

# Comportamento al fuoco delle strutture in c.a.



di Mario Collepari

**Dalla seconda edizione del libro "Il Nuovo Calcestruzzo" di Mario Collepari pubblichiamo in anteprima assoluta il nuovo Capitolo XXIV**

## **Fire behaviour of Reinforced Concrete Structures**

Mario Collepari

*This article represents the last chapter of second edition of Mario Collepari book "The new concrete" which is presented here as an exclusive preview. The effect of high temperatures and especially of fire, on reinforced concrete compressive strength is rather complex and depends on concrete composition (w/a, type and amount of aggregates, type of cement, etc.), on compaction and homogeneity of concrete in place, on stress conditions of material during heat rising and, obviously on velocity of heating, on form and dimension of the structure, etc. All this aspects are discussed and analysed and special attention is given to the role of concrete cover.*

*\* Fa eccezione a questa regola il comportamento dei calcestruzzi ad alta resistenza meccanica ( $\geq 80 \text{ N/mm}^2$ ) come è descritto in § 5*

## **1. La complessità del comportamento**

Il comportamento del calcestruzzo alle alte temperature assume una rilevante importanza pratica nelle strutture in calcestruzzo soggette **all'azione del fuoco**.

L'effetto delle alte temperature e in particolare del fuoco, sulla resistenza meccanica del calcestruzzo, è piuttosto complesso. Esso dipende dalla composizione del calcestruzzo (rapporto acqua/cemento, tipo e quantità di inerte, tipo di cemento), dalla compattezza e dall'omogeneità del getto, dalle condizioni di carico cui il materiale è sottoposto durante il riscaldamento, oltre che ovviamente dalla velocità del riscaldamento, dalla forma e dimensione della struttura, ecc.

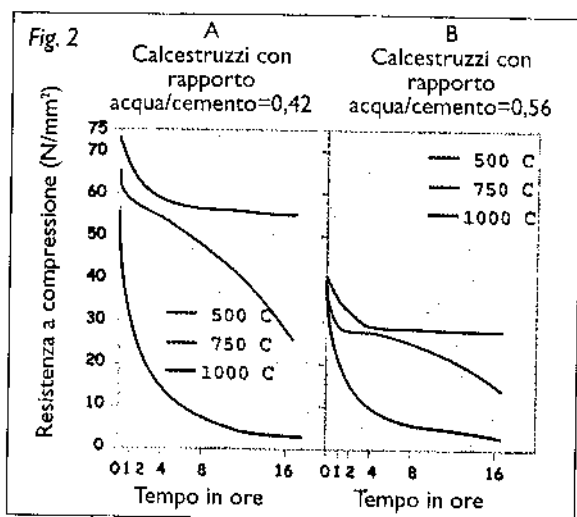
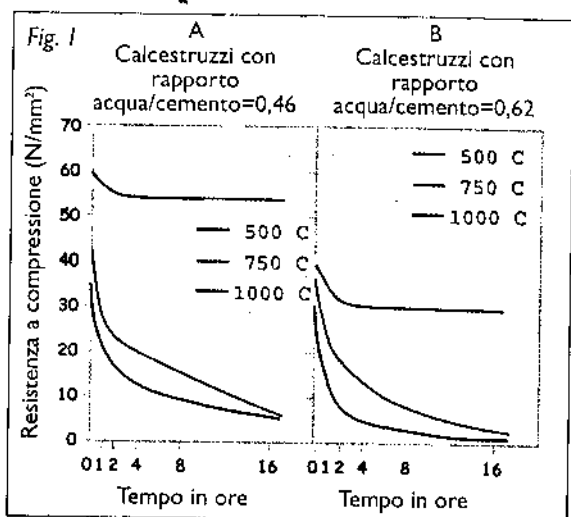
## **2. Il ruolo del calcestruzzo**

Secondo Malhotra (Mag. Concr. Res., 8, 85, 1956) il rapporto acqua/cemento (a/c) non influenza la diminuzione percentuale della resistenza meccanica provocata da un trattamento termico.

Collepari e Valente (L'Ind. Ital. Cem., 48, 481, 1978) hanno confermato sostanzialmente questa osservazione, ma hanno messo in evidenza (Fig. 1 e 2) che un calcestruzzo inizialmente più resistente, per il minor rapporto a/c, conserva in assoluto una maggiore resistenza meccanica dopo il trattamento\*.

Gli autori hanno trovato, inoltre, che i calcestruzzi con **inerti calcarei** (Fig. 2) presentano una minore caduta nella resistenza meccanica dei conglomerati confezionati con **inerti silicei** (Fig. 1), soprattutto se la temperatura del trattamento termico non supera i  $750^\circ\text{C}$ .

Il buon comportamento al fuoco degli inerti calcarei è da mette-



re in relazione con il fatto che essi assorbono una notevole quantità di calore per la loro decomposizione in ossido di calcio. La Fig. 3 mostra l'effetto della temperatura sulla resistenza a compressione del calcestruzzo: quello confezionato con inerte siliceo presenta una sensibile caduta nella resistenza intorno ai 570°C per la trasformazione di fase del quarzo (da  $\alpha$  a  $\beta$  con forte aumento di volume e conseguente azione dirompente sul conglomerato), mentre i calcestruzzi con calcare o argilla espansa perdono solo il 20% della loro iniziale resistenza se la temperatura non supera i 650°C (H.S. Abrams; "Temperature and Concrete"; Publication SP-25 American Concrete Institute; pag. 33; Detroit, 1968).

Il calcestruzzo leggero con **argilla espansa**, presenta inoltre il non trascurabile vantaggio di essere molto più termoisolante rispetto ai calcestruzzi con inerti ordinari (calcarei e silicei) e quindi di proteggere meglio le armature metalliche dal riscaldamento per effetto della trasmissione termica attraverso il copri-ferro.

I calcestruzzi con rapporto inerte/cemento più elevato presentano, secondo Malhotra, una minore diminuzione percentuale della resistenza meccanica. Tuttavia, calcestruzzi troppo magri, con una resistenza meccanica iniziale troppo bassa, potrebbero, dopo il trattamento termico, presentare valori in assoluto di resistenza eccessivamente bassa.

Peterson ("Concrete and concrete-making materials", A.S.T.M. STP-A; pag. 290; 1975) e Livovich (*Ceramic Bulletin*; 40; 559; 1961) hanno trovato che il comportamento al fuoco del calcestruzzo è migliore per i cementi Portland che liberano una minore quantità di calce di idrolisi.

Quest'ultima si può trasformare in ossido di calcio a circa 500°C durante l'incendio, favorendo lo sgretolamento del calcestruzzo

Fig. 1 - Effetto della durata del trattamento termico sulla resistenza meccanica di calcestruzzi con inerti silicei, di pari lavorabilità e diverso rapporto a/c per la presenza (A), o meno (B) di un additivo riduttore di acqua (Collepari e Valente)

Fig. 2 - Effetto della durata del trattamento termico sulla resistenza meccanica di calcestruzzi con inerti calcarei, di eguale lavorabilità e diverso rapporto a/c per la presenza (A), o meno (B) di un additivo riduttore di acqua (Collepari e Valente)

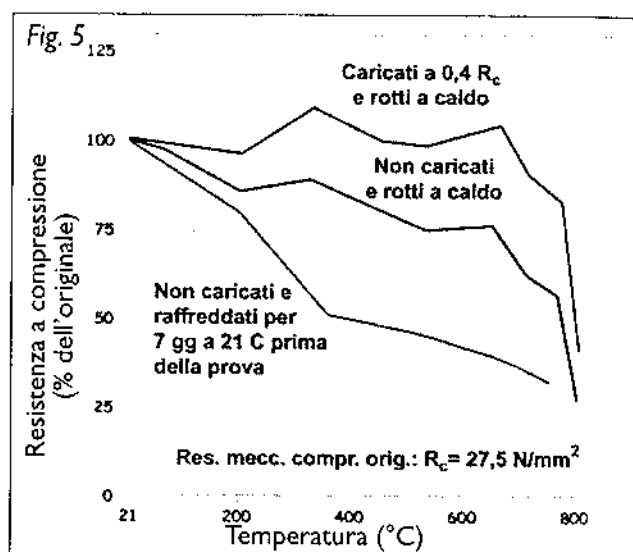
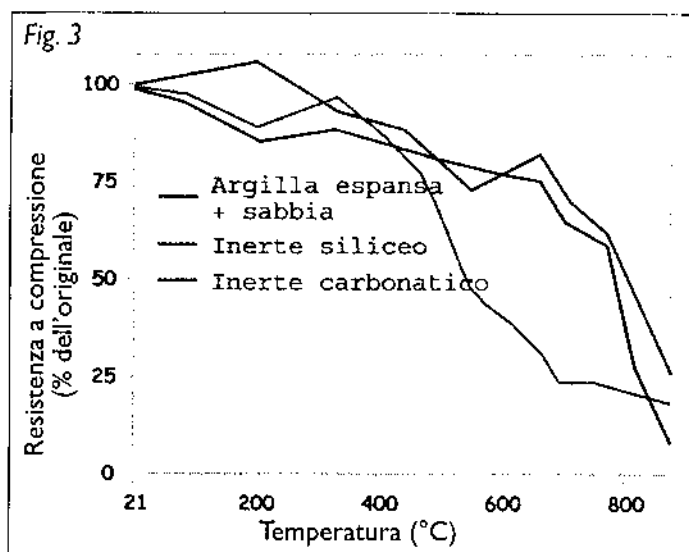


Fig. 3 - Effetto della temperatura sulla resistenza meccanica del calcestruzzo confezionato con inerti silicei, calcarei e leggeri (H.S.Abrams, Publication SP-25, ACI, 1968)

Fig. 5 - Effetto del carico a compressione (40% della resistenza meccanica) sul comportamento alle alte temperature di un calcestruzzo con inerti calcarei (M. Collepardi "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo" Ed. Hoepli, Milano 1991)

durante la fase di estinzione dell'incendio (o durante la successiva bagnatura che deve precedere l'eventuale restauro della struttura ammalorata) per la riconversione dell'ossido in idrossido di calcio che avviene con aumento di volume reazione).

Da questo punto di vista i calcestruzzi confezionati con cemento d'altoforno e soprattutto con quello pozzolanico si comporterebbero meglio di quelli preparati con cemento Portland per la minore quantità di calce di idrolisi. L'influenza della temperatura su altre proprietà del calcestruzzo è simile a quella descritta per la resistenza a compressione a eccezione del modulo elastico per il ruolo giocato dalla **zona di transizione** durante l'incendio.

### 3. Il ruolo del copriferro: qualità e spessore

Nelle strutture armate, l'influenza delle alte temperature assume un'importanza rilevante soprattutto nei confronti dell'acciaio, che oltre i 500°C perde gran parte delle sue caratteristiche meccaniche, mentre il calcestruzzo può arrivare senza subire sostanziali degradazioni fino a circa 650°C (Fig. 3).

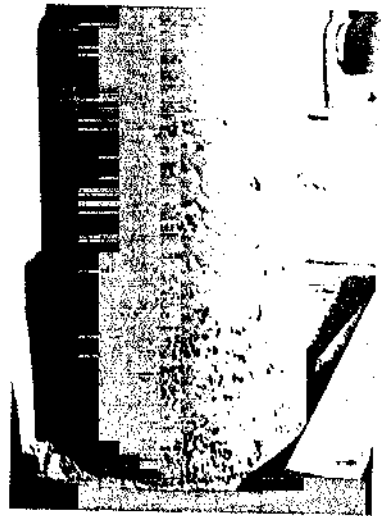
Occorre sottolineare quanto sia importante la lavorabilità del calcestruzzo fresco per assicurare la massima omogeneità e compattezza al calcestruzzo indurito, soprattutto nelle strutture armate. Infatti, se fossero presenti nel **copriferro** dei cammini preferenziali (sotto forma di materiale localmente meno compatto o addirittura sotto forma di "vespai": Fig. 4) per i fumi della combustione o, più in generale, per il flusso di calore, si potrebbe verificare localmente un rapido innalzamento della temperatura dei ferri, che al di sopra dei 500°C, perderebbero, bruscamente, gran parte delle loro caratteristiche meccaniche.

Da un punto di vista pratico, è interessante esaminare l'influenza del copriferro di calcestruzzo sul comportamento dei ferri di armatura durante il riscaldamento, che si verifica, per esempio, durante un incendio. In queste circostanze, la funzione del coprifer-

ro è quella di proteggere le armature e di evitare che la loro temperatura superi, sia pure in un sol punto, il valore di  $500^{\circ}\text{C}$ . In genere, con un calcestruzzo compatto e omogeneo, i ferri raggiungono questa temperatura in 50-70 minuti con un copriferro di 2 cm, in 80-110 minuti con uno di 3 cm, in 120-160 minuti con uno di 4 cm, e in 180-240 minuti con un copriferro di 5 cm (*Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*; 393; 17; 1976). A parità di spessore del copriferro, questi tempi aumentano se si impiega un calcestruzzo leggero per effetto della minore conducibilità termica. Negli elementi strutturali in calcestruzzo armato, spesso l'acciaio è protetto da un copriferro di spessore variabile e, quel che è peggio, è talvolta costituito in alcune zone da un calcestruzzo mal compattato e scarsamente omogeneo. Questi punti deboli, nel caso di un incendio, diventano dei canali preferenziali per il flusso termico, provocando un innalzamento localizzato della temperatura che può arrivare a superare i  $500^{\circ}\text{C}$  in un tempo brevissimo anche in presenza di un copriferro relativamente spesso. Inoltre, a causa dell'alta conducibilità termica dell'acciaio (da 125 a  $195 \text{ kJ/m h }^{\circ}\text{C}$  per temperature tra 0 e  $600^{\circ}\text{C}$ ), il flusso termico è rapidamente trasferito lungo l'armatura che, riscaldandosi, tende a dilatarsi, in questo impedita dal calcestruzzo più freddo per la minore conducibilità termica ( $6-8 \text{ kJ/m Oh }^{\circ}\text{C}$ ). Quando l'aderenza tra il ferro e il calcestruzzo non è più sufficiente a contenere la tensione generata dalla diversa dilatazione termica dei due materiali, si verifica la caduta di solidarizzazione tra acciaio e calcestruzzo, con conseguente sfilamento dei ferri e distacco di altre parti di copriferro.

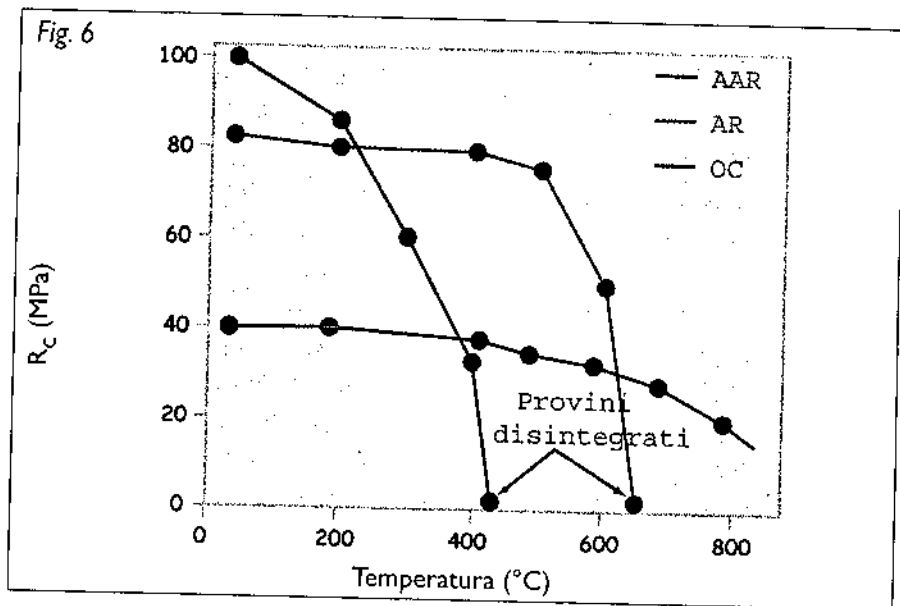
#### 4. Il ruolo del carico in servizio

Fortunatamente la struttura in servizio si comporta meglio rispetto ai provini trattati ad alte temperature e poi raffreddati prima di essere valutati per la perdita prestazionale. Nella Fig. 5 è mostrato comparativamente il comportamento di un calcestruzzo ordinario di media qualità ( $R_c = 27,5 \text{ N/mm}^2$ ) e ben costipato per effetto di un progressivo riscaldamento fino a circa  $800^{\circ}\text{C}$ . I provini di calcestruzzo riscaldati e raffreddati a temperatura ambiente per 7 giorni prima di essere sottoposti a rottura a compressione presentano una caduta di resistenza meccanica



*Fig. 4 - Presenza di macrovuoti d'aria intrappolata nel calcestruzzo per incompleta compattazione*

Fig. 6 - Influenza della temperatura sulla resistenza meccanica ( $R_c$ ) di calcestruzzi ordinari (OC), ad alta (AR) ed altissima (AAR) resistenza meccanica



ca molto maggiore rispetto a corrispondenti provini rotti alla temperatura di prova: per esempio a 600°C i primi conservano appena il 40% della resistenza meccanica originale, mentre i provini rotti a caldo (alla stessa temperatura di esposizione) conservano il 75% della resistenza meccanica iniziale. Ancora meglio si comportano i provini rotti a caldo e sollecitati al 40% della resistenza meccanica durante l'esposizione alle alte temperature: nella Fig. 5 si osserva che fino a 700°C i provini sollecitati e rotti a caldo conservano di fatto le prestazioni meccaniche iniziali.

## 5. Il ruolo del calcestruzzo ad alta resistenza meccanica

L'aumento della resistenza meccanica a circa 80 N/mm<sup>2</sup>, conseguito attraverso l'impiego di superfluidificanti per ridurre il rapporto a/c e di aggiunte minerali (fumo di silice e cenere volante), comporta una compatta microstruttura per la riduzione della porosità capillare della matrice cementizia e per l'addensamento della zona di transizione all'interfaccia matrice/aggregato.

L'evaporazione dell'acqua libera e la decomposizione di quella combinata provoca la formazione di vapore che non può facilmente fuoriuscire verso l'ambiente allorché il calcestruzzo ad alta resistenza meccanica è riscaldato. In queste condizioni, il vapore acqueo impedito nella evaporazione dalla bassa permeabilità



Fig. 7 - Fibre polimeriche in polivinil-alcol (PVA), poli-acrilo-nitrile (PAN) e polipropilene (PP)

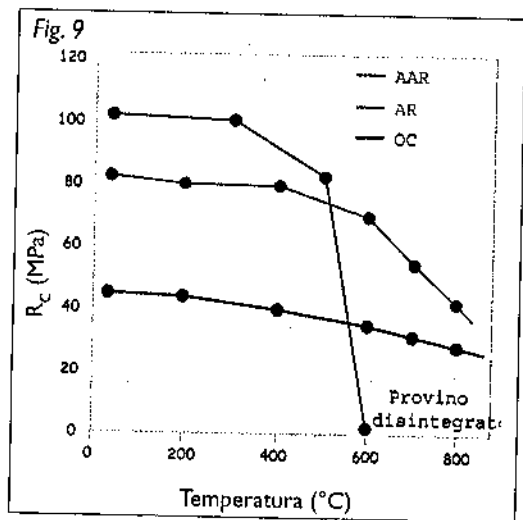


Fig 9 - Influenza della temperatura sulla resistenza meccanica ( $R_c$ ) di calcestruzzi ordinari (OC), ad alta (AR) ed altissima (AAR) resistenza meccanica in presenza di fibre metalliche (40 Kg/m<sup>3</sup>) con rapporto d'aspetti 60:0,60 (lunghezza:diametro)

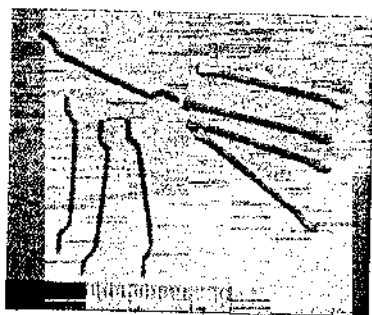


Fig. 8 - Fibre metalliche, deformate alle estremità, tipicamente impiegate nello shotcrete

del calcestruzzo, raggiunge una pressione molto elevata (effetto "pentola a pressione") finché ad una temperatura di circa 500°C la pressione del vapore acqueo è così elevata da provocare l'improvvisa esplosione ("spalling") localizzata del calcestruzzo in forma di scaglie di qualche centimetro di spessore larghe 10-20 cm. Se si aumenta la resistenza meccanica del calcestruzzo a livelli ancora superiori (per esempio 95-100 N/mm<sup>2</sup>) la resistenza allo spalling peggiora perché la permeabilità al vapore diviene ancora più bassa e già a 200-300°C si raggiunge una pressione del vapore così alta da provocare la rottura superficiale del calcestruzzo. Nella Fig. 6 il fenomeno sopra descritto è mostrato in termini di riduzione di resistenza meccanica in provini di calcestruzzo con inerti calcarei riscaldati in forno a temperatura progressivamente crescente fino a circa 800°C.

## 6. Il ruolo delle fibre

Si è pensato che l'impiego delle fibre metalliche (Fig. 7 e Fig. 8), capaci di aumentare enormemente la duttilità e la resistenza alla trazione del calcestruzzo, potesse mitigare le conseguenze dell'effetto spalling grazie al contrasto esercitato dalle fibre metalliche contro l'azione dirompente del vapore. In realtà le fibre metalliche migliorano il comportamento al fuoco dei calcestruzzi ad alta resistenza meccanica come si può osservare dal confronto della



Fig 10 - Fibre in acciaio lisce e sciolte (a sinistra) e fibre in acciaio deformate ed incollate con colla idrosolubile: la colla serve a tenere impaccettate le fibre facilitando il loro dosaggio

Fig. 11 - Influenza della temperatura sulla resistenza meccanica ( $R_c$ ) di calcestruzzi ordinari (OC), ad alta (AR) ed altissima (AAR) resistenza meccanica in presenza di fibre polipropileniche ( $10 \text{ Kg/m}^3$ )

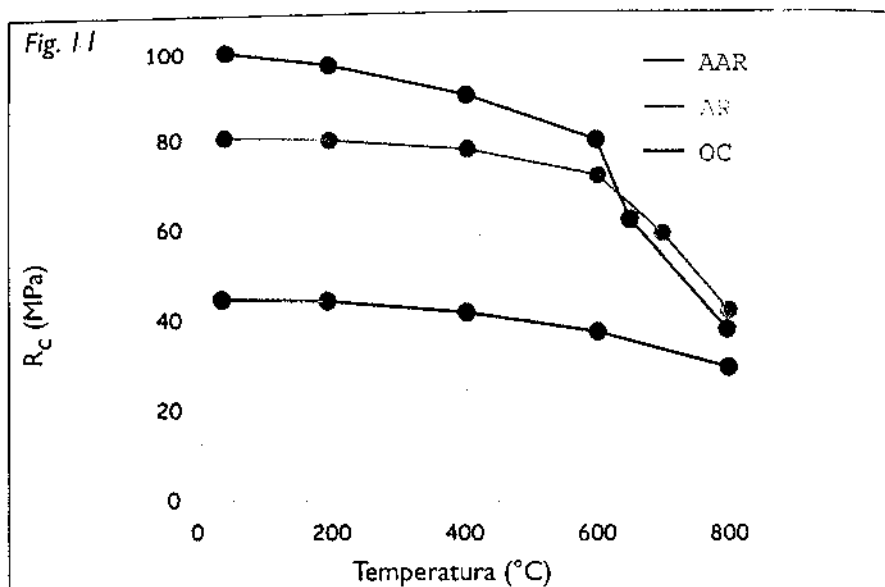


Fig. 6 e 9. Tuttavia, l'aggiunta delle fibre metalliche ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) non è decisiva nel produrre calcestruzzi resistenti al fuoco se la resistenza meccanica è molto elevata ( $\geq 100 \text{ N/mm}^2$ ) perché l'effetto dirompente del vapore ad alta pressione è in grado comunque di disintegrare la parte corticale della struttura se la temperatura raggiunge  $600^\circ\text{C}$ . Un decisivo miglioramento nella resistenza al fuoco dei calcestruzzi ad alta resistenza meccanica è conseguibile con l'impiego delle fibre polimeriche (Fig. 10).

L'effetto è mostrato in Fig. 11 dove si può osservare che, con l'impiego di  $10 \text{ kg/m}^3$  di fibre polipropileniche anche il calcestruzzo ad altissima resistenza meccanica non subisce l'effetto distruttivo dello spalling almeno fino a  $700^\circ\text{C}$ . In sostanza, le fibre polimeriche non modificano significativamente il comportamento al fuoco del calcestruzzo ordinario, ma diventano indispensabili per migliorare il comportamento al fuoco del calcestruzzo ad alta ( $R_c = 80 \text{ N/mm}^2$ ) ed altissima resistenza meccanica ( $R_c = 100 \text{ N/mm}^2$ ). Questo effetto sorprendente e non prevedibile, ma largamente documentato nella letteratura tecnica, è dovuto al fatto che le numerosissime fibre polimeriche disperse nella matrice cementizia fondono a  $160\text{-}170^\circ\text{C}$  e creano così una sorta di via d'uscita per drenare il vapore interno e per alleviare le tensioni correlate con la crescita della pressione del vapore, purché il contenuto delle fibre sia almeno pari allo 0,2% del volume del calcestruzzo. In conclusione, per migliorare la resistenza al fuoco dei calcestruzzi ad alte prestazioni, è necessario impiegare sia le fibre metalliche per aumentare la capacità di tenuta nei confronti dell'azione dirompente dello spalling, sia le fibre polimeriche per attenuare l'insorgere della pressione del vapore grazie alla fusione delle fibre a temperature (a  $160\text{-}170^\circ\text{C}$ ) che precedono l'inizio dell'effetto spalling ( $200\text{-}300^\circ\text{C}$ ) nei calcestruzzi molto densi e compatti come quelli ad altissima resistenza meccanica. ■

## Bibliografia consigliata:

- M. Collepardi, M. Valente, *L'Industria del Cemento*, 48, 481, 1978.
- R.S. Abrams, "Temperature and Concrete", Amer. Concr. Inst. Publication, SP-25, pg. 33, Detroit, 1968.
- J.C. Marechal, *Materials and Structure*, 2, 111, 1969.
- P. Sullivan, M.P. Poncher, "Temperature and Concrete", Amer. Concr. Inst. Publication, SP-25, pg. 103, Detroit, 1968.
- A.M. Neville, "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman Group Limited, Harlow, Essex, England, 1995.
- Mario Collepardi, "Scienze e Tecnologia del Calcestruzzo", Terza Edizione, Hoepli, Milano, 1991.
- G. Sanjayan, L.J. Stocks, "Spalling of High Strength Silica Fume Concrete in Fire", *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 2, pp. 170-173, 1993.
- L. Sarvanra, E. Mikkolos, "Fibre Reinforced Composites under Fire Conditions: Effect of Ageing and Moisture Content", *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 332-338, 1994.
- P. Kalifa, G. Chere and C. Gallo, "High Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres: From Spalling to Microstructure", *Cement and Concrete Research*.