

COMPORTAMENTO AL FUOCO DI SOLAI PER EDIFICI DI CEMENTO ARMATO: CONFRONTO TRA METODO TABELLARE, SPERIMENTALE ED ANALITICO

Prof. Ing. A.L. MATERAZZI⁽¹⁾, Ing. M. ZAPPÀ⁽²⁾, Ing. A. D'ALESSANDRO⁽³⁾, Ing. M. BRECCOLOTTI⁽¹⁾

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia, via G. Duranti 93, 06124 Perugia

(2) Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Comando Provinciale di Perugia, 06100 Perugia

(3) Libero Professionista, via P. Mesastris 19, 06034 Foligno (PG)

SOMMARIO

Viene affrontato il tema della valutazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali, analizzando in particolare il comportamento delle tipologie di solaio di corrente uso nell'edilizia civile ed industriale. Preliminarmente viene delineato un quadro sintetico ed esaustivo dei riferimenti normativi e dei recenti studi in materia, per poi affrontare, attraverso l'applicazione del metodo analitico, la valutazione della resistenza al fuoco degli elementi presi in considerazione ed operare un confronto con le prove sperimentali.

1. INTRODUZIONE

Gli incendi, insieme ai terremoti, rappresentano la causa principale dei danneggiamenti alle strutture: appare evidente, quindi, la rilevanza di una corretta valutazione della sicurezza antincendio sin dal momento della progettazione strutturale. Attraverso lo studio del comportamento al fuoco dei materiali da costruzione, degli elementi strutturali e della struttura nella sua globalità si può migliorare il livello di sicurezza nel quadro generale dei mezzi di protezione passiva.

La sicurezza antincendio è un obiettivo da perseguire con strategie tra loro complementari che si dividono in prevenzione e protezione: comprende requisiti sulla configurazione degli edifici e sulle prestazioni strutturali, sui prodotti da costruzione, sui servizi e sulle installazioni, sugli impianti di protezione antincendio, ecc. Questi requisiti sono in genere diversamente formulati per abitazioni, uffici, stabilimenti industriali, alberghi, sale di riunioni, ecc. in relazione agli specifici rischi.

Per ciò che concerne le prestazioni strutturali, esistono tre differenti metodologie di progetto o verifica: sperimentale, tabellare ed analitica, descritte con maggior dettaglio nei paragrafi seguenti.

1.1 METODO SPERIMENTALE

Il metodo sperimentale si basa su prove eseguite in apposite camere coibentate di dimensioni contenute, denominate forni, nelle quali gli elementi da provare sono sottoposti ad una storia tempo-temperatura convenzionale; durante la prova essi possono essere anche mantenuti sotto carico. In Italia esistono pochi forni, tra i quali il più grande è quello del Centro Studi ed Esperienze dei Vigili del Fuoco alle Capannelle a Roma. Esso ha dimensioni in pianta di 4 x 5 m, un'altezza di 3 m e la sua copertura è costituita da elementi modulari che possono essere sostituiti con gli elementi strutturali su cui effettuare la prova.

Una prova sperimentale risulta notevolmente più utile se, oltre ai risultati in termini di criteri soddisfatti (resistenza, tenuta, isolamento), contiene informazioni dettagliate ed esaustive sul comportamento termico e fisico dell'elemento esaminato, come, ad esempio, la temperatura in punti significativi (nei giunti, sui ferri, nel materiale protettivo, sulla faccia non esposta al fuoco, sulle interfacce dei materiali costituenti, all'interno a varie altezze) [1]. Anche il principale documento normativo italiano, la Circolare n. 91 del 1961 "Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura di acciaio destinati ad uso civile" [2], riporta in appendice alcune prescrizioni da seguire durante le prove sperimentali, pur se non definisce nel dettaglio le apparecchiature, i campioni ed il loro allestimento, le modalità di prova, le tolleranze, i criteri di valutazione, informazioni necessarie per perseguire la ripetibilità delle prove e di conseguenza una maggiore affidabilità dei risultati [3].

E' importante che il progettista possa conoscere nel dettaglio l'incremento di temperatura, in valore assoluto, all'interno della massa del protettivo e dell'elemento protetto così da conoscere in ogni istante lo stato degli strati più interni del campione. In questo modo risulta più facile formulare ipotesi ragionevoli sul comportamento di elementi anche con spessori inferiori a quelli sottoposti a prova, considerando, però, anche le diverse dispersioni e la diversa inerzia termica dovuta alla massa da riscaldare. Inoltre questi dati sono molto utili per gli elementi che perdono acqua durante l'esposizione al fuoco: solo conoscendoli dettagliatamente è possibile estendere i risultati e valutare in modo corretto il ritardo di riscaldamento dovuto all'evaporazione che avviene a temperatura costante, ma con tempi diversi in funzione della quantità di calore

disponibile al passaggio di stato ed alle temperature in gioco. Occorre ricordare che i dati ottenuti con un'esposizione al fuoco di tipo standard non possono essere utilizzati in casi diversi (incendi da idrocarburi, all'interno di tunnel, in difetto di ossigeno, in parete esterna, ecc.). Risulta quindi necessario avere a disposizione prove e collaudi di esposizione all'incendio con curve diverse e specifiche per l'utilizzo finale dell'elemento. Dai risultati di prova si potranno poi compilare tabelle di pratico utilizzo definendo, con criteri prudenziali, i parametri principali di progetto in funzione delle classi di resistenza richieste.

1.2 METODO TABELLARE

Il metodo tabellare si basa sul confronto di alcune caratteristiche dell'elemento strutturale (copriferro, armature,...) con quelle di elementi di riferimento la cui sicurezza antincendio è nota e tabellata. Se l'elemento soddisfa le limitazioni e i requisiti che le normative impongono per la corretta applicabilità del metodo non sono necessarie ulteriori verifiche. Questo metodo è ammesso da varie normative internazionali: anche in Italia si fa riferimento alla verifica tabellare secondo la Circolare del Ministero dell'Interno n. 91 del 14/09/61 [2], basata su prove sperimentali al forno, emanata per le costruzioni in acciaio ma utilizzata di fatto anche per le costruzioni in cemento armato. Il dimensionamento degli spessori e delle protezioni da adottare per le varie classi di strutture e nei vari casi delle pareti, dei solai, degli elementi strutturali in acciaio e degli elementi compressi è indicato su specifiche tabelle.

1.3 METODO ANALITICO

L'impossibilità di avere dati su elementi di grandi dimensioni, a causa delle limitazioni geometriche dei forni e di simulare curve di temperatura con rami discendenti, ha incoraggiato lo sviluppo di procedure di calcolo da utilizzare parallelamente o in sostituzione ai forni stessi. Nel 1989 l'Ente Italiano di Unificazione UNI ha emanato alcune norme, aggiornate in seguito nel 2001 [4], in cui viene proposto un metodo di valutazione analitico in alternativa a quello sperimentale. Tale approccio fornisce solo lo strumento necessario alla verifica del rischio di collasso (resistenza meccanica R), può essere convenientemente usato in molti casi per le verifiche di isolamento (criterio di isolamento I), mentre non dà alcuna indicazione per la capacità di tenuta (criterio di tenuta E). Con tale metodo è possibile calcolare la distribuzione delle temperature all'interno dell'elemento per vari tempi di esposizione al fuoco e con diverse condizioni al contorno.

Per effettuare l'analisi del campo termico all'interno di una sezione bisogna utilizzare le equazioni relative al trasferimento di calore dai gas caldi all'elemento strutturale. La trasmissione del calore dipende da un gran numero di grandezze, spesso correlate fra loro: condizioni ambientali, tipo di combustibile, ventilazione, conduzione, radiazione, convezione, umidità, ecc. L'interazione fra queste grandezze è difficilmente valutabile ed esprimibile e per questo è necessario operare delle semplificazioni che permettano lo studio analitico del fenomeno.

Per la determinazione della distribuzione delle temperature occorre definire le modalità di scambio termico tra la struttura e l'ambiente (flusso termico per conduzione, convezione o irraggiamento). Nota la quantità di calore fornita all'elemento, bisogna conoscere la distribuzione delle temperature al suo interno, in funzione del tempo, integrando l'equazione di Fourier per condizioni non stazionarie, senza trasferimento di massa:

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

in cui compaiono la densità ρ , il calore specifico c , la conduttività interna λ del materiale e la temperatura T in funzione del tempo e delle coordinate spaziali. L'ipotesi di uniforme esposizione al fuoco degli elementi strutturali lungo tutto il loro sviluppo longitudinale fa sì che il regime di propagazione del calore non sia spaziale, ma piano, semplificando di conseguenza anche l'applicazione dell'equazione di Fourier alle sole sezioni trasversali.

Le proprietà termo-fisiche dei materiali e le condizioni al contorno dipendono fortemente dalla temperatura: il problema della trasmissione del calore risulta non-lineare, non è possibile applicare la sovrapposizione degli effetti e si può ricavare la soluzione in forma chiusa solo per casi particolarmente semplici e di scarso interesse applicativo. In generale bisogna ricorrere a metodi risolutivi semplificati ed approssimati, compatibili con il problema in esame e con l'errore accettabile. Ad esempio il calore specifico e la conduttività termica, nel caso dell'incendio, dove l'intervallo delle temperature è molto ampio (da 0 °C a 1100 °C circa), non si possono considerare costanti; inoltre si manifestano fenomeni di evaporazione dell'umidità interna, intorno ai 100 °C per l'acqua assorbita ed ai 500 °C per l'acqua legata chimicamente, che causano dei picchi nella curva di variazione del calore specifico con la temperatura [5].

Esistono diversi programmi per elaboratori elettronici in grado di risolvere il problema della propagazione del calore nelle sezioni degli elementi strutturali in condizioni non stazionarie. Il FIREST3 dell'Università di Berkeley e il TASEF dell'Università del Lund usano il metodo degli elementi finiti, mentre altri programmi, come quello di Rudolph e Muller utilizzano quello delle differenze finite. Tali programmi sono in grado di valutare la storia della distribuzione delle temperature di elementi a 1, 2 o 3 dimensioni, costituiti da materiali con diverse caratteristiche termo-fisiche, esposti al fuoco [6]. La tecnica risolutiva del FIREST3 – il programma utilizzato per le simulazioni numeriche della presente comunicazione – è basata sul metodo degli elementi finiti, accoppiato con un'integrazione al passo nel tempo: esso consente la determinazione accurata delle temperature anche nei componenti strutturali di geometria complessa e non convenzionale per i quali la applicazione degli altri metodi è estremamente complicata. Il metodo agli elementi finiti permette inoltre di tener conto della non omogeneità dei materiali, della dipendenza delle proprietà termofisiche e delle condizioni di scambio termico tra fonte di calore ed elemento strutturale [7, 8]. La sezione in esame viene suddivisa in un numero prefissato di elementi e si suppone che l'andamento della temperatura incognita all'interno di ogni elemento sia funzione dei valori della temperatura ai nodi dell'elemento. La non-linearità del problema richiede un processo di soluzione iterativo. L'incendio è modellato tramite una curva che descrive la storia tempo-temperatura: questa curva, definita per punti, può seguire l'andamento di un incendio convenzionale, parametrico o reale. Usualmente, la curva utilizzata per definire l'incendio convenzionale è la ISO 834, proposta anche nella norma UNI 7678, la cui espressione è:

$$T - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

in cui T_0 rappresenta la temperatura ambiente e t il tempo espresso in minuti. Generalmente l'ambiente circostante all'elemento strutturale di cui si fa l'analisi e le modalità di sviluppo e di propagazione dell'incendio non vengono prese in considerazione. L'output del programma è costituito dalle temperature dei nodi e degli elementi del reticolo di calcolo utilizzato per tutti gli intervalli di tempo desiderati.

2. VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO DEI SOLAI MISTI

La classificazione degli elementi strutturali per quanto riguarda le loro prestazioni alle alte temperature avviene attraverso la valutazione della loro capacità di resistenza, tenuta ed isolamento (REI), espressa in minuti (REI 120, E 90...). La capacità portante R è la capacità di un elemento costruttivo di essere sottoposto all'azione del fuoco su una o più facce per un periodo determinato di tempo, senza alcuna perdita di stabilità strutturale; la tenuta o integrità E è la capacità di un elemento separante o di compartimentazione di essere sottoposto all'esposizione termica solo su una faccia, senza trasmissione di fiamme o gas caldi dal lato non esposto al calore; l'isolamento termico I è la capacità di un elemento di essere sottoposto all'azione del fuoco solo su una faccia senza significativo trasferimento di calore dal lato esposto a quello non esposto all'incendio. A tale proposito rivestono una particolare importanza le strutture portanti orizzontali come i solai, poiché hanno una funzionalità anche di compartimentazione (REI).

Nelle normative tecniche internazionali la tematica della protezione contro il fuoco sta acquistando sempre più spazio ed interesse: si stanno compilando, infatti, sezioni specifiche sulla resistenza alle alte temperature e sui metodi per valutarla. Anche nella letteratura internazionale sono presenti alcuni interessanti studi sulle strutture miste che dimostrano la loro elevata resistenza anche ad incendi molto severi e prolungati se ben progettate. Inoltre i giunti fra i vari elementi, spesso considerati i veri e propri punti critici, possono soddisfare perfettamente i requisiti REI se opportunamente realizzati o trattati, specialmente con elementi continui e con bassi ritiri lineari alle alte temperature. Naturalmente i presupposti fondamentali rimangono la conoscenza del loro comportamento all'incendio e l'uso di protettivi che abbiano un sufficiente grado di isolamento e soprattutto che assolvano il loro compito fino al termine dell'incendio (o fino al tempo previsto) senza deterioramenti, distacchi o rotture. Nella normativa italiana vigente [2] si determina la resistenza al fuoco dei solai attraverso gli spessori minimi definiti nella Tabella 3, "Spessore minimo dei solai", in essa contenuta: sono considerate solo alcune delle tipologie di solaio attualmente utilizzate, tenendo eventualmente in considerazione l'applicazione di una quantità di materiale protettivo necessaria a raggiungere lo spessore minimo riportato nella tabella.

La valutazione dei solai misti rispetto alle norme non è sempre facile: infatti, le norme di calcolo sono di difficile interpretazione quando gli elementi strutturali da valutare sono di tipologia diversa da quelle definite; inoltre le strutture da solaio sono composte da una geometria complessa (basti pensare alla forometria degli elementi in laterizio) e da materiali con caratteristiche fisiche piuttosto differenti (calcestruzzo gettato o prefabbricato, laterizio, polistirolo, acciaio): ne consegue che un calcolo teorico, anche se rigoroso, può condurre a risultati illusori sul comportamento globale della struttura reale sottoposta ad incendio. La risposta a questi problemi viene da un'indagine sperimentale sufficientemente estesa per

poter analizzare un campione vasto delle possibili soluzioni esistenti sul mercato valutando il comportamento di ogni componente. I solai scelti nel nostro studio sono i pannelli alveolari in c.a.p., i solai in latero – cemento ed i solai a predalles.

Per la verifica analitica della capacità portante dei solai si può utilizzare il metodo della sezione ridotta proposto dalla UNI 9502: la resistenza al fuoco al tempo θ è calcolata riducendo puntualmente le aree resistenti del calcestruzzo e dell'acciaio con i fattori di riduzione $k_c(\theta)$, $k_s(\theta)$, $k_p(\theta)$ indicati dalla norma stessa (Fig. 1).

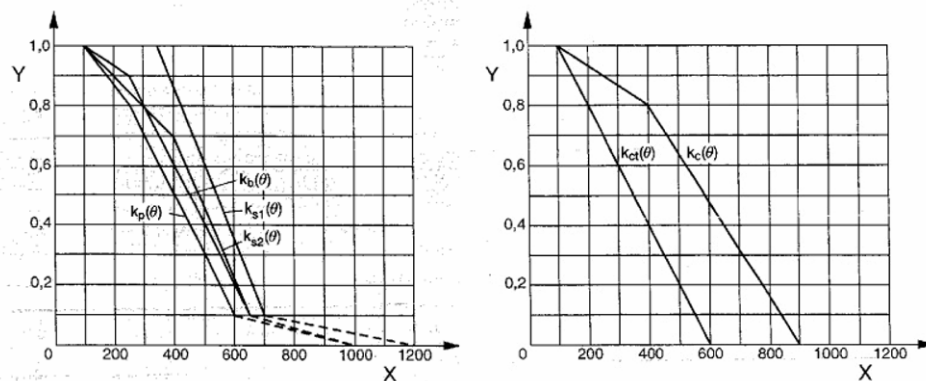


Fig. 1. Grafici per la determinazione dei coefficienti di riduzione riportati nella UNI 9502.

Stabilita così la sezione equivalente (la sezione la cui area ridotta ha nel calcolo a freddo la stessa resistenza dell'area originaria a caldo), la verifica allo stato limite ultimo può essere eseguita a temperatura ordinaria su tale sezione ridotta senza applicare al conglomerato cementizio il coefficiente riduttivo della resistenza per i carichi di lunga durata.

2.1 PANNELLI ALVEOLARI IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

I solai alveolari costituiscono una tipologia particolare di impalcati in solo calcestruzzo con vuoti di alleggerimento, solitamente precompressi [11]. Nel cemento armato precompresso gli effetti dell'alta temperatura sono più evidenti rispetto al cemento armato normale poiché la perdita di tensione da parte dei trefoli modifica la capacità portante in modo determinante. Le alte temperature riducono la resistenza che provoca un rapido collasso della struttura e lo spalling, causato dalla decomposizione del calcestruzzo con conseguente distacco di strati di conglomerato sempre più consistenti e la successiva perdita di capacità portante del rinforzo. I calcestruzzi sono confezionati con curve granulometriche controllate e costanti nel tempo, con un basso rapporto a/c, ben compattati e con elevate caratteristiche fisico-meccaniche; le armature in acciaio armonico hanno resistenze e caratteristiche di rilassamento certificate e copriferro costantemente controllato, risultando quindi particolarmente protette agli agenti aggressivi ed al fuoco.

2.2 SOLAI IN LATERO CEMENTO

Sono elementi formati da laterizi, calcestruzzo ed acciaio con diverse geometrie e caratteristiche costruttive. Generalmente i travetti hanno un interasse di 50 cm ed una larghezza di 10 cm, l'altezza del solaio è di 16÷30 cm, con una soletta di 4÷6 cm. I travetti hanno un'armatura lenta e sono realizzati con una suola in calcestruzzo in cui è annegata una struttura metallica preconfezionata con organizzazione spaziale a traliccio, rivestita da un fondello in laterizio allo scopo di conferire una omogeneità all'intradosso del solaio [12]. In caso d'incendio il comportamento è ovviamente diverso in funzione del tipo di elemento considerato, ma, in prima approssimazione, si deve considerare quello degli elementi di acciaio e quello degli elementi in laterizio che, durante lunghe esposizioni, tendono a rompersi a causa della differenza di temperatura tra faccia calda e faccia fredda. In particolare le dilatazioni indotte dal gradiente termico comportano una rottura della pignatta che, essendo realizzata in laterizio forato, è molto più fragile da questo punto di vista, con conseguente limitazione delle caratteristiche di isolamento.

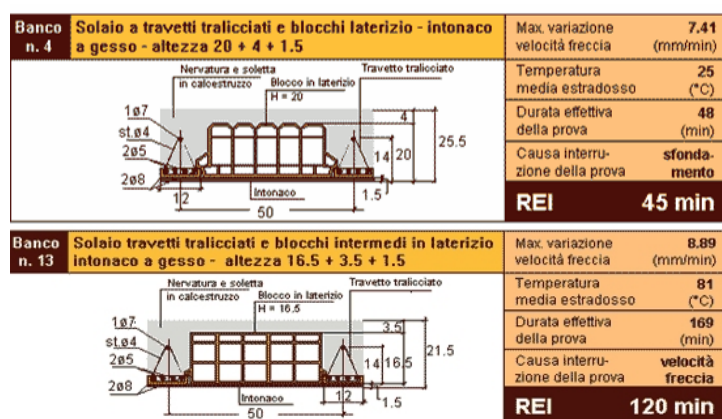
2.3 PREDALLES

Il solaio a predalles può offrire una notevole resistenza al fuoco e per questo motivo trova frequente impiego per coperture di garage. E' possibile la produzione di lastre nella versione antincendio con spessore pari a 6.5 cm ed adeguato ricoprimento delle armature. In caso di esposizione al fuoco viene meno la capacità portante del solaio per la perdita di resistenza dell'acciaio (nella sezione tesa) e del calcestruzzo (nelle sezioni

2.4 CALIBRAZIONE DELLA PROCEDURA DI MODELLAZIONE ANALITICA DEI SOLAI

Le lastre di solaio, di dimensioni di 450 x 250 cm, sono state fatte stagionare per oltre tre mesi. I pannelli sono stati semplicemente appoggiati sulla bocca superiore del forno sperimentale in modo da realizzare una camera di combustione chiusa, dove esporre al fuoco la superficie di intradosso del solaio. Sull'estradosso del solaio sono state applicate alcune termocoppie insieme a due trasduttori di spostamento per rilevare l'inflessione durante la prova e per stabilire l'istante di collasso del solaio. I prototipi di solaio sono stati caricati con due martinetti idraulici che hanno realizzato nella parte centrale, con un sistema di aste e bilancieri, un momento esterno costante. Gli elementi strutturali sono stati sottoposti ad una storia di temperatura nella superficie di intradosso in accordo alla curva standard e relative tolleranze. Dopo l'inizio delle prove il valore della resistenza al fuoco REI è stato determinato per ciascun solaio 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).

Sono stati considerati in particolare i pannelli di solaio indicati in [9] con il n. 4 e n. 13 (Fig. 2), quelli cioè con travetti tralicciati rispettivamente con intonaco normale (malta bastarda) ed intonaco a gesso.



Come detto precedentemente, la conoscenza della distribuzione delle temperature all'interno delle sezioni al variare del tempo di esposizione all'incendio normalizzato è uno degli obiettivi più importanti dell'indagine sperimentale: per una chiara comprensione del comportamento delle strutture esposte alle alte temperature, è utile discutere in dettaglio i risultati della mappatura termica sperimentale, effettuata per il pannello attraverso 16 termocoppie sistemate come in figura 3, utilizzando poi i risultati per calibrare il modello analitico.

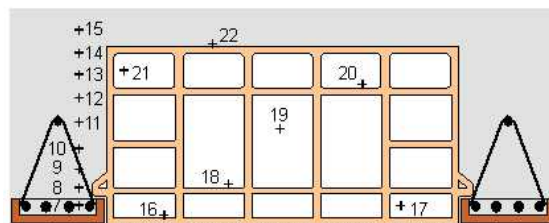


Fig. 3. Disposizione delle termocoppie.

Dopo 120 minuti dall'inizio della prova, sulla parte inferiore del blocco, si è registrata una temperatura pari a 600 °C che si è portata a valori di picco superiori a 740 °C dopo 165 minuti: tali valori provocano danneggiamenti localizzati nei blocchi. La temperatura rilevata dalla termocoppia in corrispondenza dell'armatura, durante l'esposizione al fuoco, è sufficientemente lontana dal valore critico, arrivando dopo 165 minuti a 280 °C: questo valore comporta una riduzione della resistenza a trazione dell'acciaio minore del 15%. Ciò evidenzia l'efficacia dello strato complessivo a protezione delle armature formato da 1 cm di copriferro più 0.8 cm del laterizio del fondello e 1.5 cm di intonaco in gesso con aderenza migliorata da un additivo. Per quanto riguarda la zona compressa, le termocoppie posizionate sulla parete superiore del blocco e nella nervatura evidenziano che la temperatura finale nella soletta non raggiunge valori tali da dover ipotizzare riduzioni significative di resistenza a compressione nel conglomerato e nel laterizio.

Del solaio considerato è stata successivamente valutata per via analitica la distribuzione della temperatura.

La geometria del modello del solaio in latero-cemento sono quelle del provino utilizzato per la prova sperimentale. I travetti tralicciati sono larghi 12 cm e l'interasse tra loro è pari a 50 cm. L'armatura è costituita dal 2 ϕ 5 del traliccio e 2 ϕ 8 di armatura aggiuntiva. Il solaio è alto 20 cm più 1.5 cm di intonaco in gesso. Per ragioni di simmetria è stato sufficiente modellare solo metà del solaio. La sezione è stata discretizzata con elementi di piccole dimensioni, più fitti dove lo spessore del materiale è minore (Fig. 4): il modello numerico risulta composto da 754 nodi e 700 elementi.

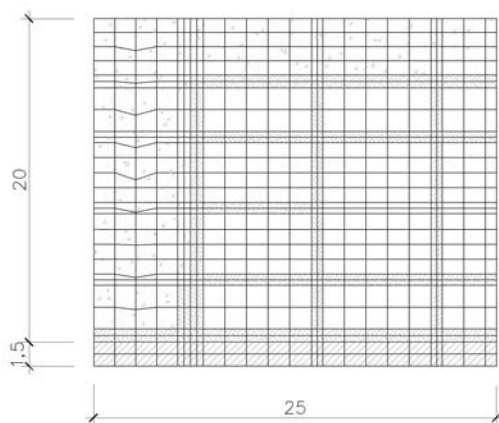


Fig. 4. Schema del solaio in latero - cemento.

Per conoscere la distribuzione delle temperature all'interno della sezione si è utilizzato il programma FIREST3. Nel file di input sono stati definiti i valori della conduttività, della densità e del calore specifico al variare della temperatura fino a 1200 °C dei diversi materiali che compongono l'elemento (calcestruzzo, laterizio, gesso e aria), ricavati dalla UNI 9502 e dalla letteratura esistente [10].

Il flusso di calore è diretto verso l'alto: all'intradosso la temperatura varia secondo la curva ISO 834, mentre all'estradosso essa è stata fatta variare nel corso di più elaborazioni consecutive per calibrare il modello rispetto ai risultati sperimentali disponibili, ipotizzando tre diversi valori di temperatura: 100, 80, 20 °C.

Nella realizzazione della mesh si è tenuto conto della disposizione delle termocoppie presenti nel campione sperimentale: a ciascuna di esse è stato fatto corrispondere un nodo. Si possono così confrontare puntualmente i risultati della modellazione analitica con le evidenze sperimentali.

I vuoti all'interno del laterizio sono stati modellati come gli altri materiali suddividendoli in elementi bidimensionali caratterizzati da opportuni parametri termici.

Nel travetto i valori delle due termocoppie superiori e delle due inferiori forniscono i dati di maggior interesse. I punti interni hanno temperature intermedie non molto distanti fra loro così come quelli all'estradosso, mentre differenze maggiori sono presenti in corrispondenza dell'intradosso.

Le temperature all'interno del laterizio sono prese sulla superficie superiore dei quattro setti che lo compongono. Le differenze tra dati sperimentali ed analitici sono minori di quelle negli altri punti selezionati. Si è valutata anche la variazione di temperatura all'estradosso della sezione. Ovviamente questo valore risente molto delle condizioni al contorno scelte per l'estradosso: la scelta di una temperatura esterna di 20 °C porta ad una sottostima dei valori sperimentali.

Nella figura 5 sono riportati alcuni dei grafici relativi a dati ottenuti con la modellazione analitica e dati relativi alle prove sperimentali. Dal loro confronto si evince che il solaio modellato con una temperatura all'estradosso di 80 °C è quello che maggiormente si avvicina al comportamento reale.

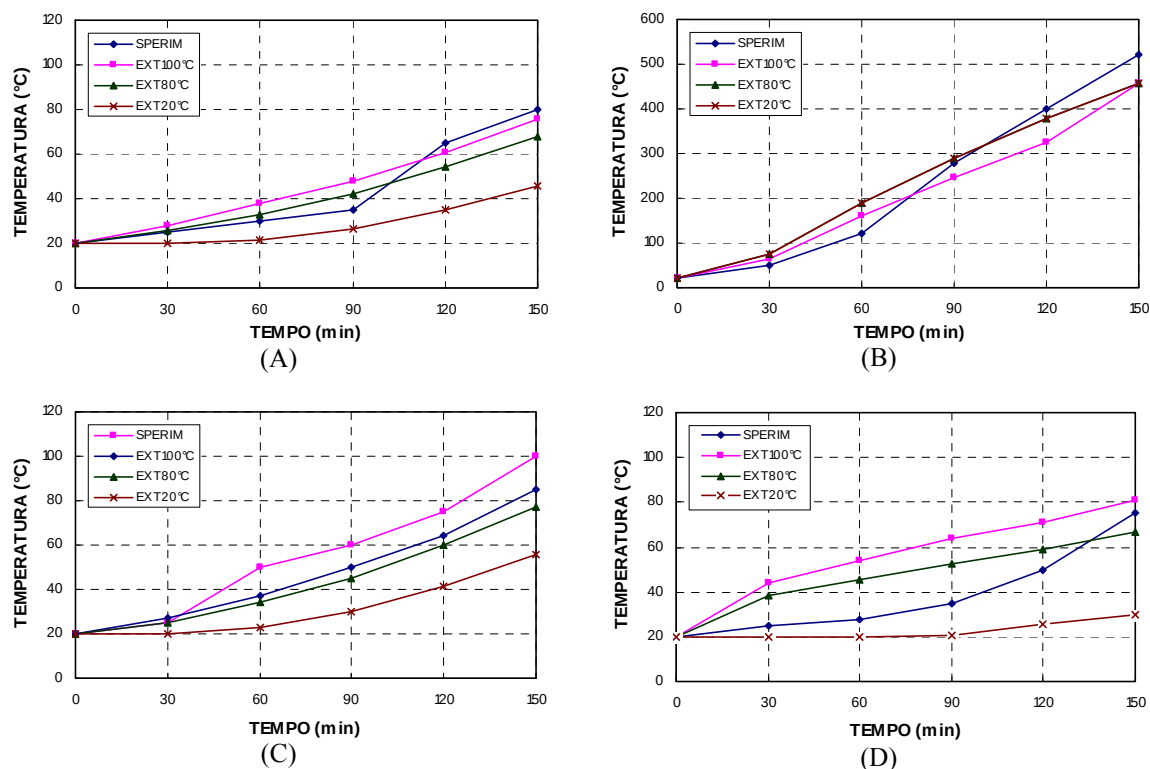


Fig. 5. Andamento della temperatura: (A) termocoppia n. 14, (B) termocoppia n. 18, (C) termocoppia n. 21, (D) in corrispondenza dell'estradosso.

2.4.1 Modellazione analitica del solaio in latero – cemento

L'analisi termica effettuata per via numerica con riferimento a tutti e tre i modelli di solaio con differenti temperature all'estradosso, descritti precedentemente, anche se con delle piccole differenze, ha evidenziato un comportamento comune: l'intonaco di gesso ostacola la propagazione del calore e nel suo spessore si concentrano le temperature più alte. Esso impedisce che la temperatura all'interno raggiunga valori elevati che potrebbero compromettere la resistenza del solaio. La figura 6 riporta le mappe delle temperature ad intervalli regolari di trenta minuti fino ad arrivare a 180 minuti, nel caso di estradosso a 80 °C. Il momento resistente del solaio modellato rimane sostanzialmente inalterato sino alla fine della simulazione.

Nelle situazioni reali l'integrità della protezione offerta dall'intonaco all'intradosso non è sempre garantita. Per esaminare l'influenza di tale elemento sono stati analizzati altri due casi. Nel primo è stato ipotizzato un intonaco in conglomerato cementizio di spessore 1.5 cm mentre nel secondo è stata ipotizzata la completa mancanza del rivestimento protettivo. In entrambi i casi, anche se con intensità differenti, la diffusione delle temperature risulta molto veloce ed il momento resistente diminuisce rapidamente già dopo pochi minuti.

Il grafico della figura 7 riporta l'andamento del momento resistente nel caso di solaio in latero - cemento con intonaco di gesso, con intonaco di conglomerato cementizio e senza intonaco e lo confronta con il momento sollecitante calcolato con la combinazione di carico definita dalla normativa UNI 9502, per l'azione incendio, considerando una luce di 4 m. Il coefficiente di combinazione relativo alle azioni variabili è quello corrispondente alla prima categoria (locali di abitazione, alberghi, uffici).

È evidente come la variazione del momento resistente nel tempo sia molto differente nei tre casi. Il solaio con il rivestimento in gesso possiede resistenza al fuoco minima di 180 minuti; quello con il rivestimento in calcestruzzo garantisce un momento resistente maggiore di quello causato dal carico fino a 120 minuti; quello senza materiale protettivo fino a 45 minuti. La presenza di uno spessore protettivo è quindi determinante per la resistenza dei solai e di tutti gli elementi strutturali in generale.

Per quanto riguarda la modellazione analitica, ulteriori conferme si hanno analizzando i dati relativi al solaio in latero – cemento del pannello n. 4: nella prova sperimentale il collasso si è verificato dopo 45 minuti (Fig. 2) a causa del distacco prematuro dell'intonaco e del cedimento dei blocchi in laterizio, lo stesso tempo che ha fornito la simulazione analitica nel caso di solaio senza intonaco (Fig. 7).

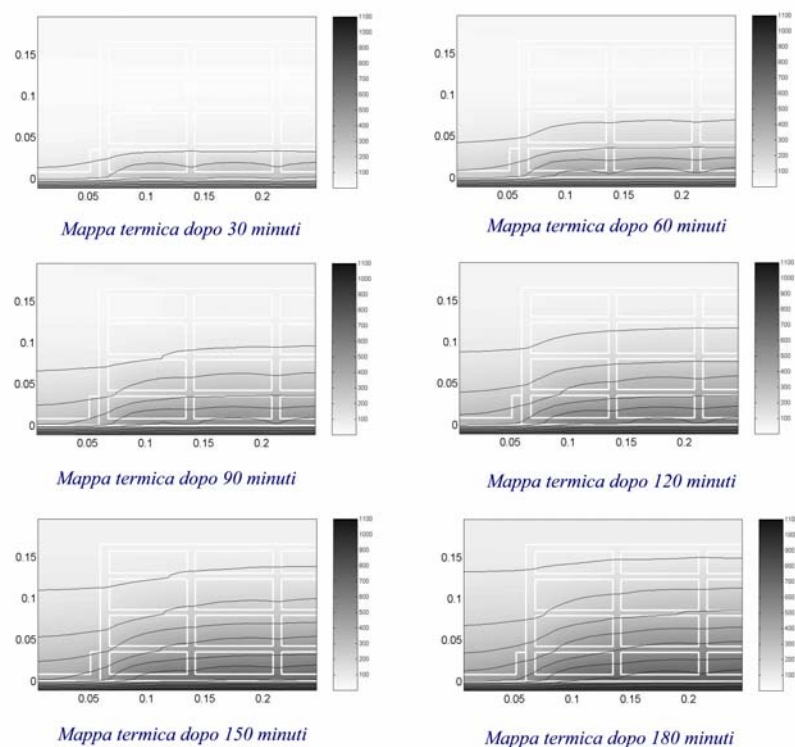


Fig. 6. Mappe Termiche del solaio in latero - cemento con $T_{ext} = 80^{\circ} C$.

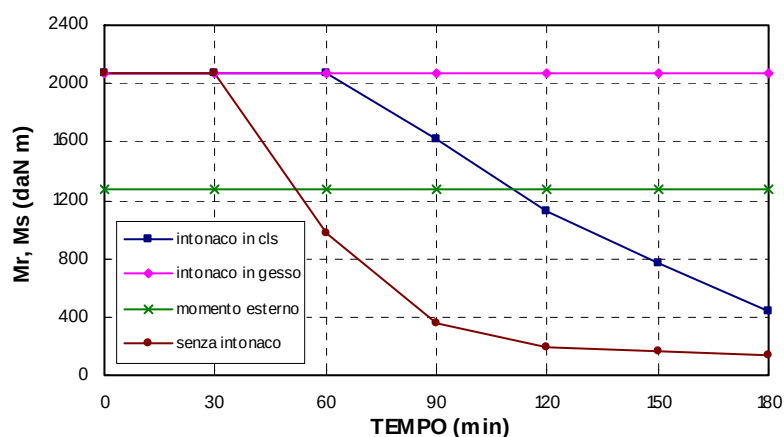


Fig. 7. Variazione del momento resistente nel tempo e confronto con il momento sollecitante.

2.4.2 Modellazione analitica del solaio a predalles

Si è modellata per simmetria solo metà di una piastra di 120 cm di larghezza e 20 cm di altezza, con la soletta superiore ed inferiore di 4 cm (Fig. 8).

Il modello è stato suddiviso in 612 elementi bidimensionali con un totale di 666 nodi. I blocchi in polistirolo sono larghi 45 cm e alti 12 cm. Anche in questo caso si sono definite nel file di input del FIREST3 le caratteristiche termiche al variare della temperatura dei materiali che lo costituiscono (calcestruzzo e polistirolo). Poiché a $250^{\circ} C$ il polistirolo inizia la sua decomposizione, oltre tale temperatura le sue caratteristiche termiche sono state sostituite con quelle dell'aria. La variazione della distribuzione della temperatura al variare del tempo è riportata nella figura 9.

Nella figura 10 è rappresentata la variazione del momento resistente del solaio a predalles nel tempo. Dal confronto con il momento sollecitante si può ricavare la resistenza al fuoco dell'elemento pari a R60. Anche in questo caso il momento sollecitante è stato calcolato utilizzando la combinazione di carico fornita dalla normativa UNI 9502 per una luce di 4 m. È stata considerata un'armatura inferiore complessiva di 4.12 cm^2 , che corrisponde a $13\phi 5$ e $2\phi 10$ nelle nervature esterne, posta a 2 cm dall'intradosso.

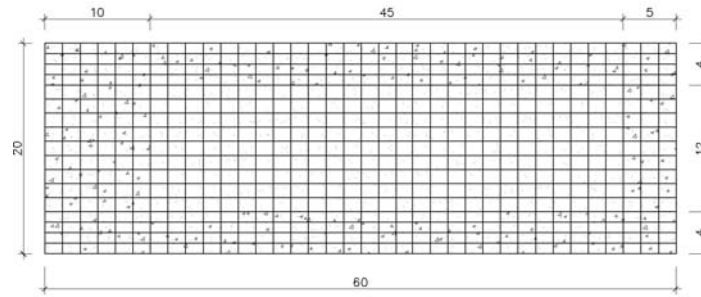


Fig. 8. Schema del modello del solaio a predalles.

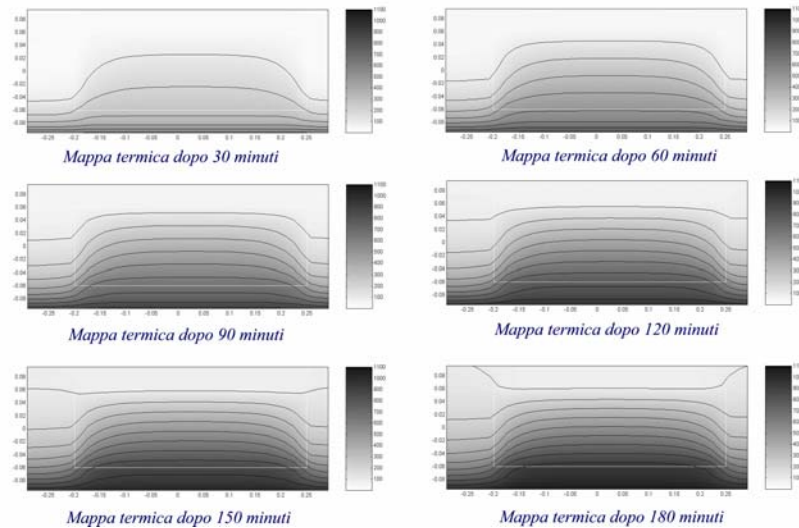


Fig. 9. Mappe Termiche del solaio a predalles.

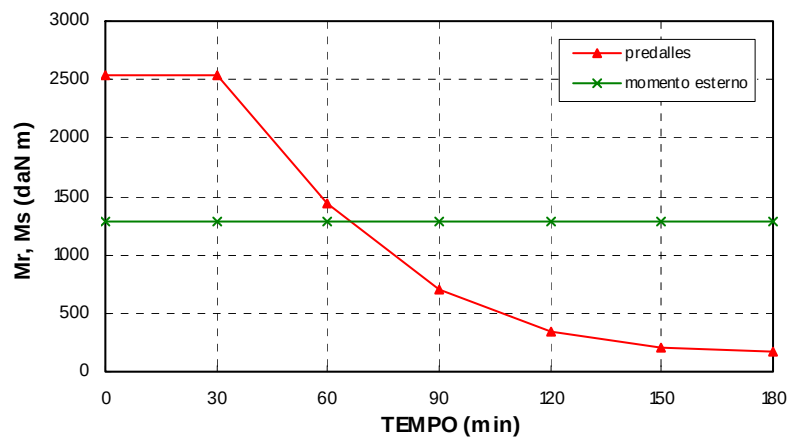


Fig. 10. Variazione del momento resistente nel tempo e confronto con il momento sollecitante.

2.4.3 Modellazione analitica del solaio alveolare

L'elemento di solaio alveolare analizzato è largo 120 cm ed alto 20 cm con fori di diametro 15 cm. L'armatura è costituita da 6 trefoli da 3/8 di pollice per un totale di 3.13 cm² di area posta a 4.4 cm dall'intradosso. Il tiro iniziale per ciascun trefolo è pari a 7410 daN, che a causa della deformazione elastica, del ritiro, dello scorrimento viscoso del calcestruzzo e del rilassamento dell'acciaio si riduce del 24%. I vuoti sono stati modellati in due differenti modalità. Nella prima sono stati modellati con elementi solidi bidimensionali caratterizzati da opportuni parametri termici. In tal caso il modello è costituito da 1631 nodi e 1640 elementi shell. La figura 11 mostra la variazione della temperatura in funzione del tempo a 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minuti.

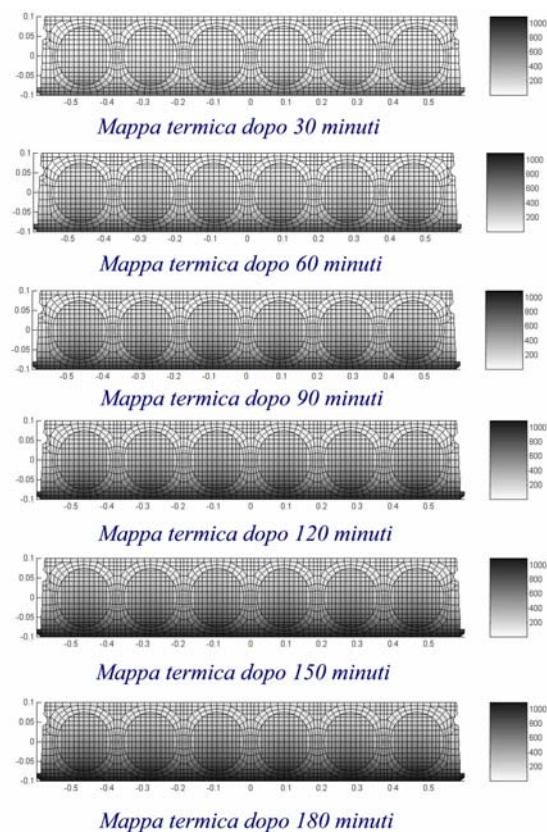


Fig. 11. Mappe termiche del solaio alveolare con fori discretizzati.

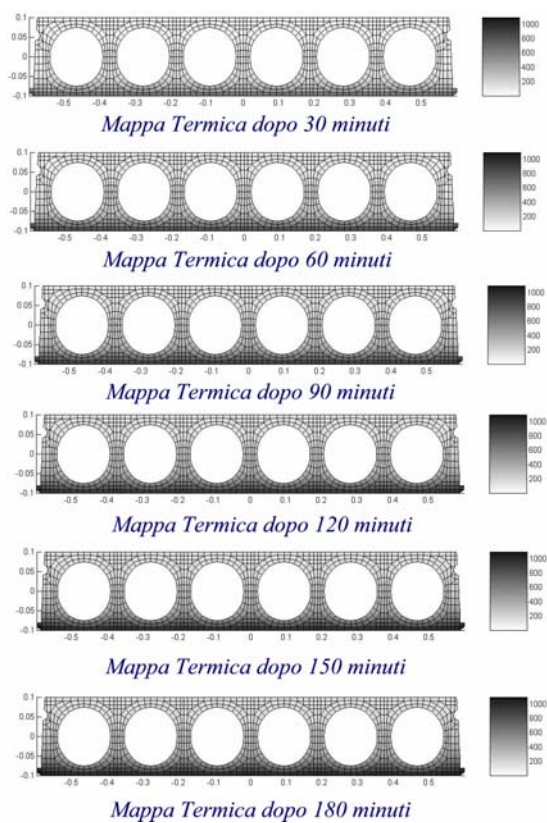


Fig. 12. Mappe termiche del solaio alveolare senza fori discretizzati.

Nel secondo modello l'aria all'interno dei fori è stata considerata come sola condizione al contorno ipotizzando la sua temperatura costante. Il modello così realizzato risulta costituito da 1013 nodi e 872 elementi shell. La figura 12 mostra la variazione della temperatura in funzione del tempo a 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minuti.

Nella figura 13 sono riportati per confronto i momenti resistenti al variare della temperatura relativi alle due simulazioni. Il momento resistente del solaio alveolare del primo modello decresce con una pendenza minore di quella del secondo modello. Calcolando il momento sollecitante secondo la combinazione di carico prevista dalla UNI 9502 per una luce di 6 m, entrambi i modelli dimostrano di possedere una resistenza R90.

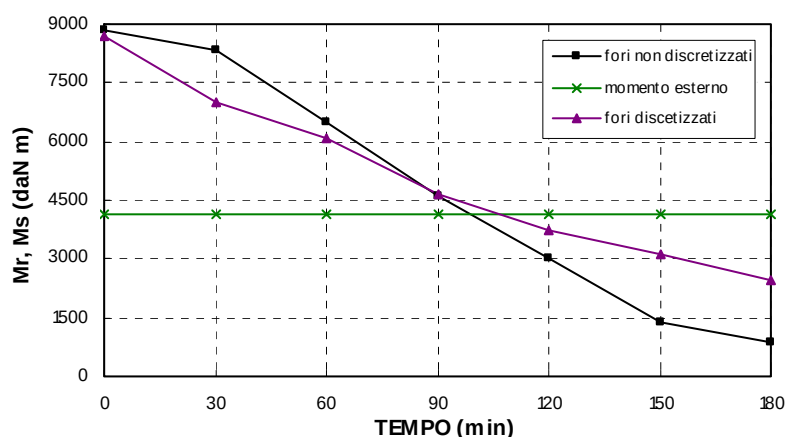


Fig. 13. Variazione del momento resistente nel tempo e confronto con il momento sollecitante

2.4.4 Confronto tra le diverse tipologie di solaio analizzate

I momenti resistenti ottenuti in precedenza, normalizzati rispetto ai rispettivi momenti resistenti “a freddo” sono stati messi tra loro a confronto. In figura 14 sono riportati i dati di resistenza relativi a solai di pari altezza. Come prevedibile le prestazioni del solaio in latero – cemento non protetto decadono velocemente, anche se fino a 30 minuti la sua resistenza rimane costante. Il solaio a predalles ha un comportamento ad esso simile, anche se con una minore velocità di degrado. Il solaio alveolare ha invece una perdita di resistenza più graduale, motivata probabilmente dal maggiore copriferro delle armature. Le elevate proprietà isolanti dell'intonaco in gesso proteggono efficacemente l'integrità strutturale del solaio in latero – cemento per il quale non si evidenzia alcun degrado della capacità portante.

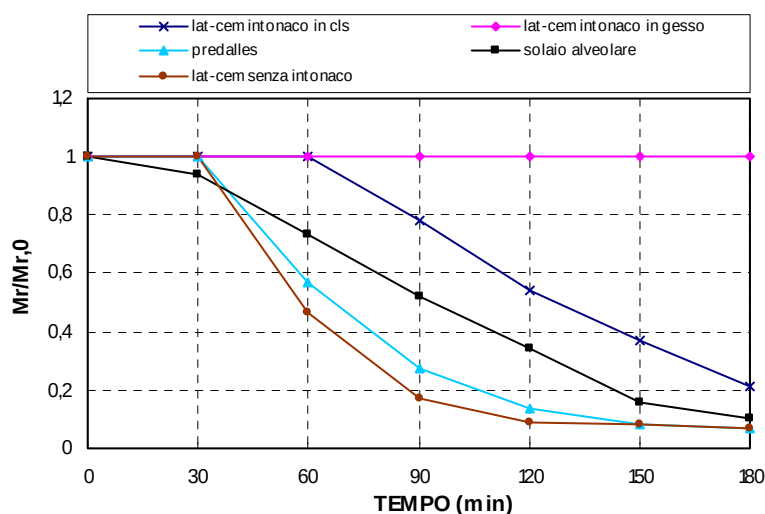


Fig. 14. Confronto momenti resistenti delle tipologie analizzate.

CONCLUSIONI

Lo studio del comportamento al fuoco dei solai misti condotto attraverso il confronto tra i metodi di verifica disponibili (sperimentale, analitico e tabellare) ha permesso di ottenere diversi risultati, per quanto riguarda sia l'attendibilità di alcune procedure di verifica, sia la valutazione della sicurezza al fuoco di elementi strutturali. Dai risultati delle prove sperimentali eseguite si può ricavare che le altezze strutturali dei solai in latero – cemento di corrente uso nell'edilizia sono più che sufficienti per garantire il requisito di isolamento e di tenuta. Dalle simulazioni effettuate risulta inoltre di fondamentale importanza, per ottenere classi di resistenza elevate, proteggere le armature dagli effetti delle alte temperature per il periodo di tempo previsto: ciò può essere ottenuto aumentando gli spessori di copriferro (soluzione che però limita sensibilmente le prestazioni statiche dei solai) oppure utilizzando strati protettivi. Infatti, il solaio alveolare ha dimostrato di avere prestazioni migliori rispetto alle altre tipologie, a parità di altezza, a causa della migliore protezione delle armature precomprese assicurata da un elevato copriferro.

La verifica analitica riesce ad eliminare alcuni svantaggi delle prove sperimentali, quali i limiti geometrici del campione, dati dalle dimensioni non elevate dei forni di prova, la difficoltà di realizzare le reali condizioni di vincolo dell'elemento, l'impossibilità di avere curve di riscaldamento non solo monotone crescenti (l'incendio reale non lo è), i costi elevati, e a fornire dati nel caso non ci siano tabelle o prove sperimentali cui fare riferimento. La normativa italiana non contempla, infatti, tutte le tipologie di solaio attualmente utilizzate nell'edilizia e occorrerebbe realizzare un numero troppo elevato di prove sperimentali per considerare tutte le variabili che influenzano la resistenza al fuoco dei solai, che, oltre alla geometria e alla natura dei materiali costituenti, riguardano anche il carico, il tipo di vincolo e le condizioni al contorno. I limiti matematici della procedura analitica riguardano invece la corretta modellazione di fenomeni quali la perdita di tenuta, di aderenza delle armature, lo spalling, i fenomeni locali di danneggiamento o l'insufficiente duttilità: tutti meccanismi valutabili solo con una campagna sperimentale mirata, sicuramente meno impegnativa di uno studio sistematico delle caratteristiche di resistenza di ogni tipologia di elemento strutturale. Un altro risultato ottenuto nel presente studio riguarda il ruolo fondamentale degli spessori dei materiali protettivi dei solai nel caso si abbia la necessità di aumentare la loro resistenza al fuoco. Infatti, quando un elemento strutturale non è in grado di soddisfare la resistenza al fuoco richiesta dal progetto antincendio o dalle norme cogenti, si può intervenire in tre modi: l'aumento dello spessore di calcestruzzo (sui ferri se il problema è la R o sui ferri e/o sull'estradosso se il problema è la I), la riduzione del carico unitario (generalmente aumentando armatura e rinforzi) ovvero la protezione con materiali protettivi adeguatamente dimensionati. Mentre i primi due comportano un intervento diretto sulla costruzione dell'elemento strutturale che non è sempre possibile sia per motivi economici che progettuali, il terzo risulta di più facile realizzazione, anche nel caso di riqualificazione o adeguamento di edifici preesistenti. In particolare, nel caso di solai misti, l'uso corretto dello spessore protettivo consente di ottenere i risultati desiderati conservando le caratteristiche di snellezza e di leggerezza degli elementi utilizzati non modificando le scelte di progetto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Mazziotti, Resistenza al fuoco dei prodotti da costruzione, *ANTINCENDIO* (Luglio 1998).
- [2] Circolare n. 91 del 14.09.1961, Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile.
- [3] M. Caciolai, Resistenza al fuoco degli elementi costruttivi: la verifica sperimentale, *ANTINCENDIO* (Febbraio 2000).
- [4] UNI 9502, Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, Maggio (2001).
- [5] M. Collepari, *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, HOEPLI Milano (1991).
- [6] R. Iding, B. Bresler, Z. Nizamuddin, *FIRES-T3 – A computer program for fire response of structures – Thermal*, Fire Research Group, University of California, Berkeley (1977).
- [7] G. Comini, S. Del Giudice, R.W. Lewis, O.C. Zienkiewicz, Finite element solution on non-linear heat conduction with special reference to phase change, *Int. J. Num. Methods Engng.* Vol. 8 (1974).
- [8] O.C. Zienkiewicz, *The finite element method*, McGraw-Hill London (1977).
- [9] G. Gazzolla, Comportamento al fuoco delle strutture miste da solaio, *COSTRUIRE IN LATERIZIO* 47/95 (1995).
- [10] SPFE, *Handbook of Fire Protection Engineering*, Second Edition Giugno (1995).
- [11] *Il Solaio Alveolare – Produzione e impieghi*, Associazione Produttori di Solai Alveolari Precompressi (1998).
- [12] V. Bacco, L. Ciancabilla, *Il manuale dei solai in laterizio*, Edizioni Laterconsult (1998).