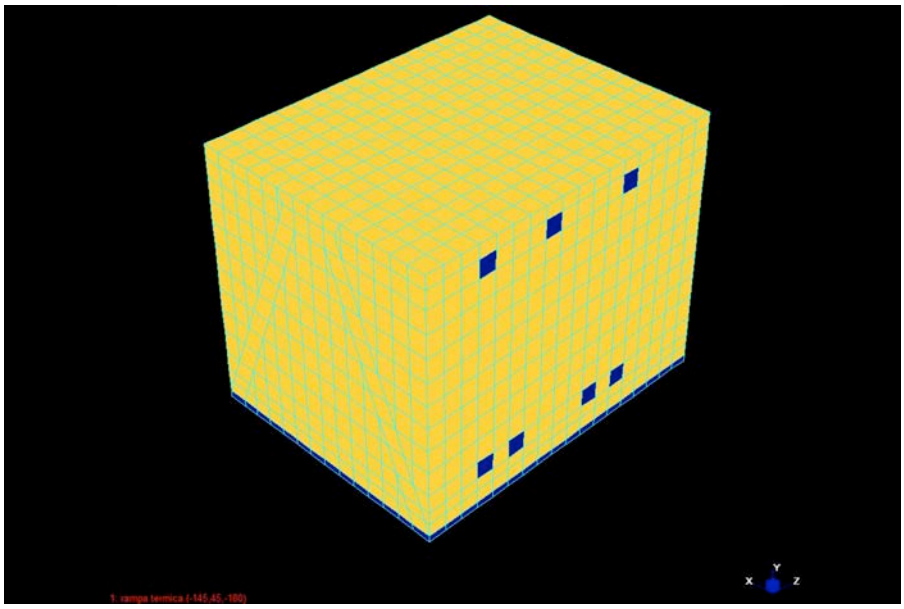
In particolare, l'analisi termica ha per oggetto e per modello un concio di trave tralicciata Prem, a struttura mista acciaio-calcestruzzo, con piatto e traliccio d'anima in acciaio strutturale e barre longitudinali in acciaio da c.a., distanziate dal piatto (in zona "fredda"), il quale risulta soggetto al carico termico dovuto all'incendio, in assenza di materiale protettivo all'intradosso del piatto.

MODELLO NUMERICO

L'analisi è stata eseguita, con l'ausilio del software di calcolo STRAUS7 [8], inizialmente su un modello 2D agli elementi finiti della sezione mista acciaio-calcestruzzo, con una Mesh costituita da elementi finiti "*2D Plane Strain*" di forma triangolare (figura 2), e successivamente, su un modello tridimensionale, costituito da elementi "*brick*" a 8 nodi (figura 3).



2. Modello piano.

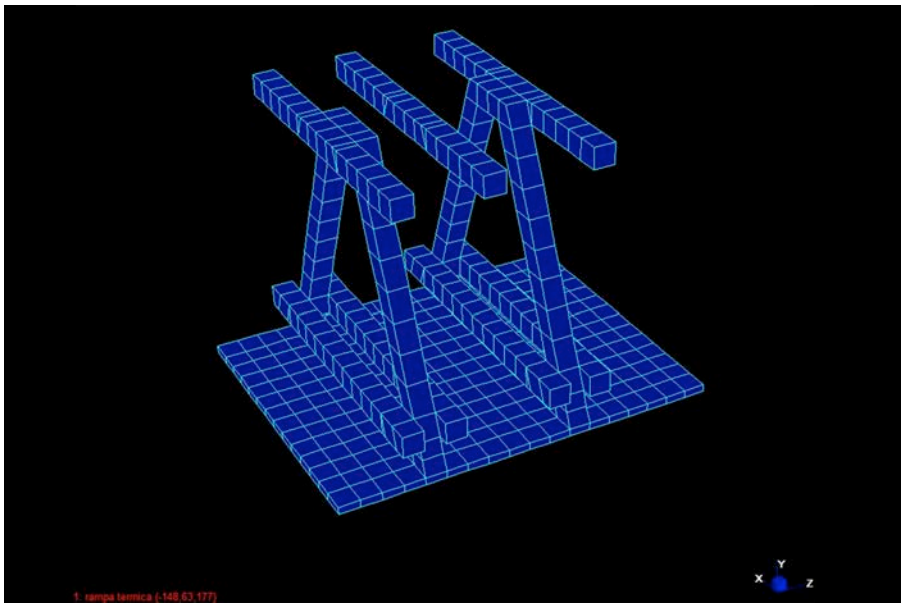


3. Modello tridimensionale.

Il modello tridimensionale realizzato rappresenta un modulo tipo della trave PREM, costituito dalla piastra di base in acciaio sulla quale sono saldate le barre inclinate del traliccio saldate inferiormente e superiormente alle barre longitudinali di armatura.
Data la complessità della geometria spaziale – come detto il modello è costituito da elementi finiti "brick" a 8 nodi - le aste del traliccio e le barre ad esse saldate della struttura reale sono state rappresentate nel modello in forma poligonale di area equivalente alle barre circolari, al fine di ottenere una mesh coerente con la struttura reale ma non eccessivamente onerosa per le elaborazioni numeriche.

Una ulteriore semplificazione geometrica adottata è stata quella di modellare il traliccio come se fosse verticale, non considerando così, la sua reale inclinazione.

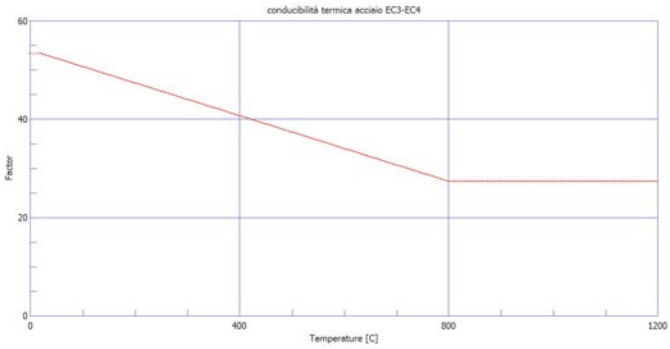
La figura 4 mostra una vista tridimensionale del modello ad elementi finiti che ritrae le componenti metalliche della trave PREM: la piastra di base in acciaio di spessore 10 mm, le aste del traliccio e le barre di armatura saldate al traliccio superiormente e inferiormente.



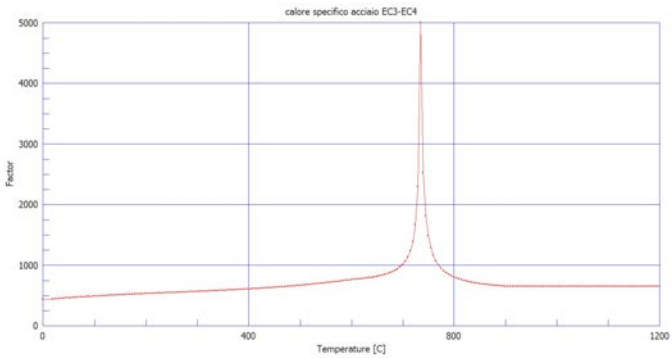
4. Componenti metalliche trave NPS.

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI MATERIALI

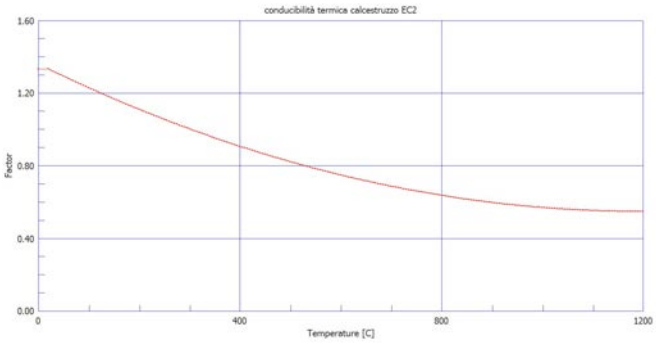
Nei grafici riportati nelle figure 5-6-7 e 8 si riportano i valori corrispondenti alle caratteristiche termiche dei materiali impiegati, al variare della temperatura espressa in °C, indicati negli Eurocodici EC2 [9] ed EC4 [10].



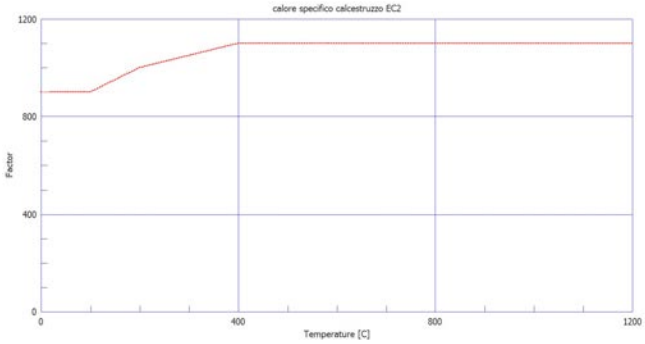
5. Conducibilità termica acciaio (EC3-EC4).



6. Calore specifico acciaio (EC3-EC4).



7. Conducibilità termica calcestruzzo (EC2).

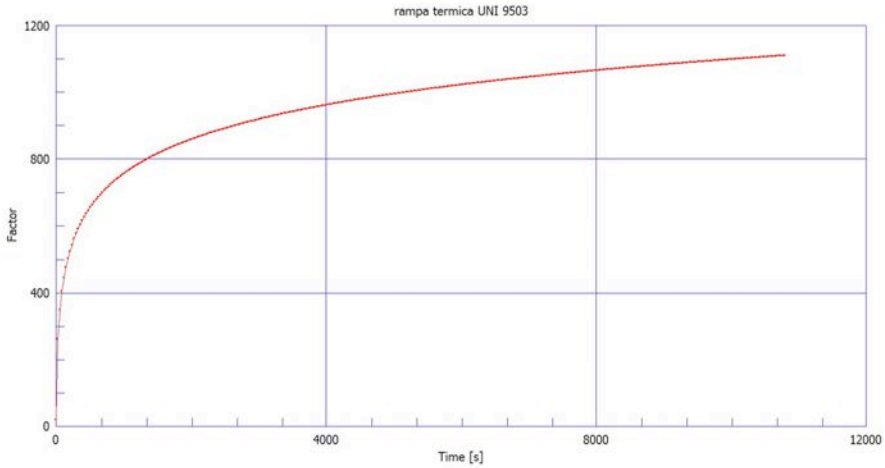


8. Calore specifico calcestruzzo (EC2).

CARICO TERMICO

Al fine di simulare il riscaldamento della trave causato da un incendio, ad entrambi i modelli è stato applicato il carico termico dovuto all'incendio, assegnando ai nodi inferiori della piastra d'acciaio la legge di variazione della temperatura nel tempo, rappresentata in figura 9, suggerita dalla norma UNI 9503:2007 – "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio", pressoché equivalente alla ISO 834 [11].

L'analisi termica è stata condotta ipotizzando un tempo di esposizione al fuoco della struttura pari a 3 ore (10800 s) e, per questo motivo, sono stati definiti, nella tabella dei parametri di input dell'analisi, un numero di step pari all'arco temporale di esposizione al fuoco.

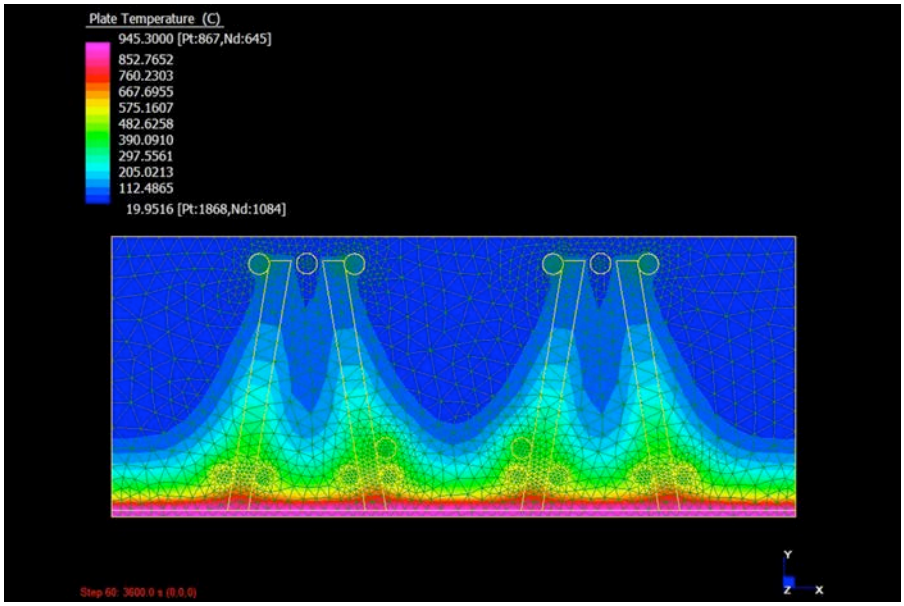


9. Legge di variazione della temperatura nel tempo UNI 9503:2007.

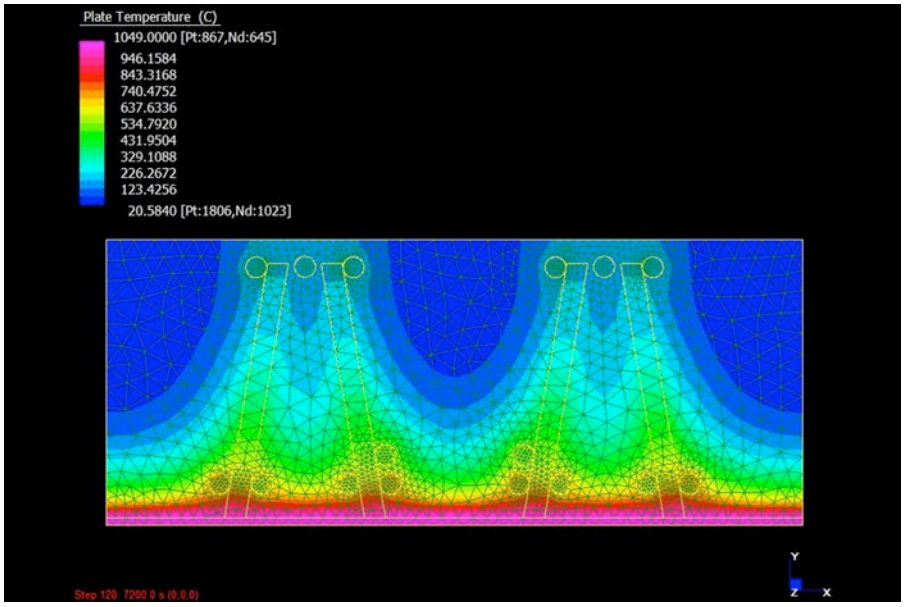
RISULTATI ANALISI TERMICA: MODELLO 2D

Analisi termica al tempo di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min

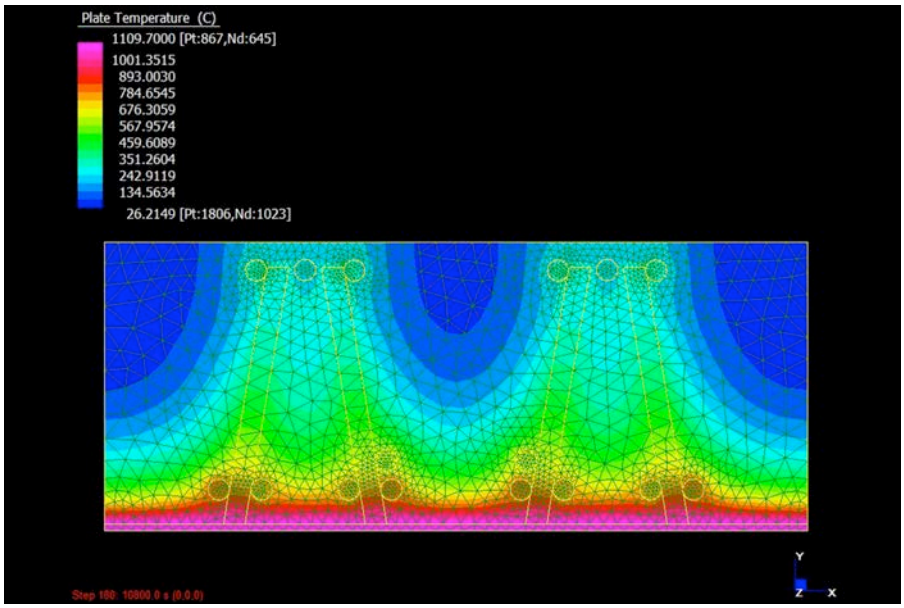
Nelle figure 10 11 e 12 si riportano i risultati delle analisi termiche sviluppate con il modello 2D.



10. Analisi termica della sezione al tempo di esposizione al fuoco di 60 min.



11. Analisi termica della sezione al tempo di esposizione al fuoco di 120 min.

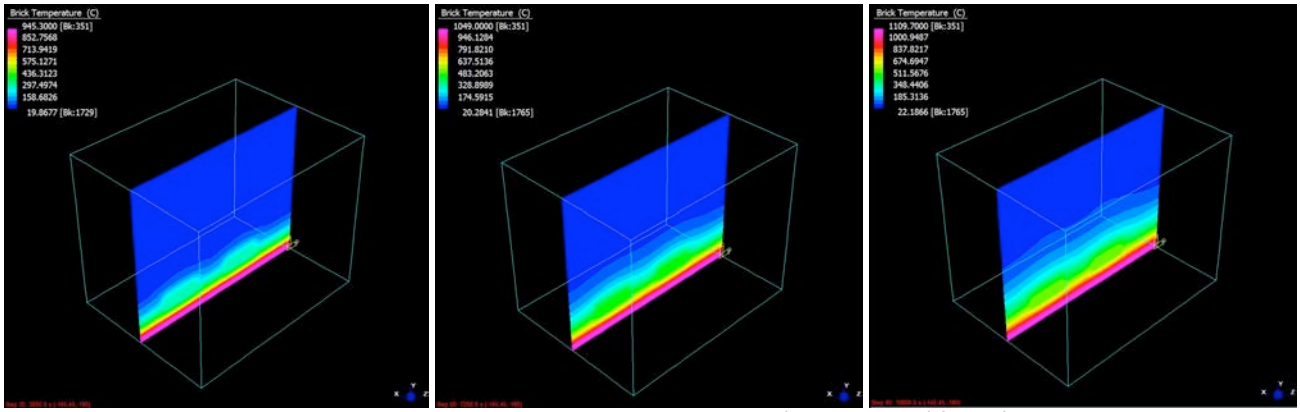


12. Analisi termica della sezione al tempo di esposizione al fuoco di 180 min.

RISULTATI ANALISI TERMICA: MODELLO 3D

Analisi termica al tempo di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min (sezione parallela al traliccio).

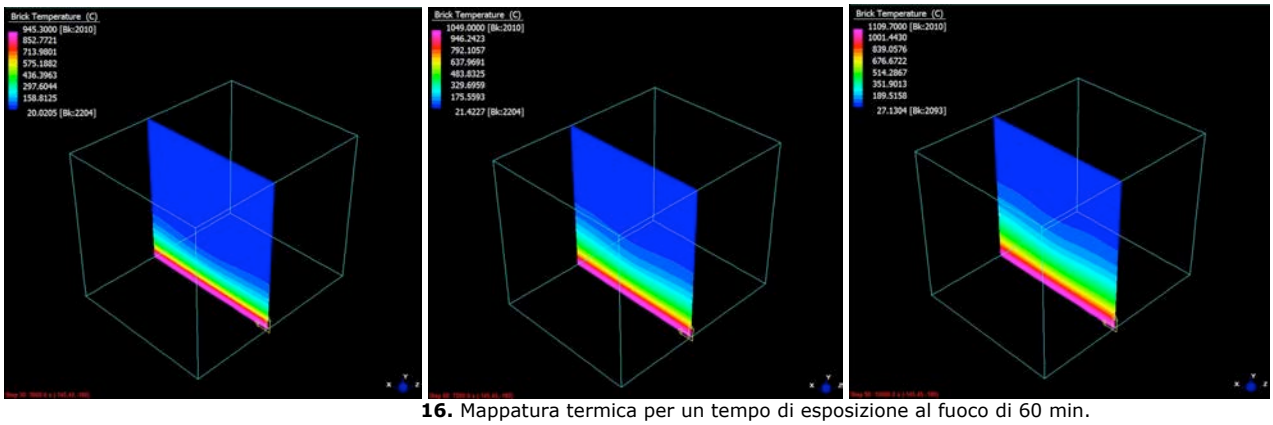
Nelle figure 13, 14 e 15 sono rappresentate le mappature termiche sulla sezione di mezzeria del concio di trave, in direzione longitudinale (parallela al traliccio), corrispondenti, rispettivamente, a un tempo di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min.



13. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 60 min.
14. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 120 min.
15. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 180 min.

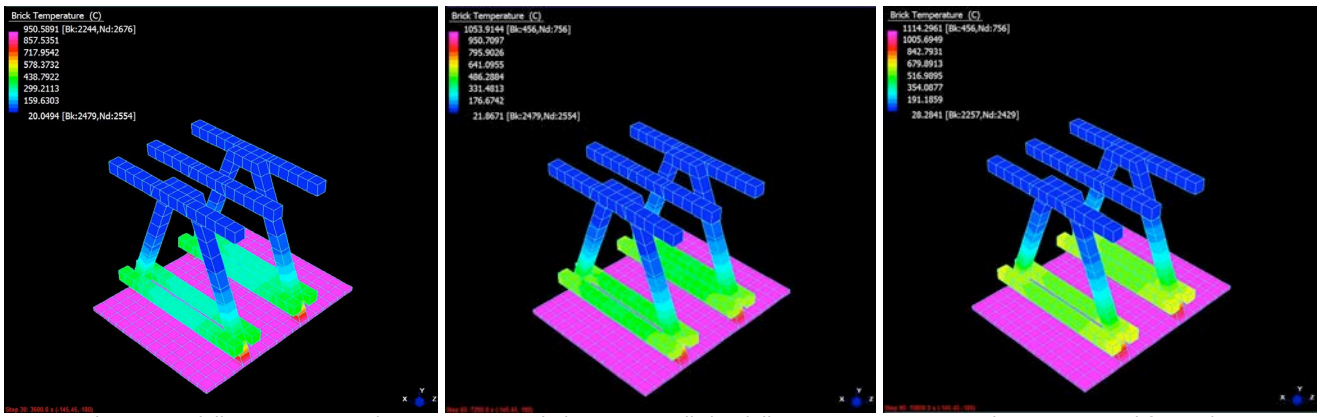
Analisi termica al tempo di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min. (sezione perpendicolare al traliccio).

Nelle figure 16, 17 e 18 sono rappresentate le mappature termiche sulla sezione di mezzeria del concio di trave, in direzione trasversale, corrispondenti, rispettivamente, a un tempo di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min.



16. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 60 min.
17. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 120 min.
18. Mappatura termica per un tempo di esposizione al fuoco di 180 min.

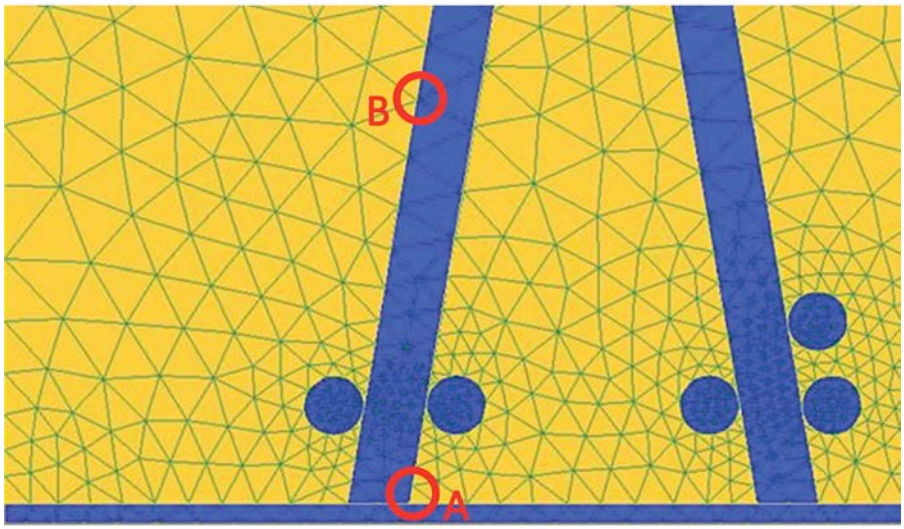
Nelle figure 19-20-21 sono visualizzate le temperature che interessano solo le parti metalliche costituenti la trave PREM, sempre con riferimento ai tempi di esposizione al fuoco di 60, 120 e 180 min. rispettivamente.



19. Visualizzazione delle temperature che interessano solo le parti metalliche della trave, per un tempo di esposizione al fuoco di 60 min.
20. Visualizzazione delle temperature che interessano solo le parti metalliche della trave, per un tempo di esposizione al fuoco di 120 min.
21. Visualizzazione delle temperature che interessano solo le parti metalliche della trave, per un tempo di esposizione al fuoco di 180 min.

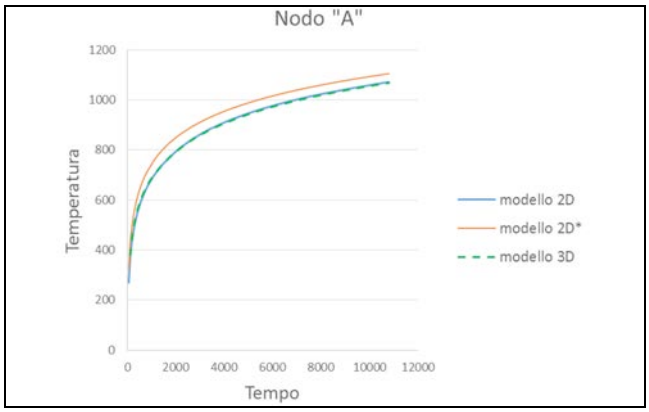
CONFRONTO DEI RISULTATI DELLE ANALISI TERMICHE

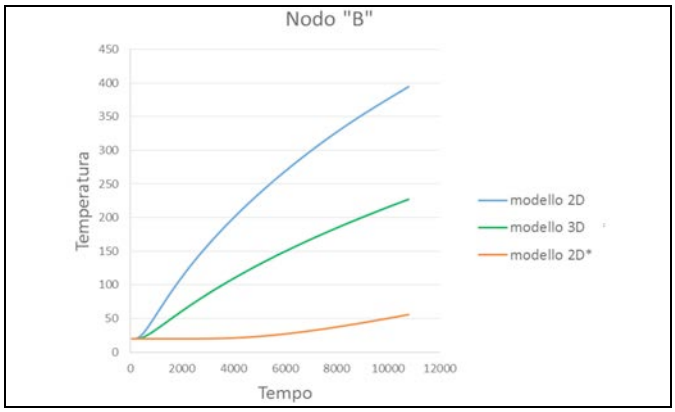
Al fine di confrontare i risultati ottenuti dalla modellazione piana e da quella 3D, nella figura 22 sono evidenziati due nodi del modello 2D, denominati A e B, per i quali sono stati tracciati i grafici relativi all'andamento della temperatura nel tempo. In particolare, il nodo A è stato scelto in corrispondenza dell'attacco tra la piastra di acciaio e l'asta del traliccio mentre il nodo B è collocato all'incirca nella mezzeria dell'asta del traliccio, come mostrato nella figura sottostante. All'interno del modello 3D, nelle stesse posizioni, sono stati individuati i nodi di riferimento per il tracciamento delle curve temperatura-tempo.



22. Identificazione nodi A e B.

Nelle figure 23 e 24 sono riportati, per confronto, relativamente ai nodi A e B descritti in precedenza, i grafici relativi ai profili di variazione della temperatura nel tempo, nel caso del modello 2D, del modello 3D e nell'ipotesi che le aste del traliccio d'anima fossero anch'esse in calcestruzzo (modello 2D*).





23. Curve temperatura-tempo nodo A.
24. Curve temperatura-tempo nodo B.

CONSIDERAZIONI FINALI

Dall'osservazione del grafico di figura 23 si nota una quasi perfetta corrispondenza tra le curve tracciate relativamente al nodo A, del modello 2D e di quello 3D, che dimostra come entrambi i modelli forniscono quasi gli stessi risultati, in termini di temperatura, relativamente al nodo di attacco tra piastra e traliccio.

Con riferimento invece al grafico di figura 24, che rappresenta il nodo "B" ubicato all'incirca nella mezzeria dell'asta del traliccio d'anima, si può osservare una divergenza dei risultati ottenuti dai due modelli, sempre in termini di temperature riscontrate sui materiali della struttura. In particolare, il modello 2D fornisce, per tale nodo, dei valori di temperatura più alti, a parità di tempo di esposizione al fuoco, rispetto a quelli ottenuti dal modello 3D. Il confronto tra i valori di temperatura è riportato nella tabella 1.

Tabella 1. Confronto tra temperatura del modello 2D e del modello 3D nel nodo B

Tempo di esposizione	Temperatura Modello 2D [°C]	Temperatura Modello 3D[°C]
60 minuti	184	101
120 minuti	305	171
180 minuti	394	227

In sintesi, si può affermare che un'analisi 2D (con traliccio di collegamento esteso indefinitamente) ed un'analisi 3D sono sovrapponibili per quanto riguarda l'andamento della temperatura sia del piatto che dell'elemento del traliccio d'anima nella zona di ancoraggio con il piatto. Viceversa, per le armature lontane dal piatto, sia trasversali che longitudinali, l'analisi 2D è molto più cautelativa, e quindi penalizzante, di una analisi 3D.

POSSIBILI INDICAZIONI PROGETTUALI

Entrambe le valutazioni numeriche evidenziano un andamento delle temperature del piatto e degli elementi del traliccio d'anima, nelle zone prossime al piatto, tale da risultare penalizzante, per la resistenza a flessione e a taglio della trave, già dopo pochi minuti di esposizione (dopo 10 minuti la temperatura del piatto è di circa 600 °C). Pertanto, in assenza di un rivestimento protettivo all'intradosso del piatto, la resistenza utile, sia del piatto inferiore che del traliccio d'anima ad esso collegato strutturalmente tramite saldatura, risulta praticamente nulla. La tipologia di trave oggetto della presente valutazione, quindi, risulta inadeguata a resistere ad un incendio standard.

Viceversa questa ricerca rende evidente che le armature posizionate ed ancorate a conveniente distanza dal piatto, in zona "fredda", possono mantenere a lungo una temperatura compatibile con una congrua resistenza meccanica.

Pertanto, in assenza di rivestimento protettivo all'incendio, si possono intravedere due possibili strade per rendere questa tipologia di trave resistente all'incendio:

1) predisporre barre longitudinali (come nella trave oggetto della ricerca) e staffe, in acciaio da c.a., in zona "fredda" e senza continuità termica con il traliccio (in acciaio liscio) a presidiare interamente la resistenza a flessione e a taglio sotto

carico d'incendio (come una vera e propria trave in c.a. cui la trave PREM trasferisce tutta la resistenza, mano a mano che la temperatura del piatto e del traliccio sale);
2) predisporre barre longitudinali, in acciaio da carpenteria metallica, in zona "fredda" e con continuità termica con il traliccio (in acciaio liscio), cioè saldate strutturalmente ad esso, a presidiare interamente la resistenza a flessione e a taglio sotto carico d'incendio, ancora come trave mista ma con le anime del traliccio ancorate in zona fredda. In questa seconda soluzione, tuttavia, il nuovo traliccio "ridotto" non funzionerebbe più con uno schema a tiranti e puntoni, data l'eccentricità che si origina ai nodi inferiori, ma con aste presso e tensoinflesse con conseguente maggiore impegno dei materiali.

Resta comunque responsabilità del Progettista, in ogni singolo caso concreto, individuare la strada migliore da seguire fra le possibili tre alternative e cioè una delle due sopra descritte o una protezione ignifuga all'intradosso che permetta anche al piatto ed al traliccio di resistere sotto carico d'incendio.

RINGRAZIAMENTI | ACKNOWLEDGEMENTS

Si ringrazia l'ing. Maurizio Acito, per l'attività di coordinamento scientifico di questo studio, Assoprem e il Gruppo di Ricerca Assoprem-CIS-E per la messa a disposizione del materiale documentale e le informazioni utili alla redazione dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

[1] Assoprem "Progettare con le travi Prefabbricate Reticolari Miste PREM", Tecniche Nuove, 2010.
[2] Izzo, L., Minelli, F., Plizzari, G., "Linee Guida per le travi reticolari miste PREM", Atti del 17° Congresso CTE, Parma, 2008, pp. 781-790.
[3] D.M. 14 Gennaio 2008 e D.M. 17 Gennaio 2018, "Norme tecniche per le costruzioni".
[4] SERVIZIO TECNICO CENTRALE DEL C.S.LL.PP, "Procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego di travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante". CSLP Assemblea Generale - Adunanza 18/09/2009 - Protocollo n. 116/09
[5] Ministero dell'Interno - Centro Studi ed Esperienze Antincendi - Roma - Capannelle - Prova di Resistenza al fuoco su Trave "REP®" n. 3804/22
[6] Ministero dell'Interno - Centro Studi ed Esperienze Antincendi - Roma - Capannelle - Prova di Resistenza al fuoco su Trave "REP®" n. 3804/23
[7] Ministero dell'Interno - Centro Studi ed Esperienze Antincendi - Roma - Capannelle - Prova di Resistenza al fuoco su Trave "REP®" n. 3804/24
[8] STRAUS7®. Theoretical manual-theoretical background to the Strand7 finite element analysis system; 2004.
[9] CEN, European Committee for Standardization, EN 1992–1–2 Eurocode 2. Design of concrete structures–Part 1–2: General rules–Structural fire design. Brussels, Belgium; 2004.
[10] CEN, Eurocode 4 EN-1994-1-2. Design of composite steel and concrete structures -Part 1–2: General rules—structure fire design, EN 1994-1-2, Final draft, European Committee for Standardization; 2005.
[11] ISO 834-1:1999 Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction General requirements.