

DANNEGGIAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI IN C.A. SOTTOPOSTI A INCENDIO

Paolo CIONI^(*), Pietro CROCE^(*), Riccardo DAL PINO^(*), Walter SALVATORE^(*)

(*) Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa

Sommario

L'esatta ricognizione del danneggiamento di edifici civili e industriali soggetti ad incendio è essenziale per decidere se ricostruire è più vantaggioso che riparare o viceversa. Considerato che lo studio del danneggiamento richiede la conoscenza della storia di temperatura cui è stato sottoposto ciascun elemento strutturale durante l'incendio e che tale conoscenza può essere ottenuta a posteriori soltanto mediante un approccio multidisciplinare, in grado di sintetizzare tutte le informazioni ricavabili da analisi di tipo termico, meccanico, fisico e chimico, viene sviluppata un'originale metodologia combinata di analisi che prevede l'individuazione preliminare, sulla base di prove non distruttive, degli elementi più danneggiati, sui quali concentrare gli ulteriori studi teorico-sperimentali, e la successiva ricostruzione a posteriori della storia termica di ciascun elemento, deducendo la massima temperatura raggiunta sulla superficie di ciascun elemento e i dati di input da utilizzare per le successive analisi termomeccaniche dell'edificio dallo studio di alcune trasformazioni termo-chimiche, tipiche dei minerali che usualmente compongono gli inerti del conglomerato. Il metodo proposto, applicato ad un caso reale, ha consentito non solo di ricostruire la storia di temperatura degli elementi, ma anche di spiegare l'inusuale quadro fessurativo rilevato, evidenziando promettenti possibilità di futuri sviluppi.

Introduzione

Il problema del riutilizzo degli edifici civili e industriali danneggiati dal fuoco è di grande attualità, soprattutto a causa della sua rilevanza economica.

Nella maggior parte dei casi il danneggiamento interessa zone limitate della struttura, perciò è necessario decidere se sia più conveniente ricostruire piuttosto che riparare o viceversa. A tale scopo diventa essenziale l'individuazione del danno effettivamente subito da ciascun elemento e la stima della sua capacità portante residua.

Nelle strutture in cemento armato i danni da fuoco non possono essere completamente individuati tramite l'esame delle superfici esterne. Infatti, poiché le zone danneggiate e/o fessurate si estendono profondamente all'interno delle membrature, a causa degli elevati gradienti termici, l'esatta ricognizione del degrado strutturale richiede l'impiego di raffinati metodi diagnostici, in grado di combinare prove non distruttive con analisi teoriche, termiche e strutturali. Purtroppo, allo stato attuale, i metodi non distruttivi sono insufficientemente calibrati per questo particolare tipo di problema e risultano spesso insoddisfacenti. L'utilizzo di metodi teorici d'indagine, d'altro canto, richiederebbe la disponibilità di precise informazioni sull'evoluzione temporale dell'incendio, difficilmente acquisibili a posteriori. Infatti, i metodi teorici, tesi a decidere i tipi d'intervento e la loro graduazione, sono partite essenzialmente dalla conoscenza dell'effettiva curva tempo-temperatura d'ogni elemento strutturale, che dipende, oltre che dal tipo d'incendio, anche dal tempo d'intervento dei Vigili del Fuoco, dal tempo necessario per estinguere il fuoco e dal conseguente raffreddamento, naturale o forzato, degli elementi. Ovviamente le curve standard di temperatura non tengono conto di tali fattori e pertanto, indipendentemente dal metodo impiegato, la stima del danneggiamento strutturale richiede l'acquisizione di informazioni supplementari concernenti la massima temperatura raggiunta da ciascun elemento strutturale e il conseguente processo di raffreddamento. E' così evidente che una metodologia di valutazione del danneggiamento da incendio di edifici esistenti deve essere di tipo multidisciplinare, combinando informazioni tratte da molteplici branche della scienza applicata.

Nella memoria è presentato e discusso un metodo non distruttivo, di tipo combinato, messo a punto dagli Autori, mediante il quale è possibile ricostruire a posteriori l'effettiva mappa delle temperature indotta dall'incendio reale.

Lo studio di alcuni edifici industriali danneggiati da incendio, illustrati nelle figure 1÷3, ha permesso di verificare le potenzialità del metodo proposto, mediante il quale sono stati ricostruiti a posteriori sia la storia termica di alcuni elementi, che il complesso quadro fessurativo in essi riscontrato.



Figura 1: Capannone danneggiato in Prato



Figura 2: Pilastro in c.a. Danneggiato dal fuoco – Prato



Figura 3: Rilievo in situ del danno – Prato

Un metodo combinato di diagnosi del danno

L'idea base del metodo è di ricostruire l'effettivo danno subito da strutture in calcestruzzo sottoposte ad incendio combinando analisi sperimentali e modellazioni teorico-numeriche.

Le indagini sperimentali preliminari hanno lo scopo di individuare le zone maggiormente danneggiate e la profondità di penetrazione di alcune isoterme caratteristiche, la cui conoscenza permette di risalire, mediante analisi termiche teorico-numeriche, alle massime temperature raggiunte sulla superficie degli elementi durante l'incendio, e, conseguentemente, di ricostruire l'andamento nel tempo del quadro tensionale e fessurativo nella struttura.

La prima fase del metodo prevede la localizzazione, mediante metodi sperimentali non distruttivi di tipo ultrasonico, sclerometrico e penetrometrico, delle aree maggiormente danneggiate della struttura su cui finalizzare e concentrare la seconda fase della sperimentazione, il cui scopo è la definizione del quadro termico e fessurativo.

Con metodi semidistruttivi, analizzando i nuclei estratti dagli elementi mediante carotaggio, si traccia la mappa delle lesioni all'interno della struttura, mentre le temperature massime raggiunte da ciascun elemento durante l'incendio si deducono con metodi numerici, controllando che nel modello teorico la profondità di penetrazione di alcune isoterme significative sia uguale a quella rilevata sull'elemento reale. Queste isoterme significative corrispondono alle temperature caratteristiche di alcune trasformazioni mineralogiche tipiche degli inerti impiegati nella preparazione del calcestruzzo, la cui profondità di penetrazione effettiva può essere determinata utilizzando metodi di analisi fisico-chimica, quali la diffrattometria.

Nelle figure 5÷9 sono illustrate alcune fasi dello studio relativo a edifici industriali danneggiati dal fuoco: in particolare, nelle figure 5, 6 e 7 sono illustrate alcune fasi del carotaggio in situ, mentre nelle figure 8 e 9 sono rappresentati i campioni estratti, che evidenziano l'andamento delle lesioni all'interno degli elementi.



Figura 5: fasi di carotaggio capannone in Prato



Figura 6: estrazione carota da pilastro – Prato



Figura 7: estrazione carota da pilastro – Prato

I campioni ottenuti dal carotaggio possono essere impiegati anche per la successiva fase d'analisi chimico-fisica il cui scopo, come detto, è di individuare la profondità di penetrazione delle trasformazioni mineralogiche caratteristiche di componenti dell'aggregato e dipendenti dalla temperatura. Ipotizzando che la composizione mineralogica iniziale del calcestruzzo sia omogenea sezione per sezione, la frontiera della zona trasformata può essere ottenuta semplicemente confrontando i cambiamenti di composizione mineralogica del calcestruzzo lungo lo spessore dell'elemento. Poiché tali trasformazioni avvengono a temperature ben definite, la frontiera della zona oggetto della trasformazione coincide con la posizione estrema raggiunta durante il riscaldamento dall'isoterma corrispondente.

Tra queste trasformazioni mineralogiche, particolarmente importante è la dissociazione, a 832 °C, della dolomite in brucite e periclasio. La rilevanza di questa trasformazione è dovuta al fatto che la dolomite è presente in molti calcestruzzi, essendo un componente tipico del calcare, degli aggregati calcarei e di molte arenarie, frequentemente impiegati come inerti.

Una volta rilevata la dissociazione della dolomite, è possibile determinare l'effettiva profondità di penetrazione dell'isoterma 832 °C e, conseguentemente, calcolare a posteriori, per via teorica o numerica, la massima temperatura raggiunta sulla superficie esterna dell'elemento stesso. Nell'ipotesi che durante l'incendio la curva tempo-temperatura sia descritta da una curva standard, si può valutare l'andamento del campo termico istante per istante e stabilire l'inizio della fase di raffreddamento, corrispondente ad un opportuno ramo discendente della curva temperatura-tempo. Questa operazione, ripetuta su più elementi strutturali di uno stesso edificio consente, infine, di ricostruire con buona approssimazione non solo l'evoluzione spazio-temporale dell'incendio nell'edificio stesso, ma anche il campo di tensioni e il quadro fessurativo nelle varie fasi.



*Figura 8: carota estratta da pilastro danneggiato
Capannone industriale in Prato*



*Figura 9: carota estratta da pilastro danneggiato
capannone industriale in Porcari (Lu)*

Applicazione del metodo ad un edificio industriale esistente

Tra i vari casi di incendi reali esaminati con la metodologia proposta, particolarmente significativo, per la tipologia d'edificio industriale interessata, è risultato quello che si è verificato in un capannone in c.a. a pianta rettangolare adibito allo stoccaggio di materiali cartacei, ubicato a Porcari (LU), che è qui illustrato in dettaglio.

La fase iniziale dell'analisi ha riguardato l'individuazione in situ, con metodo ultrasonico, delle zone maggiormente danneggiate. Le misure ultrasoniche dirette, relative a due diversi pilastri, sono rappresentate nelle figure 10 e 11, rispettivamente. L'esame dei grafici relativi alle diverse zone analizzate evidenzia che la velocità di propagazione e le proprietà meccaniche ad essa correlate sono pressoché costanti nel pilastro 1 (figura 10), mentre sono fortemente variabili nel pilastro 2 (figura 11), cosicché si può concludere che il danneggiamento da incendio interessa il solo pilastro 2 ed è pressoché nullo nel pilastro 1. Tali conclusioni sono state confermate, in particolare nelle zone più scadenti all'esame ultrasonico, dal quadro fessurativo rilevato nel corso delle prove distruttive (carotaggi), effettuate sui pilastri in oggetto presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa

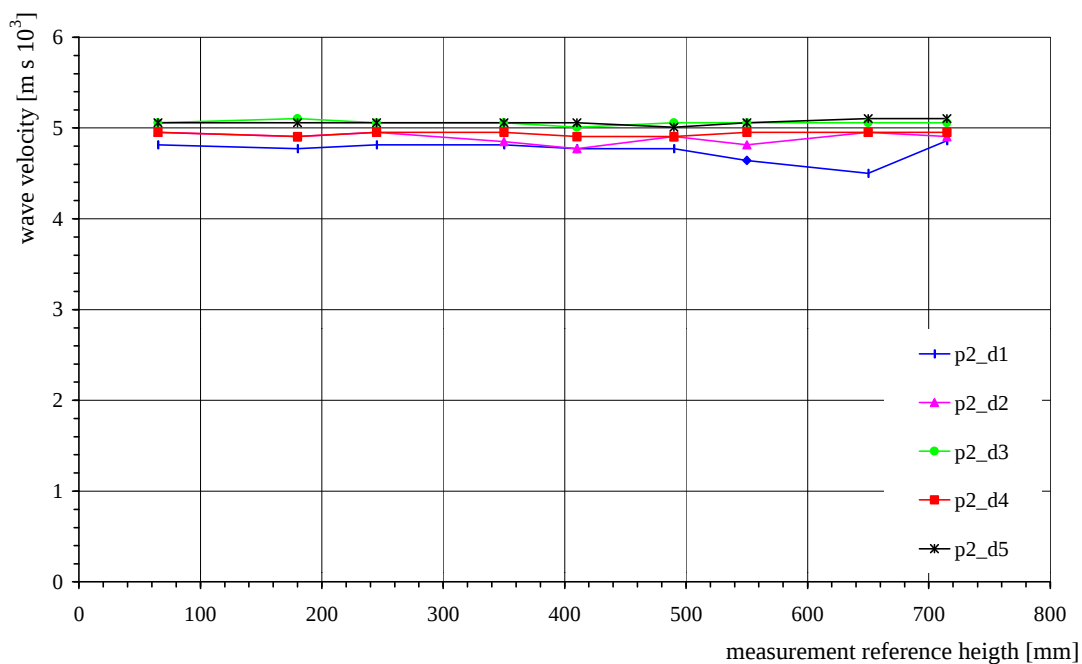


Figura 10: misure ultrasoniche dirette – pilastro 1, Porcari (Lu)

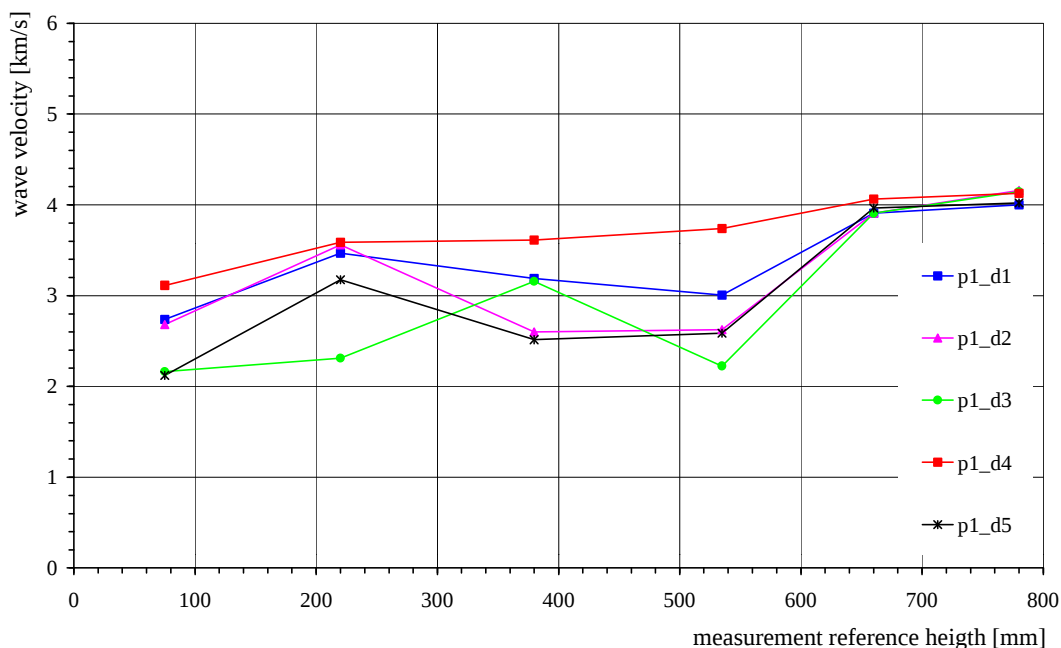


Figura 11: misure ultrasoniche dirette – pilastro 2, Porcari (Lu)

Sugli elementi ottenuti per carotaggio dai pilastri è stata successivamente eseguita l'analisi spettrografica allo scopo di determinare la presenza e la profondità di penetrazione delle trasformazioni chimiche tipiche dei componenti degli inerti e in particolare della già citata trasformazione della dolomite in brucite e periclasio.

Il confronto tra il diffrattogramma di figura 12, relativo al calcestruzzo situato in profondità, e il diffrattogramma di figura 13, relativo al calcestruzzo superficiale, esposto al fuoco, evidenzia che la dolomite si è dissociata in periclasio e brucite. Tale dissociazione è penetrata per 6 mm, per cui la massima penetrazione dell'isoterma 832°C durante l'incendio è stata di 6 mm.

Nota la posizione dell'isoterma 832°C e adottata un'appropriata curva standard temperatura-tempo è facile valutare, mediante analisi termica in transitorio, la massima temperatura raggiunta sulla superficie dell'elemento e l'inizio della fase di raffreddamento.

Nel caso in esame il transitorio termico della colonna è stato studiato utilizzando il programma agli elementi finiti COSMOS/M versione 1.80. Sia la colonna in calcestruzzo, che le barre longitudinali e le staffe in acciaio sono state modellate (figura 14) utilizzando elementi isoparametrici tridimensionali SOLID a otto nodi, mentre come curva di carico termico è stata assunta la curva standard dell'Eurocodice 1. L'input termico, in accordo con quanto avvenuto nell'incendio reale, è stato applicato ad una sola faccia del pilastro (faccia 2 di figura 15). In considerazione della presenza di pareti di tamponamento in calcestruzzo, anch'esse esposte al fuoco, e della simmetria del problema, le due facce laterali (facce 1 e 3 di figura 15) sono state considerate pareti adiabatiche, mentre sulla faccia 4, opposta a quella esposta, sono stati considerati un coefficiente di convezione aria-calcestruzzo di $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e una temperatura dell'aria esterna di 20°C .

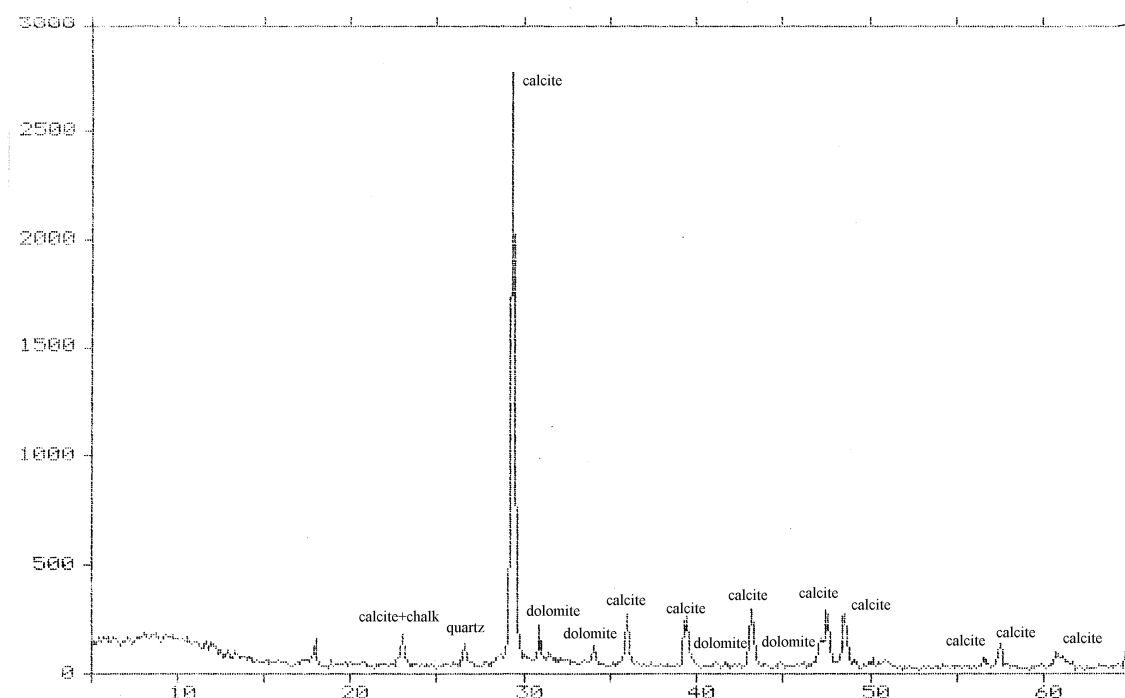


Figura. 12: diffrattogramma del calcestruzzo vergine

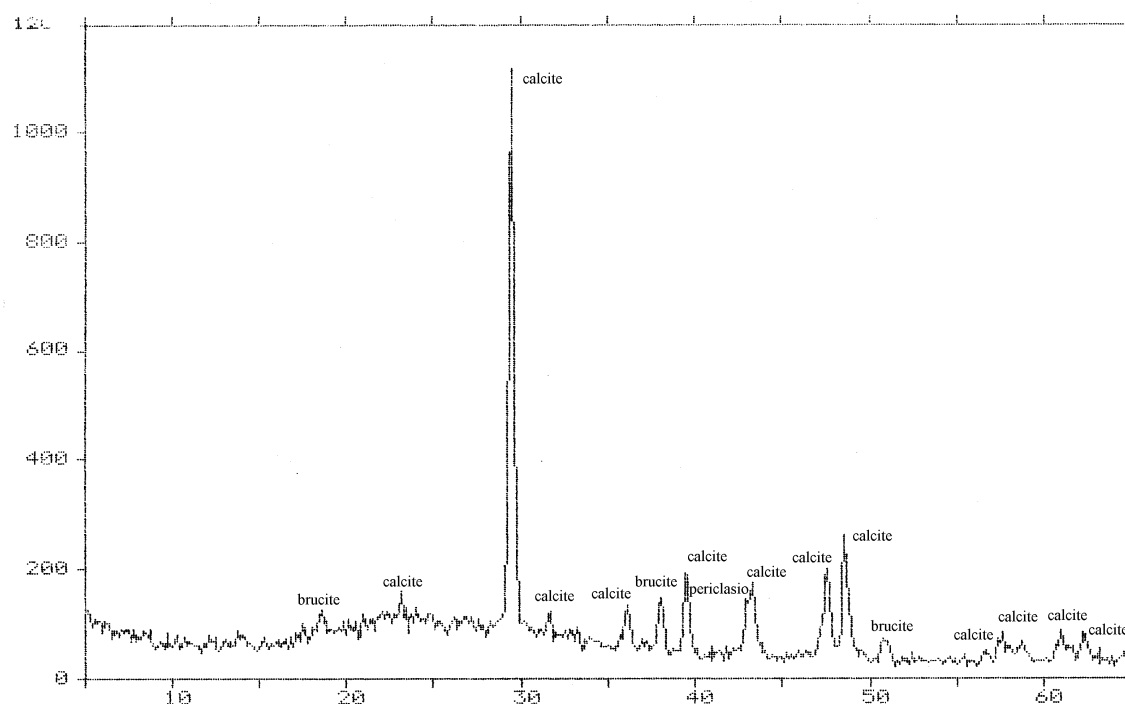


Figura. 13: diffrattogramma del calcestruzzo danneggiato

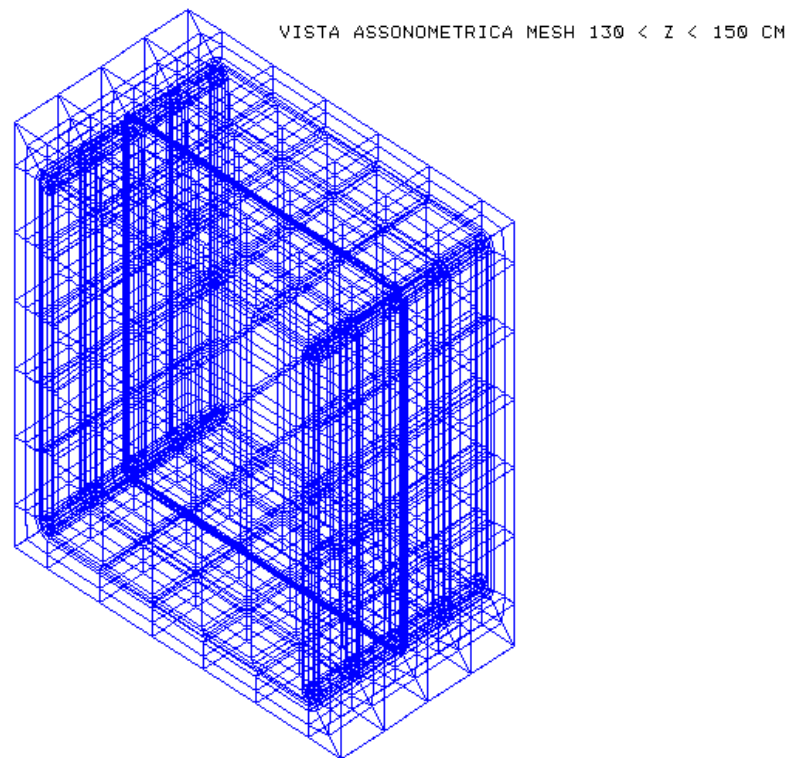


Figura. 14: vista parziale della mesh del modello agli elementi finiti

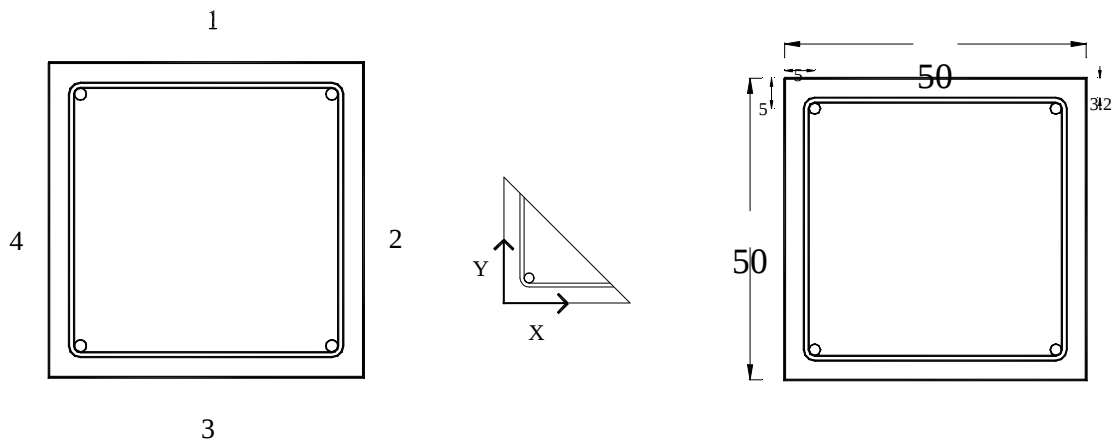


figura. 15: sezione del pilastro e numerazione delle facce

Con le ipotesi sopra menzionate, i risultati dell'analisi termica hanno consentito di stabilire che una penetrazione di 6 mm dell'isoterma 832°C corrisponde ad una temperatura massima della superficie esterna di 957°C, coincidente con l'inizio del raffreddamento. Il raffreddamento è stato considerato costituito da una prima fase di raffreddamento forzato, corrispondente all'intervento dei Vigili del Fuoco, e da seconda fase di raffreddamento naturale. La fase di raffreddamento forzato è stata simulata imponendo, in un intervallo di 30', una riduzione, lineare col tempo, della temperatura della faccia esposta dal valore massimo (957°C) a 20°C, e mantenendo costante a 20°C la temperatura della faccia esposta per ulteriori 30'. Le curve tempo-temperatura così ottenute sulla superficie esterna e in corrispondenza della frontiera della zona oggetto della dissociazione della dolomite sono rappresentate in figura 16.

La curva tempo-temperatura sulla superficie esterna è stata impiegata come dato di input per la successiva analisi termo-meccanica in regime transitorio, condotta sullo stesso modello agli elementi finiti utilizzato per l'analisi termica. Allo scopo di descrivere compiutamente il regime tensionale dell'elemento strutturale durante l'incendio, alle tensioni dovute al carico termico è stato anche sovrapposto un regime di forza

normale, mirante a riprodurre l'effetto dei carichi di esercizio.

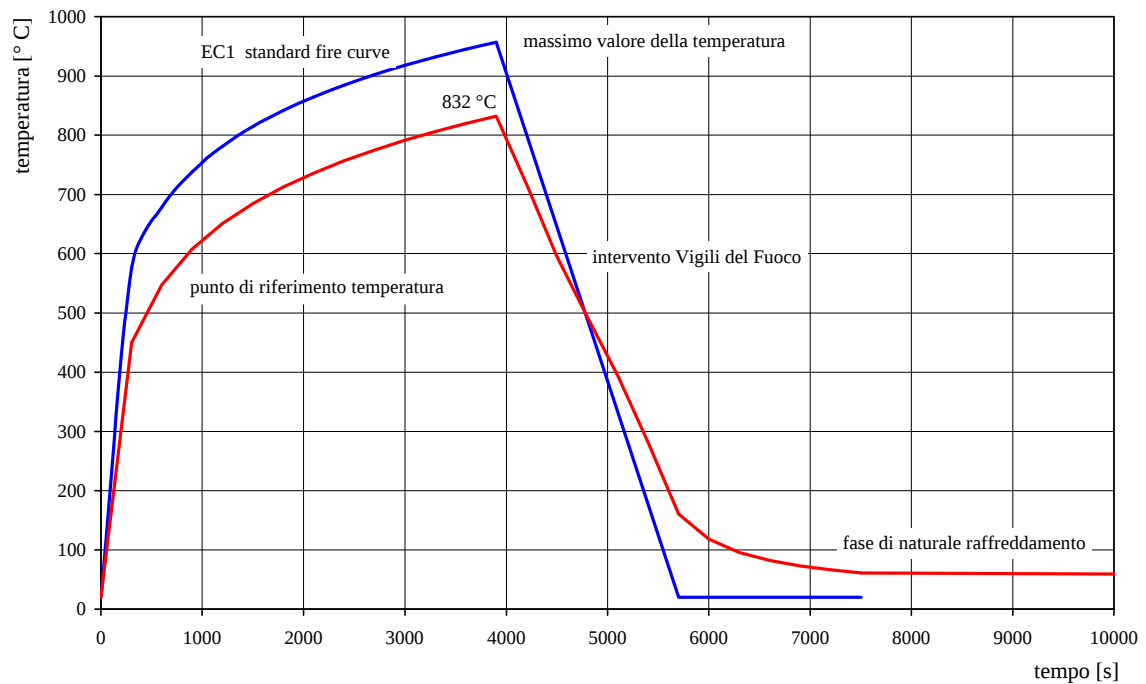


Figura. 16: Carico termico sulla superficie e andamento della temperatura a 6 mm di profondità

Nelle figure 17+22 sono illustrati alcuni significativi risultati dell'analisi termo-meccanica. In particolare in figura 17 sono rappresentati, in funzione dei tempi ivi indicati, i diagrammi della temperatura lungo la congiungente i punti medi dei lati 4 e 2, mentre nelle figure 18 e 19 sono riportati i campi termici all'interno dell'elemento strutturale in corrispondenza della massima temperatura raggiunta durante l'incendio (957°C), e al termine del processo di raffreddamento naturale, quando la superficie esterna della struttura ha raggiunto la temperatura iniziale di 20°C e il ciclo termico è praticamente concluso.

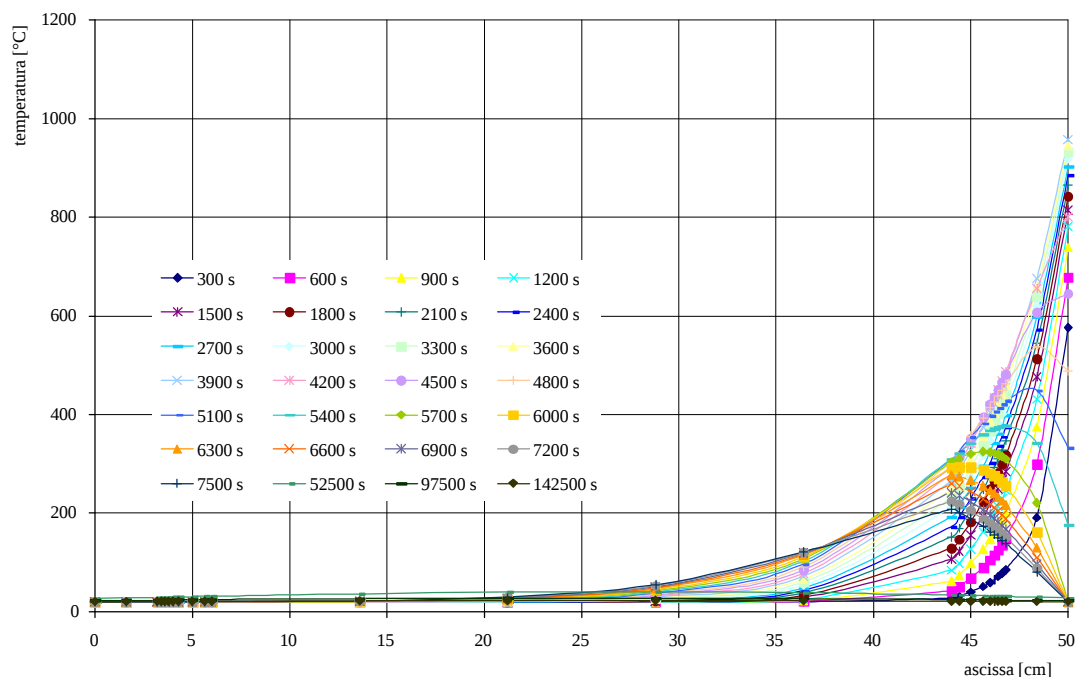


figura. 17: curve di variazione della temperatura risultanti dall'analisi termica

THERMAL Step=13

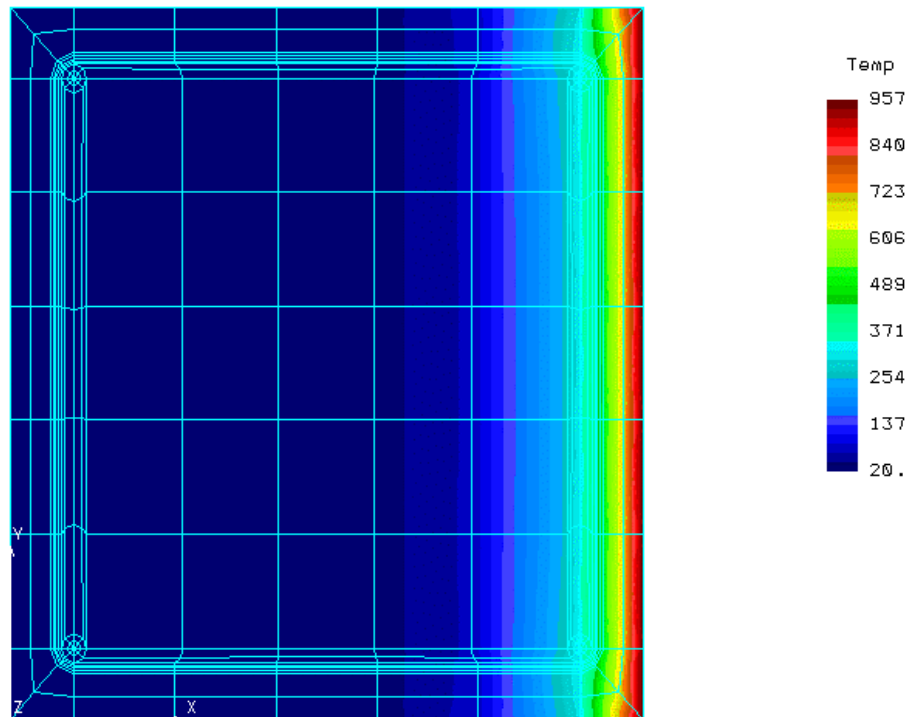


Figura. 18: mappa delle temperature nella fase di massimo riscaldamento

THERMAL Step=125

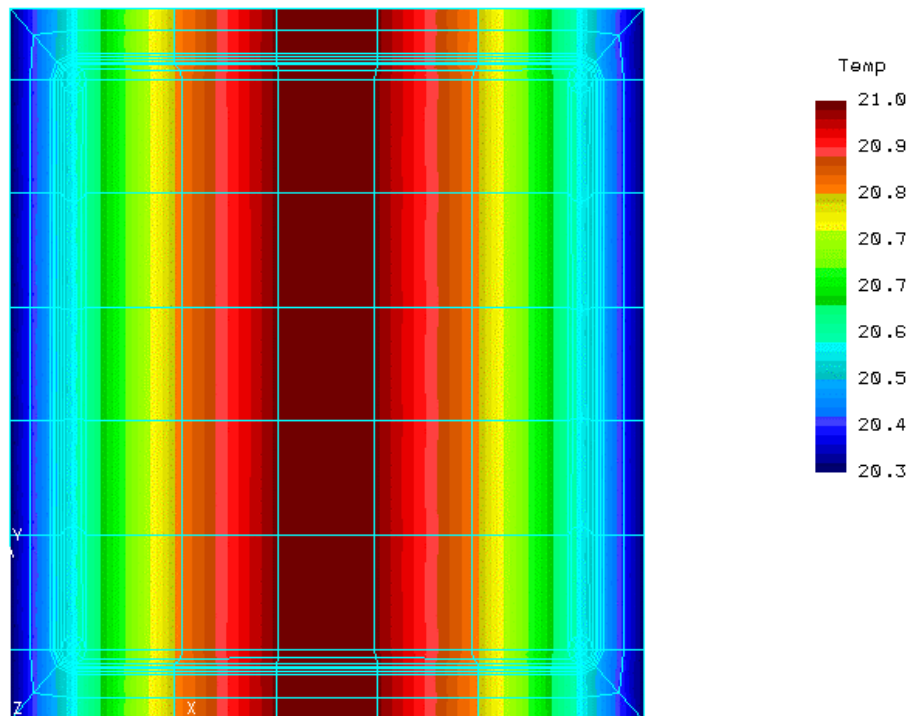


Figura. 19: mappa delle temperature nella fase finale di raffreddamento naturale

In figura 20 è rappresentato, secondo il riferimento di figura 15, il campo di tensioni σ_x in corrispondenza del raggiungimento della tensione di rottura per trazione del calcestruzzo. Il diagramma mostra che all'interno dell'elemento sono presenti tensioni di trazione σ_x rilevanti, che diventano di compressione in prossimità

delle superfici laterali adiabatiche, e si annullano sia in prossimità della superficie esposta al fuoco che della superficie sottoposta a scambio termico naturale. In figura 21 è rappresentato, invece, il campo di tensioni σ_y . Anche in questo caso le massime tensioni si verificano in corrispondenza del nucleo dell'elemento, mentre tensioni di compressione rilevanti si destano in corrispondenza della staffa e delle barre longitudinali, soprattutto a causa della differente conducibilità termica dei due materiali. Il campo di tensioni descritto, peraltro, concorda con il quadro fessurativo effettivo, caratterizzato da significative lesioni con andamento ortogonale alla faccia esposta.

L1n STRESS Lc=1

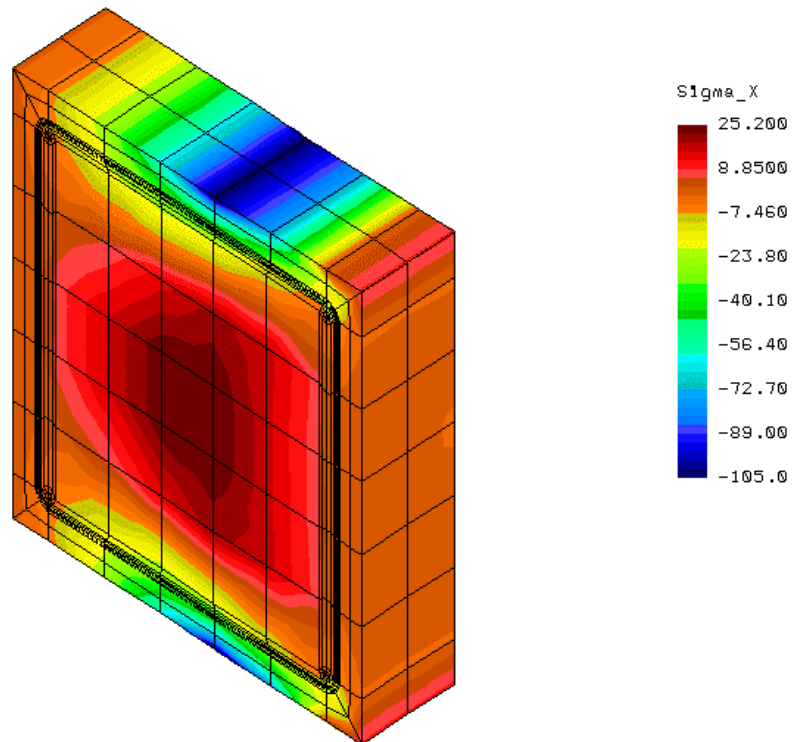


Figura. 20: mappa delle tensioni σ_x

L1n STRESS Lc=1

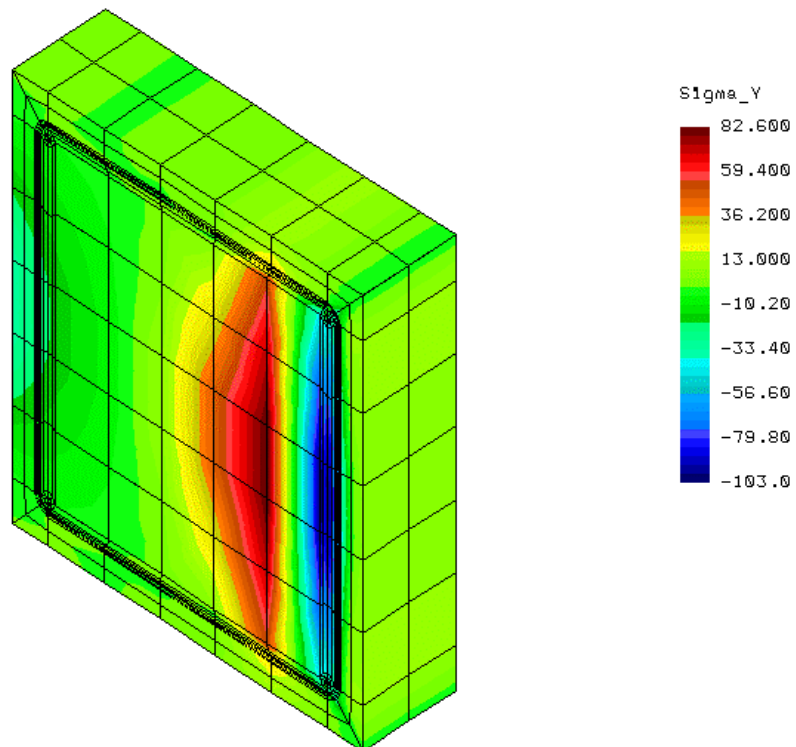


Figura. 21: mappa delle tensioni σ_y

Nel caso esaminato, inoltre, la staffatura non sembra esercitare significativi effetti di confinamento sul calcestruzzo, come appare evidente dalle modeste tensioni di trazione, dell'ordine di 11.5 daN/cm², in essa presenti (vedi figura 22).

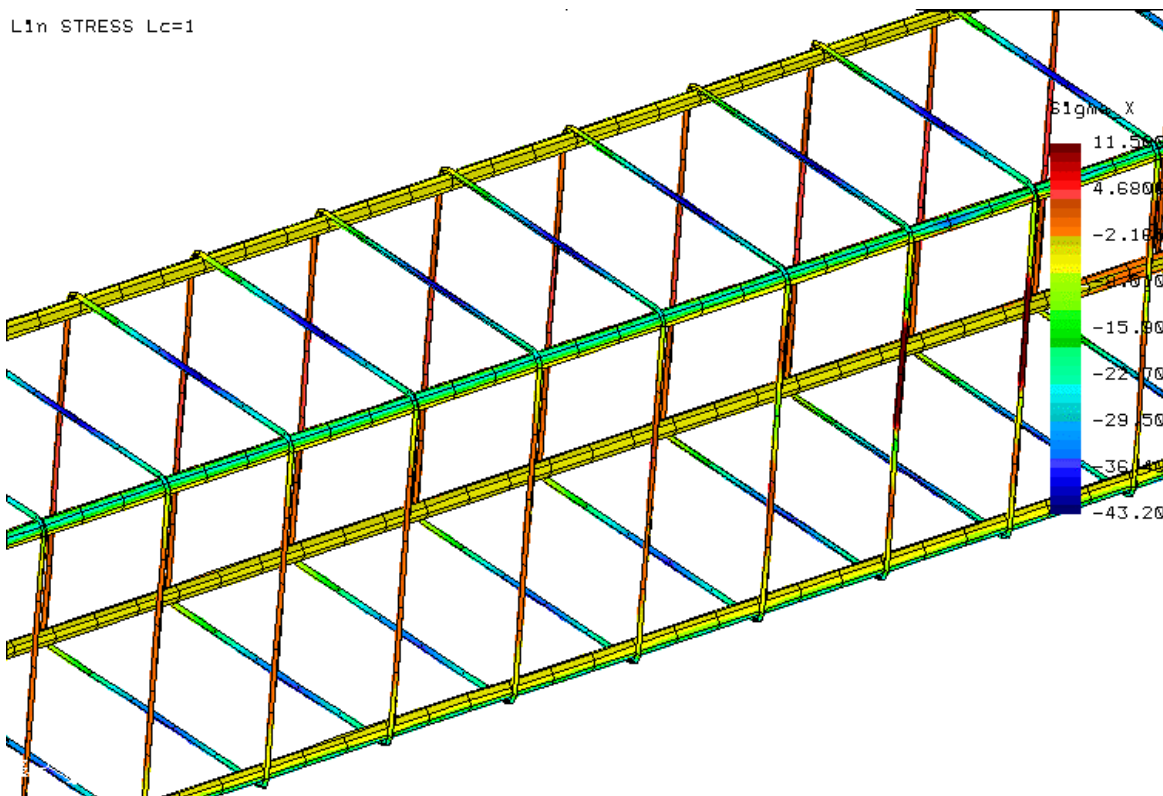


Figura. 22: mappa delle tensioni σ_x nella gabbia metallica

Conclusioni

Nella memoria è illustrata un'originale metodologia d'analisi del danneggiamento di edifici in cemento armato sottoposti ad incendio.

Il metodo di indagine proposto parte dalla constatazione che lo studio del danneggiamento richiede la conoscenza della storia di temperatura cui è stato sottoposto ciascun elemento strutturale durante l'incendio e che tale conoscenza può essere ottenuta a posteriori soltanto mediante un approccio multidisciplinare, in grado di sintetizzare tutte le informazioni ricavabili da analisi di tipo termico, meccanico, fisico e chimico.

Il metodo prevede l'individuazione preliminare, sulla base di prove non distruttive, ultrasoniche, sclerometriche e penetrometriche, degli elementi più danneggiati sui quali concentrare gli ulteriori studi teorico-sperimentali, e la ricostruzione a posteriori della storia termica dell'elemento, mediante lo studio delle trasformazioni termo-chimiche tipiche dei minerali che usualmente compongono gli inerti del conglomerato, e della massima profondità di penetrazione dell'isoterma corrispondente all'interno dell'elemento.

Tra queste trasformazioni, rilevabili mediante diffrattometria, è particolarmente rilevante quella caratteristica della dolomite, che a 832 °C si trasforma in periclasio e brucite. Infatti, la dolomite è presente in molti calcestruzzi, essendo componente caratteristico di un gran numero di calcari e arenarie, tipici costituenti degli inerti. La presenza di tale trasformazione consente di individuare la presenza e la profondità di penetrazione dell'isoterma 832 °C, la cui conoscenza è la base per il calcolo a posteriori, mediante analisi termica agli elementi finiti e utilizzando un'appropriata curva standard tempo-temperatura, della massima temperatura raggiunta sulla faccia esposta degli elementi strutturali considerati e dei dati di input da utilizzare per le analisi termomeccaniche dell'edificio.

Il metodo proposto, applicato allo studio di un edificio industriale reale soggetto ad incendio, ha consentito non solo di ricostruire la storia di temperatura degli elementi, ma anche di spiegare il quadro fessurativo, in apparenza inusuale, emerso dalle analisi distruttive, evidenziando promettenti possibilità di futuri sviluppi.

Ringraziamenti

Si ringraziano i tecnici del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa, ed in particolare i Sigg. G. Benedini e M. Di Ruscio, per la preziosa assistenza fornita nello svolgimento delle indagini sperimentali.

Bibliografia

1. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Ltd, London, 1975.
2. Lea, F.M., Davey N., The deterioration of concrete in structures, *J. Inst. C.E.*, n. 7, 1949.
3. Deer, W.A., Howie, R.A., Zussmann, J., *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*, Longman Group Ltd, London, 1992.
4. Lin, W.M., Lin, T.D., Power-Couche, T.D., Microstructure of Fire-Damaged Concrete, *ACI Materials Journal*, n. 3, 1996.
5. ENV1991-2-2, *Eurocode 1: Basis of Design and Action on Structures. Part 2.2: Actions on Structures exposed to Fire*, CEN, 1994.
6. Cioni, P., Croce, P., Salvatore, W., Evaluation of Damage of Reinforced Concrete Structures Exposed to Violent Thermal Gradients, *IABSE Colloquium "Savings Buildings in Central and Eastern Europe"*, Berlino, giugno 1998.