



L'impalcato di un viadotto ferroviario in Sicilia è rimasto coinvolto in un incendio. Le fiamme si sono sviluppate in prossimità delle pile, coinvolgendo l'intradosso di alcune travi e parte dell'anima vicino alle testate delle stesse

LA VALUTAZIONE DEL DEGRADO AL FUOCO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO

Edoardo Proverbio*
Vincenzo Venturi**
Gabriella Epasto***

I calcestruzzi ordinari confezionati con cementi Portland, se esposti a flussi termici come quelli derivanti da un incendio, subiscono radicali trasformazioni delle proprietà microstrutturali e meccaniche. Per ricostruire la storia termica di una struttura soggetta a incendio si possono seguire, come indicatori di temperatura, le trasformazioni termochimiche degli aggregati e del legante.

L'impalcato di un viadotto ferroviario ubicato nella Sicilia Orientale, realizzato in calcestruzzo armato precompresso, è rimasto coinvolto in un incendio durato circa quattro ore.

L'impalcato era costituito da sette travi a doppia T in calcestruzzo precompresso a cavi post-tesi. Su alcune carote prelevate da zone della struttura danneggiate dalle fiamme sono state eseguite caratterizzazioni microstrutturali e meccaniche mediante analisi ai raggi X, porosimetrie ad intrusione di mercurio, determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni e prove di rottura a compressione. Altre carote prelevate da zone integre sono state sottoposte a trattamenti termici. Su quelle prelevate da zone gravemente danneggiate dalle fiamme sono state rilevate lesioni interne probabilmente causate dagli stati tensionali indotti dagli elevati gradienti di temperatura. Le suddette indagini hanno avuto lo scopo di fornire i dati sperimentali per la validazione di un modello termo-meccanico agli elementi finiti, sviluppato secondo le linee guida della Normativa ISO 834.

E' ben noto in letteratura [1, 2, 3] che le proprietà microstrutturali e meccaniche del calcestruzzo armato sono pesantemente influenzate dall'azione delle elevate temperature. I danni si rilevano anche sull'acciaio che costituisce l'armatura, anche se il danno maggiore, a parità di temperatura, lo subisce il calcestruzzo. Le elevate temperature, infatti, inducono profonde trasformazioni microstrutturali: sono queste che, macroscopicamente, generano il decadimento delle proprietà meccaniche e prestazionali del calcestruzzo e dell'acciaio.

Una metodologia classica adottata per stimare il danno arrecato da un incendio si basa sull'osservazione diretta delle diverse gradazioni di colore raggiunte, in calcestruzzi contenenti inerti silicei e calcarei,



dopo l'esposizione alle alte temperature: se la massima temperatura raggiunta in superficie è compresa tra 300°C (573 K) e 600°C (873 K) la colorazione è rosa, tra 600°C (873 K) e 900°C (1173 K) è grigia scura, tra 900°C (1.173 K) e 1.200°C (1.473 K) è marrone e, infine, oltre i 1.200°C (1.473 K) è gialla. Purtroppo è un metodo approssimativo, quindi inapplicabile qualora siano necessarie informazioni dettagliate. L'ammaloramento del calcestruzzo armato dipende dalle temperature raggiunte durante l'incendio nelle differenti sezioni dell'elemento strutturale e dal tempo di esposizione a queste temperature; per questo una loro precisa determinazione è molto importante nella valutazione effettiva del danno strutturale. I diversi tipi di calcestruzzo rispondono in modo differente alle alte temperature e la risposta dipende, oltre che dagli inerti, dalla pasta cementizia impiegata, da eventuali additivi aggiunti e dal rapporto acqua/cemento.

Risalire alle radici del problema, capire le cause e i fattori che lo influenzano consente, tra l'altro, lo sviluppo di un settore del tutto nuovo nella progettazione di calcestruzzi in grado di resistere anche alle alte temperature. Il tutto è finalizzato ad ottenere maggiore affidabilità delle strutture.

La protezione dal cosiddetto "structural fire" negli ultimi venticinque anni è stata completamente ignorata e solo un evento catastrofico come il collasso del World Trade Center, l'11 Settembre 2001, ha rinnovato un forte interesse nei confronti di questo settore della ricerca.



In alcuni Paesi, tra i quali la Nuova Zelanda, esiste una Legislazione specifica circa l'affidabilità delle strutture in caso di incendio. Pertanto, capire quali siano le cause che inducono il cedimento strutturale di un'opera in calcestruzzo è di fondamentale importanza anche al fine di sviluppare una scala dei tempi entro cui inserire un eventuale piano di evacuazione della struttura.

I calcestruzzi esposti ad incendio vanno incontro a un duplice problema di natura sia estetica sia strutturale. Spesso si raggiungono temperature critiche che provocano un violento e istantaneo sgretolamento della superficie esterna (e quindi più calda) del calcestruzzo; tale fenomeno è indicato in letteratura con il nome di "spalling".

Lo spalling rappresenta un serio problema per le strutture realizzate in calcestruzzo armato poiché causa l'esposizione diretta delle armature alla fiamma. Per i calcestruzzi confezionati con cementi Portland ordinari, si osserva il fenomeno per lo più durante i primi venti minuti dell'incendio. Esso è provocato da diverse cause: dalla pressione dell'acqua "libera" - ovvero non reagita per formare composti idrati -, dalla pressione dell'acqua di bulk (vaporizzata con l'aumentare della temperatura e intrappolata nelle porosità chiuse del cls) e da una transizione di fase displasiva del quarzo. La transizione da low-quartz a high-quartz, infatti, produce espansione volumetrica degli aggregati e la formazione di cricche. Lo spalling si presenta ancora più pericoloso per i calcestruzzi precompressi nei quali principalmente si concentra negli spigoli e nelle zone curve degli elementi strutturali [2]. Per portare a termine un'indagine di questo tipo sono necessarie alcune informazioni circa:

- ♦ il luogo dell'incendio;
- ♦ la durata dell'incendio;
- ♦ il modo in cui l'incendio si è estinto (naturale o forzato);
- ♦ le tipologie di materiali impiegati per la realizzazione della struttura, il tipo di costruzione, la storia e, infine, l'uso cui è destinata la struttura.

E' opportuno aggiungere che eventuali interventi di ripristino da eseguire su strutture in calcestruzzo armato degradato da incendio sono funzione dello stato di degrado raggiunto dalla struttura e del successivo impegno cui si vorrà chiamare la struttura risanata.

Qualora gli effetti dell'incendio arrechino danni notevoli è dimostrato che è di solito più conveniente, in un conto economico complessivo, procedere al ripristino piuttosto che alla demolizione e alla successiva ricostruzione. Lo schema da seguire ogni qualvolta occorra procedere con un intervento di risanamento di una struttura coinvolta in un evento incendiario può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- ♦ il rilevamento dello stato di degrado;
- ♦ le verifiche di stabilità;
- ♦ le tecnologie di intervento.

In genere il rilevamento dello stato di degrado è eseguito su carote prelevate dalla struttura mediante le seguenti indagini sperimentali:

- ♦ diffrazione a raggi X;
- ♦ il calcolo della massa volumica del calcestruzzo mediante la pesata idrostatica;
- ♦ il calcolo della porosità mediante la porosimetria ad intrusione di mercurio;
- ♦ il calcolo della velocità di propagazione degli ultrasuoni;
- ♦ il calcolo del modulo elastico secante a compressione;
- ♦ la determinazione della resistenza a compressione.

Le indagini sperimentali consistono anche nel raccogliere tutti i dati relativi sia al materiale (stato di degrado del calcestruzzo) sia alla struttura (linea elastica dell'impalcato interessato dall'evento incendiario in condizioni di carico massimo rispetto alle condizioni di

progetto, formazione di cedimenti plastici e lesioni) necessari per eseguire una verifica, sufficientemente attendibile, dello schema statico che è venuto a crearsi a causa delle elevate temperature. L'esame è condotto parallelamente sul materiale e sulla struttura: questo perché alcune delle notizie ricavate dalle due indagini separate sono complementari, mentre altre sono indispensabili per una verifica reciproca.

La metodologia sperimentale sviluppata dagli Autori è finalizzata a caratterizzare il calcestruzzo alle varie temperature e a risalire a un'eventuale correlazione tra proprietà meccaniche (resistenza a compressione e modulo elastico) e proprietà microstrutturali (fasi rilevate mediante diffrazione a raggi X, porosità e velocità di propagazione degli impulsi ultrasonori).

Per tale scopo è stata ricostruita la storia termica di un viadotto ferroviario in calcestruzzo armato, localizzato nella Sicilia Orientale, soggetto ad incendio, accoppiata ad un modello numerico rappresentativo della stessa struttura e dello stesso evento incendiario.

Per studiare accuratamente lo stato della struttura sono stati sviluppati un primo esame visivo in loco e, in un secondo momento, uno studio in laboratorio secondo un programma sperimentale sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology) [1].

L'analisi visiva in loco è consistita anche nel carotare alcuni campioni da zone pesantemente danneggiate dalle fiamme. Sono state prelevate carote di diametro sia di 50 mm sia di 80 mm. Lo studio in laboratorio è stato condotto in due fasi: nella prima sono state eseguite indagini su campioni non danneggiati dalle fiamme, considerati come riferimento. Nella seconda questi sono stati "artificialmente" deteriorati in un forno a muffola con controllo di temperatura, per simulare le trasformazioni termiche irreversibili dei costituenti del calcestruzzo alle diverse temperature. Le indagini eseguite in laboratorio sono state le seguenti: determinazione della resistenza meccanica a compressione del cls, diffrazione a raggi X (XRD), porosimetrie ad intrusione di mercurio (MIP) e determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni (UPV). Sono stati utilizzati come indicatori di temperatura le trasformazioni chimico-fisiche degli aggregati e del legante.

Dopo aver definito le condizioni della struttura, sono state costruite le basi sperimentali per implementare un modello termo-meccanico in 3D di una trave a doppia T appartenente all'impalcato danneggiato. Lo scopo di questa modellazione agli elementi finiti è stato quello di stimare il campo delle temperature e degli stress termo-meccanici degli elementi più danneggiati e di ricostruire la mappa dei danni rilevata grazie all'esame visivo e alle indagini effettuate sulle carote.

I materiali e la metodologia sperimentale La struttura

La struttura oggetto di tale studio è un viadotto della linea ferroviaria della Sicilia Orientale.

Alcune travi del viadotto sono rimaste coinvolte in un incendio, sviluppandosi in corrispondenza delle pile, che ha danneggiato, oltre l'intradosso di alcune travi, anche l'anima in prossimità della testata delle travi. Uno schema dell'impalcato in questione è riportato in Figura 1.

Qui i numeri con riquadro indicano la locazione delle carote. I cerchi tratteggiati indicano approssimativamente le aree soggette all'incendio. Le linee a tratto pieno indicano, come rilevato dai carotaggi, la posizione nella trave di alcune lesioni giacenti su un piano verticale ri-

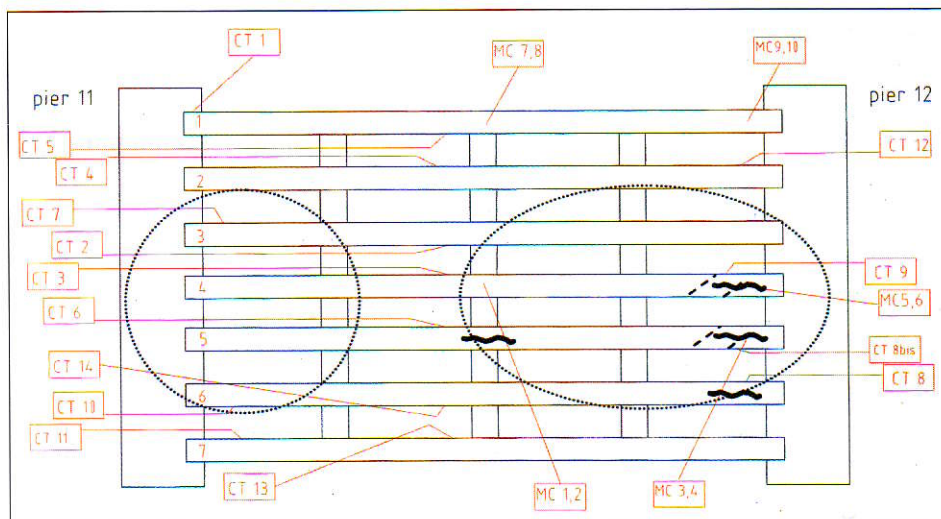


Figura 1 - Schema dell'impalcato danneggiato dall'incendio: ubicazione delle carote e delle lesioni

petto alla sezione retta della trave e trasversali rispetto all'asse della trave. Le linee tratteggiate indicano infine la posizione di cricche giacenti in un piano orizzontale rispetto alla sezione retta della trave e longitudinale all'asse della stessa (Figure 2, 3 e 4).

Le differenze tra le carote mostrate nelle Figure 2 e 3 sono le seguenti: la carota in Figura 2 è stata prelevata dall'intradosso della trave ed era parallela alla direzione della fiamma; la carota mostrata in Figura 3 (e il foro lasciato dal prelievo della stessa, Figura 4) apparteneva all'anima della tra-



Figura 2 - Carota prelevata da una trave esposta alla fiamma



Figura 3 - La lesione longitudinale su una carota prelevata dall'anima di una trave

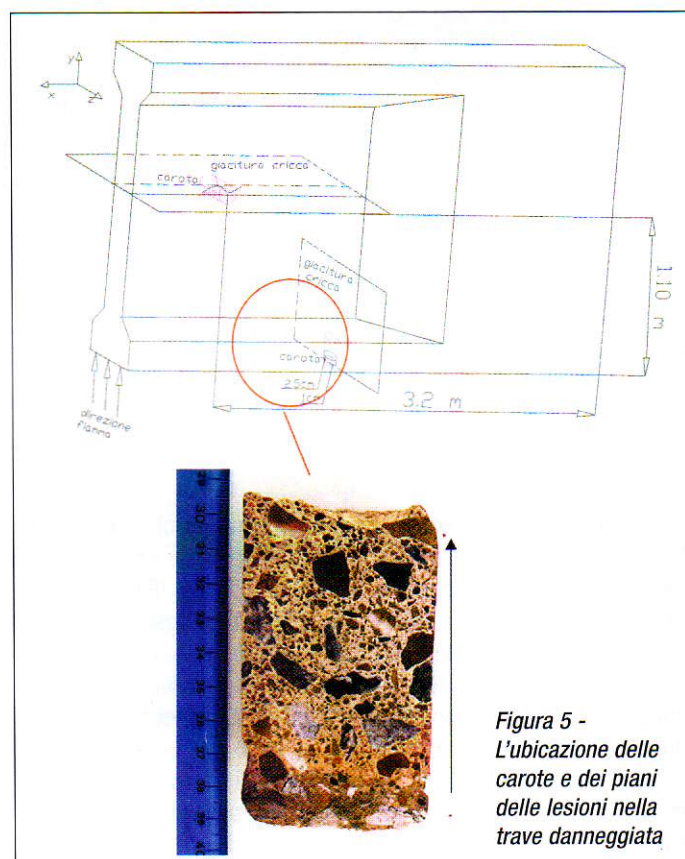


Figura 5 - L'ubicazione delle carote e dei piani delle lesioni nella trave danneggiata

Le indagini sperimentali

Nella seconda fase del presente studio, i campioni non esposti alla fiamma sono stati caratterizzati meccanicamente e microstrutturalmente. Dalle analisi è risultato che si trattava di un calcestruzzo di normali prestazioni meccaniche

Figura 4 - La lesione longitudinale di una trave sul fondo del foro lasciato dal carotaggio



ve ed era ortogonale alla fiamma (Figura 5). Il danno rilevato si è localizzato principalmente in prossimità della testata delle travi, vicino alle pile. Per meglio comprendere l'importanza dell'orientazione della carota rispetto alla fiamma, si osservi la carota riportata in Figura 5: si vedono chiaramente le diverse tonalità di colore del calcestruzzo man mano che si sposta lo sguardo lungo l'asse della carota nella direzione indicata dalla freccia.

L'incendio è stato spento dopo parecchie ore, durante le quali si sono raggiunti dei valori critici di temperatura che hanno causato lo spalling. L'esame visivo del viadotto ha rilevato un grave deterioramento per spalling nell'intradosso e nella zona centrale delle pile (Figure 6 e 7 rispettivamente).



Figura 6 - Il corner spalling e l'esposizione diretta delle armature alla fiamma nell'intradosso della trave

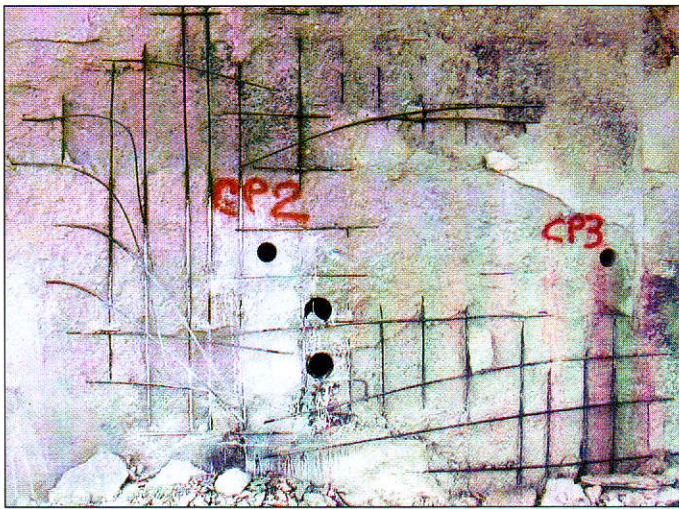


Figura 7 - Lo spalling alla base della pila

(resistenza meccanica a compressione cubica in situ, $f_{ck, is\ cube} = 54,5$ MPa) confezionato con inerti silicei. Le diffrattometrie a raggi X hanno mostrato che le fasi cementizie presenti erano $Ca(OH)_2$ (Portlandite), $CaCO_3$ (calcite) e CSH (calcio silicato idrato) gel. Le porosimetrie a intrusione di mercurio eseguite sugli stessi campioni hanno rilevato una porosità dell'ordine del 18,7%, mentre il valore medio della velocità di propagazione degli ultrasuoni, rilevata secondo quanto prescritto nello standard UNI EN 12504-4:2005 [4], era circa 3.848 m/s.

Anche i campioni esposti alla fiamma sono stati sottoposti ad una serie di indagini di laboratorio, al fine di valutare come le proprietà microstrutturali e meccaniche fossero state influenzate dalle elevate temperature.

E' stato rilevato un globale decadimento delle proprietà del cls in termini di resistenza a compressione (Figura 8), di porosità e di modulo elastico, ottenuto quest'ultimo attraverso la stima della velocità di propagazione degli ultrasuoni.

Le basse velocità sono riferite ai campioni più danneggiati (Figura 9); una velocità più bassa degli ultrasuoni indica un incremento dei vuoti e una densità più bassa (e quindi più alta porosità) del cls.

Le diffrattometrie a raggi X effettuate su carote prelevate dall'anima, esposte alla fiamma e provenienti da una trave lesionata (scansione a 0 cm, Figura 10), hanno rivelato la presenza di calcite e quarzo;

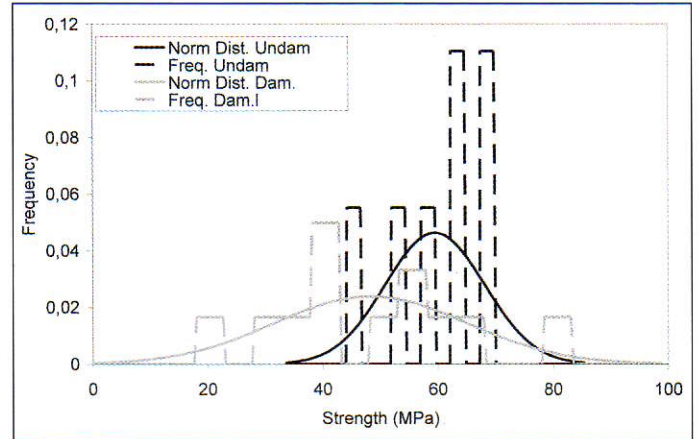


Figura 8 - Le distribuzioni della resistenza a compressione per carote danneggiate e integre

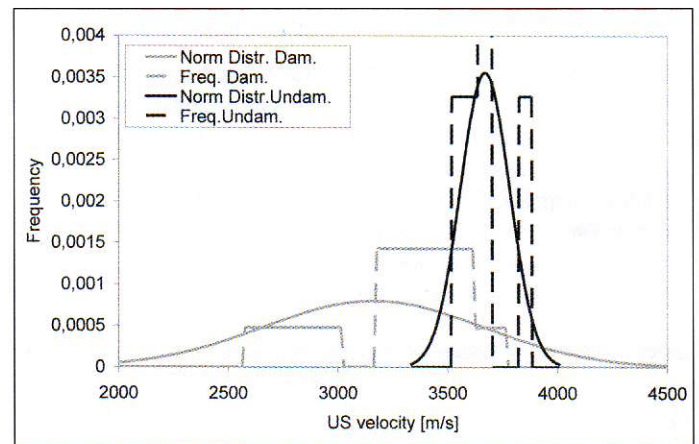


Figura 9 - La distribuzione della velocità degli ultrasuoni per carote danneggiate e integre

il CSH gel non ha subito trasformazioni e la portlandite non è stata rilevata. Se quest'ultima non è stata rilevata o è diminuita durante l'incendio, le temperature si sono mantenute oltre il valore di attivazione del processo di deidratazione.

Una volta individuate le trasformazioni avvenute, è stato necessario risalire alle temperature che hanno determinato tali trasformazioni. Per questo motivo è stata sviluppata una metodologia sperimentale in condizioni stazionarie: porzioni di carote non danneggiate dalla fiamma sono state trattate termicamente in un forno a muffola, senza l'applicazione di un

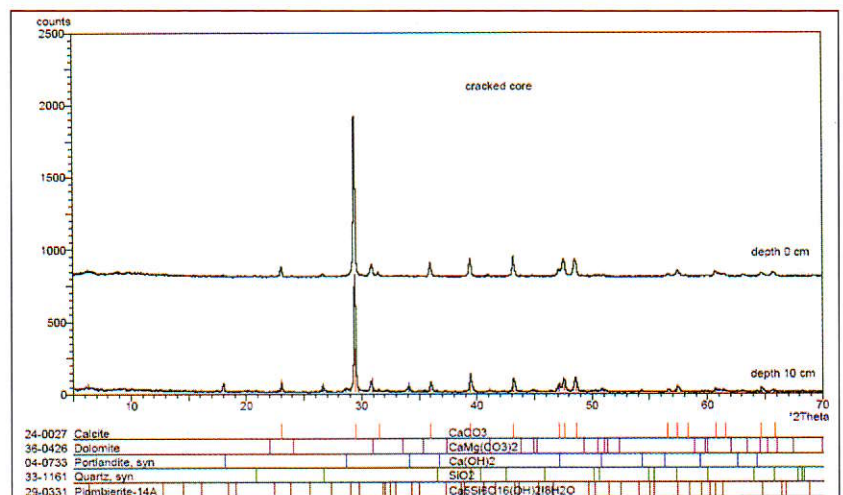
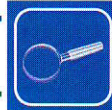


Figura 10 - Analisi ai raggi X della trave lesionata alle diverse profondità



carico esterno, alle temperature di 673, 773, 853, 923, 1023, 1.123 e 1.273 K, alla velocità di riscaldamento di 5 K/min.. Dopo aver raggiunto il valore impostato di temperatura il trattamento ha previsto la permanenza a tale temperatura per circa tre ore.

Il test è stato effettuato al fine di simulare gli effetti di un incendio reale. Dopo il trattamento termico, ogni campione è stato sottoposto ad analisi diffrattometriche e a porosimetrie. Le principali trasformazioni rilevate sono state quelle della calcite e portlandite, iniziate rispettivamente a 923 K e a 673 K come riportato nel grafico ottenuto dalle analisi a raggi X (Figura 11). Con le analisi a raggi X si sono potute stimare temperature solo sopra 673 K poiché, tra 293 e 673 K, non avvengono trasformazioni termochimiche importanti, eccetto la vaporizzazione dell'acqua in umidità.

Le porosimetrie hanno consentito di confermare la ricostruzione del campo di temperature ottenuto dalle analisi a raggi X (Figura 12). La perdita dell'acqua libera ha causato, da 393 K a circa 673 K, il primo incremento di porosità (dal 18,7% a circa il 28%); da 673 K a 853 K, la porosità è aumentata probabilmente per la deidratazione della portlandite, che a sua volta ha provocato la formazione di micro-fessure e vuoti,

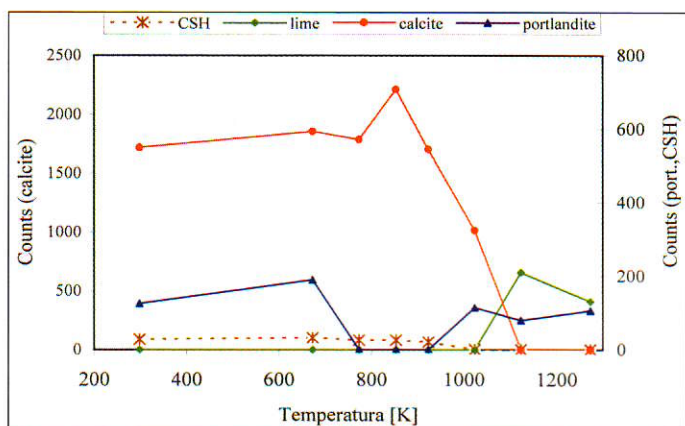


Figura 11 - La curva counts verso la temperatura per i campioni trattati termicamente

come già direttamente rilevato sui campioni. Lo spalling è stato anche osservato nei campioni trattati a circa 853 K. A 1.023 K la deidratazione delle fasi CSH si è completata e la porosità ha raggiunto il valore di 36%. L'apparente riduzione di porosità rilevata a 1.273 K è dovuta ad un vero e proprio processo di sinterizzazione della pasta cementizia.

E' stata analizzata anche una carota, lunga 75 mm (Figura 5), prelevata parallelamente alla direzione della fiamma per capire come fosse avvenuta la trasformazione delle fasi idrate e a che profondità si fosse spinto il danno. Nella porzione direttamente esposta alla fiam-

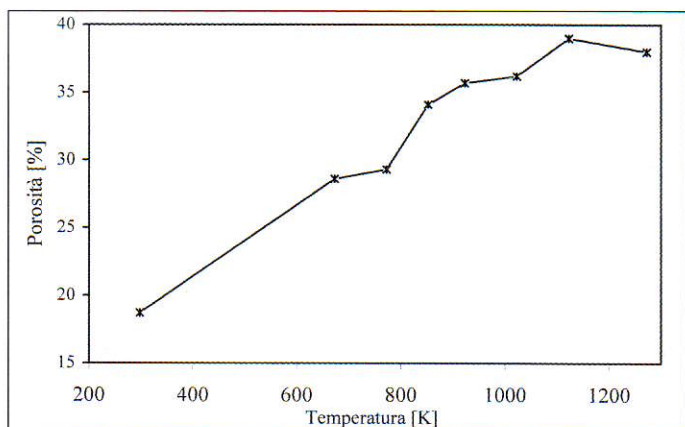


Figura 12 - Porosità verso temperatura

ma, la calcite ha subito un incremento per la precisione alla profondità di 1 cm e la portlandite non era più presente.

L'aumento della calcite è stato provocato dalla carbonatazione dell'ossido di calcio (lime) prodotto dalla decomposizione della portlandite. Alla profondità di 2,5 cm, la temperatura non ha innescato trasformazioni termiche.

Pertanto, attraverso la lettura incrociata delle Figure 11 e 13 si è evidenziato che nella superficie direttamente esposta alla fiamma (a circa 1 cm di profondità, nella porzione di intradosso vicina alla pila, Figura 5), è stata stimata una temperatura massima raggiunta compresa tra 673 e 773 K. Nella carota estratta dall'anima della trave n° 5, dal lato della pila 12 (Figura 1) e ortogonale alla direzione della fiamma, la temperatura ha superato 673 K ma non 773 K, tenuto conto che la portlandite si è deidratata e che il contenuto dei silicati idrati (CSH gel) non è variato (Figura 10, a 0 cm).

L'analisi termo-meccanica

Le indagini sperimentali sono state indispensabili per rilevare l'entità del danno subito dalle travi. Si può asserire che una delle cause dell'ammaloramento del cls è stata la deidratazione delle fasi cementizie (soprattutto portlandite) che è avvenuta nell'intervallo di temperature rilevate nelle travi lesionate.

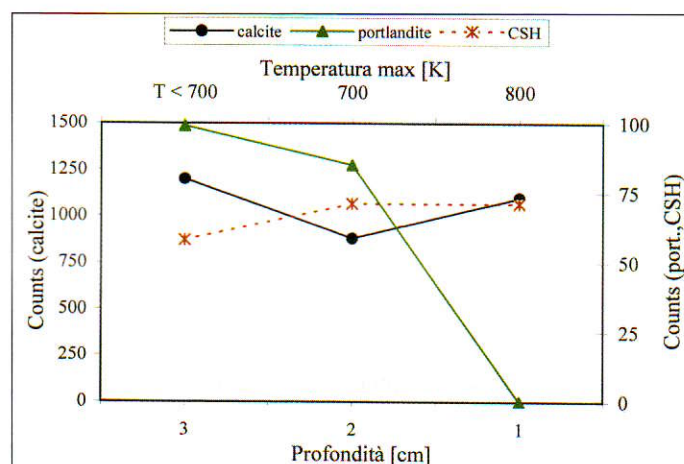


Figura 13 - Curva counts vs. profondità di una carota danneggiata dall'incendio

Mediante le analisi condotte in situ si è potuto ricostruire la mappa dei danni riportata in Figura 1 e concentrare l'attenzione sugli eventi che hanno causato tali danni.

Pertanto, al fine di ottenere anche per via numerica la correlazione tra temperature raggiunte nelle diverse aree dell'impalcato e la mappa dei danni, è stato sviluppato un modello termo-meccanico mediante l'impiego del metodo FEM (modellazione agli elementi finiti); dopodiché è stata anche stimata la percentuale di errore tra modello numerico e indagini sperimentali, al fine di valutare l'effettiva attendibilità dello stesso.

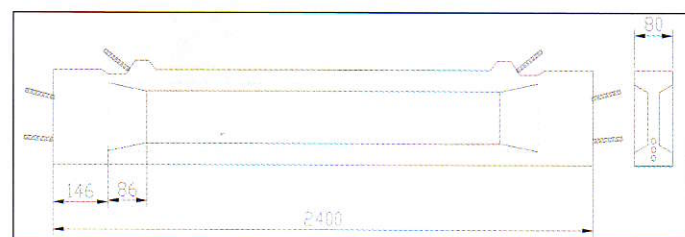


Figura 14 - Geometria della trave analizzata



Difatti lo scopo del modello suddetto è stato quello di ricostruire il campo delle temperature e delle tensioni-deformazioni (sono stati valutati anche gli spostamenti) provocate dalle elevate temperature. L'elemento strutturale testato nell'analisi termo-meccanica è una trave a doppia T con tre cavi post-tesi, appartenente all'impalcato danneggiato. I cavi hanno un diametro di circa 12 mm (Figura 14). Il primo scopo dell'analisi è stato quello di quantificare le temperature negli stessi punti dei test di laboratorio effettuati sulle carote. Il modello numerico tridimensionale è stato realizzato mediante il software ANSYS® [5].

L'analisi dei risultati

Attraverso il modello FEM si è stimato, dopo un tempo di 15.000 sec. (quattro ore circa), una temperatura massima sull'intradosso della trave, alla profondità di circa 1 cm, di 668 K.

La temperatura diminuisce man mano che si procede dalla superficie verso l'interno (Figura 15).

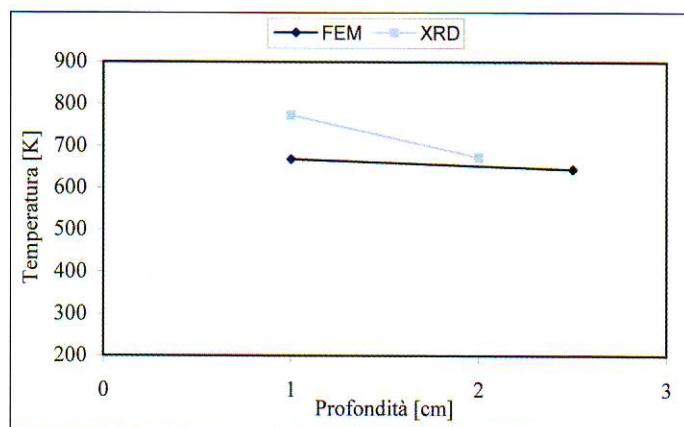


Figura 15 - La curva temperatura vs. profondità per l'intradosso della trave lungo l'asse y

Nell'anima della trave, alla profondità di 0 cm (ovvero direttamente esposta, Figura 16) si è stimata una temperatura pari a 690 K.

I risultati concordano con quanto valutato dall'esame visivo e dalle analisi in laboratorio.

Si è eseguita una stima dell'errore tra i risultati del modello e quelli delle indagini sperimentali nelle diverse sezioni della trave; l'errore calcolato sull'intradosso decresce con la profondità, per l'anima ha valori inferiori (Tabella 1).

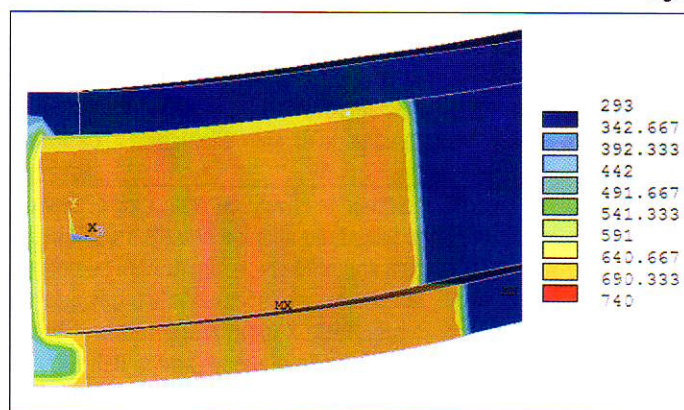


Figura 16 - Distribuzione della temperatura [K] dopo $15 \cdot 10^3$ s

L'errore è stato calcolato con la seguente equazione:

$$\text{errore}\% = 100 \cdot \frac{T_{FEM} - T_{EXP}}{T_{EXP}} \quad (1)$$

Si può asserire che i valori di temperatura calcolati dal modello numerico sono leggermente sottostimati (eccetto che nell'anima, alla profondità di 10 cm, dove il valore è sovrastimato), principalmente nella superficie direttamente esposta alla fiamma. Questo errore è probabilmente dovuto alla geometria semplificata della trave, dal momento che la presenza della soletta non è stata considerata.

Nell'analisi l'estradosso della trave si è considerato non sottoposto ai carichi termici; è stata assunta questa condizione di carico perché dall'indagine visiva è stato rilevato che la soletta, non l'estradosso, ha subito gravi danni.

La causa sarebbe che sulla parte più alta dell'anima, i gas caldi si sono accumulati generando un locale incremento di temperatura.

Il massimo errore stimato applicando la (1) è di circa 14%.

Ne segue, quindi, che il modello agli elementi finiti sviluppato è attendibile, anche se conservativo nella stima della temperatura. Dalla lettura dei risultati del modello numerico, si può asserire che l'innesco delle cricche longitudinali alla trave non è avvenuto per effetto delle tensioni normali; infatti, il massimo valore stimato della tensione normale, nella zona in cui si è rilevata la lesione mediante il carotaggio nell'anima, è al di sotto della resistenza a compressione del cls ($\sigma_x = -7,3$ MPa, Figura 17).

È importante aggiungere, tuttavia, che i valori delle tensioni di trazione sono leggermente sovrastimati, probabilmente a causa delle semplificazioni sulla geometria del modello: è stata trascurata la presenza delle staffe e dei ferri d'armatura longitudinali; è, infatti, in corrispondenza dell'intradosso della trave che l'effetto dell'assenza delle armature si fa più sensibile.

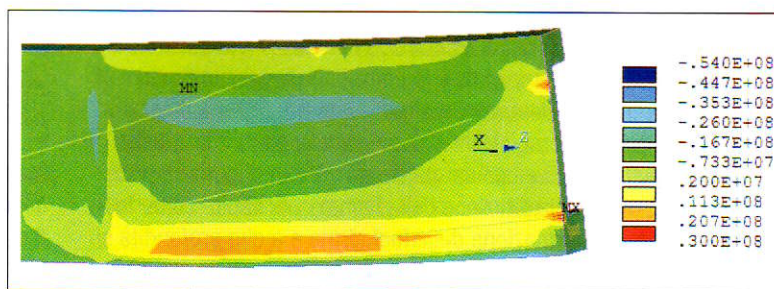


Figura 17 - Distribuzione della tensione σ_x [Pa] dopo $15 \cdot 10^3$ s

La leggera discrepanza tra valori sperimentali e numerici delle tensioni normali potrebbe anche essere attribuita al non perfetto comportamento dell'elemento utilizzato nella simulazione del calcestruzzo (notoriamente eterogeneo), come già rilevato da altri autori con altri programmi di modellazione agli elementi finiti [6]. Le indagini in situ hanno rilevato che nella sezione lesionata dell'anima, il taglio ha raggiunto un valore critico che ha causato l'innesco di fessure. Il taglio stimato dal modello numerico lungo il piano della cricca, nel punto in cui è stato fatto il carotaggio, ha assunto un valore critico ($\tau_{xy} = 1,1$ MPa) tale da poter provocare l'innesco di cricche.

Pertanto la causa della lesione rilevata nell'anima della trave potrebbe essere la differenza tra il coefficiente di espansione ter-



mica lineare del calcestruzzo e dell'acciaio, che avrebbe provocato, all'interfaccia dei due materiali, la formazione di stress di taglio tali da portare a fessurazione il cls.

La freccia in mezzeria stimata dal modello numerico (figura 18) si è mantenuta sotto il massimo valore di 48 mm ($\ell/500$, dove ℓ è la luce della trave, 24 m).

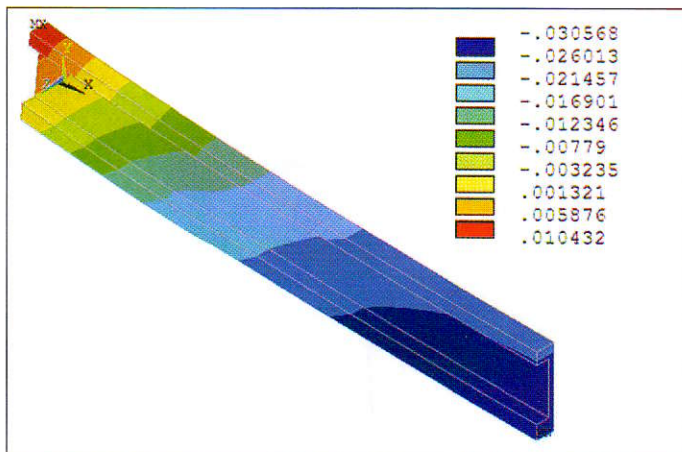


Figura 18 - Campo di spostamenti u_y [m] dopo $15 \cdot 10^3$ s

Asserendo che la freccia massima della trave non ha superato il limite di stabilità, pur non tenendo conto che il valore massimo di $\ell/500$ è riferito all'intero impalcato, ci si è mantenuti a favore della sicurezza, poiché le altre travi hanno un effetto d'irrigidimento della struttura.

Il confronto tra valori numerici e valori sperimentali stimati è riassunto nella Tabella 1, dove:

- ♦ è la porzione di cls appartenente all'intradosso della trave alla profondità di 1 cm (Figura 5)
- ♦ è la porzione di cls appartenente all'intradosso della trave alla profondità di 2,5 cm (Figura 5);
- ♦ è la porzione di cls appartenente all'anima della trave alla profondità di 0 cm (direttamente esposta al fuoco, Figura 5);
- ♦ è la porzione di cls appartenente all'anima della trave alla profondità di 10 cm (sul piano della cricca, Figura 5);
- ♦ è la sezione di mezzeria ($\ell/2$).

	Valori sperimentali	Valori numerici	Errore [%]	Ubicazione
T_{MAX} [K]	673÷773	668	-13,6	1
	673	644	-4,3	2
	673÷773	690	-10,7	3
	673	690	2,5	4
σ_x [MPa]	> -54,5 ($f_{ck, cube}$)	-7,3	-	4
u_y ($\ell/2$) [mm]	< 48	30,5	-	5

Tabella 1 - Confronto tra risultati sperimentali e numerici; nella tabella è anche riportato l'errore nella valutazione delle temperature Formula

Conclusioni

E' stata sviluppata una procedura per analizzare il comportamento di una trave in calcestruzzo armato precompresso in caso di incendio. La procedura si è basata su un modello termo-meccanico agli elementi finiti calibrato sperimentalmente.

Il modello ha dato la possibilità di stimare la temperatura nelle differenti sezioni, la profondità e l'entità dei danni e può essere molto utile anche quando i risultati sperimentali non sono disponibili. Il modello, infatti, è stato "validato" mediante dati sperimentali con buoni risultati (massimo errore stimato 14%).

La causa della lesione, rilevata nell'anima della trave, potrebbe essere dovuta alla gran differenza tra il coefficiente di espansione termica lineare del calcestruzzo e dell'acciaio, che avrebbe provocato, all'interfaccia dei due materiali, la formazione di stress di taglio tali da portare a fessurazione il cls, come dimostrato dal modello numerico.

Pertanto, il modello numerico implementato è attendibile e potrebbe essere utilizzato come metodologia diagnostica preventiva per testare una struttura in calcestruzzo armato ancora in fase di progetto o per una struttura già esistente se si paventa il rischio di incendio.

Un evento incendiario che provoca danni strutturali è considerato un evento straordinario, il cui valore nominale, che lo quantifica, non è considerato in fase di progettazione; si tiene conto, infatti, delle sole azioni permanenti.

Per tale ragione il modello numerico è molto efficace, perché permette di valutare le azioni termo-meccaniche (temperatura, tensioni, deformazioni e spostamenti) che si sommano alle azioni permanenti, senza eseguire costosi test distruttivi in scala semi-reale.



* Professore Straordinario di Scienze dei Materiali presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Messina - DCIIM

** Ingegnere e Direttore della Sidercem Srl - Istituto di Ricerca e Sperimentazione sui materiali da costruzione

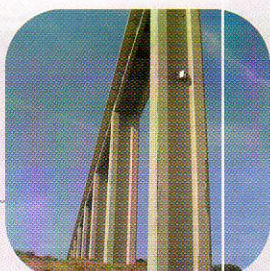
*** Ingegnere e Dottorando di Ricerca in Ingegneria e Chimica dei Materiali presso l'Università di Messina - DCIIM

BIBLIOGRAFIA

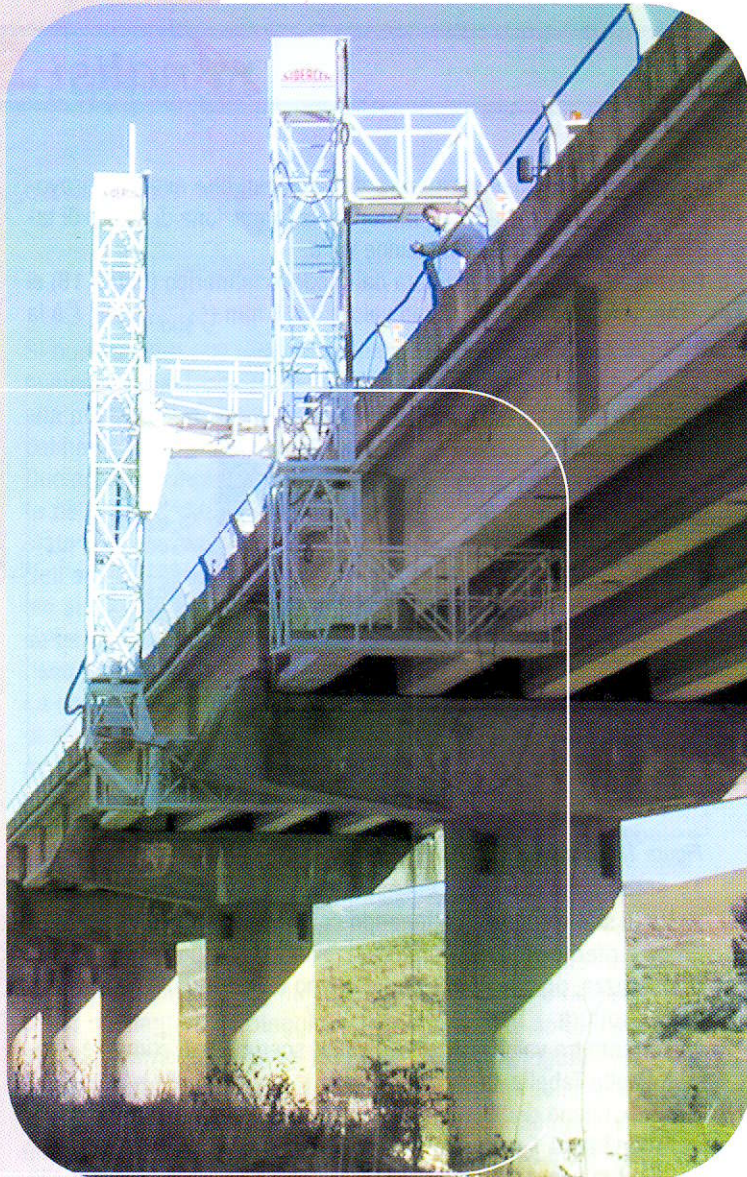
- [1]. L.T. Phan, J.R. Lawson, F.L. Davis - Effects of elevated temperature exposure on heating, characteristic, spalling, and residual properties of high performance concrete, Building and Fire Research Laboratory, National Institute for Standard and Technology, reprinted from Materials and Structures, vol. 34, pp. 83-91, March 2001.
- [2]. K.D. Hertz - Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, vol. 38, no. 2, pp. 103-116, March 2003.
- [3]. P. Cioni, P. Croce, W. Salvatore - Assessing fire damage to r.c. elements, Fire Safety Journal, vol. 36, no. 2, pp. 181-199, March 2001.
- [4]. UNI EN 12504-4:2005, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.
- [5]. ANSYS Release 7.0, Manuale dell'utente in versione CD, distribuito in Italia da Engin Soft, Ottobre 2002.

settori di intervento

- divisione 1086**
acciaio - calcestruzzo - cementi - laterizi - miscele - inerti
- divisione geotecnica**
meccanica delle terre - meccanica delle rocce - inerti
geognostica e prove in situ - chimico petrografico
- divisione diagnostica**
collaudi - strutture - controlli non distruttivi
- divisione strade**
conglomerati bituminosi - bitumi - prove in situ
- divisione ambiente**
chimica - mineralogico petrografico - ricerca amianto
- divisione topografia**
rilievo - fotogrammetria terrestre ed aerea
- divisione metrologia**
forze - lunghezze



www.sidercem.it



Istituto di Ricerca e Sperimentazione
sui Materiali da Costruzione

Laboratorio di Catania
Via Zenia, 12 - (Zona Ind.)
95045 Misterbianco (CT)
tel. 095.476942 PBX - fax 095.475003
e-mail: sidercem@tin.it

Laboratorio di Caltanissetta
C/da Calderaro (Zona Ind.) - C.P. 287
93100 Caltanissetta
tel. 0934.565012 PBX - fax 0934.575422
e-mail: info@sidercem.it

autorizzazioni, concessioni ed accreditamenti:

