



# STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

## La valutazione del danno da incendio

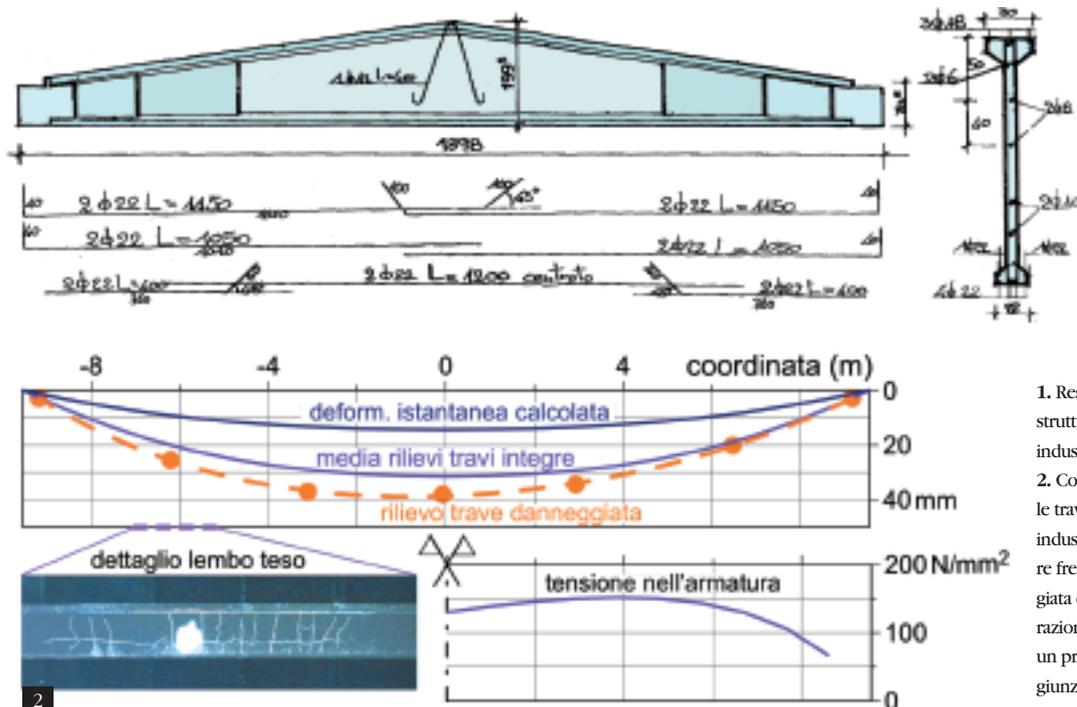
**di Roberto Felicetti**  
 Professore Associato,  
 Dipartimento di Ingegneria  
 Strutturale- Politecnico di  
 Milano  
 roberto.felicetti@polimi.it

Come è noto, le strutture calcestruzzo armato mostrano un buon comportamento al fuoco, grazie alla natura non combustibile del materiale ed alla sua bassa diffusività termica, che garantiscono una lenta diffusione del calore all'interno degli elementi strutturali. Ne consegue che nel copriferro si sviluppano forti gradienti termici e fessurazioni, ma di regola il degrado del materiale si esaurisce ad una profondità di pochi centimetri dalla superficie [1]. Vanno citate alcune importanti eccezioni, come il caso del distacco di frammenti ad opera della dilatazione termica e della pressione del vapore all'interno dei pori (spalling) e, su scala strutturale, l'innescò di meccanismi di collasso fragile di interesse membrature ad opera delle coazioni termiche (si veda l'esempio dei parcheggi sotterranei trattato in un'altra nota della presente monografia). Ciò nonostante le strutture in calcestruzzo in molti casi sopravvivono all'incendio e la valutazione della capacità portante residua diventa di primaria importanza al fine di stabilire la convenienza di un loro recupero e di progettare gli eventuali interventi di rinforzo. Si tratta però di un problema particolarmente complesso, che richiede un'inda-

gine articolata su diverse scale di osservazione e che coinvolge competenze in svariati campi, dall'ingegneria dei materiali alla meccanica delle strutture, dalla dinamica del fuoco alle indagini non distruttive. In questa nota si vuole dare un inquadramento sintetico della materia, con particolare attenzione per alcune tecniche di indagine innovative che, per l'efficacia e la facilità di applicazione sul campo, possono rivelarsi di particolare aiuto per dare risposta al problema in esame.

### RICOGNIZIONE GENERALE DELLO SCENARIO DI INCENDIO

Un primo, importante passo nella valutazione del danno subito dalla struttura consiste nell'esame dello scenario di incendio, con l'osservazione dei residui dei materiali che compongono gli arredi, le partizioni, i serramenti e gli impianti (Figura 1). Pur non avendo una valenza strutturale, questi elementi forniscono informazioni utili circa le massime temperature sviluppate, l'effettivo raggiungimento della condizione di incendio generalizzato, la quantità di materiali combustibili e quindi



1. Residui dei componenti non strutturali all'interno di un edificio industriale incendiato.  
 2. Confronto tra le deformate delle travi prefabbricate dell'edificio industriale di figura 1: alla maggiore freccia della trave più danneggiata corrispondono diffuse fessurazioni del lembo teso, sintomo di un primo cedimento nella zona di giunzione delle armature.

l'energia termica rilasciata [2, 3]. I dati raccolti, uniti ad una descrizione sintetica della geometria del comparto ed alla cronologia degli eventi (entrata in funzione di impianti antincendio, intervento dei vigili del fuoco, apertura di porte, rottura di finestre e lucernari) permettono di effettuare alcune valutazioni quantitative sulla possibile evoluzione nel tempo delle temperature a cui sono stati esposti gli elementi strutturali. A tal fine si rivelano particolarmente utili i modelli semplificati e gli strumenti di calcolo che si stanno sempre più diffondendo nel campo della progettazione della sicurezza al fuoco secondo l'approccio prestazionale (analisi fluidodinamica, modelli a zone, incendio localizzato [4]). Diventa così possibile una valutazione più oggettiva della severità dell'incendio reale, dal momento che la sua durata, articolata nelle fasi di propagazione, completo sviluppo e decadimento, non è direttamente confrontabile con i tempi di esposizione all'incendio celluloso standard a cui generalmente fanno riferimento le certificazioni degli elementi strutturali (si veda l'esempio di Figura 4).  
 Sempre nell'ambito dei rilievi su scala strutturale,

un esame delle frecce e delle deformazioni residue delle membrature principali fornisce già qualche indicazione sull'eventuale raggiungimento di situazioni critiche nei materiali. In particolare, il riscaldamento delle armature produce inizialmente un aumento della deformazione viscosa e plastica, che si manifesta con una diffusa fessurazione trasversale del copriferro e con un aumento dell'inflessione (Figura 2). Quest'ultimo aspetto diventa particolarmente significativo nel caso delle strutture prefabbricate, dove l'isostaticità degli schemi strutturali e la possibilità di confrontare la deformata di elementi nominalmente identici ma diversamente esposti alle alte temperature facilitano l'interpretazione dei risultati e l'identificazione delle zone più danneggiate.  
 Scendendo ad una scala di maggior dettaglio vi sono i rilievi dei quadri fessurativi, dei distacchi del copriferro, delle instabilità locali delle barre di armature, ecc. A questo livello di osservazione sono di grande utilità le valutazioni sulle condizioni residue del calcestruzzo, basate sull'estrazione di campioni e sull'impiego delle tecniche non distruttive di indagine.

**Owing to the generally good response to high temperatures, concrete structures are likely to survive a fire and the task of assessing their residual capacity is quite a common issue in Civil Engineering. The answer comes from the joint involvement of different fields of study, like Structural Mechanics, Fire Dynamics and Non-Destructive Testing. In this paper an overview on the subject is provided, together with the presentation of some easily accessible investigation techniques which may be of considerable help in the analysis of the thermally damaged concrete cover.**

## STIMA DEL DANNO DA INCENDIO CON TECNICHE NON DISTRUTTIVE

Dal punto di vista fisico-chimico, l'incendio dà origine nel calcestruzzo ad una serie di trasformazioni che si susseguono al crescere della temperatura [1-3]: l'acqua libera evapora a circa 100°C, i silicati idratati si decompongono a temperature superiori ai 300°C, la portlandite si deidrata a circa 500°C ed infine gli aggregati iniziano a trasformarsi e a decomporsi oltre i 600°C (conversione  $\alpha$ - $\beta$  del quarzo, decomposizione del carbonato di calcio). Le prestazioni meccaniche del materiale vengono ridotte di conseguenza e la resistenza a compressione tende a diminuire lentamente fino a 400° C e più rapidamente per temperature superiori ai 500° C. L'entità di questo decadimento irreversibile può però dipendere significativamente dal tipo di miscela, dalle condizioni di riscaldamento e raffreddamento, dal livello di sollecitazione e dagli effetti strutturali generati dai gradienti termici (autotensioni, fessurazioni). Non può essere quindi definita una relazione univoca tra la massima temperatura raggiunta e la resistenza residua del materiale. Tra le proprietà meccaniche, il degrado più marcato viene registrato per la resistenza a trazione e per il modulo elastico, e quindi per la velocità di propagazione delle onde elastiche.

Altre proprietà fisiche, quali la porosità, la concentrazione di microfessure, il colore e la conducibilità elettrica sono influenzate sensibilmente dall'esposizione alle alte temperature. Questa lunga serie di trasformazioni stimola l'interesse per l'applicazione delle tecniche non distruttive di indagine, come strumento per

una valutazione indiretta del decadimento fisico-mecchanico del materiale. Tuttavia, va considerato che molti dei metodi tradizionali puntano a mediare l'eterogeneità intrinseca del calcestruzzo, riconducibile alla frazione più grossa degli aggregati, e sono quindi poco adatti ad identificare i forti gradienti del danneggiamento subito dal copriferro.

I possibili approcci a questo problema (Tabella 1) si basano sullo studio della risposta media della parte più superficiale degli elementi strutturali, su un'analisi punto per punto di piccoli campioni prelevati a differenti profondità [2, 3] oppure sull'utilizzo di tecniche avanzate basate sull'interpretazione della risposta globale delle membrature, indagata mediante onde elastiche ed elettromagnetiche [5]. La sensibilità al degrado termico del calcestruzzo di alcune comuni tecniche non distruttive è stata messa in luce in una serie di prove di laboratorio aventi per oggetto dei cubetti di calcestruzzo (aggregato siliceo, lato = 150 mm,  $R_{cm} = 50 \text{ N/mm}^2$ ) danneggiati uniformemente mediante l'esposizione a cicli termici lenti fino a diverse temperature massime ( $T_{max} = 200-800^\circ\text{C}$  - Figura 3a [6]). Tra queste, la misura dell'indice di rimbalzo mediante lo sclerometro si dimostra molto utile per una prima identificazione in termini comparativi delle zone più danneggiate, sebbene l'informazione sia limitata allo strato più superficiale e non possa essere interpretata alla luce delle comuni curve di calibrazione (si noti l'assenza di risposta fino a 400°C, nonostante una riduzione del 30% della resistenza cubica a compressione). Più sensibile al danno termico risulta la misura della velocità degli impulsi ultrasonici, che tuttavia

**Tabella 1.** Possibili approcci per la stima del danno da incendio nelle strutture in calcestruzzo.

Risposta media del copriferro	Analisi puntuale di piccoli campioni	Tecniche speciali di interpretazione
Martello e scalpello Sclerometro Sonda Windsor Capo test Frattura interna BRE Velocità degli ultrasuoni	Prove meccaniche su piccola scala Resistenza alla perforazione Modulo elastico dinamico Velocità degli ultrasuoni Porosimetria Analisi della densità di microfessure Permeabilità ai gas Saturazione con acqua Colorimetria Analisi Petrografica Analisi termica differenziale (DTA) Analisi termogravimetrica (TGA) Dilatometria (TMA) Spettrometria raggi X e laser (LIBS) Termoluminescenza Analisi Chimica	Rifrazione di ultrasuoni Impact-echo e pulse-echo Tomografia sonora Analisi delle onde superficiali (MASW, SASW, ecc) Ground-Penetrating Radar Resistività elettrica

è condizionata dalla fessurazione e dalla forte attenuazione delle onde nel materiale danneggiato, che rendono indispensabili un ottimo accoppiamento dei sensori e la continua visualizzazione del segnale ricevuto mediante un oscilloscopio. Se effettuata col metodo diretto (per trasparenza), la misura fornisce un dato medio sulla risposta dell'intero spessore esaminato, che può essere utile per validare le mappe termiche ottenute dalla simulazione dello scenario di incendio (Figura 4c). Un'indagine più precisa sulle condizioni del copriferro può essere effettuata col metodo indiretto (per rifrazione), con qualche difficoltà in più nell'interpretazione dei risultati [7].

Per quanto riguarda la valutazione delle proprietà residue delle armature, in una ricerca appena conclusa presso il Politecnico di Milano si è riscontrata una buona correlazione tra il decadimento della tensione di snervamento  $f_y$  ed il quadrato dell'indice di rimbalzo misurato con un durometro dinamico portatile (metodo di Leeb - Figura 3b). Questa relazione si è dimostrata valida fino a temperature relativamente elevate (700-800°C) per un'ampia gamma di acciai, ad esclusione dell'acciaio inossidabile lavorato a freddo, per il quale il limite di snervamento può però essere definito solo convenzionalmente.

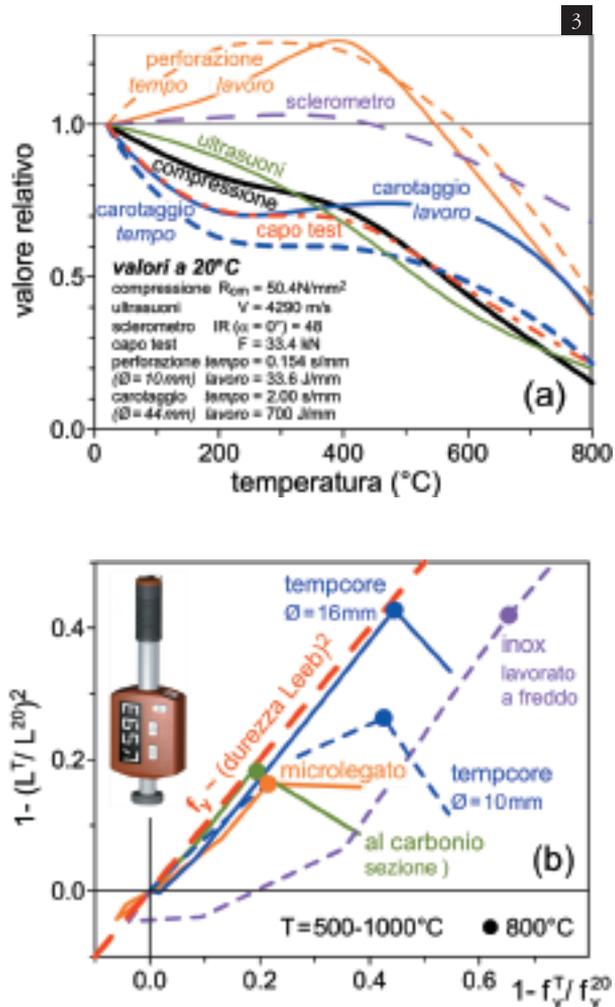
Tomando allo studio delle condizioni residue del copriferro vanno segnalate alcune tecniche innovative, particolarmente mirate all'identificazione del profilo di danno a profondità crescente e capaci di fornire un'indicazione immediata sulle condizioni della struttura in esame. Questi metodi vengono discussi brevemente nei paragrafi seguenti.

### RESISTENZA AL CAROTAGGIO E ALLA PERFORAZIONE

Il prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo, da sottoporre a prove meccaniche o ad analisi di laboratorio, è sicuramente una delle metodologie più diffuse per l'indagine sui calcestruzzi danneggiati dal fuoco. È altresì noto che la velocità di avanzamento della corona diamantata durante il taglio della carota fornisce già un'indicazione sulla qualità del materiale incontrato alle diverse profondità, in maniera del tutto simile a quanto viene correntemente fatto nelle prospezioni geofisiche o durante la perforazione dei pozzi petroliferi.

Le potenzialità del metodo sono state verificate utilizzando una comune carotatrice alla quale sono stati applicati dei sensori per la misura della velocità di rotazione, dell'avanzamento e della potenza elettrica

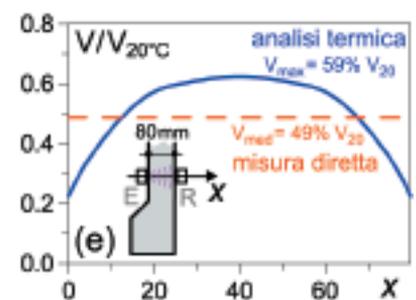
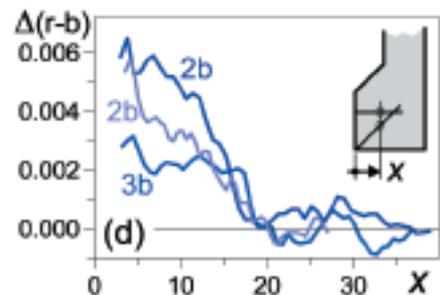
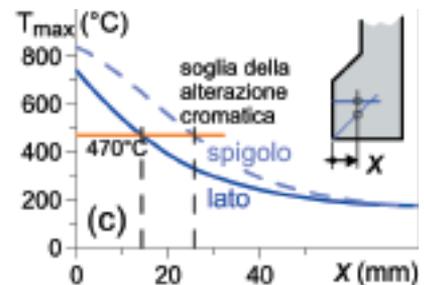
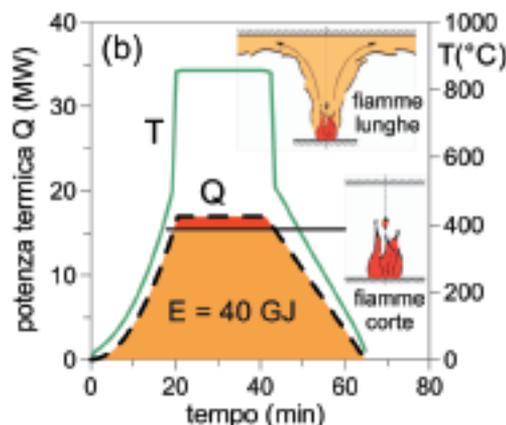
3. Sensibilità al danno da incendio (a) di alcune tecniche non distruttive per l'indagine sui calcestruzzi e (b) delle prove di durezza dinamica sulle barre d'armatura.



assorbita [6]. La costanza della spinta esercitata sulla corona si è rivelata una condizione importante per il successo di questo tipo di applicazione. Il parametro più significativo per la valutazione del danno da incendio è risultata la velocità di avanzamento della corona diamantata (Figura 3), il che rende il metodo facilmente applicabile anche disponendo di una attrezzatura tradizionale. La sensibilità al danneggiamento del materiale risulta molto buona, del tutto confrontabile con altre proprietà particolarmente indicate per questo tipo di identificazione, come la velocità degli ultrasuoni e la resistenza all'estrazione di inserti (capo test).

In maniera analoga è stato modificato anche un comune trapano a percussione alimentato a batteria

4. Nervatura di un tegolo TT esposto all'incendio di un autocarro: (a) vista del calcestruzzo dopo la rimozione del copriferro inferiore; (b) stima delle temperature sviluppatesi mediante il modello di fuoco localizzato dell'Eurocodice 1; (c) profili termici previsti nel bulbo della nervatura; (d) profili dell'alterazione cromatica ricavati dall'analisi di immagini digitali; (e) confronto tra l'andamento previsto delle velocità degli ultrasuoni nella nervatura ed il valore medio misurato per trasparenza.

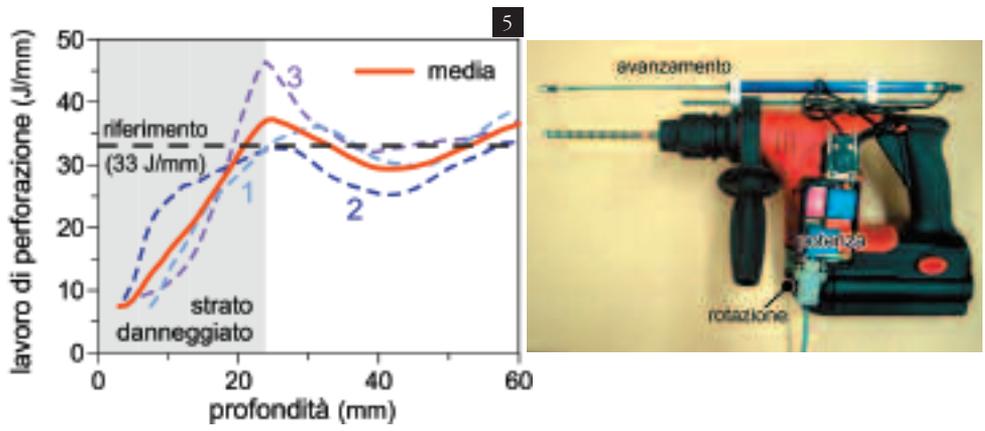


(Figura 5 [6, 7]), con il vantaggio di poter trascurare il controllo della spinta esercitata dall'operatore, che risulta ininfluente rispetto alla ben più energica azione del meccanismo battente. In questo caso il parametro più rappresentativo della qualità del materiale è risultato il lavoro netto speso per un avanzamento unitario della punta (Joule/mm).

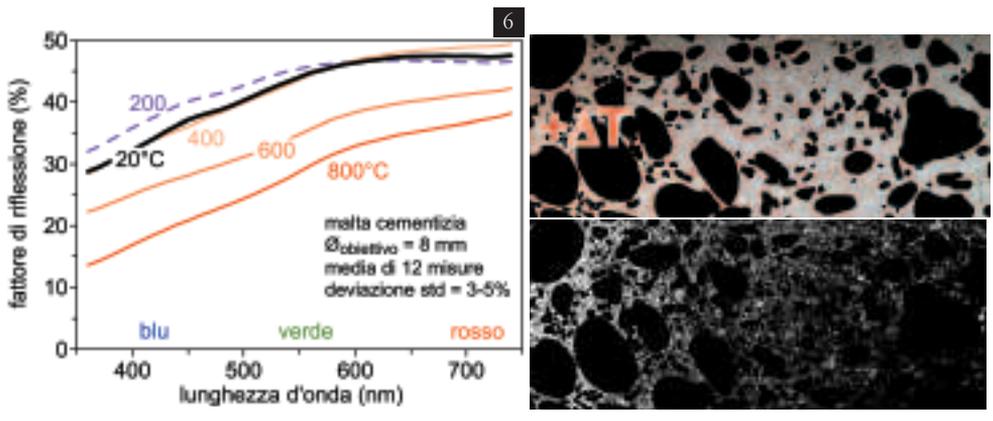
In linea di principio i due metodi presentano forti analogie, perché si fondano sulle micro-fratture che si producono quando un indentatore scalfisce una superficie. Tuttavia, mentre nella corona diamantata vi è una serie di piccoli risalti che abradano diffusamente il materiale, la punta del trapano presenta un unico tagliente di maggiori dimensioni su cui agisce un percussore. In questo secondo caso si ha dunque una maggiore concentrazione degli sforzi e una più profonda propagazione delle fratture, che è più evi-

dente nei materiali più duri e fragili, mentre può risultare attenuata in un materiale che abbia subito un lieve danneggiamento. Per questo il metodo basato sulla resistenza alla perforazione ha il limite di individuare solo danneggiamenti relativamente marcati ( $\geq 500^\circ\text{C}$  - Figura 3), pur essendo molto più pratico della carotatrice sul piano operativo, non necessitando di alimentazione elettrica, di acqua per il raffreddamento e di un supporto stabile.

Il vantaggio comune alle tecniche basate sulla perforazione è che consentono di eseguire una "scansione" delle condizioni del calcestruzzo a profondità crescenti (Figura 5). Nella maggior parte delle applicazioni le fasi conclusive della prova coinvolgono il materiale non degradato, fornendo un valore di riferimento della risposta meccanica al quale rapportare l'intero profilo. In tal modo è possibile analizzare i ri-



5. Trapano modificato per la misura della resistenza alla perforazione e profili ottenuti nel copriferro di una colonna dell'edificio industriale di Figura 1.



6. Effetto dell'alta temperatura sul fattore di riflessione del calcestruzzo siliceo di Figura 3a e vista laterale di una carota esposta a un gradiente termico, con l'immagine ottenuta dalla differenza dei canali rosso e blu normalizzati e successiva equalizzazione della gamma dei grigi (gli aggregati sono stati mascherati).

sultati in termini relativi, svincolandosi da una preventiva calibrazione del metodo. Questa diventa invece indispensabile qualora si voglia risalire ad altre proprietà di maggiore interesse ingegneristico, come la resistenza a compressione, data l'influenza della durezza dell'aggregato e di una serie di parametri operativi (diametro e tipo di utensile, pressione, velocità di rotazione, ecc).

**MISURE COLORIMETRICHE**

In molti casi il degrado termico del calcestruzzo comporta una lieve alterazione cromatica, caratterizzata inizialmente da sfumature rosa-rosso (300-600°C), quindi grigio biancastro (600-900°C) e infine giallo-marrone (900-1000°C). La colorazione rosa-rosso deriva dalla presenza di composti del ferro ne-

gli aggregati, che possono deidratarsi od ossidarsi nell'intervallo di temperature indicato. L'intensità di questa variazione di colore dipende dal tipo di aggregato ed è maggiormente pronunciata per gli aggregati silicei e meno per quelli calcarei ed ignei. L'identificazione di questo primo cambiamento di colore è di particolare importanza pratica, perché la sua comparsa coincide generalmente con l'inizio di significative perdite di resistenza del calcestruzzo. Spesso è rilevabile mediante un semplice esame visivo, pur con tutte le limitazioni di una stima qualitativa. Un metodo accurato ma oneroso consiste nell'esame di campioni di calcestruzzo con un colorimetro o uno spettrofotometro [5]. Quest'ultimo strumento consente di quantificare la percentuale di luce riflessa dalla superficie del materiale in ogni parte dello spettro visibile. Con riferimento al calcestruzzo ordi-

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. FIB: Bollettino di informazione n. 46, "Fire design of concrete structures - Structural behaviour and assessment", 2008, 209p. [2]. CIB W14 Report - "Repairability of Fire Damaged Structures", D.D. Drysdale and U. Schneider (Editors), Fire Safety Journal, V.16, 1990, pp. 251-336. [3]. Concrete Society, "Assessment, Design and Repair of Fire-damaged Concrete Structures", Technical Report n.68, 2008, 80 p. [4]. Buchanan A.H., "Progetto delle strutture resistenti al fuoco", Edizione italiana a cura di P.G. Gambarova e R. Felicetti, Hoepli, Milano, 2009, 428p. [5]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), "Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie", Report ME 62, 2005, 114 p. [6] Felicetti R., "Strumenti inediti per l'analisi del degrado nelle strutture in calcestruzzo armato", Atti del 17° Congresso C.T.E., Roma, 5-8 novembre 2008, p.675-684. [7]. Colombo M. and Felicetti R., "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", Fire Safety Journal, V.42, 2007, p. 461-472.

nario con aggregato siliceo citato in precedenza, si può notare inizialmente un fattore di riflessione relativamente costante (colore grigio) con una lieve dominante rossa (curva 20°C di Figura 6). L'esposizione all'alta temperatura produce effetti trascurabili fino a 400°C, mentre a temperature più elevate vi è una riduzione uniforme in tutto lo spettro, che corrisponde ad una tonalità più scura e, in termini relativi, ad una ancora più forte dominante rossa.

Senza ricorrere a strumenti così sofisticati, è stato dimostrato che questa alterazione cromatica può essere misurata con sufficiente accuratezza anche utilizzando le immagini ricavate con una comune fotocamera digitale [6, 7]. In questo caso la luce che giunge al sensore viene filtrata e suddivisa in tre sole bande cromatiche (i canali rosso, verde e blu del sistema RGB). Un semplice metodo per evidenziare la citata alterazione cromatica consiste e nel calcolare in ogni punto (pixel) la differenza  $R - B$  tra i valori del rosso e del blu (Figura 6). Non essendo più possibile controllare l'intensità e l'angolo di incidenza della sorgente luminosa in ogni parte dell'inquadratura, l'influenza dell'intensità luminosa viene eliminata normalizzando le misure dei due canali (ad esempio  $r = R / (R+G+B)$ ).

Questo procedimento ha il vantaggio di riassumere in un solo parametro scalare una misura che altrimenti andrebbe rappresentata nello spazio colorimetrico tridimensionale (si vedano i profili dell'alterazione cromatica di Figura 4d). Un altro punto di forza è il considerevole numero di informazioni disponibili in una singola immagine digitale (molte migliaia di pixel), che permette di analizzare separatamente la pasta di cemento e gli aggregati e di tenere conto della variabilità statistica delle misure dovuta alla eterogeneità del materiale.

Dal punto di vista operativo, la maggiore limitazione è rappresentata dalla necessità di estrarre una carota, anche se di piccolo diametro. Tuttavia, in molti casi applicativi si è riscontrato che la fessurazione del copriferro ad opera della dilatazione termica facilita la rimozione di alcune scaglie di calcestruzzo, permettendo di mettere a nudo l'alterazione cromatica del materiale (Figura 4).

Anche successivamente all'analisi col trapano stru-

mentato, l'esame della polvere raccolta ordinatamente durante la perforazione o l'analisi dell'immagine della superficie interna del foro, ricavata mediante un endoscopio munito di fotocamera, costituiscono delle valide alternative all'estrazione di campioni. Queste due ultime possibilità rientrano nell'ampio capitolo dei metodi combinati, nei quali più informazioni concorrono alla valutazione delle condizioni del materiale, a favore di una maggiore accuratezza. È questo l'approccio verso cui si sta orientando buona parte della ricerca nel campo delle prove non distruttive sulle strutture in calcestruzzo armato.

## CONCLUSIONI

La stima del danno da incendio nelle strutture in calcestruzzo armato è un tema ampio e in rapida evoluzione, in cui confluiscono competenze in diversi campi dell'Ingegneria Civile. Da un lato si possono registrare i notevoli sviluppi nel campo delle tecniche non distruttive di indagine, con la messa a punto di nuove strumentazioni e di metodi avanzati per l'interpretazione dei risultati. Si tratta però di tecniche non sempre facilmente accessibili per il professionista, e alle volte può risultare più conveniente un utilizzo opportuno di strumenti già disponibili. Il controllo continuo del processo di carotaggio e l'analisi colorimetrica delle immagini digitali sono due esempi significativi di questo tipo di approccio. Un altro bagaglio di competenze che si può rivelare di sicuro aiuto in questo tipo di indagini è quello fornito dalla "Fire Engineering", alla cui diffusione ha contribuito il crescente spazio riservato dalle attuali normative all'approccio prestazionale nella progettazione della resistenza al fuoco delle strutture. I metodi di calcolo che consentono una più precisa definizione dello scenario di incendio di progetto costituiscono infatti un valido supporto anche per la ricostruzione in termini quantitativi di un evento verificatosi realmente. L'integrazione tra questi modelli e le verifiche sul campo è senz'altro la via più promettente per una efficiente valutazione del danno da incendio, già orientata verso la determinazione della capacità portante residua della struttura e la progettazione degli eventuali interventi di rinforzo.