

# Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei calcestruzzi armati

Prof. Dott. Mario Collepardi (\*) - Dott. Ing. Michele Valente (\*\*)

## 1. Introduzione

La capacità del calcestruzzo armato di resistere alle alte temperature provocate dagli incendi è ben nota da molti anni. Gli esempi, ormai passati alla storia, sono numerosi. Si può ricordare l'incendio di Baltimora nel 1904 nel quale circa 2000 edifici furono distrutti dalle fiamme, mentre il solo fabbricato che si salvò fu una costruzione di 4 piani in calcestruzzo armato. Così durante il terremoto ed il successivo incendio di San Francisco nel 1906 l'unica costruzione relativamente poco danneggiata fu il Bekings Van and Storage Building. Nel 1911 il fuoco che scoppiò in un capannone-magazzino a Dresda fu talmente violento da fondere i vetri delle finestrate, mentre lasciò praticamente indenni le strutture in calcestruzzo armato.

Dagli innumerevoli esempi di edifici, magazzini, stabilimenti, locali pubblici, ecc., sottoposti ad incendio, si può trarre, in sostanza, la conclusione che il calcestruzzo, soprattutto se confrontato con altri materiali, presenta una resistenza relativamente buona all'azione del fuoco.

(\*) Dipartimento di Scienza dei Materiali - Facoltà di Ingegneria - Università di Ancona.

(\*\*) Centro Ricerche e Sviluppo Mac Mediterranea S.p.A. - Treviso.

Tuttavia, ci si può porre il problema di stabilire alcuni criteri generali che siano di guida nel progettare preventivamente il miglior calcestruzzo sia come materiale di per sé resistente al fuoco, sia come barriera protettiva nei confronti di altri materiali, in particolare le armature, meno resistenti all'azione delle alte temperature. Quest'aspetto del problema è divenuto sempre più importante soprattutto per il fatto che, con il diffondersi della precompressione e con lo sviluppo dell'edilizia industrializzata, si è manifestata la tendenza a ridurre sensibilmente lo spessore del calcestruzzo.

## 2. Definizione di resistenza al fuoco e metodi di prova

La resistenza al fuoco del calcestruzzo armato può essere definita come la sua capacità di continuare ad assolvere le sue funzioni statiche, di confinare il fuoco, cioè di proteggere le armature e proteggere gli ambienti attigui, e di non emettere fumi tossici, quando appunto venga a subire l'azione di un incendio.

Per questo motivo la maggior parte delle normative internazionali prevedono che le prove di resistenza al fuoco siano fatte sugli elementi strutturali piuttosto che sul materiale. Pertanto, a rigore, noi potremmo parlare di resistenza al fuoco di un pannello, di un pila-

stro, o di una trave in calcestruzzo, piuttosto che di resistenza al fuoco del calcestruzzo come tale. Tuttavia, a parità di elemento strutturale, è interessante esaminare il comportamento al fuoco dei diversi calcestruzzi in relazione alle differenti materie prime impiegate ed alle diverse composizioni adottate.

I metodi di prova che cercano di simulare l'azione di un incendio, anche se in realtà ciò che accade in un edificio che brucia è molto complesso, si basano sulla definizione di un « fuoco standard » i cui effetti possono essere paragonati approssimativamente a quelli del « fuoco reale ». Infatti sia le norme americane ASTM E 119, che le Raccomandazioni, francesi ISO R 834, come anche le norme inglesi (BS 476), prevedono che l'azione del fuoco proceda secondo una determinata curva temperatura-tempo del « fuoco standard ».

In particolare la norma ASTM E 119, specifica che in un « fuoco standard » la temperatura deve salire in 5' a 538°C, in 10' a 704°C, in 30' a 843°C, in 1h a 927°C, in 4h a 1093°C ed in 8h ed oltre a 1260°C (fig. 1) [1].

La fig. 2 mostra la curva temperatura-tempo del « fuoco standard » secondo la normativa italiana [2].

Per durata di resistenza al fuoco in forno si intende il tempo in minuti, misurato a partire dall'accensione del fuoco, dopo il quale l'elemento costruttivo considerato, sottoposto a prova al fuoco secondo la curva unificata di temperatura e le modalità delle prove in forno, perde la sua capacità portante.

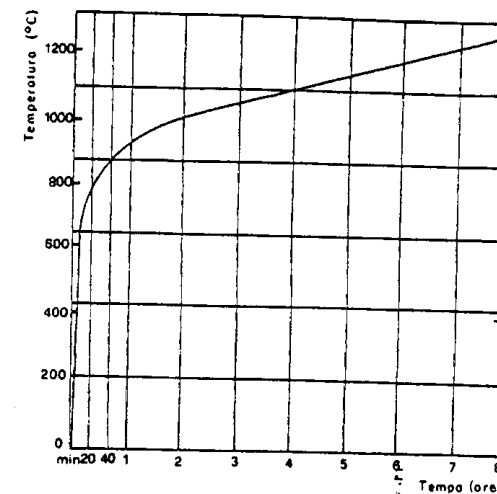
Il carico d'incendio è espresso dalla quantità equivalente di legno per m<sup>2</sup>, che si ottiene dividendo per 4400 (potere calorifico superiore del legno), il numero di calorie per unità di superficie orizzontale del locale, o del piano considerato, che al massimo si possono sviluppare per effetto della combustione di tutti i materiali combustibili presenti:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i}{4400 A}$$

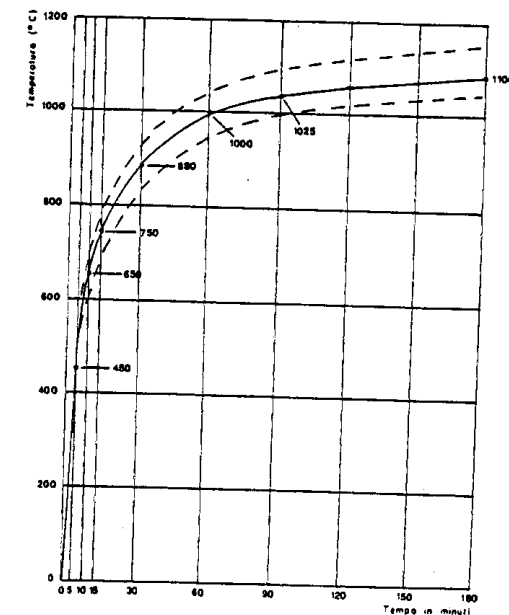
dove:

q è il carico di incendio (in  $\frac{\text{Kg legna}}{\text{m}^2}$ )

g<sub>i</sub> il peso (in Kg) del generico fra gli n combustibili che si prevedono presenti nel locale o nel piano nelle condizioni più gravose di carico di incendio



1 - Curva tempo-temperatura per la prova al fuoco negli Stati Uniti e Canada secondo la Norma ASTM [1].



2 - Curva temperatura-tempo secondo la normativa italiana [2].

$H_1$  è il potere calorifico superiore (in Cal/Kg) del generico fra gli  $n$  combustibili di peso  $g_1$   
 $A$  è la superficie orizzontale (in  $m^2$ ) del locale o del piano del fabbricato considerato  
 $4400$  è il potere calorifico superiore del legno (in Cal/Kg).

### 3. Effetto delle alte temperature sui componenti il calcestruzzo

Per valutare ciò che accade nel calcestruzzo armato per effetto delle alte temperature è opportuno rifarsi ai cambiamenti di natura fisica e chimica che queste provocano nei suoi componenti base, e cioè nella pasta cementizia legante, negli inerti, nell'acqua contenuta nel calcestruzzo.

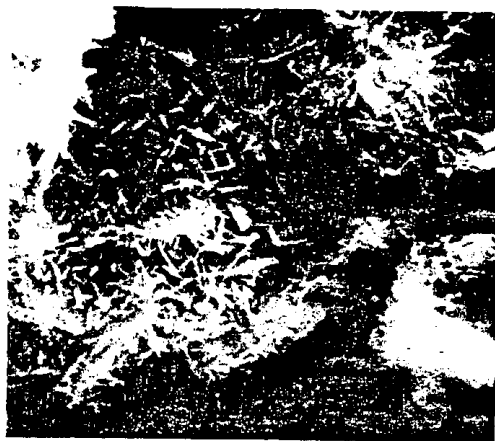
#### 3.1 Effetto sulla pasta di cemento

L'aumento della temperatura provoca nella pasta di cemento delle modificazioni strutturali di natura chimica, fisica e chimico-fisica, i cui effetti si manifestano attraverso le modifiche di alcune proprietà della pasta cementizia quali la variazione dimensionale, la resistenza meccanica e la conducibilità termica.

La pasta di cemento è sostanzialmente costituita da particelle di gel idrosilicatico di natura porosa (pori del gel) e di particelle cristalline (idrossido di calcio, alluminati idrati, solfoalluminati idrati, carbonato di calcio) tra le quali sono disseminati i cosiddetti pori capillari (fig. 3). Sia i pori del gel, di dimensione compresa tra 10 e 300 Å, che i pori capillari [3] di dimensione notevolmente maggiore (0,001 - 10  $\mu$ ), sono solitamente pieni di acqua. Se si aumenta la temperatura, o si diminuisce l'umidità relativa, l'acqua fuoriesce da queste microcavità provocando una contrazione del sistema. Prima viene eliminata l'acqua dai pori capillari più grandi e successivamente quella dai pori del gel dove le molecole di  $H_2O$  sono più tenacemente adsorbite dalla superficie delle particelle di gel idrosilicatico. In generale, l'eliminazione di quest'acqua avviene già a temperatura ambiente se l'umidità relativa è sufficientemente bassa (meno del 90%) e l'effetto macroscopico sulla pasta, e quindi sul calcestruzzo, è quello ben noto del ritiro igrometrico [4].

Ovviamente, la fuoriuscita dell'acqua, e quindi il conseguente ritiro della pasta cementizia, è sensibilmente favorito dall'aumento della temperatura.

La fig. 4 mostra l'effetto del tempo di riscaldamento sul ritiro di una pasta di cemento [5]: a temperature relativamente elevate (e cioè maggiori di 120 °C), oltre all'acqua contenuta nei pori capillari e nei pori del

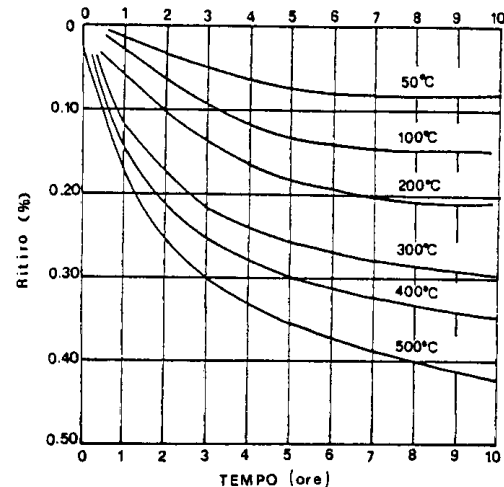


3 - Microfotografia al microscopio elettronico a scansione di una pasta di cemento.

gel, si verificano anche delle reazioni chimiche consistenti in disidratazione dei prodotti idratati del cemento.

L'eliminazione dell'acqua combinata dall'idrosilicato di calcio avviene per esempio nell'intervallo di 100 - 150 °C, mentre quella dei solfoalluminati idrati si completa in più stadi a temperature leggermente superiori (150 - 250 °C). Alla temperatura di 450 - 500 °C avviene la decomposizione dell'idrossido di calcio,  $Ca(OH)_2$ , in ossido di calcio,  $CaO$ . Infine da 700 °C a 1000 °C, avviene la trasformazione del carbonato di calcio,  $CaCO_3$ , (eventualmente formatosi per carbonatazione all'aria dell'idrossido di calcio) in ossido di calcio. Qualora la carbonatazione all'aria non sia avvenuta, le reazioni di decomposizione termica terminano a 500 °C con la disidratazione dell'idrossido di calcio. Per successivo innalzamento della temperatura, il materiale espande termicamente con un coefficiente che è nell'ordine di  $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Le considerazioni sopra riportate, ed in particolare i dati riguardanti la fig. 4, si riferiscono a condizioni di «quasi-equilibrio». In altre parole in fig. 4 si è registrata la variazione dimensionale finale, consistente sempre in un ritiro, che si verifica con un riscaldamento relativamente lento. In pratica, però, interessa maggiormente vedere l'effetto «dinamico» del riscaldamento, e cioè le variazioni dimensionali che si verificano durante l'incendio prima che si raggiunga un equilibrio termodimensionale finale. La fig. 5 mostra l'effetto dell'aumento della temperatura sulle variazioni



4 - Ritiro di una pasta di cemento mantenuta alle alte temperature [5].

dimensionali di una pasta cementizia [5]. Si può osservare, in particolare, che l'aumento di temperatura iniziale, fino a circa 100 °C, provoca un'espansione del materiale dovuta al fatto che la dilatazione termica è maggiore del ritiro provocato dall'evaporazione dell'acqua: cioè il materiale si riscalda con una velocità più elevata di quella con cui evapora l'acqua. Successivamente la disidratazione dovuta alla decomposizione degli idrosilicati, dei solfoalluminati idrati e dell'idrossido di calcio è così imponente da prendere il sopravvento sull'espansione termica. Nel caso della pasta riguardata nella fig. 5 la carbonatazione non è avvenuta e quindi al di sopra di 500 °C inizia nuovamente l'espansione termica.

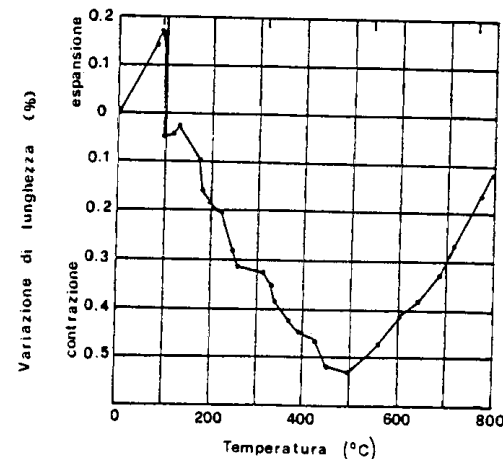
Gli effetti di queste variazioni dimensionali, soprattutto se impediti, come si verifica in parte dentro il calcestruzzo, provocano tensioni tali da superare la resistenza a trazione del materiale e da generare quindi fessure nella pasta cementizia, scollamento tra inerti e pasta, distacchi di materiale, ecc. In linea di massima gli effetti della temperatura sulla resistenza meccanica della pasta di cemento cominciano a divenire sensibili a temperature superiori a 500 °C, ed a 600 °C si possono ottenere perdite di resistenza meccanica anche del 50%.

Dal punto di vista pratico è interessante osservare l'effetto della bagnatura della pasta di cemento durante o dopo il raffreddamento, e cioè in fase di estinzione o di ripristino della struttura: in presenza di

acqua l'ossido di calcio,  $CaO$ , formatosi durante il riscaldamento per decomposizione termica dell'idrossido di calcio,  $Ca(OH)_2$ , ed eventualmente del carbonato di calcio,  $CaCO_3$ , dà luogo nuovamente all'idrossido di calcio. La trasformazione dell'ossido nell'idrossido di calcio avviene con un forte aumento di volume che può danneggiare ulteriormente la struttura della pasta di cemento. Da questo punto di vista, il cemento d'altoforno, e soprattutto il cemento pozzolanico, nei quali la calce d'idrolisi è in parte o in tutto combinata con la loppa o la pozzolana, presentano il vantaggio di un contenuto sensibilmente minore di  $Ca(OH)_2$  ed eventualmente di  $CaCO_3$ .

Naturalmente quest'aspetto del problema esiste nel calcestruzzo, indipendentemente dal tipo di cemento impiegato, qualora si siano utilizzati inerti calcarei contenenti cioè carbonato di calcio (paragrafo 3.2).

L'effetto del trattamento termico subito durante un incendio sulle proprietà della pasta di cemento si estende anche alla conducibilità termica: la fig. 6 mostra l'effetto della temperatura sulla conducibilità termica degli impasti cementizi [5]. Si può osservare che anche la pasta di cemento (curva inferiore) diviene termicamente meno conduttibile alle alte temperature: l'effetto è probabilmente da attribuire alla formazione di pori vuoti durante il riscaldamento. Tuttavia, da un punto di vista pratico, la protezione delle sottostanti armature metalliche può essere seriamente compromessa dal deterioramento della pasta cementizia presente



5 - Variazioni dimensionali di una pasta di cemento durante il riscaldamento [5].

nel copriferro. Infatti, sebbene l'impasto di cemento divenga di per sé più isolante come è mostrato in fig. 6, la formazione di fessure ed il distacco del materiale, entrambi provocati dalle variazioni dimensionali (fig. 5), creano di fatto condizioni più favorevoli alla trasmissione del calore verso l'interno della struttura, ed in particolare verso le armature (paragrafo 5).

### 3.2. Effetto sull'umidità contenuta nella pasta di cemento

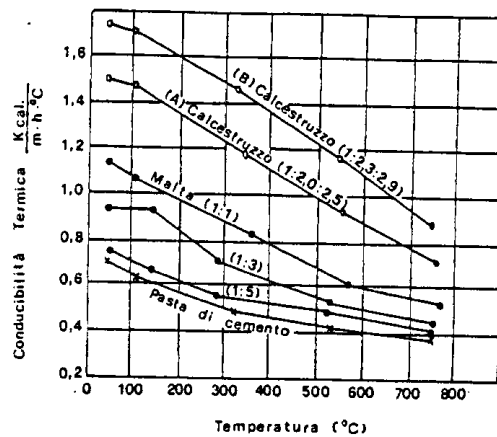
L'umidità contenuta nel calcestruzzo, ed in particolare nella pasta di cemento, per effetto delle alte temperature, tende a salire in superficie e quindi ad evaporare assorbendo calore. La temperatura della superficie viene così ad essere mantenuta sui 100 °C, fino a che l'acqua non sia tutta evaporata. Ovviamente questa azione benefica può esplicarsi fino a che la salita di temperatura non sia tanto rapida da provocare una brusca evaporazione dell'acqua all'interno del calcestruzzo. In questo caso, possono verificarsi scoppi e distacchi di materiale perché la pressione del vapore contenuto nel calcestruzzo sottostante può superare improvvisamente la resistenza a trazione del materiale [6]. In altre parole la presenza di acqua non combinata nella pasta di cemento fa aumentare la resistenza al fuoco nel caso che l'acqua stessa possa fuoriuscire lentamente dalla pasta di cemento. In tal caso, oltre al benefico assorbimento di calore per l'evaporazione dell'acqua, si verificherebbe anche una struttura con legami più forti tra le particelle di cemento idratato [7] e quindi si formerebbe una pasta di cemento meccanicamente più resistente. Nel caso in cui, invece, l'evaporazione dell'acqua avvenga senza che contemporaneamente si verifichi una fuoriuscita graduale dell'acqua stessa, l'effetto sulla resistenza meccanica risulta essere negativo [8].

### 3.3. Effetto sugli inerti

Gli effetti delle alte temperature sugli inerti dipendono sostanzialmente da quattro fattori: il coefficiente di espansione termica lineare, la conducibilità termica, la capacità termica, la presenza o meno di variazioni di stato in corrispondenza delle quali si verificano improvvisi cambiamenti di volume.

#### 3.3.1. L'ESPANSIONE TERMICA LINEARE

Gli inerti che presentano un basso coefficiente di espansione termica lineare si comportano meglio, nei riguardi delle alte temperature, di quelli che hanno forti dilatazioni termiche. Con il crescere della tem-



6 - Effetto della temperatura sulla conducibilità termica (5).

peratura, infatti, gli inerti con maggiore coefficiente di espansione termica, sono soggetti a forti tensioni che possono causare fessurazione e disgregamento. Inoltre, poiché la pasta di cemento indurita si contrae alle alte temperature (fig. 5), più bassa è la dilatazione termica degli inerti, minori sono gli sforzi di contrasto fra i due materiali e minori sono, quindi, le tensioni cui essi sono sottoposti.

Il coefficiente di espansione termica degli inerti cambia con il crescere della temperatura. Nella Tabella 1 sono riportati i valori minimi e massimi di tale coefficiente per le rocce da cui più comunemente si ricavano gli inerti per calcestruzzi.

TABELLA 1  
COEFFICIENTE DI ESPANSIONE TERMICA LINEARE DI VARI TIPI DI ROCCIA [9]

Tipo di roccia	Coefficiente di espansione termica lineare ( $\cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Granito	1,8 + 11,9
Diorite, Ardesite	4,1 + 10,3
Gabbro, Basalto, Diabase	3,6 + 9,7
Arenaria	4,3 + 13,9
Dolomite	6,7 + 8,6
Calcare	0,9 + 12,2
Selce	7,4 + 13,1
Marmo	1,1 + 16,0
Quarzite [10]	> 10

#### 3.3.2. CONDUCEBILITÀ E CAPACITÀ TERMICA

La conducibilità e la capacità termica degli inerti giocano un ruolo importante alle alte temperature, poiché esse indicano la capacità che gli inerti hanno di assorbire il calore e di dissiparlo. Gli inerti calcarei o dolomitici, per esempio, rallentano l'avanzata della temperatura all'interno della massa a causa del calore che essi assorbono tra 700 e 900 °C per essere trasformati in ossido di calcio o di magnesio. Il calore assorbito è di 430 cal/g per la decomposizione del carbonato di calcio e di 340 cal/g per il carbonato di magnesio. In questo modo viene assorbito del calore che altrimenti agirebbe sulla massa del calcestruzzo. Questi inerti, quindi, a causa della loro decomposizione, aumentano la resistenza al fuoco della struttura, arrestando la salita della temperatura, e prolungando il tempo necessario perché questa si propaghi all'interno della massa.

Da questo punto di vista anche gli inerti leggeri, capaci di assorbire e di trattenere una parte del-

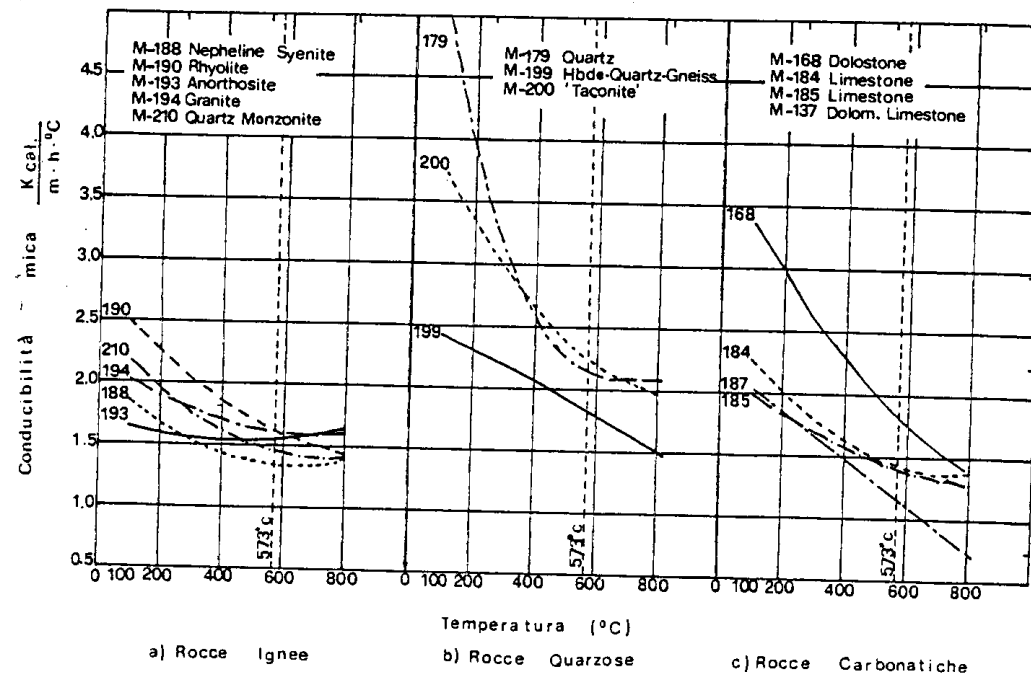
l'acqua di impasto nella loro struttura porosa, sono capaci di assorbire una notevole quantità di calore per evaporare l'acqua assorbita.

La fig. 7 mostra la conducibilità termica alle diverse temperature di alcuni inerti naturali [5]. Si osserva che per tutti gli inerti l'aumento della temperatura fa diminuire la conducibilità termica. Poiché anche la pasta di cemento diviene meno conducibile all'aumentare della temperatura, ne consegue che anche il calcestruzzo diviene termicamente più isolante alle temperature più elevate (fig. 6).

La fig. 7 mette anche in evidenza come, a parità di temperatura, la conducibilità termica dipende dal tipo di roccia impiegata come inerte per il calcestruzzo.

#### 3.3.3. LE TRASFORMAZIONI DI STATO

Il quarzo, che è il principale minerale delle sabbie silicee e di moltissime ghiaie, e che è presente in apprezzabili proporzioni in molte rocce ignee, presenta una trasformazione cristallina, a 573 °C, da una modi-



7 - Effetto della temperatura sulla conducibilità termica di alcune rocce (5).

ficazione più densa (quarzo  $\alpha$ ) ad una più leggera (quarzo  $\beta$ ) accompagnata da una brusca espansione di circa 0,85%. Per questo motivo i calcestruzzi contenenti aggregati ricchi di quarzo sono da considerare tra i meno resistenti al fuoco, perché presentano una grande tendenza a distaccarsi a causa dell'azione dirimente del quarzo.

Anche nell'arenaria è presente il quarzo sotto forma di microcristalli cementati da altri minerali che si ritirano per decomposizione termica e che controbilanciano in parte l'espansione del quarzo. A causa di ciò, l'impiego delle arenarie nei calcestruzzi non è così deleterio come quello di altri inerti quarzosi nei confronti del fuoco.

Nelle rocce calcaree e dolomitiche si verifica una espansione termica fino a circa 900 °C, cui segue una contrazione a causa della trasformazione dei carbonati nei corrispondenti ossidi. L'effetto, soprattutto nei calcari molto densi, è comunque trascurabile per l'elevata temperatura a cui si verifica ed interessa solitamente le parti superficiali del calcestruzzo più esposte all'azione del fuoco.

#### 3.3.4. CLASSIFICAZIONE DEGLI INERTI

Sulla base della loro resistenza al fuoco, Ingberg [10] ha classificato gli inerti per calcestruzzo in quattro gruppi con resistenza al fuoco decrescente dal 1° al 4°.

1° Gruppo — Inerti calcarei, comprendenti calcari e dolomie, che si trovano in molti inerti frantumati, o come costituenti pietre naturali o ghiaie. Essi presentano un'espansione termica medio-bassa ma soprattutto sono capaci di assorbire una notevole quantità di calore prima di decomporsi a circa 900 °C (paragrafo 3.2).

2° Gruppo — Inerti silicatici non quarzosi, composti soprattutto da feldspati, olivine, anfiboli e pirosseni come l'orneblenda e l'augite che non manifestano fessurazioni o sgretolamento superficiale alla prova al fuoco. Questi inerti includono molte rocce comuni come basalti e diabasi (trachiti), ardesiti, gabbri e sieniti. Inoltre pomice e inerti artificiali come mattoni rotti, argille e scisti espansi, loppe d'altoforno e le varietà più dure di clinker o ceneri volanti, con punto di fusione di 1150 ÷ 1260 °C.

3° Gruppo — Inerti che alle prove al fuoco manifestano fessurazioni e sgretolamenti superficiali. Si tratta di rocce ignee quarzose che hanno un contenuto di silice libera più alto dei gruppi 1 e 2.

Fanno parte di questo gruppo i graniti, composti di

quarzo, feldspati e minerali ferromagnesiaci, insieme con l'arenaria, quarzite, scisti e gneiss contenenti quarzo.

4° Gruppo — Comprende rocce che consistono prevalentemente di silice non combinata sotto forma di quarzo e cioè quarzite, quarzo e selce che causano fessurazioni, sgretolamento e distruzione del calcestruzzo a profondità di 2-3 cm ed oltre al di sotto della superficie.

E' opinione degli autori del presente articolo che gli inerti leggeri, come argille e scisti espansi, abbiano una buona resistenza al fuoco a causa della bassa conducibilità termica, e della loro stabilità chimico-fisica alle alte temperature, dovuta al fatto di essere già stati trattati a temperature relativamente elevate (più di 1000 °C).

Essi, pur avendo di per sé una bassa capacità termica, assorbono un'apprezzabile quantità di calore per l'evaporazione dell'acqua contenuta nei loro pori (paragrafo 3.3.2).

#### 4. Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo

Nei paragrafi precedenti sono stati esaminati gli effetti del riscaldamento provocato da un incendio sui componenti del calcestruzzo ed in particolare sulla pasta di cemento (paragrafo 3.1), sulla sua umidità (paragrafo 3.2) e sugli inerti (paragrafo 3.3).

Nei paragrafi che seguono saranno discussi i risultati concernenti gli effetti delle alte temperature sulle proprietà del calcestruzzo.

##### 4.1. Effetto sulla composizione del calcestruzzo

Si è già detto che il riscaldamento provoca delle trasformazioni chimiche sia nella pasta di cemento che negli inerti. Poiché tali trasformazioni avvengono in corrispondenza di un certo intervallo di temperatura l'analisi del materiale sottoposto a riscaldamento, soprattutto se confrontata con quella del materiale originale prelevato da una porzione del calcestruzzo sicuramente non attaccato dal fuoco, può fornire utilissime indicazioni significative sullo stato del calcestruzzo dopo l'incendio. Ciò è particolarmente utile quando esistono incertezze circa la parte di calcestruzzo da rimuovere prima di procedere al restauro dell'opera danneggiata. A questo scopo oltre alla normale analisi chimica, le migliori tecniche di diagnosi sono costituite dall'analisi diffrattometrica con i raggi x, l'analisi termica differenziale e l'analisi termoponderale.

##### 4.2. Effetto sulle variazioni dimensionali

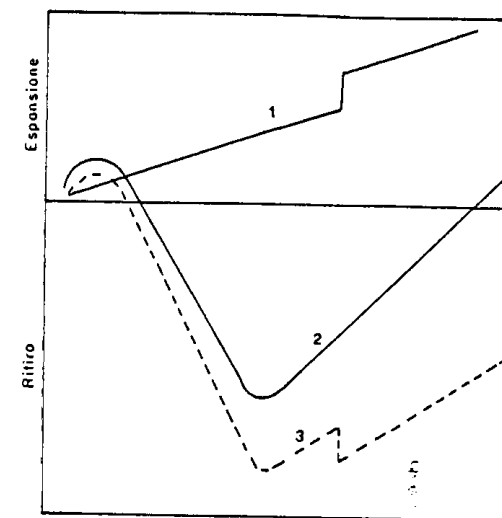
Da un punto di vista pratico è interessante conoscere sia il comportamento dilatometrico a livello microscopico, per esaminare i movimenti relativi di un componente rispetto all'altro, sia quello a livello macroscopico, per valutare nell'insieme le variazioni dimensionali dell'elemento strutturale.

In linea di massima un materiale si dilata durante il riscaldamento, a meno che non intervengano trasformazioni di fase o reazioni chimiche consistenti in una decomposizione del materiale. Nel caso del calcestruzzo, una porzione di esso — la pasta di cemento — subisce per riscaldamento alcune trasformazioni chimiche che provocano, in un certo intervallo di temperatura, una contrazione del sistema (fig. 5), mentre l'altro componente — l'inerte — si dilata, in generale, senza altre contrazioni se si esclude l'inerte calcareo a temperature relativamente elevate (900 °C).

Il diverso comportamento dilatometrico a livello microscopico della pasta cementizia e dell'inerte di tipo siliceo è schematicamente mostrato a titolo di esempio in fig. 8. La curva dell'inerte mostra la dilatazione costante del materiale ed il brusco aumento dimensionale corrispondente alla trasformazione di stato da quarzo  $\alpha$  a quarzo  $\beta$  (paragrafo 3.3.3). La curva della pasta di cemento mostra la contrazione subita a causa della disidratazione dei suoi componenti e la successiva dilatazione oltre i 500 °C. La curva inferiore mostra la variazione dimensionale della pasta rispetto all'inerte ed è ottenuta per differenza tra le due precedenti curve: essa indica che all'interno del calcestruzzo si vengono a creare delle tensioni rilevanti e discontinue capaci di fessurare la pasta di cemento e provocare il distacco tra questa e l'inerte. Lankard ed altri [7], già a temperature di circa 250 °C, hanno messo in evidenza, attraverso delle microfotografie, lo stato microfessurativo interessante sia la pasta di cemento che l'interfaccia pasta-inerte (fig. 9).

Quest'aspetto del problema è particolarmente importante per le sue conseguenze sulla resistenza del materiale e soprattutto sulla conducibilità termica del materiale, giacché, qualora le microfessure raggiungano notevoli dimensioni, per larghezza ed estensione, viene favorita la penetrazione dei fumi caldi attraverso il calcestruzzo verso le armature metalliche.

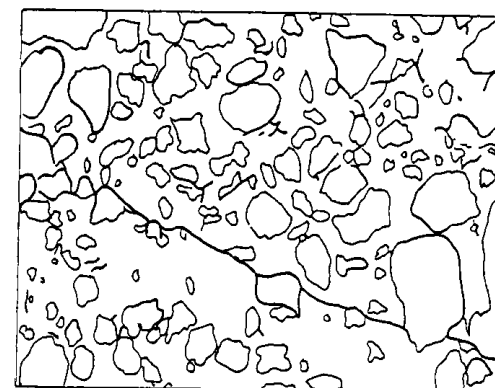
Da un punto di vista macroscopico le contrazioni della pasta si traducono in microfessure, ed il calcestruzzo nel suo insieme risulterà dilatato durante il riscaldamento tanto più quanto maggiore è il contenuto di inerte, ed in particolare di inerte siliceo.



1 - Variazione dimensionale dell'inerte siliceo  
2 - Variazione dimensionale della pasta di cemento  
3 - Variazione dimensionale della pasta di cemento rispetto all'inerte siliceo

8 - Influenza della temperatura sulle variazioni dimensionali [5].

9 - Microfotografia schematizzata di un calcestruzzo microfessurato per riscaldamento a 250°C. Le linee più grosse mostrano le fessure attraverso la pasta e all'interfaccia pasta-inerte [7].

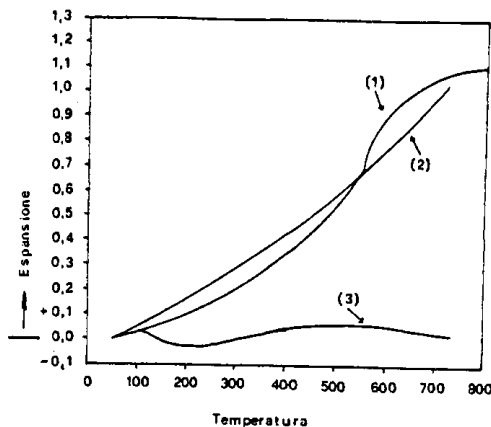


Poiché inevitabilmente esisteranno dei gradienti termici all'interno di una struttura, come la parte più calda situata in prossimità delle fiamme, la diversa dilatazione che ne consegue crea delle sollecitazioni di trazione nello spessore del calcestruzzo più esposto al calore. Quando questa supera la resistenza a trazione del materiale, si verifica il distacco esplosivo del calcestruzzo che può interessare spessori anche superiori a 2-3 cm.

Il distacco è favorito dagli inerti silicei che presentano una brusca trasformazione di stato (fig. 8) e una dilatazione termica in generale superiore a quella degli altri inerti. Per ridurre questo genere di tensioni, e quindi la probabilità di distacco, è preferibile l'impiego di inerti calcarei al posto di quelli silicei.

Le figg. 10 e 11 mostrano l'influenza del tipo e della quantità di inerte sulla dilatazione termica di malte e c. e. struzzi. La fig. 10 mostra come varia la dilatazione termica, da una pasta di cemento ad una malta, per aggiunta di sabbia calcarea o silicea. Si può osservare che l'aggiunta di sabbia calcarea faccia diminuire sensibilmente la dilatazione termica della malta, con la conseguenza che, da un punto di vista macroscopico, anche le tensioni tra materiale più caldo e più freddo diminuiscono. Al contrario l'aggiunta di sabbia silicea fa aumentare leggermente la dilatazione termica.

Nella fig. 11 è mostrato l'effetto di un inerte grosso siliceo o calcareo ed una malta con sabbia silicea o calcarea. Si conferma, per entrambe le malte, il benefico effetto dell'inerte grosso calcareo, sulla dilatazione



1 - Inerte siliceo  
2 - Inerte calcareo  
3 - Inerte leggero (pomice)

12 - Effetto del tipo di aggregato sull'espansione termica del calcestruzzo [5].

termica del calcestruzzo. Al contrario, l'inerte grosso siliceo, mentre non modifica il comportamento della malta con sabbia silicea, fa aumentare la dilatazione termica della malta con sabbia calcarea. Questi risultati indicano che, in linea di massima, un inerte calcareo è da preferirsi ad uno siliceo per la minore dilatazione termica del conglomerato, ma soprattutto che con una oculata scelta dell'inerte si può modificare sensibilmente la dilatazione termica del calcestruzzo e quindi la tendenza al distacco del calcestruzzo superficiale durante il riscaldamento.

La fig. 12 mostra la percentuale di espansione di alcuni calcestruzzi in funzione della temperatura: il calcestruzzo con inerte siliceo presenta un'espansione maggiore che aumenta sensibilmente nell'intervallo tra 500 e 600 °C a causa della trasformazione di stato del quarzo a 573 °C; il conglomerato con inerte calcareo presenta un'espansione leggermente inferiore ma soprattutto non mostra la brusca variazione dimensionale tra 500 °C e 600 °C; infine il calcestruzzo con inerte leggero naturale (pomice) presenta un'espansione termica trascurabile, dovuta probabilmente al fatto che i pori presenti nella pomice consentono di assorbire, da un punto di vista macroscopico, le dilatazioni che si verificano su scala microscopica.

#### 4.3. Effetto sulla conducibilità termica

Ai fini della protezione delle armature e del calcestruzzo più interno è preferibile disporre di un calcestruzzo con la minore conducibilità termica. Questa

dipende sostanzialmente dal tipo di inerte, dal rapporto inerte/cemento, dall'umidità del calcestruzzo e dalla temperatura. In linea di massima la conducibilità termica di un calcestruzzo ordinario è compresa tra 1,5 e 2 Kcal/m · h · °C. I calcestruzzi con inerte quarzoso mostrano in generale i valori più alti mentre quelli basaltici presentano quelli più bassi, con valori intermedi per i conglomerati contenenti inerti calcarei. Tuttavia inerti dello stesso tipo (per es. calcareo o siliceo) possono presentare valori di conducibilità termica anche molto diversi tra loro a seconda della loro provenienza (fig. 7). Poiché l'inerte presenta una conducibilità termica più elevata di quella della pasta di cemento, i calcestruzzi più magri, è cioè con più alto rapporto inerte/cemento, presentano una maggiore conducibilità termica (fig. 6). La fig. 13 mostra la conducibilità termica di due calcestruzzi (A e B) in funzione della temperatura.

Si può osservare che il calcestruzzo più magro (cemento:sabbia:inerte grosso = 1:2,3:2,9) è più conduttivo.

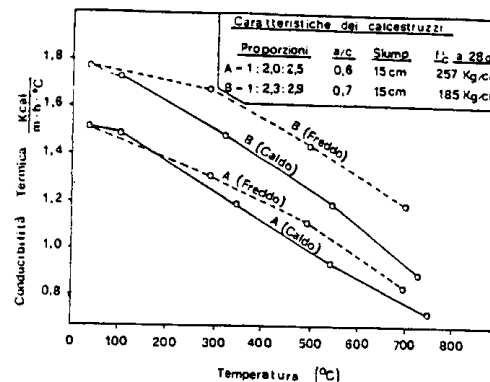
Se si sostituisce l'inerte ordinario con quello leggero la conducibilità termica è dell'ordine di 0,15 - 0,50 Kcal/m · h · °C per i calcestruzzi il cui peso specifico è compreso tra 500 e 1800 Kg/m<sup>3</sup>.

La fig. 14 mostra il limite di sopportazione del fuoco in funzione dello spessore di una lastra confezionata con calcestruzzo ordinario (2400 - 2500 Kg/m<sup>3</sup>), leggero (1400 - 1800 Kg/m<sup>3</sup>) e isolante (800 - 1200 Kg/m<sup>3</sup>). Tale limite è qui inteso, secondo la norma ASTM E 119 [1], come il tempo, in ore, perché la superficie della lastra opposta a quella esposta al fuoco raggiunga mediamente una temperatura di 121,1 °C (250 °F) superiore a quella iniziale, oppure in un punto la temperatura superi il valore di 162,8 °C (325 °F). Si può osservare che diminuendo il peso specifico, con l'impiego di inerti leggeri, aumenta lo spessore di calcestruzzo che corrisponde ad un determinato limite di sopportazione del fuoco.

Le figg. 6 e 13 indicano che aumentando la temperatura diminuisce la conducibilità termica dei calcestruzzi ordinari, e che le misure effettuate a freddo (dopo aver riscaldato il materiale) presentano valori maggiori di quelle effettuate su calcestruzzi caldi (fig. 13).

L'effetto della temperatura sulla conducibilità termica è probabilmente da mettere in relazione con il contenuto di umidità nel calcestruzzo.

Poiché la conducibilità termica dell'aria è più bassa di quella dell'acqua, un calcestruzzo asciutto è sensibilmente più isolante di un calcestruzzo saturo d'acqua.

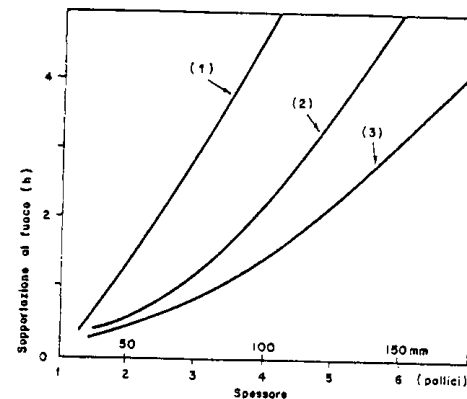


13 - Effetto della temperatura e della composizione sulla conducibilità termica del calcestruzzo [5].

La Tabella 2 mostra l'effetto dell'umidità sulla variazione di conducibilità termica di un calcestruzzo: una umidità dell'1% in volume nel calcestruzzo fa aumentare la conducibilità termica di circa il 30% rispetto al calcestruzzo asciutto, mentre con un'umidità del 10% si ottiene più che un raddoppio della conducibilità termica.

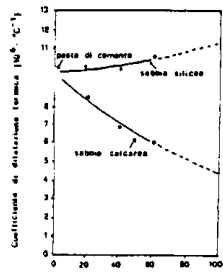
TABELLA 2  
FATTORE DI MOLTIPLICAZIONE (f) PER LA CONDUCE-  
LITA' TERMICA DOVUTO ALLA VARIAZIONE DI UMIDITA'  
NEL CALCESTRUZZO

Umidità (% in volume)	1	2,55	5	10	20	25
Fattore f	1,3	1,55	1,75	2,10	2,35	2,75

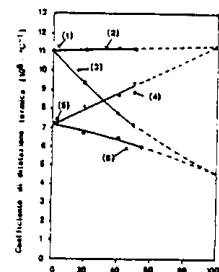


1 - Calcestruzzo isolante; 2 - Calcestruzzo leggero; 3 - Calcestruzzo ordinario

14 - Effetto dello spessore della lastra in calcestruzzo sul limite di sopportazione al fuoco.



10



11

- 1 - Malta silicea
- 2 - Malta silicea+aggr. siliceo
- 3 - Malta silicea+aggr. calcarea
- 4 - Malta calcarea+aggr. siliceo
- 5 - Malta calcarea
- 6 - Malta calcarea+aggr. calcarea

10 - Influenza del tipo di sabbia sulla dilatazione termica di una malta. Le parti tratteggiate delle curve rappresentano delle estrapolazioni verso i valori della sola sabbia [5]. 11 - Influenza del tipo di inerte grosso sulla dilatazione termica [5].

Qualora non si conoscano i reali contenuti di umidità si può approssimativamente assumere un valore del 5% e 2,5% per calcestruzzi ordinari rispettivamente esposti e non esposti all'aria, e 8% e 5% per calcestruzzi leggeri rispettivamente esposti e non esposti all'aria.

Da un punto di vista pratico, però, l'aumento di temperatura che si verifica durante un incendio può avere effetti sulla conducibilità termica diversi da quelli mostrati nelle figg. 6 e 13. Ciò si verifica quando nel materiale, a causa delle tensioni provocate dalle differenti dilatazioni della pasta e dell'inerte (fig. 8), si creano delle fessure continue e di notevole entità che favoriscono localmente l'accesso dei fumi caldi verso il calcestruzzo non esposto direttamente alle fiamme e soprattutto verso le armature (paragrafo 4.2).

#### 4.4. Effetto sulla resistenza meccanica a compressione

L'effetto del fuoco sulla resistenza meccanica del calcestruzzo è piuttosto complesso. Esso dipende dalla composizione del calcestruzzo (rapporto acqua/cemento, tipo di inerte, tipo di cemento, ecc.), dalla lavorabilità e dalla messa in opera del conglomerato, dalle condizioni di carico cui il materiale è sottoposto durante il riscaldamento, oltre che, ovviamente, dalle modalità di riscaldamento, dalla geometria e dimensione del materiale, ecc.

##### 4.4.1. INFLUENZA DELLA COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO

L'effetto del rapporto acqua/cemento sul comportamento del calcestruzzo alle alte temperature è stato studiato da Malhotra [12]. Egli ha trovato che la diminuzione percentuale della resistenza meccanica è in dipendenza dal rapporto acqua/cemento. I dati ottenuti dagli autori della presente memoria (figg. 15-16) confermano sostanzialmente questa osservazione. Tuttavia essi mettono in evidenza il vantaggio di preparare calcestruzzi con un più basso rapporto acqua/cemento. La fig. 15 mostra, per esempio, l'influenza del tempo di riscaldamento a 500-750-1000 °C, di due calcestruzzi, entrambi preparati con inerti silicei, ma con diverso rapporto acqua/cemento, e quindi con diversa resistenza meccanica iniziale, per la presenza o meno di un additivo riduttore d'acqua [13-15]. Si può osservare che, in entrambi i casi, un trattamento termico a 500 °C, anche dopo diverse ore, provoca una leggera diminuzione di resistenza meccanica. A temperature di 750 °C, invece, si registra una rapida diminuzione della resistenza meccanica, che già dopo trenta minuti è diminuita di circa il 30%, e di oltre il 50%

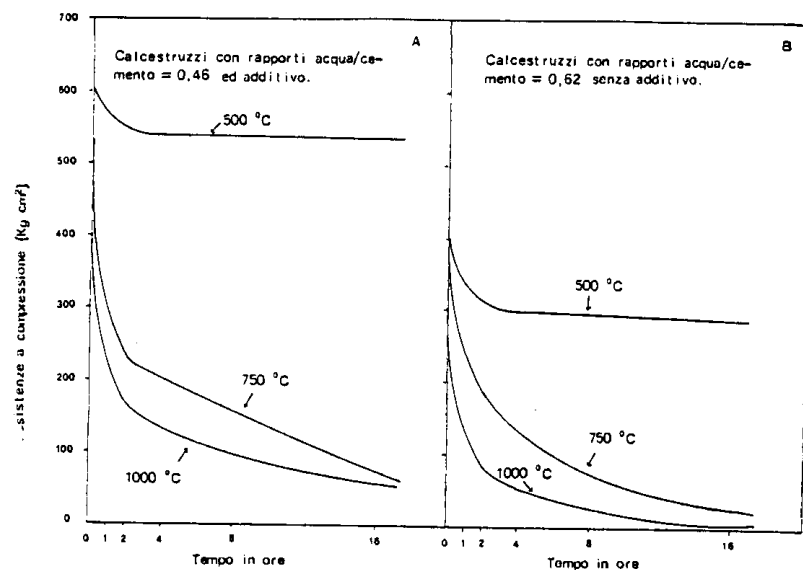
a 1000 °C. Tuttavia nel calcestruzzo contenente l'additivo, cioè con il minor rapporto acqua/cemento (0,46), la resistenza meccanica è sensibilmente maggiore, e dopo 30 minuti a 750 °C, o dopo 15 minuti a 1000 °C, esso conserva ancora un' apprezzabile resistenza meccanica (400 Kg/cm<sup>2</sup>) che è all'incirca eguale a quella del calcestruzzo originale privo di additivo e quindi con un maggior rapporto acqua/cemento (0,62).

Analoghi effetti del rapporto acqua/cemento sulla caduta della resistenza meccanica durante il trattamento termico, sono stati osservati per i calcestruzzi preparati con inerti calcarei (fig. 16). In tal caso, a causa del miglior comportamento dell'inerte calcareo, si registra un miglior comportamento, soprattutto a 750 °C, rispetto ai calcestruzzi preparati con inerti silicei (fig. 15). A parità di composizione del calcestruzzo, si è trovato che, dopo un riscaldamento di 1 ora a 750 °C, la resistenza meccanica diminuisce del 25% per i calcestruzzi con inerti calcarei, e del 45% per quelli con inerti silicei.

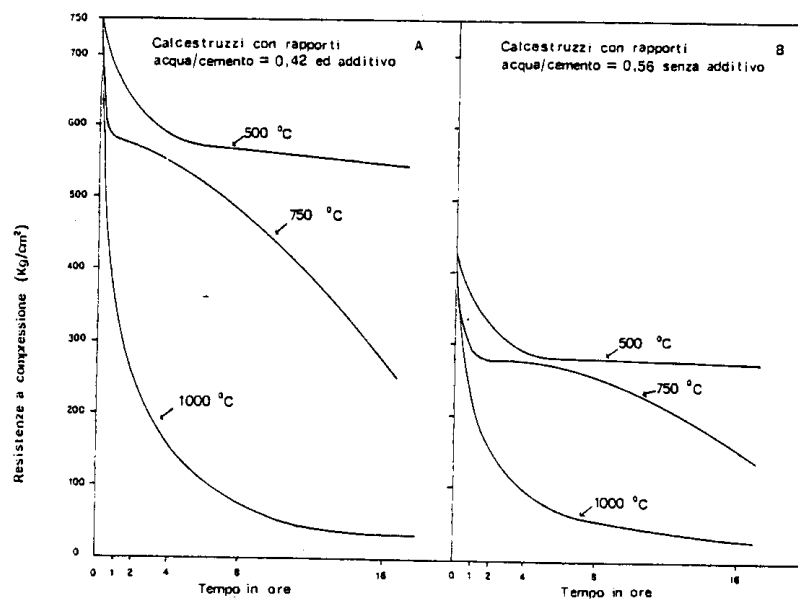
La natura dell'inerte (paragrafo 3.3) influenza sensibilmente il comportamento del calcestruzzo alle alte temperature ed in particolare la sua resistenza meccanica. La fig. 17 [16] mostra la variazione in percentuale, in funzione della temperatura, per calcestruzzi preparati con inerti di diversa natura: aggregati silicei, calcarei e leggeri. Si può osservare che, in generale, il riscaldamento provoca un progressivo deterioramento del materiale che a 400-450 °C ha perso circa il 20% della resistenza meccanica iniziale. Questo deterioramento è attribuibile alle modificazioni chimico-fisiche subite dalla pasta di cemento ed in particolare alle microfessurazioni nella pasta e all'interfacies pasta-aggregato (paragrafo 3.1).

Eccezionalmente, soprattutto se il contenuto di umidità è relativamente basso e se la temperatura sale molto lentamente, si può osservare un lieve incremento della resistenza meccanica durante il riscaldamento fino a 200 °C: ciò è osservabile, per esempio, in fig. 17 nel calcestruzzo con inerte leggero (argilla espansa) probabilmente per il lento aumento della temperatura dentro il calcestruzzo provocato dalla bassa conducibilità termica dell'inerte leggero. In tal caso l'effetto negativo delle microfessurazioni della pasta di cemento è controbilanciato dall'effetto positivo determinato dal fatto che il legame tra le particelle di cemento idratato diviene più intenso in assenza di acqua (paragrafo 3.2).

Nell'intervallo di 550-650 °C, per i calcestruzzi con inerti silicei, si osserva una brusca diminuzione



15 - Influenza del tempo di riscaldamento sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con inerti silicei e con diversi rapporti acqua/cemento; A: con additivo riduttore d'acqua; B: senza additivo.



16 - Influenza del tempo di riscaldamento sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con inerti calcarei e con diversi rapporti acqua/cemento; A: con additivo riduttore d'acqua; B: senza additivo.

nella resistenza meccanica fino ad arrivare al 25-30% del valore iniziale a 650 °C. I calcestruzzi con inerti calcarei o con argilla espansa, invece, conservano, a questa temperatura, circa il 75% della resistenza iniziale.

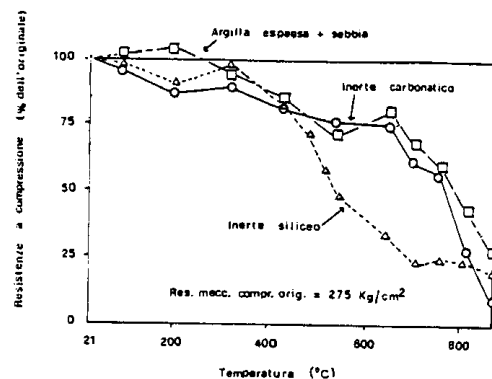
Seguitando ad aumentare la temperatura oltre 650 °C, i calcestruzzi con inerti silicei non subiscono praticamente ulteriori degradazioni mentre quelli confezionati con argilla espansa, e soprattutto quelli contenenti l'inerte calcareo, subiscono un progressivo deterioramento, specialmente nell'intervallo tra 700 e 900 °C.

Anche il rapporto inerte/aggregato può influenzare significativamente la riduzione della resistenza meccanica nei calcestruzzi esposti alle alte temperature. Malhotra [12] ha trovato che più alto è il rapporto inerte/cemento, minore è la riduzione in percentuale della resistenza a compressione. È opinione degli autori della presente memoria che tale comportamento debba essere escluso per gli inerti silicei, e debba essere invece limitato agli inerti calcarei o più in generale a quelli non silicei. Tuttavia, anche in questo caso occorre sottolineare che i calcestruzzi con un basso dosaggio di cemento, a causa della minore resistenza meccanica iniziale, presentano, in valore assoluto, una minore resistenza residua alla fine del trattamento termico.

Per quanto concerne il tipo di cemento, in generale si dovrebbero preferire cementi Portland che liberano per idratazione il minor quantitativo di calce d'idrolisi [8, 17] o meglio ancora impiegare cementi d'altoforno e soprattutto pozzolanici nei quali la calce d'idrolisi, è in gran parte combinata con la pozzolana o la loppa d'altoforno. La presenza di calce d'idrolisi, che si trasforma in ossido di calcio durante il riscaldamento (450 - 500 °C), favorisce, infatti, lo sgretolamento del calcestruzzo quando questo viene bagnato o in fase di estinzione dell'incendio o prima di procedere all'eventuale restauro del calcestruzzo degradato (paragrafo 3.1). Qualora, però, si siano impiegati inerti calcarei e la temperatura abbia raggiunto valori di 700 - 1000 °C, la produzione di ossido di calcio, per decomposizione del carbonato di calcio, è decisamente predominante rispetto a quella provocata dalla calce di idrolisi, cosicché in tal caso il vantaggio di usare cementi pozzolanici o d'altoforno, rispetto al cemento Portland, può essere praticamente annullato.

#### 4.4.2. INFLUENZA DELLA LAVORABILITÀ E DELLA MESSA IN OPERA DEL CALCESTRUZZO

Dal punto di vista pratico è particolarmente importante valutare l'effetto sulla resistenza al fuoco della compattezza e della omogeneità del calcestruzzo indu-



17 - Effetto del tipo di inerte sulla resistenza meccanica a compressione misurata durante il riscaldamento [18].

rito, in relazione alla lavorabilità e alla messa in opera del calcestruzzo fresco.

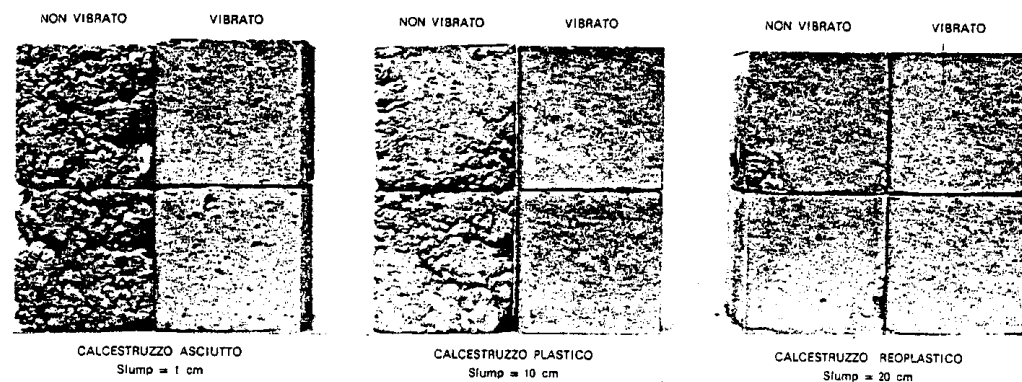
Sebbene non esistano, a conoscenza degli autori, dati sperimentali concernenti il comportamento al fuoco dei calcestruzzi in funzione della loro compattezza ed omogeneità, si può ragionevolmente assumere che se l'eterogeneità e la cattiva compattazione del calcestruzzo provoca, in generale, un decadimento delle prestazioni della struttura a temperatura ambiente [18], rende ancora più grave il comportamento dell'elemento strutturale durante l'incendio. Infatti, un'eterogeneità del materiale provoca una diversa trasmissione del calore e soprattutto una diversa dilatazione termica, con la conseguenza di aggravare le tensioni all'interno del materiale sia su scala microscopica, che su quella macroscopica (paragrafo 4.2). Inoltre, nelle zone mal compattate, ed in particolare nei cosiddetti «nidi di ghiaia», la presenza di grosse cavità esistenti tra gli inerti, oltre a rendere localmente il calcestruzzo scarsamente resistente, favorisce l'accesso dei fumi caldi, l'insorgere di tensioni localizzate nel calcestruzzo, il cedimento delle armature e quindi il collasso delle strutture (paragrafi 5.1 - 5.3). Sebbene l'argomento sia di grande interesse pratico, non solo per la resistenza al fuoco, ma, più in generale, per tutte le altre caratteristiche del calcestruzzo, è opinione degli autori che quest'aspetto del problema sia spesso sottovalutato, sia in fase di progetto, che in fase di esecuzione del lavoro. Infatti, la maggior parte delle prove sperimentali, che talvolta precedono la scelta di un conglomerato, sono spesso condotte su elementi di calcestruzzo ben confezionati in laboratorio che raramente sono rappresentativi degli elementi strutturali realmente messi in opera.

È noto che tutte le proprietà del calcestruzzo indurito sono migliorate con la diminuzione del rapporto acqua/cemento. Tuttavia, diminuendo l'acqua d'impasto, diminuisce anche la lavorabilità ed aumenta quindi la difficoltà di compattare il calcestruzzo, cioè di riempire le casseforme e di avvolgere completamente gli acciai d'armatura. Pertanto, stabilito il rapporto acqua/cemento necessario al raggiungimento di certe proprietà (resistenza meccanica, ritiro, modulo elastico, fluage, durabilità, ecc.), si dovrebbe scegliere di volta in volta un adeguato sistema di messa in opera per realizzare in pratica la compattazione del calcestruzzo fresco cui corrisponde una certa lavorabilità in corrispondenza del prefissato rapporto acqua/cemento. Oppure, stabilito che si vuole mettere in opera il calcestruzzo con un determinato sistema di messa in opera di cui si dispone,

correrrebbe determinare la lavorabilità, e quindi il rapporto acqua/cemento, che rende possibile in pratica la completa compattazione del materiale; in tal caso, ovviamente, tutte le proprietà del materiale risultano conseguentemente fissate e di ciò si dovrebbe tener conto in fase di progetto. In altre parole, o si fissa preliminarmente la qualità (per es. la resistenza meccanica) e si determina in conseguenza un sistema di compattazione adeguato, o si fissa aprioristicamente il sistema di compattazione e si determina quindi la qualità sulla quale si può contare.

Val la pena di osservare che per sistema di messa in opera qui si intende non solo il mezzo meccanico per il trasporto (caduta per gravità, scivolamento, pom-

paggio, ecc.) o la compattazione del calcestruzzo (pompatura manuale, vibrazione interna o esterna, ecc.) ma anche la cura della messa in opera, e cioè il tempo di vibrazione, il numero di operai, la diligenza nel lavoro ecc. Appare evidente che data la difficoltà di determinare quantitativamente questi parametri, anche la valutazione della interdipendenza tra qualità (comprensione la resistenza al fuoco) - lavorabilità - messa in opera del calcestruzzo, è di difficile valutazione. Tuttavia ci non esclude che ci si possa muovere nella direzione di una minore dipendenza della qualità dal sistema di messa in opera. Un calcestruzzo ideale sarebbe quello che avesse contemporaneamente qualità elevate, costanti, ed indipendenti dal sistema della messa in opera da questo punto di vista, l'impiego di additivi che riducono sensibilmente il rapporto acqua/cemento e incrementano al tempo stesso la lavorabilità dell'impasto, senza provocare segregazione apprezzabile, costituisce un eccellente strumento per avvicinarsi a questo obiettivo [13-15]. In fig. 18 sono mostrati alcuni calcestruzzi, di diversa consistenza (rigidi con slump di 1 cm e rapporto acqua/cemento di 0,42; plastici con slump di 10 cm e rapporto acqua/cemento di 0,56; e reoplastici con slump di 20 cm e rapporto acqua/cemento di 0,42), e sottoposti a vibrazione di diversa durata, (0 sec e 30 sec) per simulare una variazione del sistema della messa in opera. Si può osservare che il calcestruzzo a consistenza plastica, e soprattutto quello a consistenza rigida, presentano visivamente una compattazione scadente quando non sono vibrati: se ciò



18 - Effetto della lavorabilità del calcestruzzo e della vibrazione sulla capacità del calcestruzzo di proteggere le armature

accade in qualche zona della struttura messa in opera la resistenza al fuoco dell'elemento può essere seriamente compromessa per la minore resistenza meccanica del calcestruzzo, ma soprattutto per il più facile accesso dei fumi caldi alle armature. Ovviamente qualora gli impasti fossero ben compattati, il calcestruzzo più asciutto (slump = 1 cm) presenterebbe una qualità migliore di quello a consistenza plastica, per il più basso rapporto acqua/cemento. Nel caso dei calcestruzzi replastici [13-15], invece, si osserva che l'effetto della vibrazione è sensibilmente meno marcato non solo sull'aspetto (fig. 18), ma anche sulla resistenza meccanica [18]: a causa della grande lavorabilità, la qualità del materiale, e soprattutto la protezione delle armature dall'azione del fuoco, risulta essere notevolmente meno dipendente dalla cura della messa in opera; poiché, d'altra parte, per la presenza d'additivo, il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo replastico risulta relativamente basso, ed all'incirca eguale a quello del calcestruzzo asciutto a slump di 1 cm, la qualità di questo materiale risulta relativamente elevata ed eguale a quella del migliore (nel senso di più compattato) calcestruzzo asciutto.

#### 4.4.3. INFLUENZA DEL CARICO APPLICATO AL CALCESTRUZZO

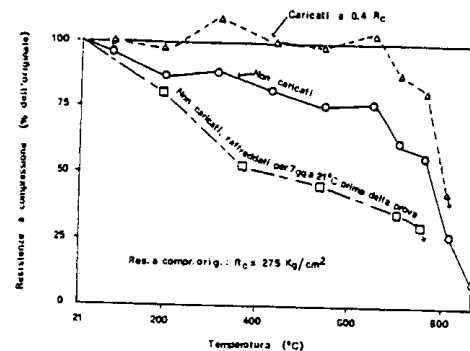
I risultati precedentemente discussi, in particolare quelli riportati in fig. 17, riguardano l'effetto della temperatura sulla resistenza a compressione del calcestruzzo misurata a caldo in assenza di qualsiasi carico. In realtà, però, durante l'azione del fuoco l'elemento strutturale si trova sempre sottoposto ad una sollecitazione meccanica o per il peso proprio, o per gli eventuali carichi accidentali, o addirittura per lo stato di vibrazione realizzato, per esempio, con la precompressione. Per simulare queste situazioni sono state eseguite delle prove, sia in assenza che in presenza di carico, i cui risultati sono riportati nelle figg. 19-21 [16]. Le curve superiori riguardano calcestruzzi caricati con il 40% della resistenza meccanica iniziale ( $275 \text{ Kg/cm}^2$ ) e rotti a caldo per compressione; le curve intermedie si riferiscono ai calcestruzzi non sollecitati e rotti a caldo, mentre le curve inferiori riguardano i calcestruzzi conservati a temperatura ambiente per 7 giorni dopo il trattamento termico e quindi rotti a compressione.

La fig. 19, che si riferisce a calcestruzzi preparati con inerti calcarei, mostra che la resistenza meccanica dei materiali sotto carico non presenta alcuna sostanziale variazione fino a circa  $650^\circ\text{C}$ , mentre la diminuzione di resistenza è di circa il 25% per i provini non

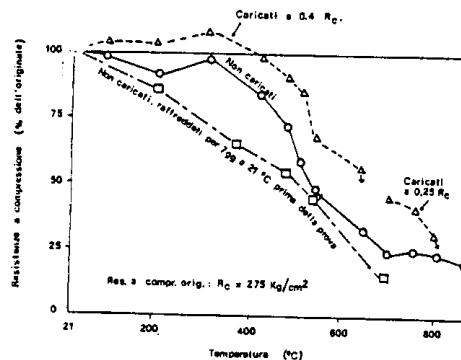
caricati rotti a caldo e di circa il 60% per quelli non caricati rotti a freddo. Questo diverso comportamento del calcestruzzo, che approssimativamente si ritrova anche per i calcestruzzi con inerti silicei (fig. 20) o con inerti leggeri (fig. 21), può essere attribuito ad alcune variazioni fisiche e chimico-fisiche che si verificano nella pasta di cemento o all'interfacies pasta-inerte (fig. 9). Le microfessure che si formano in conseguenza delle tensioni generate a livello microscopico dalla differente dilatazione termica, possono essere completamente annullate dall'azione del carico applicato: grazie allo scorrimento viscoso della pasta di cemento, infatti, le particelle di cemento idratato (fig. 3) subiscono un processo di addensamento cosicché le microfessure sono evitate oppure eliminate.

Il fatto che il materiale, conservato a temperatura ambiente dopo il trattamento termico, presenti una resistenza meccanica inferiore a quella del corrispondente materiale rotto a caldo, dipende probabilmente dalla reintroduzione delle molecole di acqua dall'ambiente verso la pasta (paragrafo 3.2): Pihlajaava [19], Sereda ed altri [20], e Wittmann [21], hanno messo in evidenza che i legami tra le particelle di cemento idratato risultano più deboli in presenza di acqua adsorbita sulla superficie delle particelle stesse.

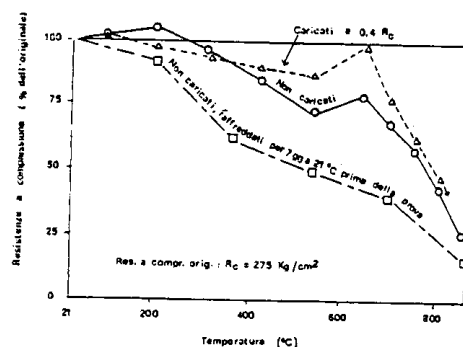
Tornando alla fig. 19 si può osservare che anche la diminuzione di resistenza meccanica che si verifica tra  $700$  e  $900^\circ\text{C}$ , e probabilmente attribuibile alla decomposizione termica del carbonato di calcio (paragrafo 3.3), dipende sensibilmente dalla presenza o meno di carico, come anche dalla temperatura alla quale il materiale viene rotto. Dall'esame di questi risultati si può osservare che l'effetto della temperatura sulla resistenza meccanica, soprattutto se misurata a temperatura ambiente, risulta più deleteria di quanto in realtà si verifica per la presenza del carico e per l'effetto della temperatura. Nella fig. 20 sono mostrati i risultati riguardanti l'effetto della temperatura sulla resistenza a compressione dei calcestruzzi contenenti inerti silicei. A parte l'effetto positivo esercitato dall'applicazione del carico, si osserva che nell'intervallo di temperatura di  $550$ - $600^\circ\text{C}$ , si verifica una brusca caduta della resistenza a causa della trasformazione di stato del quarzo a  $573^\circ\text{C}$ . Nella fig. 21 sono riportati i risultati concernenti il comportamento dei calcestruzzi preparati con argilla espansa: nel caso dei calcestruzzi riscaldati sotto carico non si verifica una sostanziale variazione di resistenza a compressione fino a  $650^\circ\text{C}$ ; la leggera diminuzione registrata tra  $550$  e  $600^\circ\text{C}$ , è probabilmente da attribuire alla presenza di quarzo



19 - Effetto del carico applicato sulla resistenza meccanica di calcestruzzi trattati ad alte temperature: inerti calcarei [16].



20 - Effetto del carico applicato sulla resistenza meccanica di calcestruzzi trattati ad alte temperature: inerti silicei [16].



21 - Effetto del carico applicato sulla resistenza meccanica di calcestruzzi trattati ad alte temperature: inerti sabbia + argilla espansa [16].

nella sabbia usata come inerte fine accanto all'argilla espansa.

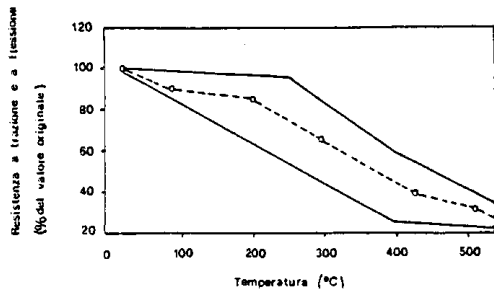
#### 4.5. Effetto sulla resistenza meccanica a trazione

In fig. 22 è mostrata la variazione percentuale della resistenza meccanica a trazione pura ed a trazione per flessione in funzione della temperatura [11]. La curva tratteggiata si riferisce ai valori medi mentre le curve superiore ed inferiore ai massimi e minimi ottenuti in condizioni particolari. I valori massimi sono ottenuti, in genere, con un raffreddamento lento, con bassa umidità nel calcestruzzo, mentre i valori minimi si riferiscono alle prove effettuate in presenza di carico che provoca trazione, con raffreddamenti bruschi dopo il trattamento termico, ed in presenza di notevole umidità la cui fuoriuscita venga impedita durante il riscaldamento: in quest'ultimo caso, si creano all'interno del materiale delle forti tensioni provocate dalla pressione del vapore che agisce da cuneo tra le particelle di cemento idratato.

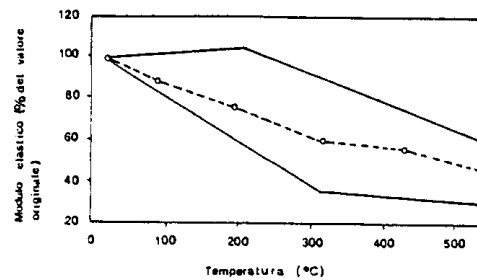
Si può osservare che la diminuzione della resistenza a trazione per effetto del riscaldamento, è sensibilmente più marcata di quella della resistenza a compressione: a  $500^\circ\text{C}$ , per esempio, il calcestruzzo conserva solo il 20-40% dell'originale resistenza a trazione, mentre, nel peggiore dei casi (fig. 17), la resistenza a compressione rimane all'80% del valore originale. Il diverso comportamento del materiale è da attribuire alla formazione, già a temperatura inferiore a  $500^\circ\text{C}$ , delle microfessure (fig. 9) nella pasta di cemento e all'interfacies pasta-inerte (paragrafo 4.2). Le microfessure costituiscono dei punti di innesco della rottura del materiale ed hanno ovviamente un effetto notevolmente più deleterio durante gli sforzi di trazione che non durante quelli di compressione.

#### 4.6. Effetto sul modulo elastico

Nella fig. 23 è rappresentata la diminuzione percentuale del modulo elastico in funzione della temperatura del trattamento termico subito dal calcestruzzo. Il significato delle tre curve è identico a quello già discusso in fig. 22, ed anche l'influenza della temperatura sulla variazione del modulo elastico è molto simile a quella riscontrata per la resistenza a trazione. Le principali differenze consistono nel fatto che la diminuzione percentuale del modulo elastico risente, più che la resistenza a trazione ed a compressione, del dosaggio di cemento e del rapporto acqua/cemento: il modulo elastico dei calcestruzzi con alto dosaggio di ce-



22 - Effetto delle alte temperature sulla variazione percentuale della resistenza a trazione ed a flessione del calcestruzzo [11].



23 - Effetto della temperatura sul modulo elastico del calcestruzzo [11].

... e minor rapporto acqua/cemento è meno influenzato dal trattamento termico, ed i punti sperimentali si trovano pertanto, nella curva superiore della fig. 23.

#### 5. Effetto delle alte temperature sul calcestruzzo armato

Il vasto impiego del calcestruzzo armato nel campo delle costruzioni si basa sostanzialmente: a) sulla solidarizzazione del calcestruzzo, che resiste agli sforzi di compressione, e dell'acciaio, che resiste alle sollecitazioni di trazione; b) sul fatto che i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali sono pressoché identici nel campo delle escursioni termiche che si verificano a temperatura ambiente. Sotto l'azione delle alte temperature vengono a modificarsi sia le caratteristiche del calcestruzzo e dell'acciaio, che la solidarizzazione dei due materiali.

Nei precedenti paragrafi sono stati esaminati gli effetti delle alte temperature sul calcestruzzo e sugli elementi che lo compongono; in quelli che seguono saranno discussi gli effetti del riscaldamento sulle proprietà fisico-meccaniche dell'acciaio e sulla solidarizzazione ferro-calcestruzzo.

#### 5.1. Effetto delle alte temperature sulle proprietà dell'acciaio

Pur nella grande varietà di acciai da costruzione disponibili sul mercato, la lega ferro-carbonio, e l'acciaio in particolare, è un materiale notevolmente più riproducibile ed omogeneo del calcestruzzo sia per i controlli ai quali è sottoposto durante la produzione industriale, sia per il minor numero di parametri che intervengono nella modifica delle sue proprietà. Per questo motivo

l'influenza della temperatura sulle proprietà fisico-mechaniche dell'acciaio è molto più definita e conosciuta.

Nei paragrafi che seguono sono indicate, sotto forma di curve ed equazioni, le variazioni di alcune proprietà degli acciai da costruzione di uso più corrente, provocate dall'aumento di temperatura: esse sono riprese da un rapporto francese [22] del gruppo di lavoro « Incendio » (Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier).

#### 5.1.1. EFFETTO SUL CARICO DI SNERVAMENTO

Il carico al limite di snervamento, convenzionalmente definito come il carico di trazione in corrispondenza del quale si verifica un allungamento residuo dello 0,2%, varia con la temperatura secondo l'andamento mostrato in fig. 24 o secondo le equazioni di seguito riportate:

$$\sigma_{eT}/\sigma_e = 1 + \frac{T}{2072 \log_{10}(T/1750)}$$

nell'intervallo di temperatura tra 0 e 600 °C, e

$$\sigma_{eT}/\sigma_e = (340 - 0,35 T)/(T - 240)$$

nell'intervallo di temperatura tra 600 e 1000 °C, dove  $\sigma_e$  è il carico di snervamento a 0 °C e  $\sigma_{eT}$  il carico di snervamento alla generica temperatura T.

#### 5.1.2. EFFETTO SUL MODULO D'ELASTICITÀ

La seguente equazione mostra l'influenza della temperatura sul modulo elastico ( $E_T$ ) rispetto a quello misurato a 0 °C (E):

$$\frac{E_T}{E} = 1,0 + \frac{T}{4605 \log_{10} T/100}$$

Nella fig. 25 è rappresentata graficamente la suddetta equazione.

#### 5.1.3. EFFETTO SULLA RESISTENZA MASSIMA A TRAZIONE

Nella fig. 26 è mostrata l'influenza della temperatura sulla resistenza a trazione ( $\sigma_{max, T}$ ) in rapporto al carico di snervamento a 0 °C ( $\sigma_e$ ).

#### 5.1.4. EFFETTO SULLA CONDUCIBILITÀ TERMICA

La variazione della conducibilità termica ( $\lambda_2$ ) fra 0 °C e 750 °C, può essere rappresentata dall'equazione convenzionale seguente:

$$\lambda_a = -0,0283 T + 47 \text{ (in Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C)},$$

riportata graficamente in fig. 27.

#### 5. EFFETTO SULLA DILATAZIONE TERMICA

La seguente equazione rappresenta come varia la dilatazione termica ( $\Delta L/L$ ) in funzione della temperatura:

$$\frac{\Delta L}{L} = 0,4 \cdot 10^{-4} T^2 + 1,2 \cdot 10^{-5} T - 3 \cdot 10^{-4}$$

riportata graficamente in fig. 28.

#### 5.2. La protezione dell'acciaio d'armatura inglobato nel calcestruzzo

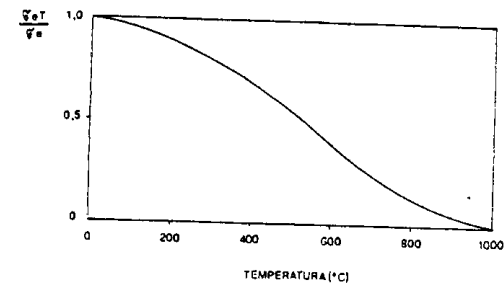
L'acciaio è inglobato nel calcestruzzo per espletare una o più delle seguenti funzioni:

1) normalmente per resistere alle tensioni di trazione provocate dai carichi;

2) talvolta, per limitazioni di spazio, per opporsi a tensioni di compressione: nel caso dei pilastri, l'armatura metallica costituita dai ferri longitudinali e staffe, o spirali cerchianti, è sempre presente, come vuole la normativa italiana (D.M. 16 giugno 1976) per i ben noti motivi;

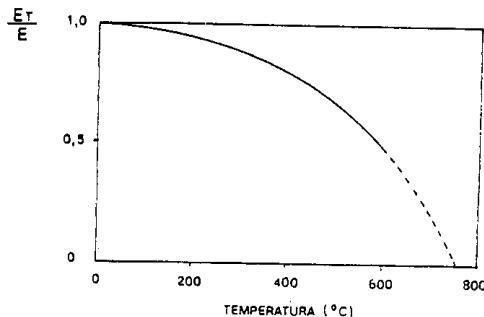
3) spesso, soprattutto nel caso di strutture iperstatiche, per contrastare le tensioni di trazione causate da elevate differenze di temperatura, o per limitare l'apertura di fessure provocate dalle tensioni di trazione dovute al ritiro del calcestruzzo.

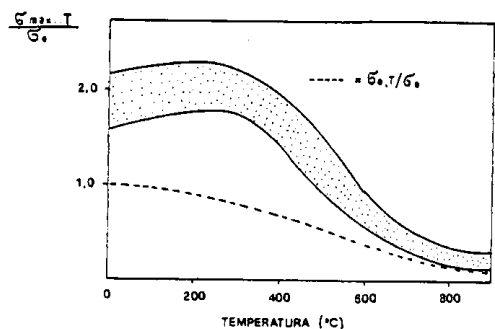
Tranne che per le tensioni di trazione provocate dal taglio, in tutti gli altri casi, e cioè per trazione causata da flessione, torsione, differenza di temperatura e ritiro, l'azione dell'armatura è tanto più efficace quanto



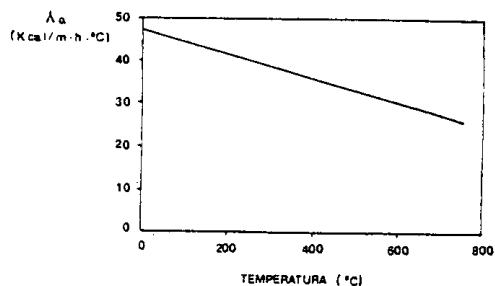
24 - Effetto della temperatura sul carico di snervamento dell'acciaio ( $\sigma_e$  = carico di snervamento a 0°C;  $\sigma_{eT}$  = carico di snervamento alla temperatura T) [22].

25 - Effetto della temperatura sul modulo elastico dell'acciaio (E = modulo elastico a 0°C;  $E_T$  = modulo elastico alla temperatura T) [22].



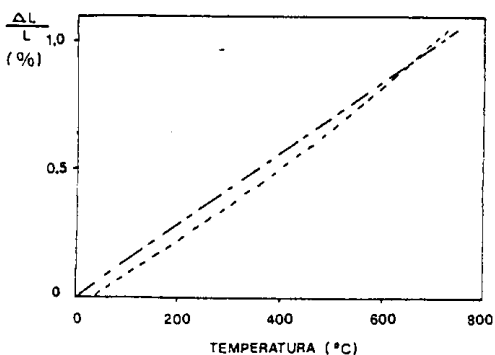


26 - Effetto della temperatura sul carico di snervamento ( $\sigma_y, T$ ) e sul carico di rottura per trazione ( $\sigma_{max}, T$ ) dell'acciaio rispetto al carico di snervamento a 0°C ( $\sigma_y$ ) [22].



27 - Effetto della temperatura sulla conducibilità termica ( $\lambda$ ) dell'acciaio [22].

28 - Effetto della temperatura sulla dilatazione termica ( $\Delta L/L$ ) dell'acciaio [22].



più essa è disposta vicino ai lembi della sezione dell'elemento strutturale: in tal modo infatti si aumenta il braccio di leva della coppia interna resistente e l'inerzia della sezione. La distanza però tra l'armatura ed il lembo della sezione, cioè il copriferro, non può essere piccola a piacere, poiché questo strato di calcestruzzo ha delle funzioni ben precise da svolgere:

- 1) deve proteggere l'armatura contro l'esposizione ad agenti aggressivi;
- 2) deve assicurare l'aderenza fra l'acciaio e il calcestruzzo;
- 3) deve proteggere l'acciaio dal fuoco.

La salvaguardia dell'acciaio nel calcestruzzo armato è quindi affidata allo spessore del copriferro, ed al comportamento del calcestruzzo, di cui il copriferro è costituito, alle alte temperature.

Per quanto riguarda lo spessore del copriferro le norme italiane (D.M. 16 giugno 1976) parlano di almeno 0,8 cm nel caso di solette e di almeno 2 cm nel caso di travi e pilastri in ambienti normali, e di spessori maggiori, rispettivamente 2 cm e 4 cm, nel caso di ambienti variamente aggressivi, lasciando aperta la possibilità di ulteriori aumenti del copriferro per ottenere protezioni ancora maggiori, previa ovviamente l'adozione di opportuni provvedimenti atti ad evitare il distacco dal calcestruzzo. In ogni caso, però, si presuppone sempre che questi spessori di copriferro siano sufficientemente uniformi, e costituiti da calcestruzzo omogeneo e compatto (paragrafo 4.4.3). Infatti, solo se è valida questa condizione la protezione dell'acciaio è sicuramente efficace, e dipendente dallo spessore del copriferro e dal comportamento del calcestruzzo alle alte temperature. Per quanto riguarda il copriferro si possono distinguere, in sostanza, due comportamenti a seconda dei campi di condizione « tempo-temperatura »:

1) campo di condizioni « tempo-temperatura » nel quale il calcestruzzo resta integro o, pur sgretolandosi superficialmente, ricopre ancora con sufficiente spessore l'acciaio di armatura;

2) campo di condizioni « tempo-temperatura » nel quale il calcestruzzo presenta microfessurazione estesa e continua, ed uno sgretolamento superficiale (paragrafo 4.2.).

Nel primo caso il calcestruzzo protegge ancora l'acciaio inglobato, e il flusso di calore che giunge alla armatura per innalzarne la temperatura è quello che

può propagarsi attraverso il calcestruzzo. Nel secondo caso l'armatura viene in contatto diretto con i fumi caldi generati dall'incendio.

Il fatto che il copriferro venga a trovarsi in uno dei due campi di condizioni sopra menzionate dipende da molteplici fattori, alcuni esterni, come i parametri dell'incendio, le condizioni di esposizione dell'elemento alle fiamme, la forma dell'elemento (rapporto superficie/volume), lo stato di sollecitazione e di vincolo dell'elemento; altri interni, cioè propri del calcestruzzo, come il contenuto di umidità, la composizione, il contenuto di vuoti, lo spessore del copriferro.

Il gran numero di fattori in gioco rende a tutt'oggi impossibile una trattazione completa di questo argomento: infatti tutti gli studi svolti, sia a livello teorico, che a livello sperimentale, introducono delle ipotesi o delle condizioni sperimentali semplificate, quali: il « fuoco standard », che approssima i parametri del « fuoco reale » (paragrafo 2); la prova in forno, che approssima le condizioni di esposizione dell'elemento alle fiamme; forme semplici degli elementi, quali pilastri rettangolari e travi a T o a I; stati di sollecitazioni e di vincolo semplici, come quelli che si verificano per peso proprio nelle travi inflesse, semplicemente appoggiate, o per compressione semplice nei pilastri rettangolari; spessori di copriferro variabili fra 2 e 5 cm.

Nei limiti di tali semplificazioni sono state eseguite misure di temperatura a diversi livelli di profondità nelle varie sezioni dell'elemento strutturale provato [23-24]. Alla temperatura di circa il 45% del carico di snervamento (fig. 24). Il residuo 55% del carico di snervamento corrisponde, grosso modo, al valore della tensione ammissibile assunta nei calcoli, e quindi alla temperatura di 500 °C ci si trova per l'acciaio al limite di sicurezza.

D'altra parte, però, alla temperatura di 500 °C, si dispone ancora di una certa resistenza a rottura che è almeno eguale al 90% del carico di snervamento a 0 °C (fig. 26), e pertanto superiore di almeno il 60% alla tensione ammissibile. Inoltre, il modulo elastico dell'acciaio a 500 °C conserva ancora il 65% del suo valore a temperatura ambiente.

Anche il calcestruzzo, a 500 °C, indipendentemente dalla natura degli inerti impiegati (figg. 19-21) e purché ben compattato, conserva ancora almeno i tre quarti dell'originale resistenza meccanica, almeno per quel che concerne le sollecitazioni di compressione. Si può quindi ragionevolmente assumere che finché non viene raggiunta la temperatura di 500 °C

nell'acciaio, l'elemento in calcestruzzo armato si trova in condizioni di sicurezza. Pertanto, l'efficacia dello spessore di copriferro potrà essere valutata attraverso il tempo durante il quale riesce a mantenere l'acciaio al di sotto di tale temperatura limite. Nelle varie prove fatte, sempre utilizzando il « fuoco standard », si è trovato che mediamente con 1 cm di copriferro si protegge l'acciaio per 30 ÷ 40 minuti, con 2 cm per 50 ÷ 70 minuti, con 3 cm per 80 ÷ 110 minuti, con 4 cm per 120 ÷ 160 minuti, e con 5 cm per 180 ÷ 240 minuti [24].

Ovviamente quanto sopra detto è valido solo nel caso in cui lo strato del copriferro sia costituito da calcestruzzo omogeneo e compatto. Se, invece, a causa di una non adeguata compattazione del calcestruzzo, l'acciaio di armatura si trova direttamente esposto all'azione del fuoco, si potrà raggiungere la temperatura limite di 500 °C in 15 ÷ 30 minuti, e tanto più rapidamente quanto più vicino si troverà alla sorgente di calore, e quanto maggiore sarà il rapporto fra la superficie esposta ed il volume.

Dal punto di vista della protezione dell'acciaio di armatura non va sottovalutata, soprattutto nei casi nei quali lo stato del copriferro lasci a desiderare, la possibilità di utilizzare intonachi a base di gesso. Le buone caratteristiche ignifughe degli impasti di gesso possono essere migliorate, oltre che dall'impiego di inerti leggeri a base di vermiculite e perlite, anche dall'aggiunta di alginati, solfato ed ossido di alluminio, cemento alluminoso, calce, ecc. [25]. La buona resistenza al fuoco del gesso è attribuibile al fatto che la temperatura della superficie esposta alle fiamme si mantiene al di sotto di 200 °C finché tutta l'acqua di cristallizzazione del gesso non è stata eliminata per trasformazione del gesso bi-idrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) in emidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) e quindi in anidrite ( $\text{CaSO}_4$ ). Inoltre il basso coefficiente di espansione termica del gesso riduce il pericolo di formazione di fessure attraverso le quali le fiamme potrebbero venire in contatto con il materiale sottostante.

### 5.3. L'aderenza tra l'acciaio e il calcestruzzo

Negli elementi strutturali in calcestruzzo armato, spesso l'acciaio è protetto con un copriferro che non solo è di spessore variabile, ma, quel che è peggio, è costituito da calcestruzzo mal compattato e scarsamente omogeneo. E' sufficiente pensare ai « ferri a vista » o ai « nidi di ghiaia » o alle sbrecciature che frequentemente si vedono lungo gli elementi strutturali. Questi

punti deboli del calcestruzzo, che già in situazioni normali possono pregiudicare seriamente la durata dell'opera, diventano, nel caso di un incendio, dei canali preferenziali per il flusso di calore e provocano quindi un pericoloso innalzamento della temperatura dell'acciaio di armatura, con le dannose conseguenze descritte al paragrafo 5.2. Inoltre, a causa dell'alta conducibilità termica dell'acciaio, che varia da 30 a 47 Kcal/m · h · °C per temperature comprese fra 0 e 600 °C questo flusso di calore viene rapidamente trasferito lungo l'armatura che, riscaldandosi, tende a dilatarsi, in questo impedita dal calcestruzzo che si trova a temperatura molto inferiore per la minore conducibilità termica (1-2 Kcal/m · h · °C). Quando l'aderenza tra il ferro e il calcestruzzo non è più sufficiente a contenere la tensione generata dalla dilatazione termica dell'acciaio, si ha caduta della solidarizzazione fra i due materiali, con sfilamento dell'acciaio e distacco di ulteriori parti di copriferro, e quindi con ulteriore e più grave degra-

dazione della struttura. E' quindi indispensabile, affinché il copriferro sia efficace, che esso sia sufficientemente uniforme e soprattutto costituito da calcestruzzo omogeneo e compatto. Se l'uniformità dimensionale può essere ottenuta con una maggiore accortezza nel disegno e nel successivo posizionamento dell'armatura e dei distanziatori, d'altro lato, per realizzare copriferri di calcestruzzo omogeneo e compatto, è necessario far ricorso a un calcestruzzo reoplastico, cioè molto fluido ma nello stesso tempo coesivo, non segregabile, praticamente « autocompattante », e soprattutto confezionato con rapporti acqua/cemento relativamente bassi [13-15].

Se invece venisse usato un calcestruzzo fluido semplicemente aumentando il rapporto acqua/cemento, si avrebbe non solo un materiale di bassa qualità, e quindi con bassa aderenza all'acciaio, ma anche segregabile ed eterogeneo che aumenterebbe quindi il pericolo di un inadeguato ricoprimento dei ferri.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] American Society Testing Materials, E-119.
- [2] Ministero dell'Interno, Dir. Gen. Servizi Antincendi, Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile.
- [3] COLLEPARDI M., Proceedings of Symposium RILEM-IUPAC « Pore structure and Properties of Materials », Vol. I, B-25, Academia Prague, Praga (1974).
- [4] NEVILLE A.M., « Properties of Concrete », pp. 323-338, Pitman Publishing, Londra (1975).
- [5] ZOLDNERS N.G., « Temperature and Concrete », American Concrete Institute, Publication SP-25, p. 1, Detroit (1968).
- [6] HARMATHY T.Z., « Moisture in Materials Relating to Fire Tests », ASTM STP 385, Maggio (1965).
- [7] LANKARD D.R., D.L. BIRKIMER, F.F. FANDRIEST e M.J. SNYDER, « Temperature and Concrete », American Concrete Institute, Publications S8-25, p. 59, Detroit (1968).
- [8] PETERSEN P.H., « Concrete and concrete-making materials », ASTM STP 169-A, p. 290, (1975).
- [9] NEVILLE A.M., « Properties of Concrete », p. 145, Pitman Publishing, Londra (1975).
- [10] INGBERG S.H., Proceedings Am. Soc. Test. Mats. 29, 824, (1929).
- [11] SULLIVAN P.J. e M.P. PONCHER, « Temperature and Concrete », American Concrete Institute, Publication SP-25, p. 103, Detroit (1968).
- [12] MALHOTRA H.L., Magazine Concrete Research, 8, 85, (1956).
- [13] COLLEPARDI M. e L. MASSIDA, Proceedings of the Conference Hydraulic cement pastes: their structure and properties, p. 256, Sheffield, Aprile, (1976).
- [14] COLLEPARDI M., Cement and Concrete Research 6, 401, (1976).
- [15] COLLEPARDI M., S.M. GUELLA e M. VALENTE, Giornate AICAP, Sanremo 1975, « Porosità, permeabilità e durabilità del calcestruzzo », Notiziario AICAP n. 9, Settembre 1976, Industria Italiana del Cemento.
- [16] ABRAMS H.S., « Temperature and Concrete », American Concrete Institute, Publication S8-25, p. 33, Detroit (1968).
- [17] LIVOVICH A.F., Ceramic Bulletin, 40, 559, (1961).
- [18] COLLEPARDI M., M. CORRADI e G. MORICONTI, Calcestruzzi