

# Analisi termica di solai in latero-cemento sottoposti a carico d'incendio

D.G. Favilla<sup>1</sup>, G.C. Marano<sup>2</sup>, F. Piccininni<sup>2</sup>, F. Trentadue<sup>2</sup>, G. Ninni<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Il Facoltà di Ingegneria di Taranto, Politecnico di Bari

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Ambientale per lo Sviluppo Sostenibile, D.I.A.S.S., Il Facoltà di Ingegneria di Taranto, Politecnico di Bari

<sup>3</sup>Direttore Vicedirigente del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Taranto

Il lavoro ha come obiettivo l'analisi termica di un solaio in latero-cemento a travetti prefabbricati, con blocchi interposti, e la determinazione della sua resistenza al fuoco secondo il metodo disciplinato dalla norma UNI CNVVF 9502 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso"

Per effettuare l'analisi termica ed il calcolo analitico della resistenza al fuoco (REI) mediante software, è stato necessario realizzare un modello del solaio (fig. 1), opportunamente tarato e aderente alla realtà del fenomeno. La resistenza al fuoco è stata determinata in accordo con la norma UNI 9502, verificando la capacità portante allo stato limite ultimo di collasso con il metodo semiprobabilistico agli stati limiti che il software ThermoCAD consente. L'analisi termica è stata ripetuta per il solaio di partenza rivestito di uno strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite e sottoposto al programma termico secondo la curva standard ISO 834 (*Fire-resistance tests - Elements of building construction*). I risultati, in termini di distribuzione delle temperature nella sezione e di variazione della resistenza del conglomerato cementizio armato, hanno confermato l'efficacia dei materiali protettivi nell'aumentare la resistenza al fuoco della struttura. Infine, il solaio è stato sottoposto alla curva di incendio reale, relativa ad un edificio standard in muratura, ed è stato effettuato il confronto con la curva ISO 834, che si è rivelata un modello di incendio più severo giustificando il suo impiego nelle prove in forno.

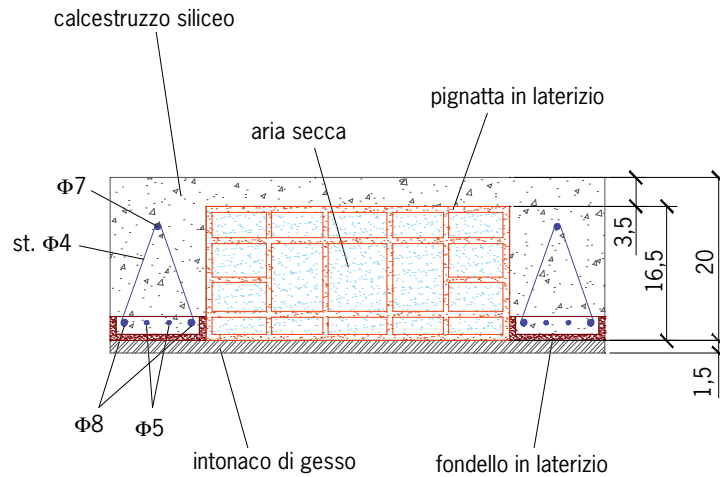


Figura 1 - Sezione trasversale del modello con superficie di esposizione al fuoco (ThermoCAD - Concrete structural engineering software).

## Descrizione del modello

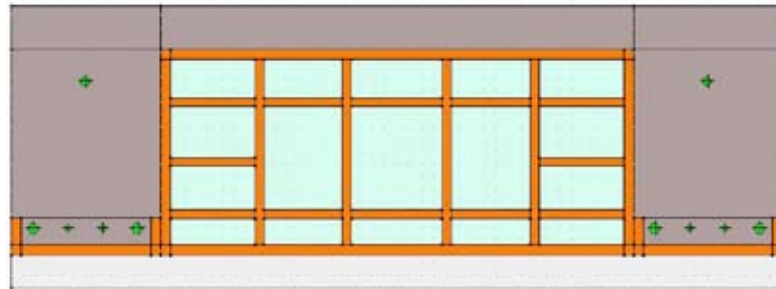
Oggetto dell'analisi termica è stato un solaio di dimensioni 450 x 250 cm, realizzato con travetti in struttura a traliccio metallico, fondello in laterizio, conglomerato gettato in opera e blocchi di alleggerimento in laterizio di altezza pari a 16,5 cm. La soletta superiore di 3,5 cm e le nervature (con interasse di 50 cm) sono di calcestruzzo gettato in opera (Rck 350). L'armatura resistente (FeB44K) è costituita da 2  $\varnothing$  8, facenti parte del traliccio, più 2  $\varnothing$  5 inseriti nel fondello. Lo schema costruttivo e le dimensioni sono riportate nella fig. 2.





**Figura 2 - Solaio oggetto dell'analisi termica (misure in cm).**

Per poter utilizzare il programma agli elementi finiti ThermoCAD ed effettuare l'analisi termica, è stato necessario modellizzare opportunamente il solaio come mostrato in fig. 3. Nel modello, in luogo dell'intonaco di gesso dello spessore di 1,5 cm, è stato considerato uno strato di cemento di spessore equivalente, facendo riferimento ai valori proposti dalla norma UNI 9502 (prospetto 4), per omogeneizzare la struttura. In particolare, utilizzando un coefficiente di equivalenza tra intonaco di gesso e cemento pari a 1,8, è stato considerato uno spessore di cemento equivalente pari a 2,7 cm.



**Figura 3 - Sezione trasversale dell'unità strutturale analizzata (ThermoCAD – Concrete structural engineering software).**

Definiti il modello numerico e il materiale, sono state fissate le condizioni al contorno, ed in particolare:

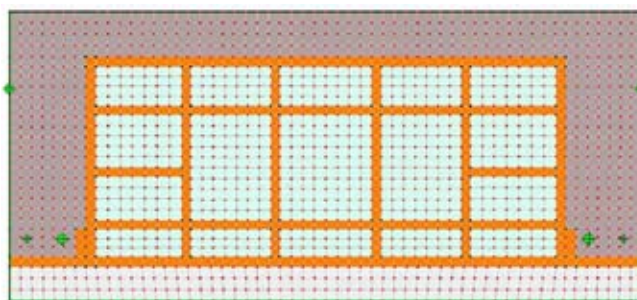
- la superficie esposta al fuoco (intradosso);
- la superficie alla temperatura ambiente di 20°C (estradosso);
- le condizioni di adiabaticità ai lati della sezione, presupponendo la continuità con il solaio.

Da sottolineare, il carattere isotropo e omogeneo del materiale costituente il solaio che caratterizzerà in maniera significativa la successiva analisi termica.

### **Distribuzione delle temperature nelle sezioni**

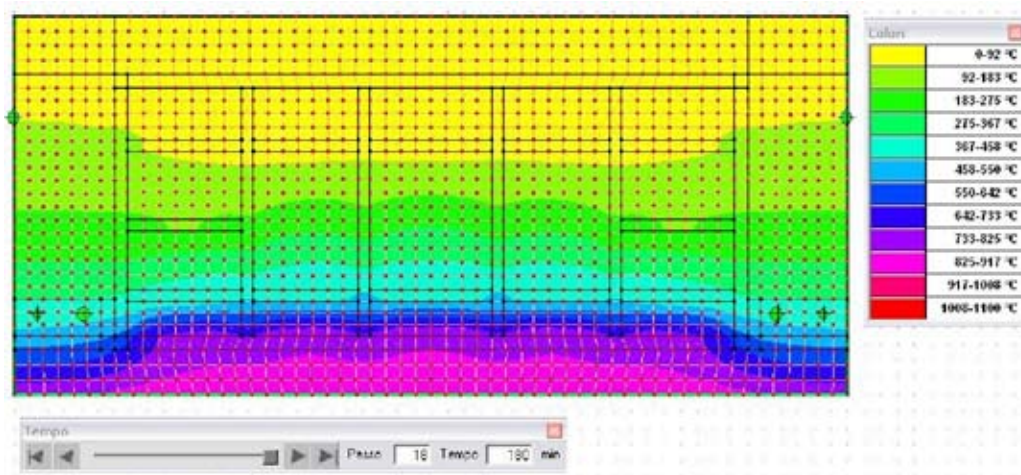
La fase di analisi termica consente di determinare le temperature nodali in base alle condizioni al contorno assegnate alla sezione. Prima di avviare il calcolo del solutore agli elementi finiti, si procede alla generazione della mesh degli elementi che discretizzano la sezione secondo una dimensione massima che, nel caso in

questione, è stata fissata pari a 1 cm. Il programma provvede a creare la mesh mantenendo la continuità dei nodi per i blocchi contigui (fig. 4).



**Figura 4 - Sezione (discretizzata) trasversale dell'unità strutturale analizzata, considerando un interasse di 50 cm (ThermoCAD – Concrete structural engineering software).**

L'analisi termica viene dunque condotta sottoponendo l'intradosso del solaio all'azione della curva standard ISO 834 e misurando le temperature nodali. Nel caso in esame, l'analisi è stata condotta con 180 step da 60 secondi l'uno, per un totale di esposizione al fuoco della sezione di tre ore. Al termine dell'analisi, per il calcolo delle temperature nodali, è stato visualizzato l'andamento del fronte termico ad intervalli di 10 minuti. L'avanzamento del fronte termico nel primo modello analizzato (solaio con intonaco di gesso, sottoposto all'azione della curva ISO 834) è mostrato nella fig. 5.



**Figura 5 - Fronte termico a 180 minuti (ThermoCAD – Concrete structural engineering software).**

### Validazione del modello

La misura della temperatura durante l'azione termica, in punti specifici della sezione del solaio, ha consentito di elaborare delle curve temperatura tempo.

In particolare, la scelta dei punti di misura della temperatura è stata eseguita con riferimento ai dati sperimentali messi a disposizione dall'ANDIL, in maniera tale da poter confrontare i risultati ottenuti.

Agendo sul valore delle grandezze termofisiche dei materiali che controllano il processo di avanzamento del fronte termico nel solaio, il modello è stato tarato in maniera ottimale così da ottenere un comportamento aderente alla realtà del fenomeno. In particolare, sono stati assunti dei valori tali da raggiungere il giusto compromesso tra quanto specificato nella norma UNI 9502 e quanto si verifica nelle prove in forno, tenuto conto della loro specificità.

Sono state, dunque, realizzate quattro famiglie di curve temperatura-tempo sottoponendo il solaio all'azione termica della curva ISO 834:

- in corrispondenza dei travetti ed a distanza variabile dalla superficie esposta al fuoco;
- nei setti e nei vuoti del blocco di laterizio;
- all'estradosso del solaio.

La fig. 6 mostra il confronto tra le curve temperatura-tempo ottenute dall'elaborazione dei risultati confrontate con quelle sperimentali.



4

## Analisi termica di solai in latero-cemento sottoposti a carico d'incendio

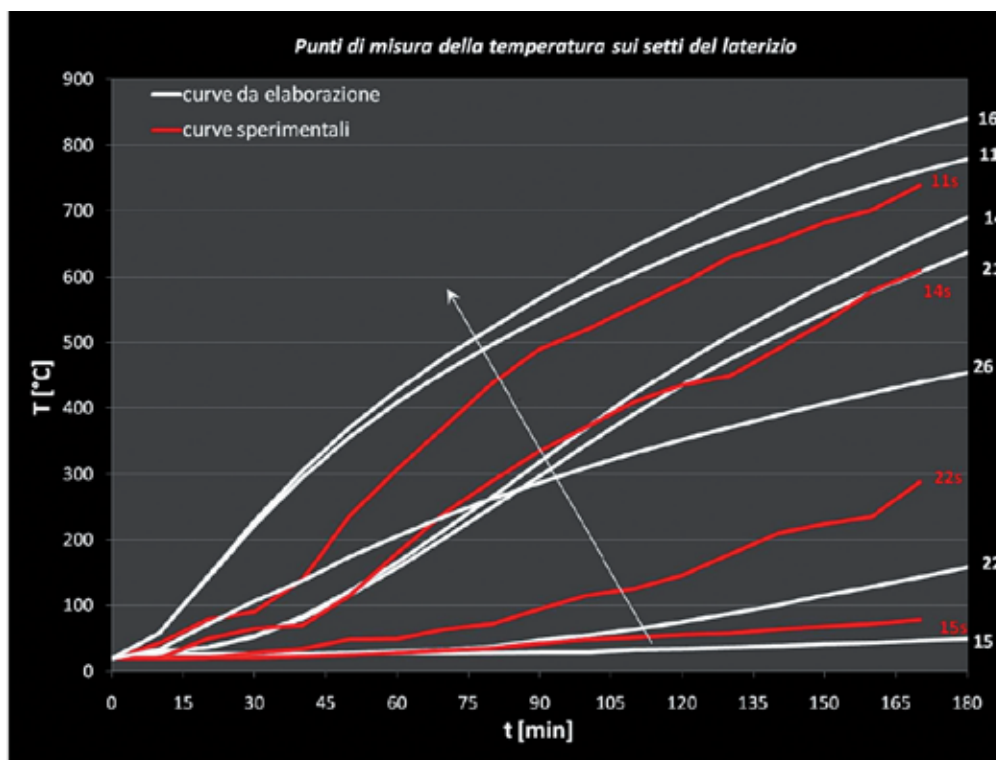


Figura 6 - Confronto tra le curve temperatura-tempo elaborate e quelle sperimentali.

L'analisi delle curve ottenute dall'elaborazione numerica mostra un andamento piuttosto regolare, crescente e convergente alla temperatura ambiente di 20°C; le curve sperimentali, pur presentando un andamento irregolare e frastagliato, mostrano comunque una chiara analogia con quelle elaborate.

La spiegazione può essere attribuita al fatto che il modello analizzato dal software agli elementi finiti fa riferimento ad un materiale isotropo e omogeneo, a differenza del solaio reale testato durante la prova in forno che risente, invece, delle irregolarità dei materiali e della posa in opera.

È opportuno sottolineare che nei punti in cui il solaio viene sollecitato maggiormente dall'azione termica, cioè in corrispondenza dell'intradosso e nelle vicinanze dell'armatura, le temperature misurate con l'ausilio del software presentano valori maggiori rispetto ai dati sperimentali e questa differenza diminuisce all'aumentare della distanza dalla superficie esposta al fuoco.

### Confronto tra la curva ISO 834 e la curva d'incendio reale

La procedura sopra descritta è stata ripetuta per effettuare l'analisi termica del modello di partenza ma sottoposto all'azione della curva di incendio reale (fig. 7), relativa ad un edificio standard con pareti in muratura.

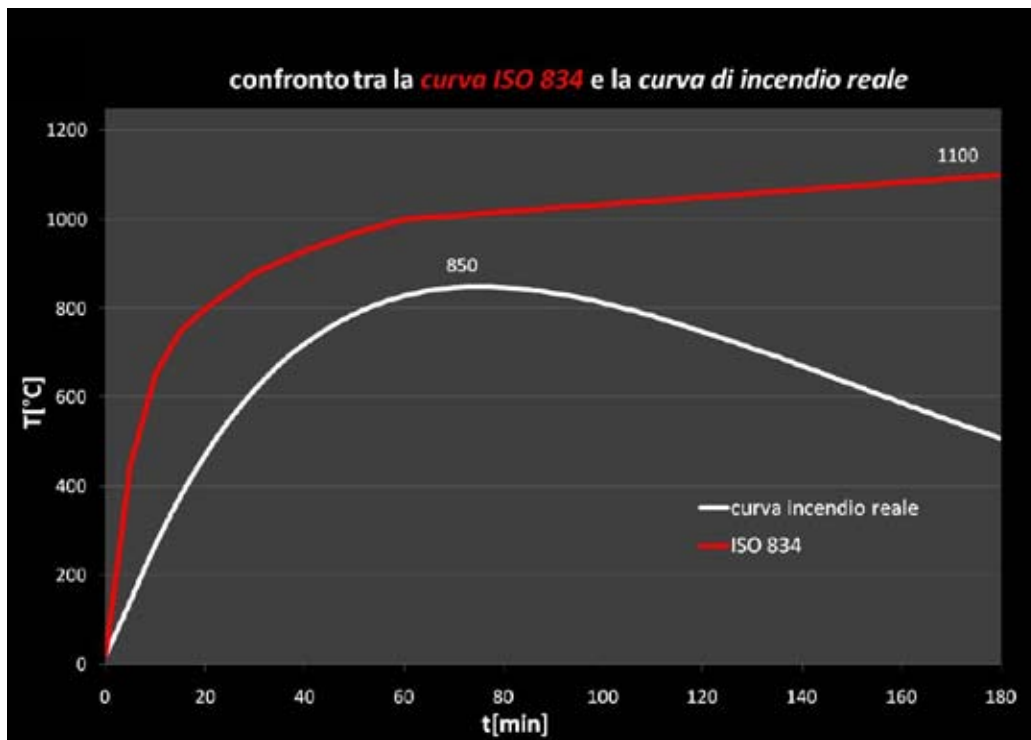


Figura 7 - Confronto tra la curva standard ISO 834 e quella d'incendio reale.

La fig. 8 mostra il confronto tra le curve elaborate relative al modello sottoposto all'azione termica secondo la curva ISO 834 e quelle relative allo stesso modello ma sottoposto all'azione termica della curva di incendio reale.

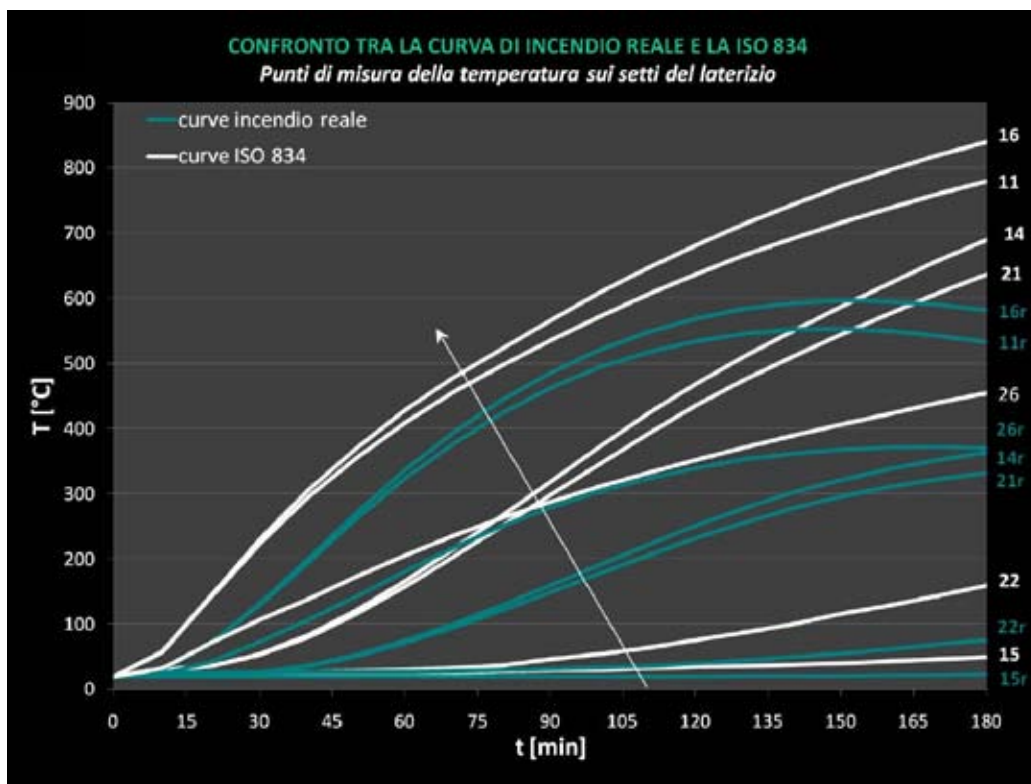


Figura 8 - Confronto tra le curve temperatura-tempo relative alla curva standard ISO 834 e quelle relative alla curva d'incendio reale.

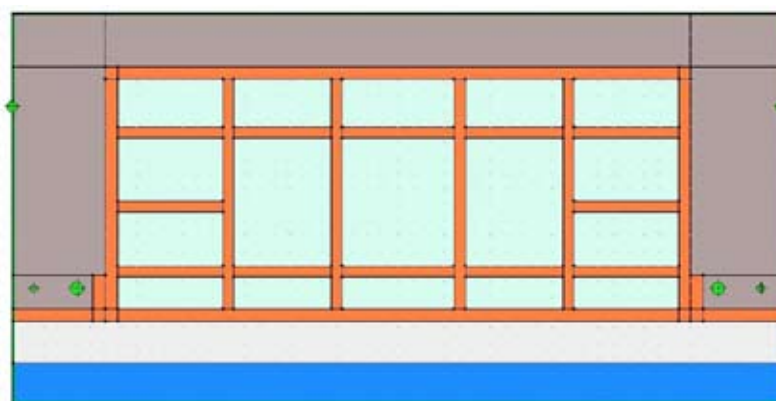
Dal confronto grafico emerge che le curve temperatura-tempo relative al modello iniziale, sottoposto all'azione termica della curva di incendio reale, presentano un andamento simile a quello delle curve relative alla ISO 834; nella parte finale, però,

dopo aver raggiunto una fase di massimo sviluppo, mostrano un andamento decrescente, coerentemente con l'andamento della curva di incendio reale. Esse, inoltre, rispetto alle curve temperatura-tempo della ISO 834, mostrano sempre un valore minore della temperatura e questa tendenza diminuisce all'aumentare della distanza dalla superficie esposta al fuoco.

È stato valutato l'abbassamento percentuale della temperatura quando sono trascorsi 180 minuti dall'innescò dell'incendio. Tale abbassamento è dovuto al minore stress termico indotto dalla curva di incendio reale rispetto alla ISO 834. In particolare, è stato riscontrato, a fronte di un valore medio del 33%, un abbassamento massimo del 53% e del 18% in corrispondenza del punto dove il calcestruzzo raggiunge la massima temperatura.

### Applicazione (intonaco di gesso e vermiculite)

La medesima procedura è stata ripetuta per effettuare l'analisi termica del modello di partenza rivestito, però, di uno strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite dello spessore di 1 cm (fig. 9).



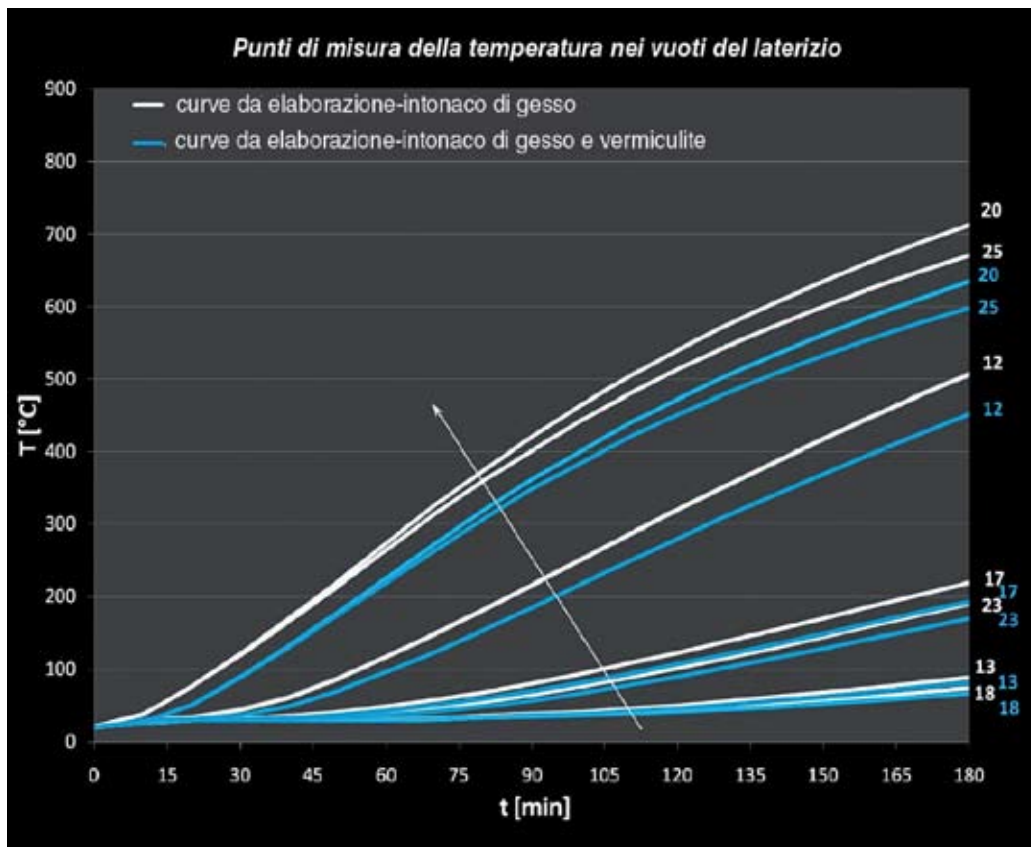
**Figura 9 - Modello di partenza con strato protettivo di gesso e vermiculite dello spessore di 1 cm (2,7 cm di cemento equivalente; ThermoCAD - Concrete structural engineering software).**

In luogo dell'intonaco di gesso e vermiculite, è stato utilizzato uno strato di cemento di spessore equivalente (2,7 cm), facendo riferimento, ancora una volta, ai valori proposti dalla norma UNI 9502 - prospetto 4. La fig. 10 mostra il confronto tra le curve elaborate relative al modello iniziale (intonaco di gesso) e quelle relative allo strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite.

Dal confronto grafico, emerge che le curve relative allo strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite presentano lo stesso andamento delle curve relative al solo strato di intonaco di gesso; rispetto a queste ultime, però, mostrano sempre un valore minore della temperatura e questa tendenza diminuisce all'aumentare della distanza dalla superficie esposta al fuoco.

Inoltre, è stato valutato l'abbassamento percentuale della temperatura in corrispondenza del passo temporale 18, cioè quando sono trascorsi 180 minuti dall'innescò dell'incendio. In particolare, è stato riscontrato, a fronte di un valore medio del 10%, un abbassamento massimo del 14% e del 10% in corrispondenza del punto dove il calcestruzzo raggiunge la massima temperatura.





**Figura 10 - Confronto tra le curve temperatura-tempo relative all'intonaco di gesso e quelle relative all'intonaco di gesso e vermiculite.**

### Calcolo del parametro REI e verifica della sezione

La valutazione della resistenza al fuoco, in accordo con quanto richiesto dalla UNI 9502, è stata effettuata mediante la successione dei seguenti passaggi:

1. determinazione della distribuzione di temperatura nell'elemento strutturale al variare del tempo di esposizione (analisi termica);
2. determinazione della variazione delle proprietà meccaniche dei materiali costruttivi al variare della temperatura;
3. verifica della capacità portante allo stato limite ultimo di collasso con il metodo semiprobabilistico agli stati limiti che il software ThermoCAD consente.

L'operazione è stata effettuata sia per il modello di partenza (intonaco di gesso) che per la soluzione alternativa che prevede il rivestimento con uno strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite, mettendo in evidenza l'aumento prevedibile del parametro REI del solaio. In base alla temperatura del materiale, nella verifica si considera il decremento delle proprietà meccaniche secondo i coefficienti di degrado imposti dalla norma UNI 9502.

La verifica del parametro REI è stata effettuata considerando che il peso proprio del solaio è pari a 285 kg/m<sup>2</sup> e che il momento di servizio agente sulla struttura è pari a 540 kg·m, corrispondenti a circa 53.350 daN·cm. Tale valore deriva dal fatto che il prototipo di solaio, testato durante la prova in forno, è stato caricato con due martinetti idraulici che, mediante un sistema di aste e bilanciere, creano, nella parte centrale dello stesso, una zona a momento esterno costante.

La determinazione analitica svolta con il programma agli elementi finiti ThermoCAD ha confermato quanto ottenuto con le prove sperimentali in forno, ossia un valore REI pari a 120 minuti.

È necessario mettere in evidenza che, mentre il valore di resistenza al fuoco REI del

solaio, nelle prove sperimentali in forno, è stato determinato in corrispondenza di uno dei seguenti eventi:

- velocità di deformazione superiore a quella critica (crisi di stabilità R)
- passaggio di fuoco o fumi dall'interno del forno verso l'esterno (crisi di tenuta E)
- valore della temperatura sulla superficie opposta a quella del fuoco superiore a 150°C (crisi di isolamento I),

nel caso studiato, è stata effettuata la verifica della capacità portante allo stato limite ultimo di collasso con il metodo semiprobabilistico agli stati limiti attraverso il software ThermoCAD.

Il valore REI ottenuto mediante determinazione analitica, relativo al solaio rivestito dello strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite, è stato di 150 minuti, coerentemente con quanto previsto in letteratura.

### Riduzione della resistenza del materiale

I risultati ottenuti dall'analisi termica hanno consentito, inoltre, di valutare la riduzione della resistenza del materiale all'aumentare della temperatura nella sezione. È stato considerato l'andamento della temperatura nel punto dove il calcestruzzo e l'armatura di acciaio risultano essere maggiormente esposti allo stress termico, trovandosi alla minima distanza dalla superficie di esposizione al fuoco. In particolare, è stata valutata:

- la riduzione della resistenza caratteristica a compressione ( $f_{ck}$ ) e a trazione ( $f_{ctk}$ ) del conglomerato cementizio;
- la riduzione della resistenza caratteristica allo snervamento dell'acciaio ( $f_{yk}$ ).

In entrambi i casi, sono stati utilizzati i coefficienti di riduzione della resistenza del materiale previsti dalla UNI 9502.

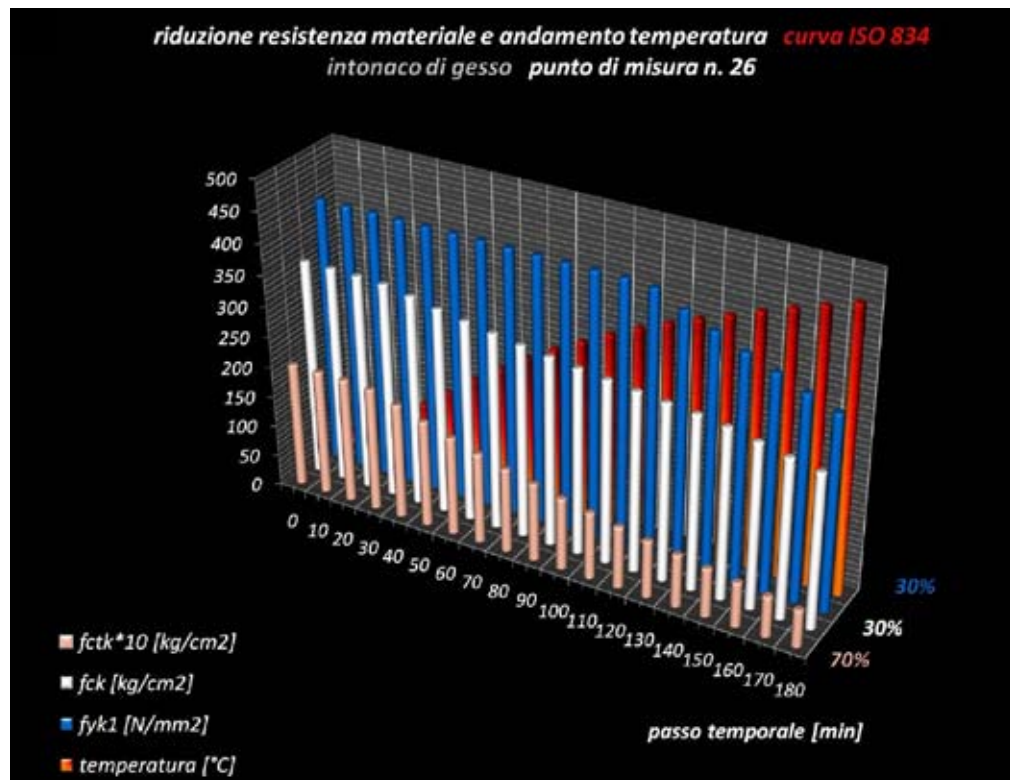


Figura 11 - Diminuzione della resistenza del conglomerato cementizio e dell'acciaio nelle tre situazioni analizzate (curva ISO 834).



L'analisi è stata condotta sia per il solaio rivestito del solo strato di intonaco di gesso, sottoposto allo stress termico previsto dalla curva ISO 834 e da quello di incendio reale, sia per il solaio rivestito dello strato protettivo di intonaco di gesso e vermiculite, sottoposto allo stress termico secondo la ISO 834. La fig. 11 mostra la diminuzione della resistenza del conglomerato cementizio e dell'acciaio nelle tre situazioni analizzate (curva ISO 834).

Modello analizzato		Riduzione percentuale resistenza materiale (%)		
Rivestimento	Programma termico	$f_{ck}$	$f_{ctk}$	$f_{yk}$
gesso	curva ISO 834	30	70	30
gesso e vermiculite	curva ISO 834	20	60	15
gesso	curva incendio reale	20	50	5

**Tabella I - Riduzione percentuale della resistenza del materiale.**

## Conclusioni

La tabella I presenta i risultati ottenuti in termini di riduzione della resistenza del materiale. I risultati consentono di cogliere i seguenti aspetti fondamentali:

1. la temperatura rilevata in prossimità dell'armatura maggiormente esposta al fuoco è sufficientemente lontana dal valore critico, mantenendosi intorno ai 450°C. Infatti, per gli acciai comunemente impiegati in edilizia, la temperatura critica varia tra i 500÷550°C, inferiore a quella del calcestruzzo che è valutabile intorno ai 600°C;
2. la verifica del solaio sottoposto all'azione termica crescente della ISO 834 avviene a vantaggio di sicurezza poiché, nella stragrande maggioranza degli incendi, si raggiungono temperature minori, come dimostrato dalla verifica del solaio sottoposto all'azione termica secondo la curva d'incendio reale e dal confronto delle riduzioni delle resistenze dei materiali;
3. l'utilizzo di un adeguato strato di rivestimento determina una congrua diminuzione della temperatura nel solaio a vantaggio della resistenza; l'uso dei materiali di rivestimento, come l'intonaco di gesso e vermiculite, risulta essere, pertanto, indispensabile, soprattutto se si considera la notevole efficacia con cui questi, a parità di spessore rispetto ad un intonaco tradizionale, riducono la temperatura, aumentando la capacità della struttura di resistere all'azione dell'incendio, oltre che il tempo di intervento dei Vigili del Fuoco.