

# PROPRIETÀ DEGLI IMPASTI CEMENTIZI PER IL CONSOLIDAMENTO ED IL RIPRISTINO STRUTTURALE DI COSTRUZIONI AMMALORATE

Atti delle "Giornate A.I.C.A.P. 1977"  
Venezia 6/9 Ottobre 1977

Relatori:  
Prof. Dott. Mario Collepari  
Dott. Mario Corradi  
Dott. Ing. Mauro Silvio Guella

## Introduzione

Il ritiro dell'impasto fresco di cemento con cui si intende ripristinare strutturalmente il calcestruzzo di una costruzione degradata è una delle cause più frequenti di insuccesso, che consiste di solito nel distacco tra i due materiali o nella fessurazione del materiale ripristinante. Per ovviare agli inconvenienti causati dal ritiro si può provocare nel conglomerato impiegato per il ripristino una espansione che, se opportunamente contrastata provoca uno stato di compressione nel conglomerato stesso capace di annullare o di ridurre gli effetti del successivo ritiro (fig. 1).

Tuttavia, sia il ritiro, che l'espansione, sono funzione di molteplici parametri, alcuni dei quali dipendenti dalle condizioni ambientali, altri dalle modalità operative e dalla composizione del conglomerato. Lo scopo di questa nota è quello di esaminare i parametri summenzionati e di suggerire le condizioni operative ed i materiali più idonei alla buona riuscita di un ripristino strutturale.

## Il ritiro

Il ritiro è una proprietà tipica di tutti i conglomerati cementizi consistente in una contrazione del materiale provocata dalla sottrazione di acqua da parte dell'ambiente circostante. Esso può essere formalmente suddiviso in: a) ritiro da bleeding che riguarda l'impasto fresco; b) ritiro plastico concernente l'impasto plastico; c) ritiro igrometrico che riguarda il materiale indurito.

## Ritiro da bleeding

Il ritiro da bleeding si verifica subito dopo l'impasto in un calcestruzzo ancora fresco. Il bleeding, o l'essudazione, consiste nella risalita dell'acqua verso la superficie del conglomerato fresco. L'acqua essudata può pregiudicare l'adesione tra il calcestruzzo degradato ed il conglomerato di ripristino in tutti quei lavori, come quello schematizzato in fig. 2, dove la raccolta di acqua di bleeding avviene all'interfaccia tra i due materiali. La successiva evaporazione, o l'assorbimento da parte del calcestruzzo vecchio, dell'acqua di bleeding provoca, di conseguenza, un ritiro verticale nel conglomerato di ripristino.

Il bleeding che aumenta notevolmente con il rapporto acqua/cemento dell'impasto, diviene particolarmente evidente soprattutto nell'impiego di boiacche, malte e betoncini molto fluidi, quali spesso sono richiesti nei lavori di ripristino per iniezioni. Inoltre, il bleeding dipende dal tipo di cemento, dalla temperatura e dalla presenza di additivi [1].

## Ritiro plastico

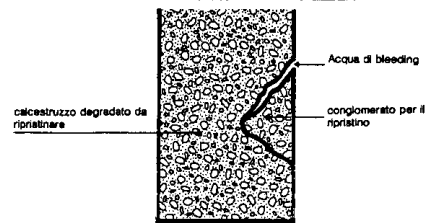
Il ritiro plastico è quello che si verifica in un calcestruzzo nello stato plastico che precede l'indurimento. Quando, a causa dell'evaporazione dell'acqua sulla superficie del calcestruzzo, vengono a formarsi menischi

di acqua, si crea uno stato di tensione che tende a comprimere il calcestruzzo non ancora indurito [1, 2]. La sollecitazione (P) che provoca il ritiro plastico, dipende dalla tensione superficiale dell'acqua ( $\gamma$ ) e dal raggio di curvatura del menisco (r):  $P = 2 \gamma / r$ . Man mano che l'evaporazione progredisce, diminuisce il raggio di curvatura dei menischi d'acqua sulla superficie del calcestruzzo ed aumenta quindi la sollecitazione che tende a comprimere lo strato superficiale del calcestruzzo.

A causa della bassissima resistenza alla trazione del materiale che deve ancora indurire, e del vincolo dovuto all'adesione del sottostante calcestruzzo fresco al vecchio calcestruzzo, si genera uno stato di tensione che provoca fessurazioni sulla superficie del calcestruzzo. Il modo migliore per ovviare all'inconveniente del ritiro plastico è quello di evitare l'evaporazione dell'acqua proteggendo o bagnando il calcestruzzo fresco; tenuto conto della durata relativamente breve, comunque sempre inferiore a un giorno, il problema non è di difficile soluzione.



1  
L'espansione contrastata nel calcestruzzo provoca uno stato di compressione (a) che diminuisce a causa del successivo ritiro (b). Le frecce dentro il calcestruzzo rappresentano la compressione.



2  
L'acqua essudata (bleeding) si raccoglie tra il vecchio calcestruzzo ed il conglomerato ripristinante favorendo il distacco tra i due materiali.

### Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico è la contrazione che si verifica, a causa dell'evaporazione dell'acqua, nel calcestruzzo indurito.

Esso è il ritiro più importante sia per la durata, del fenomeno, che riguarda tutta la vita del calcestruzzo, sia per le conseguenze che può avere sulle fessurazioni del conglomerato (fig. 3).

In una struttura vincolata, la contrazione da ritiro potenziale ( $\epsilon$ ) induce una sollecitazione  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , dove  $E$  è il modulo elastico del materiale, che, se supera la resistenza a trazione del materiale ( $\sigma_t$ ), può provocare la fessurazione. Occorre, tuttavia, tener conto che di solito la sollecitazione non è indotta immediatamente, cosicché a causa del rilassamento del materiale, la sollecitazione di trazione risulta eguale a  $\sigma = E (\epsilon - C)$ , dove  $C$  è la deformazione dovuta allo scorrimento viscoso. In fig. 3 è illustrato schematicamente l'andamento delle tensioni provocate dal ritiro in funzione del tempo: nei punti A e B della fig. 3 si verificano le condizioni di fessurazione rispettivamente in assenza ed in presenza dello scorrimento viscoso.

Le teorie nell'interpretazione del ritiro sono complesse e controverse. Powers, per esempio, pone l'accento sugli effetti provocati dalla eliminazione di acqua assorbita sulla tensione superficiale del solido e sulla pressione disgiungente [3]. Feldman, invece, ritiene, che la diminuzione di volume sia da mettere in relazione con la fuoriuscita delle molecole d'acqua dagli strati elementari di idrossilicati di calcio [4].

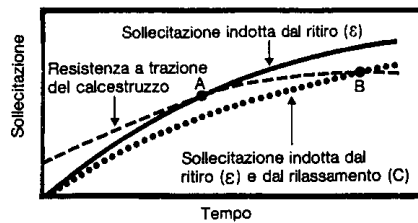
Qualunque sia l'interpretazione del fenomeno, esiste tuttavia una concordanza di opinioni circa l'effetto di alcuni parametri sul ritiro igrometrico. Il ritiro diminuisce aumentando l'inerte e diminuendo il rapporto acqua/cemento [5]. Poiché il ritiro è dovuto, infatti, alla pasta di cemento, l'introduzione di inerte riduce proporzionalmente la pasta e quindi la causa del ritiro. D'altra parte, le proprietà elastiche dell'inerte determinano il grado di resistenza offerta alla sollecitazione provocata dal ritiro della pasta: l'aumento del modulo elastico dell'inerte riduce il ritiro del conglomerato; per esempio, calcestruzzi con inerti quarzosi presentano un ritiro sensibilmente inferiore a quelli con inerti basaltici [6].

Oltre che dal tipo di inerte, il ritiro può dipendere dal tipo di cemento: minore, per esempio, è il contenuto di gesso nel cemento, maggiore è il ritiro del calcestruzzo [7]. Anche gli additivi possono influenzare il ritiro: il cloruro di calcio, per esempio, incrementa sia la velocità che l'entità finale del ritiro [8], mentre il ligninsulfonato fa aumentare soprattutto la velocità del ritiro [9].

Oltre che dai parametri summenzionati, tutti concernenti la composizione del calcestruzzo, il ritiro dipende anche dalle condizioni ambientali quali l'umidità relativa, la

temperatura, la concentrazione di anidride carbonica e la velocità del vento. Minore è l'umidità relativa, maggiore risulta sia la velocità del ritiro che il ritiro finale. Nel caso di ambienti saturi di vapore, il calcestruzzo tende a rigonfiare leggermente, cosicché l'equilibrio igrometrico tra calcestruzzo ed ambiente si verifica ad un'umidità relativa inferiore al 100%. Lorman [10] ha calcolato che questo equilibrio si verifica in un ambiente con umidità relativa del 94%.

In ambienti ricchi di anidride carbonica, oltre al ritiro dovuto all'evaporazione dell'acqua, si verifica quello provocato dalla carbonatazione [11]. La velocità del vento e la temperatura possono influenzare soprattutto la velocità di evaporazione e quindi la possibilità che si formino fessure: se l'essiccamento del materiale avviene troppo rapidamente, la sollecitazione di trazione, indotta dal ritiro impedito, non può essere attutita dal rilassamento dovuto allo scorrimento viscoso del calcestruzzo e ciò provoca una maggiore fessurazione del materiale (fig. 3).



3 Effetto del ritiro e del fluage sulla fessurazione del calcestruzzo.

### Agenti espansivi

Si definiscono agenti espansivi quei componenti che aggiunti all'impasto cementizio provocano nel conglomerato un'espansione che, opportunamente contrastata, genera una sollecitazione di compressione di entità paragonabile o superiore a quella di trazione causata dal successivo ritiro.

La figura 4 illustra schematicamente gli effetti dell'essiccamento su calcestruzzi con e senza agente espansivo.

Perché l'aggiunta di agente espansivo risulti efficace, occorre che si verifichino le seguenti condizioni:

- l'espansione deve coincidere con l'indurimento iniziale del calcestruzzo, in quanto l'espansione che

precede l'indurimento deforma inutilmente il calcestruzzo plastico senza provocare alcuna compressione del materiale;

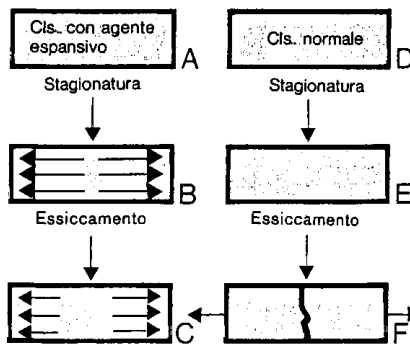
- l'espansione deve essere contrastata o esternamente, mediante confinamento rigido, o internamente, mediante l'impiego di armature disposte simmetricamente, al fine di creare uno stato di compressione.

Nel caso di calcestruzzo armato contenente un agente espansivo che provoca un'espansione contrastata [12], si genera nel calcestruzzo una sollecitazione di compressione ( $\sigma_c$ ) e nell'acciaio una sollecitazione di trazione ( $\sigma_a$ ) così correlabili:

$$A_c \cdot \sigma_c = A_a \cdot \sigma_a = A_a \cdot E_a \cdot \epsilon$$

$$\sigma_c = \epsilon \cdot E_a \cdot A_a / A_c$$

dove  $A_c$  ed  $A_a$  sono le sezioni del calcestruzzo e dell'acciaio,  $E_a$  è il modulo elastico dell'acciaio. Per esempio un'espansione contrastata ( $\epsilon$ ) di circa 300 micron per metro, nel caso che la sezione delle armature sia l'1% di quella del calcestruzzo, provoca una compressione del calcestruzzo di circa 6 Kg/cm<sup>2</sup>, che è un valore compreso nell'intervallo di 2-7 Kg/cm<sup>2</sup> corrispondente ai cosiddetti calcestruzzi a ritiro compensato [13]. Valori più elevati di  $\sigma_c$ , comunque inferiori a 70 Kg/cm<sup>2</sup>, corrispondono ai cosiddetti calcestruzzi espansivi autocompresi [13].

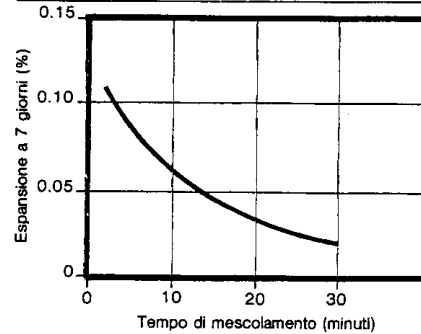


4 Con l'aggiunta di agente espansivo si possono eliminare le fessure da ritiro. A) Cls. con agente espansivo al momento della presa; B) Cls. con agente espansivo dopo l'essiccamento; C) Cls. con agente espansivo e armature dopo l'essiccamento; D) Cls. normale al momento della presa; E) Cls. normale dopo l'essiccamento; F) Cls. normale con armature dopo l'essiccamento.

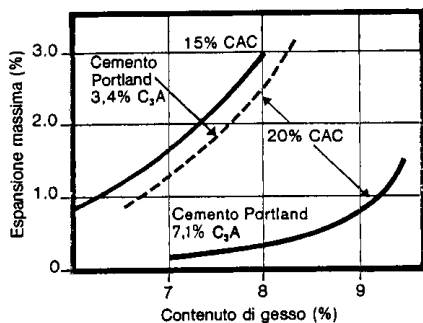
Gli agenti espansivi comunemente impiegati sono costituiti da a) solfoalluminati o alluminati in miscela con solfato di calcio [14]; b) clinker speciali ricchi di ossido di calcio e magnesio [15]; c) particelle di ferro metallico [16].

Qualunque sia la natura dell'agente espansivo, è necessario che l'espansione finale raggiunga un valore sufficientemente elevato da porre il calcestruzzo in compressione, e che si verifichi entro un certo intervallo di tempo. Poiché il processo espansivo si basa sostanzialmente su una reazione chimica di idratazione o di ossidazione, l'espansione finale e la velocità di espansione dipenderanno rispettivamente dalla stechiometria e dalla cinetica della reazione che provoca l'espansione, le quali, a loro volta, dipendono dalle condizioni sperimentali.

Così, per esempio, l'agitazione dell'impasto fresco fa aumentare la velocità di reazione, e pertanto maggiore è il tempo di mescolamento dell'impasto in betoniera, maggiore è la quantità di agente espansivo che reagisce preliminarmente quando il calcestruzzo è ancora fresco, e minore è quindi l'espansione realmente utile nel calcestruzzo indurito [17], come è illustrato in fig. 5. Pertanto, se si è stabilito di impiegare una certa percentuale di agente espansivo e di realizzare quindi una certa espansione contrastata ( $\epsilon$ ), un prolungamento del tempo di mescolamento del calcestruzzo fresco fa



5 Effetto del tempo di mescolamento in betoniera sull'espansione del calcestruzzo contenente un agente espansivo [17].



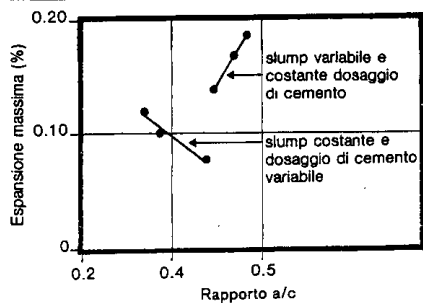
6 Influenza del tipo di cemento sull'espansione del calcestruzzo contenente gesso e alluminato di calcio come espansivo [17]. Legenda: Cemento Portland (7,1% C<sub>3</sub>A) - 2,1% di SO<sub>2</sub>; Cemento Portland (3,4% C<sub>3</sub>A) - 1,4% di SO<sub>2</sub>; Alluminato di calcio (CAC) - 0,4% di SO<sub>2</sub>; Gesso - 48,8 di SO<sub>2</sub>.

diminuire la compressione  $\sigma_c$  del calcestruzzo indurito, calcolabile con l'equazione  $\sigma_c = \varepsilon \cdot E_a \cdot A_d/A_c$ , e quindi annulla, in parte o in tutto, l'efficacia dell'agente espansivo.

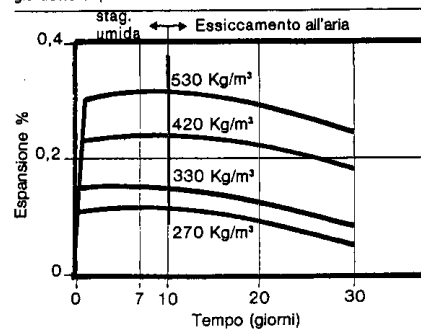
D'altra parte, oltre al tempo di mescolamento, l'espansione ottenibile con una certa quantità di agente espansivo dipende da molti altri fattori quali il tipo di cemento impiegato per l'impasto (fig. 6), il rapporto acqua/cemento e la lavorabilità del calcestruzzo (fig. 7), il dosaggio di cemento (fig. 8), il tipo di inerte (fig. 9), la natura degli additivi. Tenuto conto della molteplicità dei parametri sia l'espansione nella fase iniziale, che il ritiro successivo possono variare entro limiti la cui ampiezza diminuisce aumentando il controllo dei suddetti parametri (fig. 9 bis).

#### Prodotti pronti all'uso

I dati sopra riportati indicano che, per una determinata quantità di agente espansivo aggiunto all'impasto cementizio, l'espansione può variare entro un certo intervallo la cui ampiezza aumenta al variare dei parametri summenzionati. Ne consegue che tutti questi parametri debbono essere mantenuti costanti il più possibile, se si vuol garantire che l'espansione sia sempre compresa entro un determinato intervallo ragionevolmente ristretto, tale comunque da evitare da una parte un'eccessiva espansione del materiale, e dall'altra che il successivo ritiro igrometrico non provochi uno stato tensionale da arrivare egualmente a fessurare il materiale. Si deve, inoltre, tener conto che anche il ritiro dipende, tra l'altro, dai parametri sopramenzionati e riguardanti tutti la composizione dell'impasto, come si è già detto al punto 2.3.



7 Influenza del rapporto acqua/cemento (a/c) sull'espansione del calcestruzzo espansivo [17].



8 Influenza del dosaggio di cemento sull'espansione del calcestruzzo contenente un agente espansivo [17].

Pertanto, il corretto impiego di un agente espansivo non può prescindere da un rigoroso controllo di tutti gli altri parametri concernenti l'impasto cementizio, la qual cosa è, per esempio, realizzabile in un processo di prefabbricazione dove si può ragionevolmente applicare un controllo di qualità dei materiali impiegati (cemento, inerti, additivi), e dove si può mantenere costanti entro limiti accettabili la composizione e la lavorabilità dell'impasto. Nel caso di lavori da eseguirsi in cantiere, per opere di restauro strutturale, invece, è preferibile — qualora i quantitativi di materiali siano contenuti entro limiti che ne rendano economicamente accettabile l'impiego — utilizzare prodotti industriali pronti all'uso, ai quali occorre cioè aggiungere solo l'acqua, e che siano stati sottoposti ad un controllo di qualità. Nel seguito sono discusse le proprietà di un prodotto pronto all'uso impiegato per lavori di restauro strutturale. Esso, oltre a possedere caratteristiche espansive standardizzate e verificate mediante controlli statistici di qualità, possiede una serie di proprietà collaterali, ottenute mediante l'impiego di particolari additivi, che lo

rendono particolarmente idoneo per i lavori di restauro strutturale soprattutto per l'elevata adesione al calcestruzzo vecchio da restaurare.

#### Modalità dell'impasto

L'impasto è stato ottenuto mescolando il prodotto pronto all'uso con acqua (rapporto acqua/solido = 0,16) per 5 minuti in una comune betoniera a 20°C.

#### Caratteristiche dell'impasto fresco

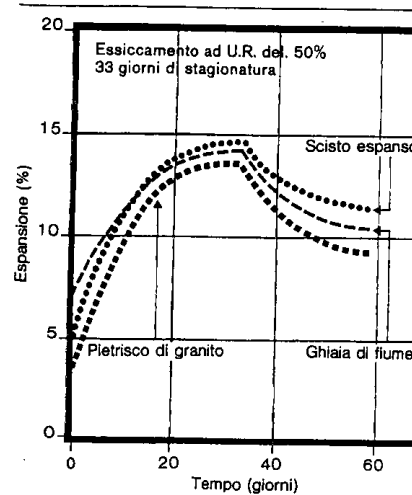
L'impasto fresco si presenta estremamente fluido (spandimento 140% con 5 colpi alla tavola a scosse secondo il test ASTM C-230) e privo di acqua di bleeding (UNI 7122 - 72).

La fluidità consente una facile messa in opera del materiale anche con tecniche particolari (a spruzzo, per iniezione ecc.), mentre l'assenza di bleeding impedisce che l'acqua essudata si raccolga tra l'impasto fresco ed il calcestruzzo da ripristinare (fig. 2).

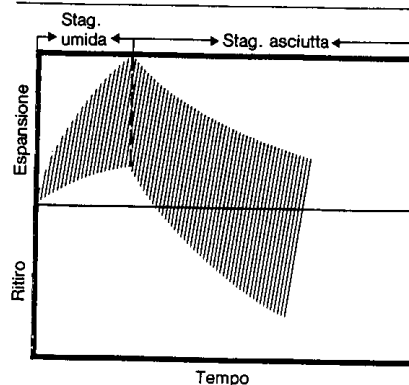
#### Caratteristiche dell'impasto indurito

a Adesione al calcestruzzo vecchio: circa 35 Kg/cm<sup>2</sup> a 28 giorni (fig. 10).

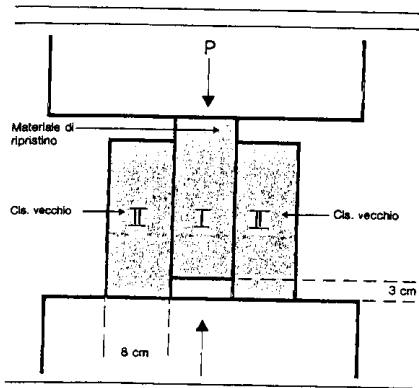
b Resistenza meccanica a compressione: circa 300 Kg/cm<sup>2</sup> a 1 giorno e circa 900 Kg/cm<sup>2</sup> a 28 giorni (fig. 11).



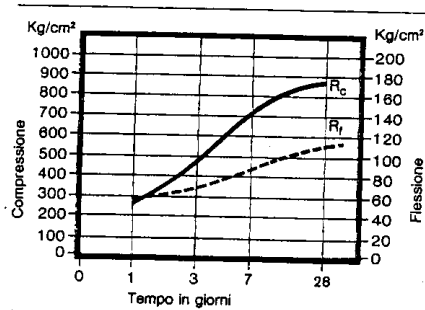
9 Influenza del tipo di inerte sull'espansione e sul successivo ritiro del calcestruzzo contenente un agente espansivo [17].



9 bis Espansione e ritiro in un conglomerato cementizio contenente un agente espansivo. La zona tratteggiata rappresenta il campo di variabilità sia dell'espansione che del ritiro.



10 Prova di adesione del materiale ripristinante (I) al vecchio calcestruzzo (II);



11 Resistenza meccanica a compressione (R<sub>c</sub>) e a flessione (R<sub>f</sub>) del prodotto pronto all'uso.

c Resistenza meccanica a flessione: circa 60 Kg/cm<sup>2</sup> a 1 giorno e oltre 90 Kg/cm<sup>2</sup> a 28 giorni (fig. 11).

d Pull-out: a 7 giorni 30 Kg/cm<sup>2</sup> per barra di acciaio liscia e 200 Kg/cm<sup>2</sup> per barra di acciaio ad aderenza migliorata; i corrispondenti valori a 28 giorni diventano: 40 Kg/cm<sup>2</sup> e oltre 300 Kg/cm<sup>2</sup> (fig. 12).

e Espansione libera: 0,3% tra il tempo di inizio indurimento (7 ore) e 24 ore (18).

f Permeabilità: minore di  $1 \cdot 10^{-12}$  cm/sec a 3 giorni.

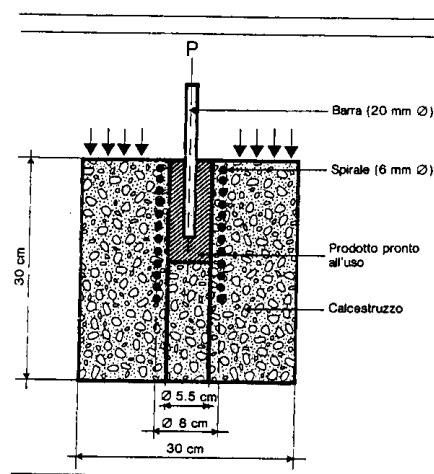
g Resistenza ai cicli di gelo-disgelo: dopo 300 cicli termici tra -20°C e +5°C il modulo elastico è diminuito meno del 5% (ASTM C-233-73).

h Comportamento a caldo: dopo una stagionatura a temperatura ambiente di 1 giorno, il materiale è stato conservato per altri 6 giorni a 400°C. Le resistenze meccaniche a compressione od a flessione, rispetto ai materiali conservati a temperatura ambiente, risultano diminuire di circa il 15% dopo 6 giorni, ed appaiono addirittura più elevati durante i primi due giorni di trattamento a 400°C (fig. 13).

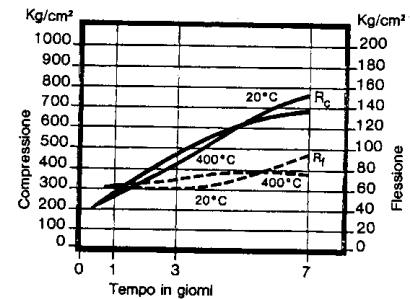
i Comportamento alla fatica: dopo una stagionatura di 28 giorni il materiale è stato sottoposto a carichi variabili tra 200 e 500 Kg/cm<sup>2</sup> di compressione con una frequenza di 500 cicli/min. Dopo oltre due milioni di cicli la prova è stata interrotta ed il materiale non presentava alcuna diminuzione della resistenza meccanica.

l Modulo elastico dinamico: 350.000 Kg/cm<sup>2</sup> a 7 giorni e 400.000 Kg/cm<sup>2</sup> a 28 giorni.

m Modulo elastico statico con carichi pari a un terzo del carico di rottura: 280.000 Kg/cm<sup>2</sup> a 7 giorni e 320.000 Kg/cm<sup>2</sup> a 28 giorni.



12 Prova di sfilamento di barra d'acciaio.



13 Influenza del trattamento ad alta temperatura (400°C) sulla resistenza meccanica a compressione (R<sub>c</sub>) ed a flessione (R<sub>f</sub>) del prodotto pronto all'uso.

10

I prodotti descritti nelle note sono:

#### Emaco S 88

L'EMACO S 88 è un prodotto in polvere pronto all'uso, da mescolare con acqua per ottenere masse reoplastiche — cioè fluide e non segregabili — tixotropiche, a basso calore di idratazione, prive di ritiro, ad alta resistenza meccanica, duttili, di elevato potere adesivo all'acciaio ed al calcestruzzo, impermeabili, e particolarmente durevoli anche in ambienti fortemente aggressivi.

#### EMACO S 66

L'EMACO S 66 è una formulazione speciale per produrre betoncini reoplastici privi di ritiro. Esso è raccomandato nei restauri con spessori elevati (> 10 cm), soprattutto nei climi caldi. Esso differisce dall'EMACO S 88 per il maggior diametro degli inerti (9,5 mm invece di 2,5 mm) e quindi per il minor contenuto di cemento che porta ad un calore di idratazione ancora più basso. In climi freddi (< 10°C) getti di 10-30 cm possono anche essere realizzati con EMACO S 88.

Tutti i prodotti EMACO sono confezionati in sacchi da 25 Kg resistenti all'umidità e sono facili quindi da immagazzinare e trasportare per il peso relativamente modesto dei sacchi. Tutti i prodotti EMACO non contengono particelle metalliche, né cloruri o solfuri.

#### Bibliografia

- 1 Powers T.C.:  
The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1968.
- 2 Wittmann F.H.:  
Cement and Concrete Research, 6, 49, 1976.
- 3 Powers T.C.:  
The Structure of Concrete, pag. 319, Cement and Concrete Assoc., London, 1968.
- 4 Feldman R.F. - P.J. Sereda:  
Materiaux et Constructions, 1, 509, 1968.
- 5 Odman S.T.A.:  
RILEM - Cembureau Int. Colloquium on the Shrinkage of Hydraulic Concretes, 1, 20, Madrid, 1968.
- 6 Troxell G.E. - J.M. Raphael - R.E. Davis:  
Proc. A.S.T.M., 58, 1101, 1968.
- 7 Lorch W.:  
Proc. A.S.T.M., 46, 1152, 1946.
- 8 Colleparidi M. - Marcialis A. - Solinas V.:  
Il Cemento, 70, 83, 1973.
- 9 Colleparidi M. - Marcialis A. - Solinas V.:  
Il Cemento, 70, 3, 1973.
- 10 Lorman W.R.:  
Proc. A.S.T.M., 40, 1082, 1940.
- 11 Verbeck G.J.:  
A.S.T.M. Sp. Tech. Publicn. No. 205, 17, 1958.
- 12 Russel H.G.:  
Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, ACI Publication SP, 38, 192, 1972.
- 13 Kalousek G.L.:  
Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, ACI Publication SP, 38, 2, 1973.
- 14 Mehta P.K.:  
Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, ACI Publication SP, 38, 57, 1972.
- 15 Kawano T. - Hitotsuya K. - Mori T.:  
The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974.
- 16 Mather B.:  
American Concrete Institute, Manual of Concrete Practice, 212, 23, 1973.
- 17 Kesler C.E.:  
American Concrete Institute, Manual of Concrete Practice, 223, 1, 1973.
- 18 Rubin E.H.:  
Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, ACI Publication SP, 38, 341, 1972.
- 19 Bartelletti R. - Marini P. - Pierobon C. - Razzauti A.:  
Comunicazione Privata.