VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO DI ELEMENTI STRUTTURALI IN C.A.P. PER EDIFICI INDUSTRIALI: METODOLOGIE A CONFRONTO.

Prof. Piero Masini [(1)], Ing. Maria Romano[(1)], Ing. Renato Pavia[(2)], Ing. Pasquale Rausa[(2)] Ing. Luigi Cippone[(3)]
[(1)] Politecnico di Bari – D.I.A.C. - Via E. Orabona, 4 – 70125 - Bari
[(2)] Libero Professionista
[(3)] Comando Prov.le VV.F. – Bari – Via Tupputi, 52 - Bari
m.romano@poliba.it

SOMMARIO

Nell'ambito delle misure di protezione passiva, interesse particolare riveste la resistenza al fuoco delle strutture, soprattutto in relazione alle specifiche restrizioni previste dalla normativa italiana per le differenti destinazioni d'uso.

Progettisti e produttori hanno attualmente a disposizione tre differenti modalità per l'attestazione delle caratteristiche di resistenza al fuoco: valutazione sperimentale, analitica e tabellare. Ciascuna soluzione presuppone differenti livelli di cautelatività, ma anche differenti costi, pertanto la scelta di un metodo è opportuno discenda da una efficace analisi costi-benefici.

Nel presente lavoro si è inteso delineare un confronto fra le tre metodologie alternative, attraverso la loro applicazione ad un medesimo elemento strutturale in calcestruzzo armato parzialmente precompresso, al fine di quantificare le differenze prestazionali attestabili seguendo le diverse procedure.

In particolare, per l'applicazione del metodo analitico, è stato utilizzato uno specifico programma di calcolo agli elementi finiti, dedicato all'analisi del comportamento al fuoco di sezioni costituite da materiali qualsiasi, mediante il quale, a valle della descrizione geometrica della sezione e dei dati di input, relativi sia alle caratteristiche termiche e meccaniche dei materiali attinti da appositi archivi, di cui dispone il software, sia alle condizioni al contorno (condizioni di vincolo termico, temperature imposte, superfici di scambio di calore per convenzione ed irraggiamento), è stato possibile effettuare:

- l'analisi termica della sezione sottoposta all'incendio con condizioni al contorno assegnate (intesa ad individuare l'andamento nel tempo della temperatura interna del corpo);
- la valutazione dell'andamento nel tempo della resistenza della sezione, a seguito della modificazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Si è proceduto, poi, con la verifica di resistenza delle sezioni con il metodo allo stato limite ultimo e con la determinazione del coefficiente di sicurezza.

L'analisi dei risultati derivanti dall'applicazione dei tre metodi, le evidenze sperimentali e le indicazioni analitiche e tabellari, hanno consentito di valutare i differenti gradi di cautelatività ottenuti, e di suggerire possibili orientamenti nelle opportunità di scelta della metodologia di classificazione dell'elemento strutturale considerato.

1. INTRODUZIONE

La resistenza al fuoco di una membratura in calcestruzzo armato, ovvero la durata temporale per la quale quest'ultima mantiene i requisiti (R, E, I) ritenuti rilevanti per la propria funzione portante e/o separante, dipende dalle caratteristiche del fuoco cui essa è esposta e (per gli elementi portanti) dalle condizioni di carico.

Per quanto concerne il cimento termico, la curva temperatura-tempo può essere scelta tra quelle nominali disponibili in letteratura, costruita parametricamente oppure ricavata analiticamente tramite appositi modelli (a zone o a campi).

Per quanto attiene invece le condizioni di carico, esse devono essere desunte dall'analisi strutturale sotto specifiche combinazioni di azioni, ritenute plausibili in caso di incendio. In via approssimata, è sufficientemente cautelativo ipotizzare sollecitazioni in condizioni di incendio pari al 70% di quelle considerate per il progetto a temperatura ambiente, secondo quanto consentito dal Bollettino CEB n. 208, dalla norma europea ENV 1992-1-2 (ed. 1995) e dalla norma italiana UNI 9502 (ed. 2001).

Fissate le condizioni termiche e di carico, per la determinazione della resistenza al fuoco delle membrature in calcestruzzo armato ordinario e precompresso è possibile utilizzare i tre seguenti metodi:

- metodo tabellare;
- metodo analitico;
- metodo sperimentale.

1.1 Metodo tabellare

Prevede la verifica che la membratura rispetti specifiche prescrizioni tabellari, ricavate una tantum sulla base di sperimentazioni effettuate su membrature similari esposte in forno ad un prestabilito cimento termico. Le prescrizioni variano in funzione della curva tempo-temperatura utilizzata per le prove in forno, del livello sollecitativo e della durata di resistenza al fuoco richiesta alla membratura; il rispetto di tali prescrizioni si ritiene condizione sufficiente affinché l'elemento strutturale in esame presenti la richiesta resistenza, mentre nulla può essere asserito in merito ad una sua eventuale riparabilità e/o riusabilità.

Le prescrizioni tabellari fornite dall'Eurocodice 2 (ENV 1992-1-2, ed. 1995), in buona parte riprese dal Bollettino CEB n. 208, sono tarate sulla base di prove in forno su membrature in C.A. e C.A.P. esposte all'incendio normalizzato ISO 834, con differenti livelli sollecitativi (per le membrature portanti); tuttavia tali valori risultano "incasellati" e dunque suscettibili di modifiche a livello nazionale tramite l'emanazione di specifici Documenti Nazionali di Applicazione (DAN).

Le prescrizioni tabellari fornite dalla norma UNI 9502 riguardano la valutazione della sola classe R di elementi in calcestruzzo armato ordinario e precompresso, in riferimento al minimo copriferro da garantire alle armature affinché esse non raggiungano la propria temperatura critica entro il prefissato tempo di esposizione all'incendio standard ISO 834; tali prescrizioni sono perciò utilizzabili solo per membrature destinate al collasso per cedimento dell'armatura tesa e non secondo altri meccanismi.

Per completezza, occorre ricordare che anche la Circolare M.I. n. 91/61 fornisce delle indicazioni tabellari, ricavate sulla base di sperimentazioni al fuoco effettuate seguendo la curva temperatura-tempo proposta dalla stessa Circolare, le quali, sebbene in origine destinate alla regolamentazione della resistenza al fuoco delle sole strutture in acciaio, sono, sia pur limitatamente, utilizzabili anche per il dimensionamento di membrature in calcestruzzo.

1.2 Metodo analitico

Negli ultimi 30 anni, la disponibilità di attendibili informazioni sperimentali ha consentito di approntare affidabili modelli di rappresentazione del comportamento al fuoco dei più importanti materiali strutturali, consentendo un notevole impulso allo sviluppo di metodi per la valutazione analitica della resistenza al fuoco degli elementi strutturali in genere, compresi quelli in calcestruzzo armato ordinario e precompresso.

La successione logica di operazioni su cui è basato il metodo analitico è la seguente:

- scelta della curva d'incendio (nominale, parametrica, reale);
- analisi termica della membratura, con determinazione della distribuzione di temperature nelle sezioni dell'elemento strutturale, al variare del tempo di esposizione al fuoco;
- verifica dei criteri di resistenza (*R*, *E* ed *I*) della membratura all'aumentare del tempo di esposizione al fuoco, sulla base dell'evoluzione delle caratteristiche termo-meccaniche dei materiali strutturali al variare della temperatura.

Limitando ora l'attenzione alle sole membrature in calcestruzzo, i metodi pratici proposti nella letteratura tecnica e sui testi normativi, tra i quali si citano quelli indicati dal Bollettino CEB n. 208, dalla norma ENV 1992-1-2 (ed. 1995), dalla norma UNI 9502 (ed. 2001), differiscono tra loro per le modalità con cui i singoli steps indicati vengono sviluppati.

1.3 Metodo sperimentale

La valutazione sperimentale della resistenza al fuoco di una membratura in C.A. o C.A.P. soggetta a specifiche condizioni di carico, a fronte di un prefissato programma di riscaldamento, può essere effettuata mediante prove in forno. I risultati di tali prove sono influenzati da un elevatissimo numero di variabili, pertanto, nella pratica ha senso parlare di valutazione sperimentale della resistenza al fuoco di una membratura solo se in stretta correlazione con lo standard procedurale seguito per l'effettuazione delle relative prove in forno. In linea generale, condizione necessaria affinché la valutazione sperimentale sia affidabile è che gli elementi utilizzati per le prove presentino, rispetto alla membratura di effettivo impiego:

- identiche dimensioni (o comunque dimensioni quanto più prossime a quelle reali);
- identiche caratteristiche per quanto concerne materiali, modalità di armatura e modalità di posa in opera;
- identiche condizioni di carico ed identico programma di riscaldamento.

Sui risultati influiscono poi numerose altre variabili, tra cui le caratteristiche della fornace, le modalità di valutazione della temperatura e di vincolo della membratura, i criteri pratici utilizzati per l'accertamento della perdita dei requisiti R, E ed I.

2. DESCRIZIONE DELL'ELEMENTO STRUTTURALE ESAMINATO

Il tipo di membratura da esaminare, la cui scelta è stata dettata dall'esigenza di "coprire" tutti i requisiti di interesse (capacità portante, tenuta, isolamento termico) è rappresentata da un tegolo prefabbricato in calcestruzzo armato parzialmente precompresso a forma di Π (fig. 1), avente le seguenti caratteristiche:

lunghezza nominale totale:	5000	mm;	larghezza nominale totale:	2490	mm;
altezza nominale totale:	400	mm;	peso proprio:	545	daN/m.

Il campione, in particolare, è composto da:

- soletta superiore in calcestruzzo, dimensioni in pianta 5000 x 2490 mm e spessore 50 mm;
- n. 2 nervature longitudinali inferiori in calcestruzzo, spessore 120 mm ed altezza 310 mm, poste ad interasse di 1250 mm (fig. 2).

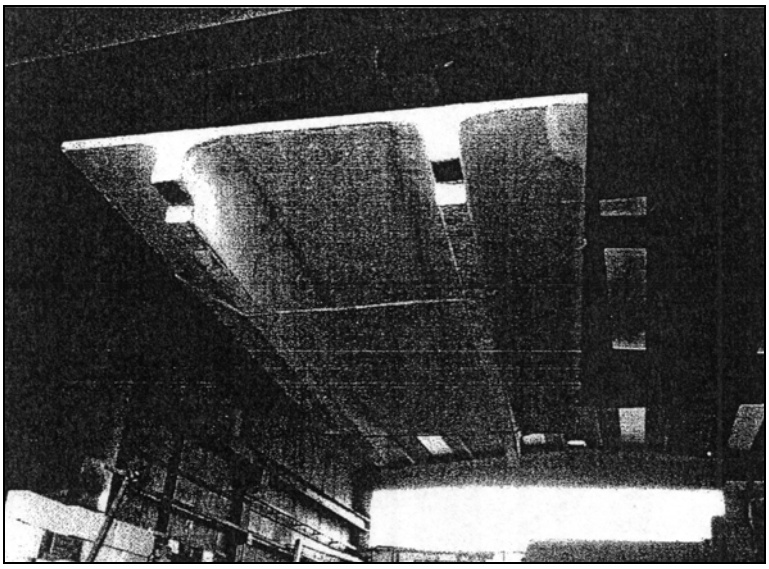


Fig. 1 – Foto del tegolo prima della prova.

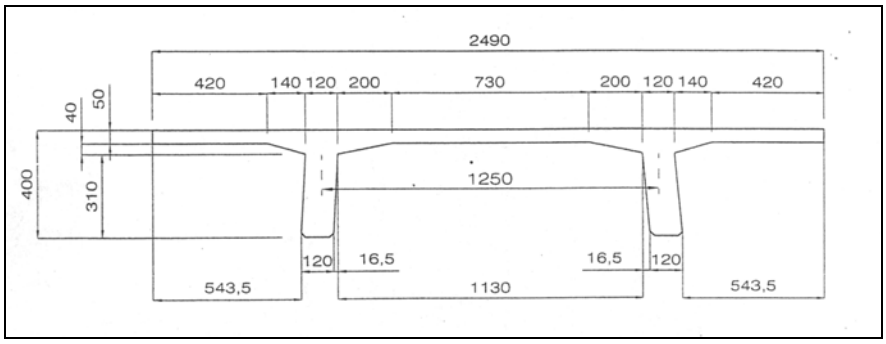


Fig. 2 – Caratteristiche geometriche del tegolo.

L'armatura principale (figg. 3, 4, 5 e 6) è composta da:

- n. 1 barra in acciaio, lunghezza totale 3000 mm e diametro 20 mm, con ancoraggio a squadro verticale (lunghezza 2600 mm, squadro 300 mm), posta longitudinalmente a partire da ciascuna estremità delle nervature longitudinali del tegolo, a 45 mm dalla superficie d'intradosso dello stesso (n. 4 barre totali);
- n. 1 trefolo tesato in acciaio, diametro 3/8", posto longitudinalmente al centro di ciascuna nervatura longitudinale del tegolo a 240 mm dalla superficie d'intradosso dello stesso (n. 2 trefoli totali);
- n. 2 trefoli tesati in acciaio, diametro 0,6" ciascuno, posti longitudinalmente al centro di ciascuna nervatura longitudinale del tegolo, a 200 mm e a 160 mm dalla superficie d'intradosso dello stesso (n. 4 trefoli totali);
- n. 2 trefoli in acciaio non tesati, diametro 0,6" ciascuno, posti longitudinalmente al centro di ciascuna nervatura longitudinale del tegolo, a 120 mm e a 80 mm dalla superficie d'intradosso dello stesso (n. 4 trefoli totali).

L'armatura secondaria è composta da:

- n. 1 rete in acciaio elettrosaldata a maglia quadrata, diametro dei fili trasversali 6 mm, diametro dei fili longitudinali 5 mm, sezione della maglia 200 x 200 mm e dimensioni della rete 4700 x 2460 mm, posta a circa metà dello spessore della soletta superiore;
- n. 1 rete in acciaio elettrosaldata a maglia quadrata, diametro dei fili trasversali 6 mm, diametro dei fili longitudinali 5 mm, sezione della maglia 200 x 200 mm e dimensioni della rete 4700 x 980 mm, piegata a forma di U e posta all'interno di ciascuna nervatura longitudinale (n. 2 reti totali);
- n. 4 barre in acciaio, lunghezza 2400 mm e diametro 8 mm ciascuna, poste trasversalmente al di sopra della rete della soletta superiore in prossimità delle estremità del tegolo (n. 8 barre totali);
- n. 3 barre in acciaio, lunghezza totale 1000 mm e diametro 8 mm ciascuna, conformate a forcella orizzontale (lunghezza 480 mm, forcella 60 mm), poste longitudinalmente in ciascuna estremità delle nervature longitudinali (n. 12 barre totali).

Le caratteristiche dei materiali utilizzati per la realizzazione del campione sono le seguenti:

- calcestruzzo calcareo: $R_{ck} > 550$ kg/cm^2 acciaio: FeB44K
- trefoli: $f_{ptk} > 19000$ kg/cm^2 pretensione trefoli: $\epsilon = 0{,}006$.

LEGENDA DELLE ARMATURE

Simbolo	DESCRIZIONE
A	Trefolo tesato in acciaio, diametro 3/8"
B	Trefolo tesato in acciaio, diametro 0,6"
C	Trefolo non tesato in acciaio, diametro 0,6"
1	Barra in acciaio, lunghezza totale 3000 mm e diametro 20 mm, con ancoraggio a squadro verticale (lunghezza 2600 mm, squadro 300 mm)
2	Barra in acciaio, lunghezza totale 1000 mm e diametro 8 mm, conformate a forcella orizzontale (lunghezza 480 mm, forcella 60 mm)
3	Barra in acciaio, lunghezza 2400 mm e diametro 8 mm
R9	Rete in acciaio elettrosaldata a maglia quadrata, diametro dei fili trasversali 6 mm, diametro dei fili longitudinali 5 mm, sezione della maglia 200 x 200 mm e dimensioni della rete 4700 x 2460 mm
RF	Rete in acciaio elettrosaldata a maglia quadrata, diametro dei fili trasversali 6 mm, diametro dei fili longitudinali 5 mm, sezione della maglia 200 x 200 mm e dimensioni della rete 4700 x 980 mm, piegata a forma di U

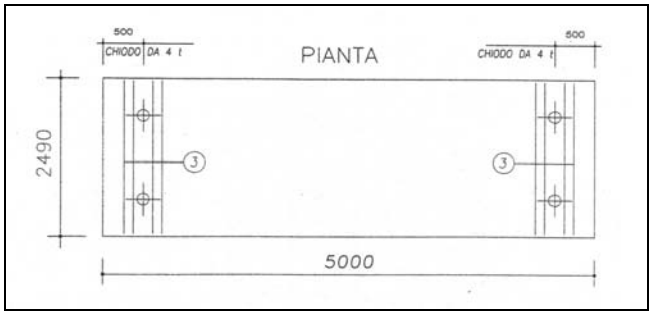


Fig. 3 – Armatura trasversale del tegolo. Pianta.

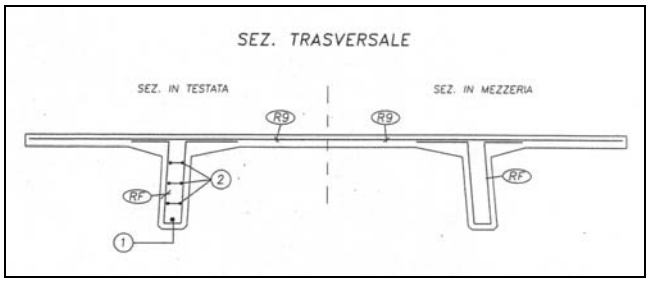


Fig. 4. Armatura lenta del tegolo. Sezione trasversale

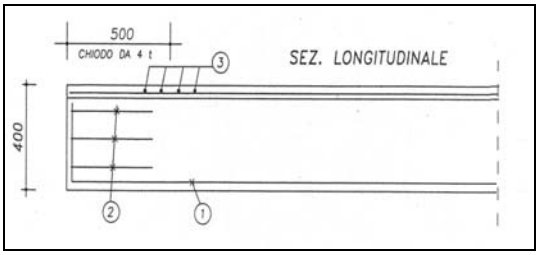


Fig. 5. Armatura lenta del tegolo. Sezione longitudinale

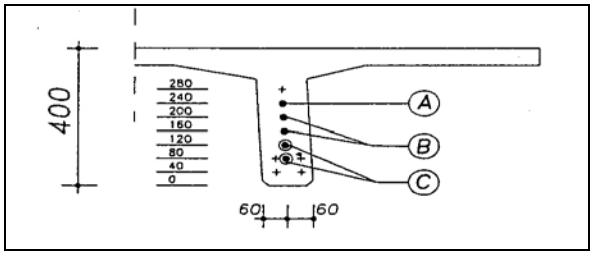


Fig. 6. Armatura pretesa del tegolo. Sezione trasversale

3. VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA AL FUOCO

La prova di resistenza al fuoco effettuata sul tegolo esaminato ha portato alla determinazione del tempo di conservazione, da parte del campione testato, dei requisiti di stabilità R, tenuta E e isolamento termico I, così come definiti dal D.M. 30/11/1983. Per l'esecuzione della prova si è fatto riferimento ai criteri prescritti, in materia di sperimentazione al fuoco, dalla Circolare M.I. n. 91/61.

3.1 Apparecchiatura di prova

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata la seguente apparecchiatura:

- forno sperimentale con apertura sul lato superiore (bocca del forno), lunghezza 4000 mm e larghezza 2500 mm riducibile a 2000 mm, provvisto di:
  - rulli cilindrici di appoggio, posti uno su ciascun lato corto ad interasse di 4200 mm;
  - bruciatori a doppia fiamma alimentati a gasolio posti sui lati lunghi;
  - n. 2 camini, posti sui lati corti, con sistema manuale di regolazione della sezione d'uscita costituito da valvola a farfalla;
  - rilevatori di pressione posti sui lati corti;
- attrezzatura di carico costituita da n. 2 martinetti idraulici aventi un carico max di 127,5 kN ciascuno;
- sistema di acquisizione dati costituito da:
  - centraline poste sui lati lunghi del forno per il rilevamento delle temperature all'interno del forno;
  - sistema a lettura manuale della pressione, posto su una parete del forno in prossimità della bocca;
  - termocoppie a filo tipo "K" collegate ad una centralina mobile, a sua volta collegata ad un lettore che trasforma la differenza di potenziale delle termocoppie stesse in temperatura;
  - trasduttori di spostamento costituiti da potenziometri regolati da cavetti in acciaio collegati alla centralina mobile sopra citata;
  - calcolatore elettronico e software di gestione.

3.2 Modalità di esecuzione della prova

Il campione, semplicemente appoggiato sui rulli, è stato installato sulla bocca superiore del forno sperimentale. La realizzazione di n. 2 paretine laterali di coibentazione (interne ai rulli), ha consentito la creazione di una camera di combustione chiusa, dove esporre al fuoco la superficie d'intradosso del campione stesso. Sulla superficie d'estradosso del tegolo, in corrispondenza delle nervature, sono stati applicati n. 2 trasduttori di spostamento (fig. 7, F1 e F2) per il rilievo della freccia d'inflessione durante la prova e per stabilire, di conseguenza, l'istante di collasso del campione. Il criterio R è stato considerato perso, infatti, al momento del raggiungimento della velocità massima ammissibile di variazione delle frecce, calcolata utilizzando la seguente formula:

$$\left(\frac{\Delta f}{\Delta t}\right)_{\max} = \frac{L^2}{9000 \cdot h} = 5{,}52 \text{ mm/min} \qquad (1)$$

dove:

L = distanza appoggi, pari a 4200 mm; h = altezza di calcolo del campione, pari a 355 mm;
Δt = intervallo di tempo, in minuti; Δf = variazione della freccia durante il tempo Δt, in mm;
$\frac{\Delta f}{\Delta t}$ = velocità di variazione della freccia, espressa in mm/min.

Sul campione sono state altresì applicate n. 10 termocoppie (dalla n. 1 alla n. 10).

In particolare, le termocoppie dalla n. 1 alla n. 5 sono state posizionate sulla superficie estradossale del tegolo (fig. 8), con la funzione di rilevare l'istante di perdita del requisito di isolamento termico I da parte del campione. Tale requisito, in base al dispositivo della Circolare 91/61, si ritiene perso quando la temperatura media sulla parete non esposta al fuoco dell'elemento raggiunge il valore di 150°C; in realtà, è prassi comune quella di ritenere probante, accanto a tale criterio, anche quello di attingimento puntuale della temperatura di 180°C sul lato non esposto al fuoco.

Le termocoppie dalla n. 6 alla n. 10 sono state invece inserite, attraverso dei fori fatti partendo dalla superficie d'estradosso del campione, all'interno di una delle due nervature longitudinali, in prossimità dei suoi trefoli (fig. 9), con l'intento di valutare l'evoluzione termica, durante la prova, dell'acciaio di armatura.

Il criterio utilizzato per la determinazione dell'istante di perdita del requisito di tenuta E è quello classico,

proposto dalla Circolare Ministeriale n. 91 del 1961 e dalla norma UNI EN 1363-1.

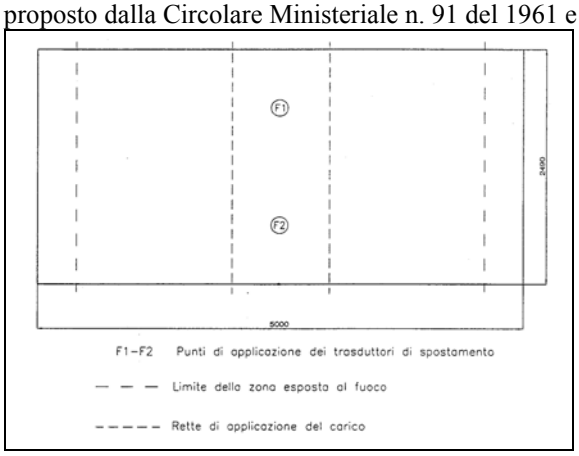


Fig. 7. Posizione dei trasduttori di spostamento.

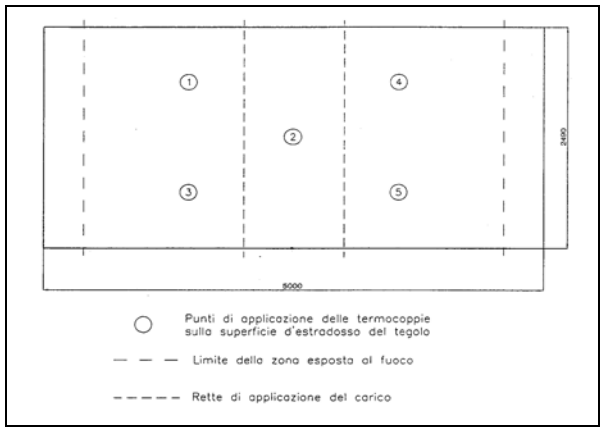


Fig. 8. Posizione delle termocoppie di estradosso.

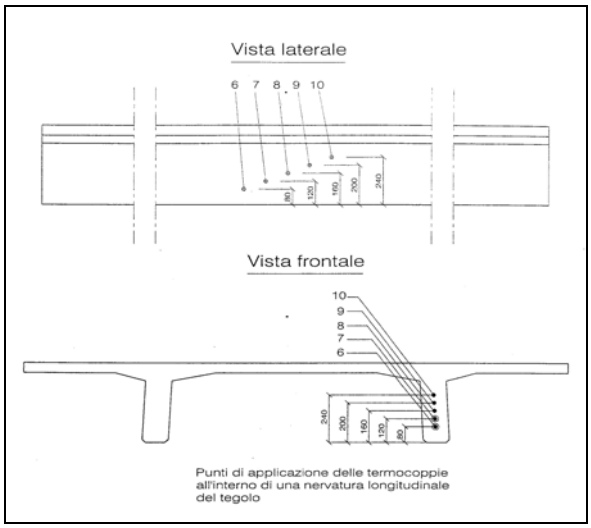


Fig. 9. Posizione delle termocoppie all'interno di una nervatura.

Il campione è stato sottoposto, per l'intera durata della prova, a n. 2 carichi concentrati, distribuiti lungo altrettante rette trasversali, del valore di 50,1 kN ciascuno, applicati a 1600 mm dagli appoggi (fig. 10). In tal modo si è riusciti a generare, nel tratto compreso tra i punti d'applicazione dei sovraccarichi, tenendo conto del peso proprio, un momento flettente praticamente costante e pari a M = 90,5 kN·m.

Secondo lo schema classico dei transient tests, dopo aver posizionato le apparecchiature di misura, mantenendo costante il carico, si sono accesi i bruciatori, riscaldando il forno sperimentale secondo la curva temperatura-tempo prevista dalla Circolare n. 91/61 del Ministero dell'Interno, nel rispetto delle tolleranze prescritte.

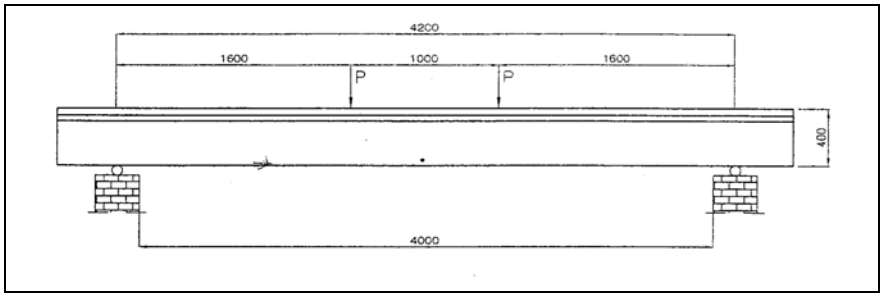


Fig. 10. Modalità di carico del tegolo.

3.3 Risultati della prova

Nel corso della prova si sono verificati i fenomeni significativi di seguito riportati:

Minuto di prova	Osservazioni
20°	Inizio di fuoriuscite di vapore acqueo dalla superficie di estradosso del campione: tali fuoriuscite sono proseguite fino al 60° minuto di prova.
40°	Piccole esplosioni, con distacco di ridotte porzioni di calcestruzzo dalle nervature longitudinali del campione.
55°	Formazione di piccole macchie di condensa sulle testate delle nervature longitudinali, in prossimità dei trefoli.
61°	Perdita del requisito di isolamento termico da parte del campione, dovuta al superamento dei 150°C da parte della temperatura media registrata dalle cinque termocoppie applicate sulla sua superficie d'estradosso (termocoppie dalla n. 1 alla n. 5).
95°	Ulteriori distacchi di porzioni di calcestruzzo a seguito di esplosioni.
126°	Interruzione della prova a causa delle perdita di stabilità da parte del campione, dovuta al raggiungimento del massimo valore ammissibile da parte della velocità di variazione della freccia rilevata dal trasduttore F1.

Al 61° minuto di prova (temp amb.: 24°C), le temperature registrate dalle termocoppie applicate sulla superficie d'estradosso del campione in esame (dalla n. 1 alla n. 5) avevano raggiunto i valori seguenti:

- temperatura media: 151°C, temperatura massima: 177°C.

All'interruzione della prova le temperature registrate dalle termocoppie applicate all'interno della nervatura longitudinale (termocoppie dalla n. 6 alla n. 10) avevano raggiunto i valori riportati di seguito:

- termocoppia n. 6 (a 80 mm dall'intradosso): 572°C
- termocoppia n. 7 (a 120 mm dall'intradosso): 566°C
- termocoppia n. 8 (a 160 mm dall'intradosso): 516°C
- termocoppia n. 9 (a 200 mm dall'intradosso): 515°C
- termocoppia n. 10 (a 240 mm dall'intradosso): 504°C.

Nello stesso istante, le frecce registrate dai trasduttori di spostamento applicati sulla superficie d'estradosso del campione (F1 e F2) erano le seguenti:

- trasduttore F1: 66,2 mm trasduttore F2: 35,4 mm.

I ripetuti controlli effettuati, durante la prova, sulla faccia non esposta al fuoco del campione in esame, secondo le prescrizioni della norma UNI EN 1363-1, non hanno evidenziato alcuna perdita di tenuta da parte del campione stesso; solo nei minuti successivi all'interruzione della prova si è registrata un'esplosione che ha causato lo sfondamento della soletta superiore del tegolo, nella zona compresa tra le due nervature longitudinali (fig. 11).

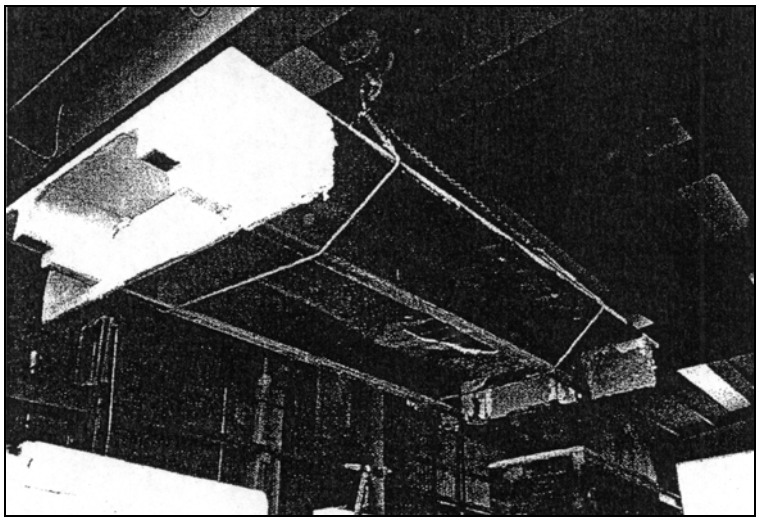


Fig. 11. Foto del tegolo al termine della prova.

3.4 Classificazione

I risultati emersi durante il test effettuato sul tegolo campione hanno consentito, in definitiva, di accertare una resistenza al fuoco di 61 minuti con riferimento al requisito di isolamento termico I e di 126 minuti rispetto, invece, ai requisiti di capacità portante R e di tenuta E.

In base al dispositivo della Circolare 91/61, dunque, il tegolo è stato classificato:

REI 60	*RE* 120

Tali prestazioni, attestate peraltro con margini molto esigui (6 minuti per la classe RE e un solo minuto per la classe REI), possono ovviamente ritenersi attendibili solo nell'ipotesi che il tegolo sia sollecitato, in esercizio, da un momento flettente non superiore a quello massimo realizzato durante la prova.

4. VALUTAZIONE ANALITICA DELLA RESISTENZA AL FUOCO

Nel presente paragrafo si riportano i risultati emersi dall'applicazione di uno dei metodi analitici disponibili per la valutazione della resistenza al fuoco, con riferimento al particolare elemento analizzato.

Tali risultati sono indicati separatamente per i diversi requisiti di capacità portante R, di tenuta E e di isolamento termico I, tenendo presente che, per le particolari caratteristiche del tegolo e per il tipo di esposizione al fuoco (zona intradossale esposta), la capacità portante è quasi totalmente delegata alle due nervature, mentre i requisiti E ed I sono assolti integralmente dalla soletta superiore.

4.1 Capacità portante

Una valutazione alternativa a quella sperimentale del requisito R può in generale essere fatta per via analitica, tramite idonei programmi di calcolo.

Nel caso in esame, l'accertamento analitico è stato sviluppato utilizzando il software agli elementi finiti ThermoCAD, della Concrete S.r.l., dedicato all'analisi del comportamento al fuoco di sezioni composte da materiali qualsiasi.

Dal punto di vista dell'organizzazione, il programma si divide in tre parti:

- descrizione geometrica della sezione;
- analisi termica della sezione sottoposta a incendio, con condizioni al contorno assegnate, volta ad individuare l'andamento nel tempo della temperatura interna;
- per le sole sezioni in C.A. e C.A.P., valutazione dell'evoluzione temporale della resistenza, a seguito della modificazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

L'input viene gestito da un ambiente grafico che consente la definizione di sagome qualsiasi attraverso l'assegnazione di elementi omogenei di forma quadrangolare o triangolare. Per sezioni di uso corrente è prevista una libreria di sagome predefinite. Facilitano il completamento dell'input una serie di funzioni per la generazione automatica delle mesh, per la definizione delle situazioni al contorno e per l'inserimento di eventuali armature metalliche.

La funzione termica, che rappresenta generalmente l'incendio normalizzato, ma che può essere personalizzata, ed i valori dei parametri termofisici dipendenti dalla temperatura sono definiti per punti e riportati in tabelle e grafici modificabili.

L'analisi transitoria del flusso del calore all'interno della sezione viene svolta da un solutore agli elementi finiti. E' prevista la gestione di materiali con proprietà termiche e meccaniche diverse e variabili con la temperatura. Le condizioni al contorno possono comprendere condizioni di vincolo termico, temperature imposte, superfici di scambio di calore per convezione ed irraggiamento. Il solutore calcola e memorizza l'andamento delle temperature all'interno della sezione ad intervalli di tempo che vengono prestabiliti. Al termine dell'analisi, la distribuzione delle temperature può essere visualizzata alle varie scadenze temporali, con rappresentazione a bande di colore, ed analizzata nel dettaglio interrogando la sezione con lo strumento di sonda.

La verifica di resistenza delle sezioni in calcestruzzo armato e precompresso con il metodo allo stato limite ultimo viene effettuata individuando il dominio di resistenza (luogo dei punti rappresentativi delle terne di sollecitazione limite M_x, M_y, N) in presenza di una distribuzione di temperatura all'interno del corpo e calcolando il coefficiente di sicurezza per una o più assegnate sollecitazioni. In alternativa, è disponibile una procedura che consente di individuare la posizione dell'asse neutro per un'assegnata sollecitazione di presso-tensoflessione deviata, in presenza di una distribuzione termica all'interno della sezione.

Entrambi i metodi di verifica prevedono la suddivisione della sezione in mesh e l'attribuzione ad ogni elemento delle caratteristiche meccaniche, in dipendenza della propria temperatura media. Si possono

definire più combinazioni di carico; il programma determina in modo automatico il tempo in cui la sezione risulta verificata al fuoco, considerando ad ogni passo temporale la combinazione di carico più gravosa.

Nel caso in esame, si è ricreata graficamente la sezione del tegolo con la relativa armatura, assegnando ai materiali le caratteristiche meccaniche effettive a temperatura ordinaria. Si è ritenuta esposta al fuoco la superficie di intradosso, con superfici laterali e di estradosso a temperatura ambiente (20°C).

L'analisi è stata condotta considerando valide, per le proprietà termiche e meccaniche, le curve previste dalla norma UNI 9502 (ed. 2001), assunte come default dal programma, e impostando una dimensione massima di mesh pari a 3 cm.

Anche per quanto concerne la curva termica si è fatto riferimento allo standard adottato dalla citata norma, ovvero alla curva ISO 834.

Con tali input, e per una sollecitazione di flessione semplice retta (M_x = 90,5 kN·m), quale quella che si verifica con buona approssimazione nella zona compresa tra i due carichi applicati durante la prova sperimentale, il requisito R viene mantenuto per 110 minuti circa. La prima verifica, in ordine temporale, per la quale il coefficiente di sicurezza risulta negativo è, infatti, quella a 120 minuti.

Di seguito si riporta uno stralcio della relazione di calcolo prodotta dal software.

Caratteristiche termiche dei materiali

Materiale: calcestruzzo calcareo
Coefficiente di convezione per esposizione al fuoco: 25.0 $W/m^2 \cdot °C$
Coefficiente di convezione per ambiente: 9.0 $W/m^2 \cdot °C$
Coefficiente di remissività risultante: 0.56
Coefficiente di irraggiamento: 0.0000000318 $W/m^2 \cdot °K^4$

Comportamento del calcestruzzo in fase di verifica:

Temperatura	Massa	Conducibilità	Calore specifico
°C	*Kg*	$W/m^2 \cdot °C$	$J/Kg \cdot °C$
0	2300.0	1.500	900.0
275	2250.0	0.993	1062.0
550	2250.0	0.666	1183.0
825	2250.0	0.516	1261.0
1100	2250.0	0.545	1297.0

Caratteristiche meccaniche dei materiali

Calcestruzzo R_{ck}: 550 daN/cm^2 a_1 = coefficiente di passaggio da R_{ck} a f_{ck} = 0.83 a_2 = coefficiente riduttivo per carichi permanenti = 0.85 Coefficiente di sicurezza parziale: 1.200 Incremento g_c in compressione semplice: 1.250	Deformazioni limite e_{c1} = primo limite deformativo del calcestruzzo = 0.002 e_{c2} = secondo limite deformativo del calcestruzzo = 0.0035 e_{f2} = limite deformativo massimo dell'acciaio = 0.010
Armature lente f_{yk}: 4300 daN/cm^2 E_s : 2060000 daN/cm^2 Coefficiente di sicurezza parziale: 1.000	Trefoli f_{ptk}: 19000 daN/cm^2 E_s: 2060000 daN/cm^2 Coefficiente di sicurezza parziale: 1.000

Parametri di sollecitazione termica

Curva di incendio ISO 834: $T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20$
Numero di passi di risoluzione: 120
Passo temporale: 60 secondi
Intervallo risultati: 10 passi

Verifiche SLU nei vari intervalli temporali

Coefficienti di sicurezza a sforzo normale costante

t (min)	fam	comb	M_x	M_y	N	coefficiente
10	1	1	-905000	0	0	6.14948
20	1	1	-905000	0	0	6.14948
30	1	1	-905000	0	0	5.82478
40	1	1	-905000	0	0	5.30538
50	1	1	-905000	0	0	4.75291
60	1	1	-905000	0	0	4.09000
70	1	1	-905000	0	0	3.47852
80	1	1	-905000	0	0	2.89118
90	1	1	-905000	0	0	2.35327
100	1	1	-905000	0	0	1.85588
110	1	1	-905000	0	0	1.38992
120	1	1	-905000	0	0	0.96058

Nelle figure 12, 13, 14 e 15 sono riportati i domini di rottura della sezione (per N = 0) rispettivamente a 30, 60, 90 e 120 minuti di esposizione, con indicazione del punto di sollecitazione (in grigio) e del punto limite (in nero). Sono altresì indicati i valori del momento flettente ultimo e del coefficiente di sicurezza.

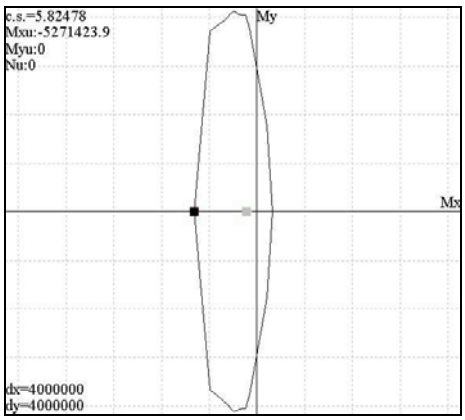


Fig. 12. Dominio di rottura a 30 minuti di esposizione

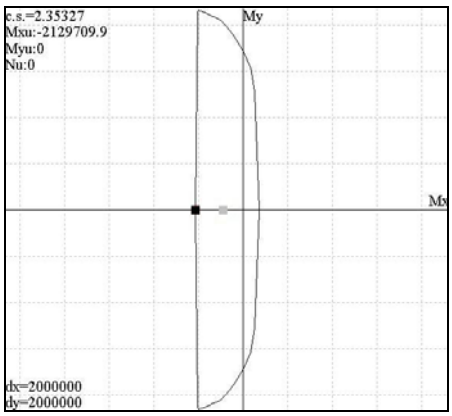


Fig. 13. Dominio di rottura a 60 minuti di esposizione

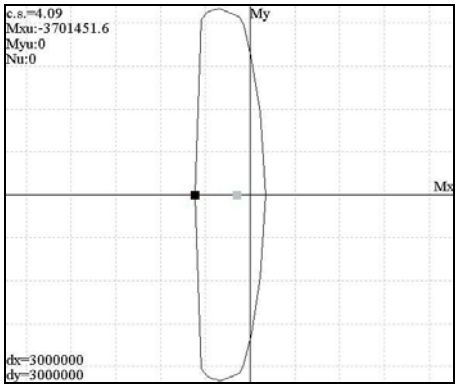


Fig. 14. Dominio di rottura a 90 minuti di esposizione

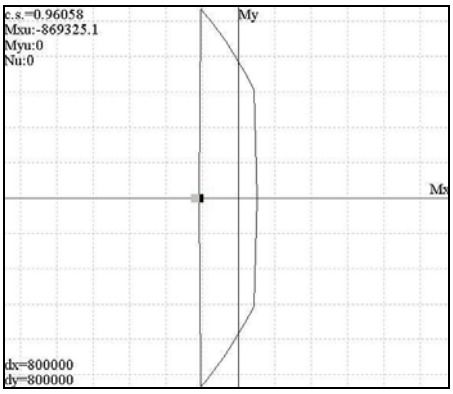
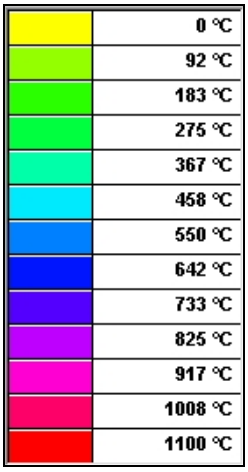


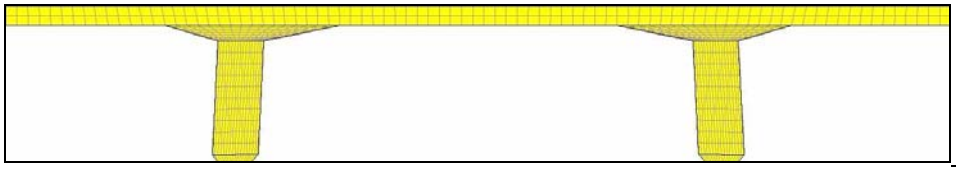
Fig. 15. Dominio di rottura a 120 minuti di esposizione

Nelle figure che seguono si riportano le mappature termiche del tegolo ad intervalli di 10 minuti; sono

visibili anche le mesh generate dal programma per il calcolo agli elementi finiti.



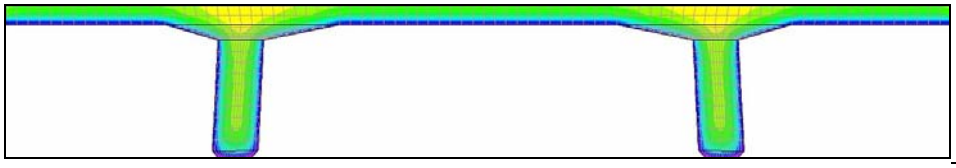
Legenda termica



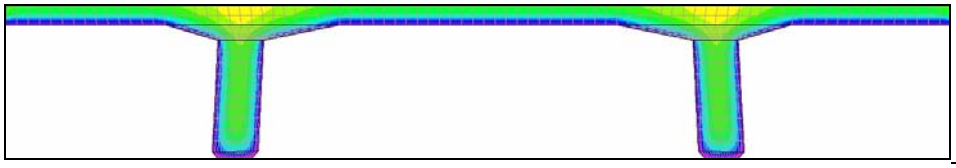
Tempo 0

Tempo 10 min.

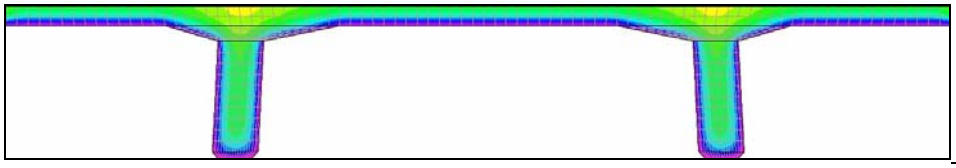
Tempo 20 min.



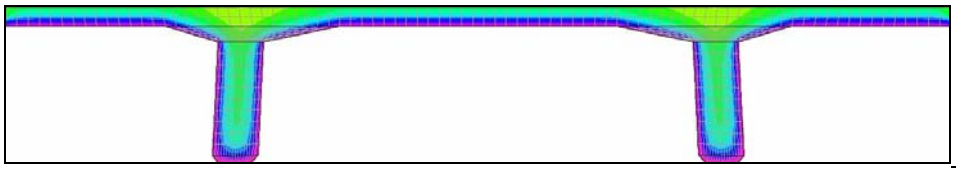
Tempo 30 min.



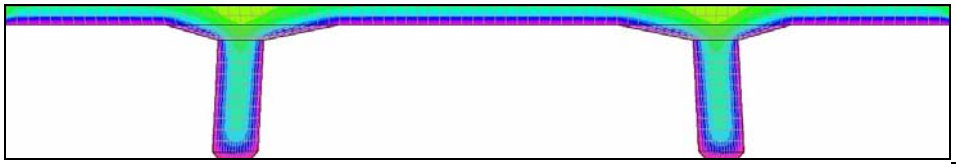
Tempo 40 min.



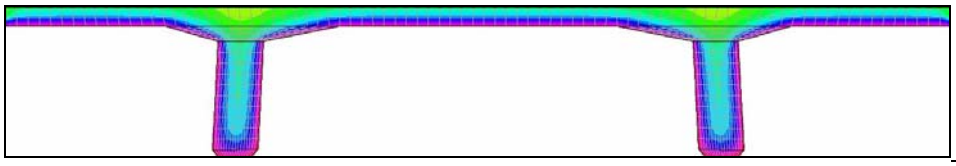
Tempo 50 min.



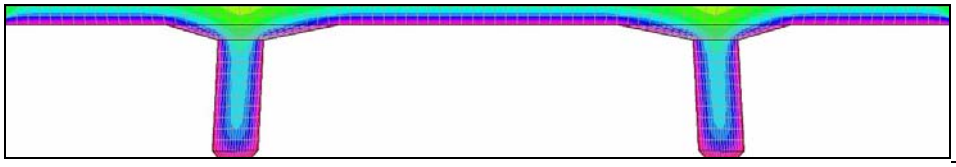
Tempo 60 min.



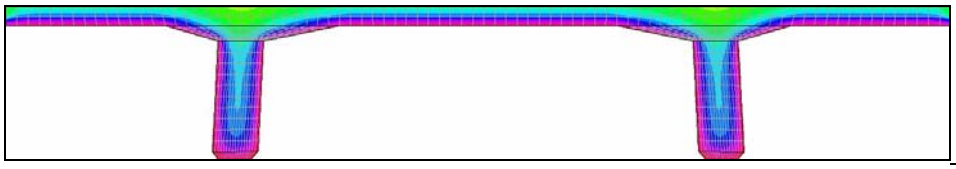
Tempo 70 min.



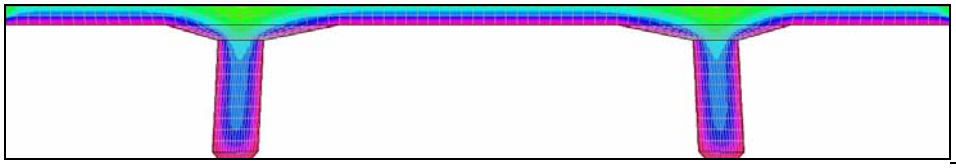
Tempo 80 min.



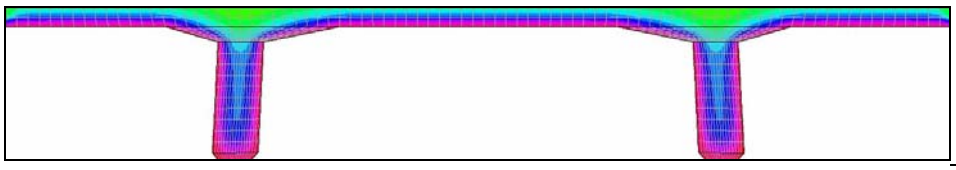
Tempo 90 min.



Tempo 100 min.



Tempo 110 min.



Tempo 120 min.

4.2 Tenuta

Non sono disponibili metodi analitici per la valutazione del requisito di tenuta.

4.3 Isolamento termico

Il requisito di isolamento termico del tegolo può essere verificato analiticamente, a condizione di conoscere la distribuzione delle temperature entro la soletta ai vari istanti. L'analisi termica è stata effettuata con il programma ThermoCAD, tenendo conto del calore di vaporizzazione dell'acqua presente all'interno del conglomerato (circa 2% in massa, pari a 50 kg/m^3) e quindi del valore di picco del calore specifico del calcestruzzo (1875 J/Kg·K) raggiunto a ridosso dei 100°C, come indicato dall'Eurocodice 2. Per la curva termica si è fatto riferimento alla ISO 834.

Con tali input, si sono ottenute le curve termiche riportate nelle figure 16, 17, 18, 19, 20 e 21, riferite a punti interni alla soletta, situati a differente distanza dalla superficie intradossale esposta al fuoco.

Ai fini dell'accertamento del requisito di isolamento termico, la curva di interesse è quella riferita alla superficie di estradosso (fig. 21).

In base ai dati raccolti, dunque, il requisito di isolamento termico dovrebbe considerarsi perso dopo 31

minuti di esposizione al fuoco; dopo tale tempo, infatti, la temperatura media sulla faccia non esposta raggiunge i 151°C, superando i 150°C previsti come limite dalla UNI 9502.

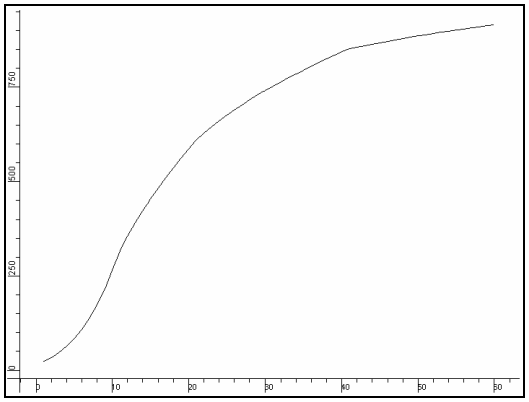


Fig. 16. Temperatura all'intradosso

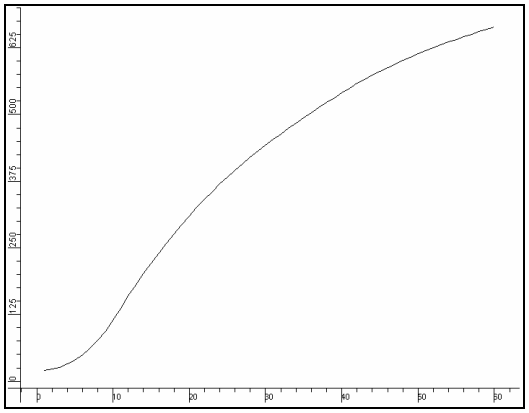


Fig. 17. Temperatura a 1,11 cm dall'intradosso.

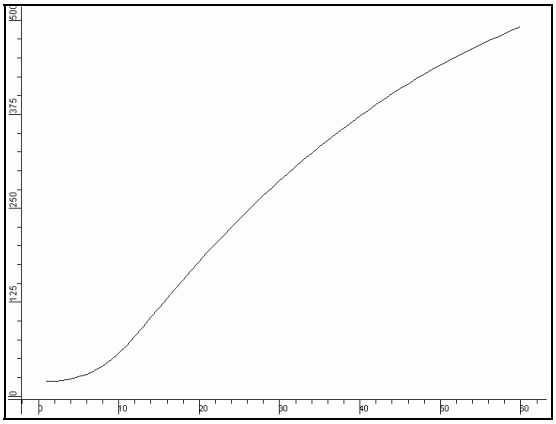


Fig. 18. Temperatura a 2,22 cm dall'intradosso.

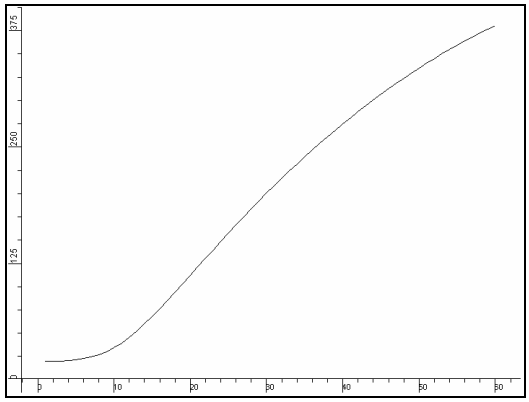


Fig. 19. Temperatura a 3,33 cm dall'intradosso

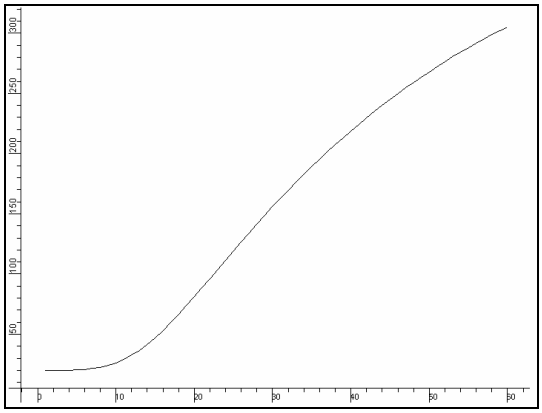


Fig. 20. Temperatura a 4,44 cm dall'intradosso

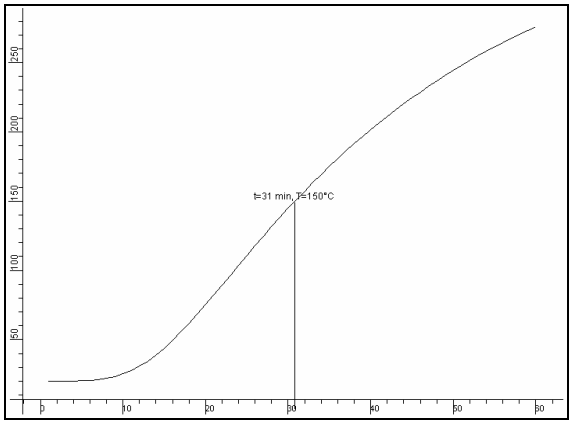


Fig. 21. Temperatura all'estradosso

5. VALUTAZIONE TABELLARE DELLA RESISTENZA AL FUOCO

L'analisi di resistenza al fuoco del tegolo in esame è stata completata con l'indicazione dei risultati ottenibili applicando il metodo tabellare. I risultati sono stati indicati separatamente per i diversi requisiti di capacità portante R, di tenuta E e di isolamento termico I.

5.1 Capacità portante

Nel particolare caso in esame, è stato possibile tentare un'approssimata valutazione di tipo tabellare, secondo le indicazioni fornite dalla UNI 9502 (ed. 2001). Occorre però precisare che tali indicazioni sono dichiaratamente cautelative ed il loro rispetto, nello spirito della norma, consente solo di evitare una precisa valutazione analitica del requisito R.

Con questa premessa, all'interno delle nervature, le armature più esposte al cimento termico sono la barra da 20 mm di acciaio FeB44K posta a 45 mm dall'intradosso e il trefolo da 0,6" (non tesato) posto a 80 mm dall'intradosso. Per tutte le armature, la distanza dalle pareti laterali dei travetti è pari a 60 mm. Per questa configurazione, facendo riferimento alle citate prescrizioni (fig. 22), fornite separatamente per acciai ordinari e acciai da pretensione e tenendo in conto la particolare modalità di esposizione al fuoco delle nervature (su tre lati), si trova che la capacità portante dovrebbe essere garantita almeno per 60 minuti.

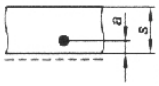
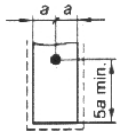
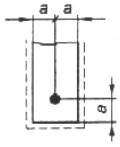
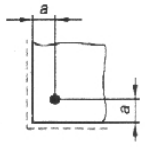
Acciaio	Tempo di esposizione t (min)	Fuoco su un lato	Fuoco su 2 lati	Fuoco su 3 lati	Fuoco sullo spigolo
					
Per acciaio ordinario (tipo 1)	30	2,00	2,60	3,00	2,05
	60	2,00	4,30	5,00	3,65
	90	2,72	5,60	6,40	4,60
	120	3,40	6,80	7,70	5,80
	180	4,50	8,60	9,80	7,50
	240	5,44	10,20	11,70	9,00
Per barre (o cautelativamente per acciaio tipo 2)	30	2,00	3,15	3,60	2,70
	60	2,73	5,20	5,90	4,50
	90	3,70	6,70	7,60	6,00
	120	4,50	8,00	9,00	7,10
	180	5,84	10,20	11,50	9,10
	240	7,00	12,00	13,60	10,70
Per acciaio da precompressione	30	2,00	3,60	4,10	3,20
	60	3,25	5,80	6,50	5,10
	90	4,20	7,30	8,30	6,70
	120	5,20	8,80	9,90	8,00
	180	6,70	11,10	12,50	10,00
	240	8,00	13,00	14,60	11,90

Fig. 22. Verifica tabellare del requisito R (UNI 9502).

5.2 Tenuta

Per tale requisito si è fatto riferimento alle prescrizioni fornite dalla UNI 9502, nella quale si stabilisce che la verifica del criterio di tenuta E possa ritenersi soddisfatta quando siano rispettate le seguenti condizioni:

- presenza di uno strato continuo ed uniforme di conglomerato cementizio armato con spessore pari almeno a 40 mm fino a 60 minuti di esposizione e pari a 50 mm per tempi di esposizione superiori;
- presenza di armatura diffusa in ambedue le direzioni nello strato di conglomerato sopra descritto, non inferiore a 1,5 kg/m^2.

Nel caso in esame, la presenza di una soletta di spessore pari a 50 mm, armata con una rete trasversale in acciaio elettrosaldata a maglia quadrata 200 x 200 mm, con fili trasversali di diametro 6 mm e fili longitudinali di diametro 5 mm, per un peso di armatura quasi pari a 1,9 kg/m^2, dovrebbe assicurare una tenuta superiore ai 60 minuti.

5.3 Isolamento termico

La UNI 9502 consente di evitare la valutazione analitica del requisito I a condizione che siano rispettate alcune semplici prescrizioni tabellari, di carattere fortemente cautelativo.

Sulla base di queste ultime, per una soletta con spessore di 60 mm, il requisito I può ritenersi garantito per 30 minuti, senza bisogno di alcun ulteriore controllo analitico o sperimentale. Conseguentemente, da una soletta con spessore di 50 mm, come quella testata, sembrerebbe lecito attendersi il mantenimento del requisito di isolamento termico per un tempo minimo di 20 ÷ 25 minuti.

6. CONCLUSIONI

Indipendentemente dalla fonte normativa utilizzata come riferimento, i metodi analitici e tabellari cui si è fatto cenno sono affetti da un consistente margine di cautelatività, per cui le prestazioni accertabili per tali vie sono spesso notevolmente peggiori rispetto a quelle effettivamente dimostrabili dall'elemento in opera.

La valutazione sperimentale risulta essere, tra le varie alternative citate, quella affetta da minore cautelatività. Le caratteristiche di resistenza al fuoco accertate sperimentalmente si dimostrano, infatti, molto prossime a quelle "reali" della membratura.

Il caso pratico analizzato dimostra la correttezza di tali considerazioni. Dal confronto svolto tra le evidenze sperimentali e le indicazioni analitiche e tabellari, infatti, si ritrova conferma del differente grado di cautelatività che caratterizza le valutazioni effettuate con i vari metodi.

Le indicazioni tabellari si confermano le più cautelative, laddove i risultati sperimentali si dimostrano quelli più "generosi".

	Requisito R	Requisito E	Requisito I
Valutazione tabellare	60	> 60	20 - 25
Valutazione analitica	110	n.d.	30 - 35
Valutazione sperimentale	126	> 126	61

Nel particolare caso in esame, la scelta (onerosa per il committente) di classificare il tegolo per via sperimentale, è stata ampiamente premiata dall'ottimo comportamento che l'elemento ha evidenziato in forno. I risultati sperimentali hanno infatti superato, con un margine addirittura sorprendente per quanto concerne il requisito di isolamento termico, le più rosee aspettative, consentendo all'elemento in questione di fregiarsi della classificazione REI 60 - RE 120 e di collocarsi sul mercato, alla luce delle prescrizioni della normativa italiana, con rilevanti potenzialità di impiego.

Alla luce di quanto emerso, l'accertamento sperimentale deve ritenersi preferibile per elementi destinati alla prefabbricazione di serie. In questo caso, infatti, il maggior costo sostenuto dal produttore per la valutazione sperimentale può essere giustificato dalle migliori prestazioni attestabili per tale via e quindi dalla maggiore concorrenzialità con cui l'elemento è collocabile sul mercato.

In tutti gli altri casi, le valutazioni analitiche e tabellari, pur nella loro cautelatività, costituiscono un'alternativa assai più economica e perciò preferibile.

BIBLIOGRAFIA

1. Collepardi M. (1987) – *"Tecnologia del calcestruzzo"* – Hoepli, Milano.
2. Corbo L. (1997) – *"Prevenzione incendi. Corso di sicurezza nelle costruzioni"* – ETAS, Milano.
3. Mazziotti L. (1997) – *"Considerazioni sulla resistenza al fuoco"* – Rivista Antincendio, febbraio 1997.
4. Materazzi A. L., Rossi S., Zappia M. (2000) – *"Simulazione d'incendio in un edificio commerciale a rischio"* – Rivista Antincendio, maggio 2000.
5. Radogna E. F., Materazzi A. L. (1989) – *"La capacità portante delle sezioni di cemento armato in caso di incendio: tendenze recenti nei procedimenti di calcolo e nelle raccomandazioni tecniche"* – Notiziario A.I.C.A.P.
6. C.E.B. (1987) – *"Model Code for Fire Design of Concrete Structures"* – Bulletin d'information n. 174, Lausanne.
7. C.E.B. (1991) – *"Fire Design of Concrete Structures"* – Bulletin d'information n. 208, Lausanne.
8. C.I.B. W14 (1986) – *"Structural Fire Safety"* – Fire Safety Journal n. 9.
9. Ministero dell'Interno. Direzione Generale dei Servizi Antincendi (1961) – *"Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile"* – Circolare Ministeriale n. 91, 14 settembre 1961.
10. UNI-CNVVF 9502 (2001) – *"Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso"* – UNI, Milano.
11. UNI ENV 1992-1-2 (1998) – *"Progettazione delle strutture in calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione della resistenza all'incendio"* – UNI, Milano.
12. UNI EN 1363-1 (2001) – *"Prove di resistenza al fuoco - Requisiti generali"* – UNI, Milano.
13. UNI EN 1363-2 (2001) – *"Prove di resistenza al fuoco - Procedure alternative e aggiuntive"* – UNI, Milano.
14. UNI ENV 1363-3 (2000) – *"Prove di resistenza al fuoco - Verifica della prestazione del forno"* – UNI, Milano.