

DURABILITÀ DI CALCESTRUZZI RINFORZATI CON FIBRE IN POLIACRILONITRILE

MARIO COLLEPARDI (*), LUIGI COPPOLA (**), GIACOMO MORICONI (**)

RIASSUNTO

E' stato studiato il comportamento di conglomerati cementizi rinforzati con fibre polimeriche esposti a diversi ambienti aggressivi (solfati, cloruri, anidride carbonica, gelo-disgelo).

I dati sperimentali mostrano che l'impiego di fibre polimeriche in conglomerati destinati a strutture non casserate ed esposte all'aria, consente di produrre calcestruzzi realmente durevoli, anche se non correttamente stagionati, purchè la matrice cementizia sia adeguata (rapporto a/c e presenza di microbolle d'aria) al tipo di aggressione ambientale.

1. INTRODUZIONE

Nelle prime ore successive al getto, un conglomerato cementizio non correttamente stagionato ad umido (come sovente si verifica nella pratica), si fessura in ambienti asciutti e ventilati per effetto delle tensioni di trazione indotte dal ritiro plastico a causa dell'evaporazione di acqua dalla superficie del calcestruzzo [1]. Infatti, le tensioni indotte da tale fenomeno facilmente superano la resistenza a trazione del materiale, che, data la brevissima stagionatura, risulta estremamente esigua (dell'ordine dei mPa). Pertanto, se le strutture prodotte con questo conglomerato cementizio sono successivamente esposte ad un ambiente aggressivo, le fessure da ritiro plastico diventano dei canali preferenziali di accesso delle sostanze aggressive all'interno del calcestruzzo, con il risultato che la durabilità del materiale può essere seriamente compromessa, indipendentemente dalla qualità della matrice cementizia ed in particolare dal rapporto acqua/cemento.

L'introduzione di fibre polimeriche nel calcestruzzo consente di incrementare la resistenza a trazione del calcestruzzo, nelle prime ore successive al getto, di quel tanto da renderla superiore alle tensioni di trazione indotte dal ritiro plastico, eliminando, quindi, le fessurazioni connesse con tale fenomeno [2]. In queste condizioni, la durabilità del calcestruzzo diventa realmente una proprietà che dipende dalla composizione del conglomerato (dosaggio di cemento, quantità d'acqua, ecc.) indipendentemente dalle modalità più o meno corrette della stagionatura.

D'altra parte, occorre prendere atto che - soprattutto nei climi caldi, asciutti e ventilati - la stagionatura delle strutture non casserate (pavimentazioni, rivestimenti in galleria, ecc.) lascia

(*) Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Facoltà di Ingegneria, Università di Ancona.

(**) Enco, Engineering Concrete, Spresiano.

ABSTRACT

The behaviour of polymer fiber-reinforced concretes in several aggressive environments has been studied (sulfate, chloride, carbon dioxide, freezing-thawing).

Experimental data show that the use of polymer fibers in concrete devoted to un-moulded structures exposed to dry air allows to manufacture really durable concretes even in the absence of wet curing, provided that the cement matrix is adequate to the type of aggressive environments for the w/c ratio and air-entrained volume.

molto spesso a desiderare per la mancanza di cura nella protezione delle superfici esposte all'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente insaturo di vapore.

Il presente lavoro riporta i risultati di una ricerca tesa a valutare l'efficacia delle fibre polimeriche in poliacrilonitrile (P.A.N.) nel preservare il calcestruzzo, non correttamente stagionato ad umido, dall'azione deleteria di alcuni tra i più comuni agenti aggressivi che attaccano in servizio il conglomerato cementizio (cloruri, solfati, gelo-disgelo, ecc.).

In particolare la ricerca è stata condotta su "betoncini per spritzbeton" e su "calcestruzzi per pavimentazioni" (di seguito per brevità chiamati betoncini e calcestruzzi rispettivamente), destinati alla costruzione di strutture non casserate e soggette al rischio di fessurazioni da ritiro plastico a causa dell'elevato rapporto superficie/volume che le caratterizza.

2. MATERIALI E METODOLOGIE DI PROVA

Sono stati confezionati due conglomerati cementizi che si differenziano per il dosaggio di cemento e per il diametro massimo dell'aggregato. Nel seguito essi saranno denominati "betoncino" e "calcestruzzo".

Per la produzione del betoncino sono stati impiegati un cemento Portland 425 (500 kg/m³) e aggregati naturali costituiti da due sabbie alluvionali ed un ghiaio con diametro massimo di 12 mm. Con questo betoncino, sono state confezionate venti lastre di dimensioni 3x50x50 cm. Inoltre, sono state confezionate venti lastre con un betoncino di stessa composizione di quello precedente, nel quale sono state aggiunte fibre Ricem poliacrilonitriliche (lunghe 8 mm) nella misura di 2 kg/m³ (Tabella 1). Tutte le lastre sono state armate con una rete metallica (maglia = 10 cm, diametro del filo = 6 mm) disposta simmetricamente in mezzera.

In Tabella 1, oltre alle composizioni dei betoncini con e senza fibre sono riportate le caratteristiche dei due conglomerati allo stato fresco.

Si può notare come l'aggiunta delle fibre abbia richiesto la presenza di un fluidificante (0.4%) per compensare la diminuzione di lavorabilità (circa 10 cm di *slump*) provocata dalle fibre stesse.

Limitatamente ai betoncini destinati alla confezione delle lastre esposte ai cicli di gelo-disgelo, è stato aggiunto nei due impasti un agente aerante in modo da inglobare l'8% in volume di aria sotto forma di microbolle (diametro 100-200 μ m). E' noto, infatti, che la presenza delle microbolle d'aria è necessaria per rendere la matrice cementizia resistente alla formazione di ghiaccio indipendentemente dalla presenza di fessure [3].

TABELLA 1

COMPOSIZIONE E CARATTERISTICHE ALLO STATO FRESCO DEL BETONCINO CON E SENZA FIBRE POLIMERICHE *

		BETONCINO SENZA FIBRE	BETONCINO FIBRO- RINFORZATO
acqua	(kg/m ³)	235	235
cemento	(kg/m ³)	500	500
sabbia (0-2 mm)	(kg/m ³)	260	260
sabbia (2-5 mm)	(kg/m ³)	400	400
ghiaia (5-12 mm)	(kg/m ³)	905	905
fibre P.A.N. (l = 8 mm)	(kg/m ³)	0	2
additivo fluidificante (%sul cemento)		—	0,4
slump	(cm)	16	17
massa volumica del calcestruzzo fresco	(kg/m ³)	2300	2305
rapporto acqua/cemento		0,47	0,47

* I due betoncini, con e senza fibre, sono stati preparati anche con l'aggiunta di un agente aerante (aria = 8% in volume) limitatamente per le lastre destinate alle prove di gelo-disgelo.

Oltre alle lastre di betoncino, sono state confezionate venticinque lastre di dimensioni 10x60x60 cm impiegando un calcestruzzo con e senza fibre polimeriche le cui composizioni sono riportate in Tabella 2. A parte il ghiaio, sostituito da una ghiaia con diametro massimo di 25 mm, gli ingredienti del calcestruzzo sono gli stessi di quelli impiegati per il betoncino. Per le fibre polimeriche si è cambiata la lunghezza (da 8 a 24 mm) ed il relativo dosaggio (da 2 a 1 kg/m³) per ottimizzare le prestazioni in relazione alla variazione del diametro massimo dell'aggregato grosso da 12 a 25 mm. Dieci lastre (cinque senza fibre polimeriche e cinque fibrorinforzate) sono state armate con tondini d'acciaio (*FeB38K*; diametro = 8 mm; copriferro = 3 cm); le restanti quaranta non sono state armate. Le lastre in calcestruzzo armato sono state destinate alle prove di immer-

TABELLA 2

COMPOSIZIONE E CARATTERISTICHE ALLO STATO FRESCO DEL CALCESTRUZZO CON E SENZA FIBRE POLIMERICHE *

		CALCESTRUZZO SENZA FIBRE	CALCESTRUZZO FIBRORIN- FORZATO
acqua	(kg/m ³)	155	155
cemento	(kg/m ³)	285	285
additivo superfluidificante	(kg/m ³)	3,9	3,9
sabbia (0-2 mm)	(kg/m ³)	340	360
sabbia (2-5 mm)	(kg/m ³)	470	500
ghiaia (12-25 mm)	(kg/m ³)	310	335
fibre P.A.N. (l = 24 mm)	(kg/m ³)	—	1
additivo fluidificante (% sul cemento)		—	0,2
slump	(cm)	11	10
massa volumica del calcestruzzo fresco	(kg/m ³)	2430	2420
rapporto acqua/cemento		0,54	0,54

* I due calcestruzzi, con e senza fibre, sono stati preparati anche con l'aggiunta di un agente aerante (aria = 6% in volume) limitatamente per le lastre non armate destinate alle prove di gelo-disgelo.

sione in acqua salata (10% in $NaCl$) per simulare la situazione delle pavimentazioni esposte al trattamento dei sali disgelanti nel periodo invernale.

In Tabella 2, oltre alle composizioni dei due calcestruzzi sono riportate le caratteristiche del conglomerato allo stato fresco.

Anche per il calcestruzzo, come per il betoncino, solo le lastre non armate destinate ai cicli di gelo-disgelo sono state trattate con agente aerante in modo da inglobare il 6% in volume di aria.

Sia le lastre confezionate con il betoncino, che quelle realizzate con il calcestruzzo, al termine della miscelazione sono state sottoposte ad un ciclo di ventilazione forzata (velocità del vento circa 20 km/h) in un ambiente caratterizzato da una temperatura di 40°C e da una U.R. del 60%, al fine di creare le condizioni che favoriscono la manifestazione delle fessure da ritiro plastico; in questo ambiente sono stati mantenuti per 15 ore dopo il getto.

Al termine del ciclo di ventilazione forzata le lastre realizzate con il betoncino sono state esposte ai seguenti ambienti:

a) acqua ($T=20^{\circ}C$);

b) soluzione acquosa al 10% di solfato di sodio;

c) camera di carbonatazione accelerata (tenore di CO_2 pari al 30% in volume);

d) vasca per cicli di gelo-disgelo (8 ore a 5°C e 16 ore a -20°C).

Le lastre in calcestruzzo non armato sono state esposte agli stessi ambienti in cui sono stati esposti i betoncini, mentre le lastre in calcestruzzo armato con i tondini d'acciaio sono state immerse in una soluzione acquosa al 10% di cloruro di sodio.

Tutti gli ambienti menzionati risultano aggressivi per il calcestruzzo o per l'armatura ad eccezione dell'acqua che costituisce l'ambiente di riferimento.

Dopo 7, 28, 60 e 90 giorni di esposizione negli ambienti suddetti per ogni lastra sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- 1) misura dello spessore di conglomerato cementizio carbonatato (solo per le lastre in camera di carbonatazione) mediante un indicatore colorimetrico a base di fenoltaleina;
- 2) misura dello spessore di conglomerato cementizio penetrato dal cloruro (solo per le lastre di calcestruzzo armato immerse in soluzione acquosa di cloruro di sodio) mediante indicatore colorimetrico a base di fluoresceina e nitrato d'argento (Norma UNI 7928);
- 3) osservazione visiva dei prodotti di corrosione e misurazione dello spessore di acciaio corrosivo (solo per le lastre di calcestruzzo armate con tondini d'acciaio);

4) misura dello spessore di conglomerato cementizio penetrato dal solfato (solo per le lastre immerse nella soluzione acquosa di solfato di sodio) mediante un indicatore colorimetrico a base di cloruro di bario e permanganato di potassio (Norma UNI 8019);

5) misura del modulo elastico dinamico con la tecnica degli ultrasuoni (per tutte le lastre);

Inoltre, per una loro caratterizzazione generica, con tutti i conglomerati sono stati confezionati provini cubici (10 cm) per la determinazione della resistenza meccanica a compressione (Fig. 1). Si può osservare che, mentre l'aggiunta di fibre polimeriche non ha comportato alcuna significativa modifica nella resistenza meccanica, l'aggiunta di aerante ha ovviamente provocato un calo di resistenza giustificato dall'aumento del volume di aria [4].

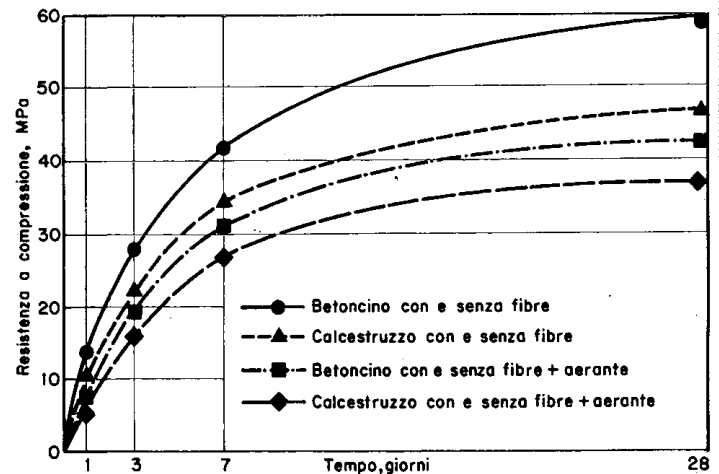


Fig. 1 - Resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di conglomerati con e senza fibre e con e senza aerante.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 RITIRO PLASTICO

Nel seguito sono discussi i risultati ottenuti sui conglomerati con e senza fibre esposti al ritiro plastico e successivamente alla penetrazione dell'anidride carbonica, del cloruro e del solfato.

Al termine della prova di ventilazione forzata sia le lastre di calcestruzzo che quelle di betoncino, entrambe senza fibre, presentavano, sulla superficie non protetta dal cassero, numerose

cavillature caratteristiche del fenomeno del ritiro plastico, distribuite casualmente, di lunghezza compresa tra 4 e 6 cm ed ampiezza dell'ordine di qualche decina di micron. Le lastre realizzate sia con calcestruzzo che con betoncino fibrorinforzato, invece, si presentavano completamente prive di fessure.

Pertanto, si può concludere che l'introduzione di fibre P.A.N., di geometria e dosaggio opportuno, nei conglomerati cementizi elimina le fessure che si innescano nella fase plastica, allorché questi, non correttamente stagionati, sono esposti a condizioni di umidità, temperatura e ventilazione tali da provocare una eccessiva evaporazione di acqua dal calcestruzzo.

3.2 PROVE DI CARBONATAZIONE

La profondità di carbonatazione è stata misurata in corrispondenza di sezioni di calcestruzzo integro per i conglomerati fibrosi e in corrispondenza di sezioni fessurate per ritiro plastico per i conglomerati senza fibre: per i primi la profondità di carbonatazione appariva piuttosto uniforme in tutta la sezione; nei secondi, invece, lo spessore di calcestruzzo carbonatato risultava maggiore in corrispondenza delle fessure e minore, oltre che uniforme, in zone lontane dalle fessure.

Nella Fig. 2 è riportato il massimo spessore carbonatato in funzione della radice quadrata del tempo.

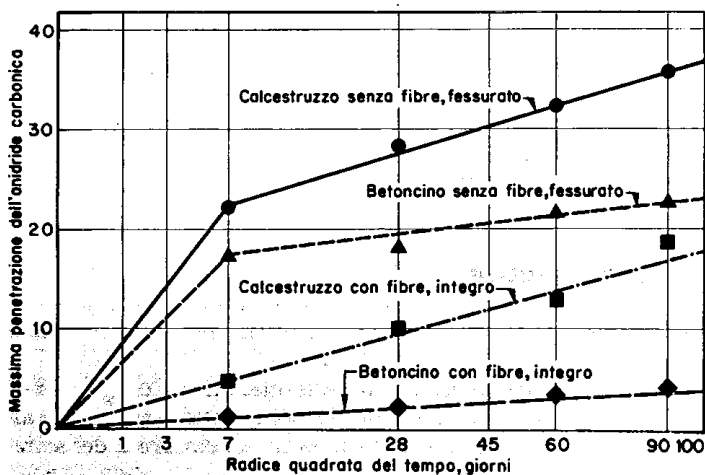


Fig. 2 - Penetrazione della CO₂ in funzione del tempo per lastre di betoncino e calcestruzzo con e senza fibre.

Si può notare come la carbonatazione, sia per il calcestruzzo che per il betoncino fibrorinforzato, segua la legge di diffusione di Fick:

$$x = k (t)^{1/2}$$

dove:

x è lo spessore di calcestruzzo carbonatato in mm;

t è il tempo in giorni;

k è una costante, proporzionale al coefficiente di diffusione e che dipende dalla qualità del materiale (rapporto a/c , tempo di stagionatura, tipo di cemento): più il calcestruzzo risulta permeabile maggiore è il valore del coefficiente di diffusione.

Per i conglomerati senza fibre, in realtà, lo spessore interessato dalla carbonatazione non varia inizialmente con la radice quadrata del tempo: dopo solo 7 giorni di esposizione è superiore a quello dei conglomerati con fibre dopo 90 giorni di esposizione.

Nei conglomerati non fibro-rinforzati, le fessure, presenti a causa del ritiro plastico, costituiscono dei canali di accesso per le molecole di CO₂ che penetrano velocemente all'interno del calcestruzzo carbonatandolo.

Quindi, raggiunto l'apice della fessura, l'anidride carbonica penetra nel calcestruzzo integro al di sotto della fessura con la stessa legge con cui essa si propaga nei conglomerati fibrorinforzati (integri).

Inoltre, occorre sottolineare che la penetrazione della CO₂ è maggiore nei provini di calcestruzzo, in quanto essi hanno un rapporto a/c maggiore (0,5) di quello dei betoncini (0,4) e quindi anche una struttura più porosa.

Le considerazioni fatte per l'anidride carbonica possono essere estese alla penetrazione sia del cloruro che del solfato. Anche in questo caso si è registrata una penetrazione uniforme del cloruro e del solfato nei conglomerati fibro-rinforzati e non fessurati, mentre in quelli privi di fibre e fessurati si è trovato che la penetrazione era maggiore in corrispondenza delle fessure che non nelle zone adiacenti.

Nelle Fig. 3 e 4 è riportata la massima penetrazione dell'agente aggressivo, rispettivamente cloruro e solfato, in funzione della radice quadrata del tempo. Nei conglomerati non fessurati, anche la penetrazione del cloruro e del solfato procede più lentamente nel betoncino che non nel calcestruzzo per il più basso rapporto a/c nel primo conglomerato.

Per quanto concerne, in particolare, la diffusione del cloruro, lo spessore di calcestruzzo penetrato dal sale ha superato il copriferro (30 mm) già a 30 giorni nelle lastre non fibro-rinforzate in corrispondenza delle fessure, mentre eguaglia appena il copriferro nelle lastre fibro-rinforzate e non fessurate a 90 giorni.

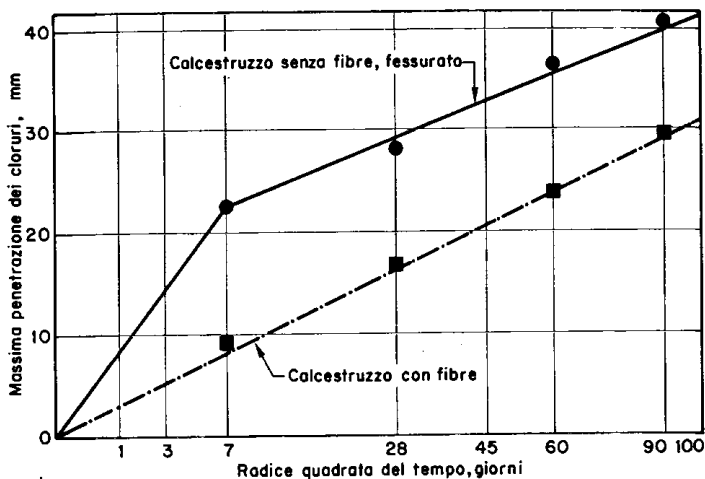
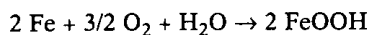


Fig. 3 - Penetrazione del cloruro in funzione del tempo per lastre di calcestruzzo con e senza fibre.

Tuttavia, entrambi i tipi di lastre - fessurate e non - non presentano visivamente i segni della corrosione con formazione di ruggine a 90 giorni: occorre, però, tener conto del fatto che le lastre erano tutte completamente immerse in acqua salata e che la corrosione è alimentata dal flusso di ossigeno dell'aria secondo lo schema seguente:



Nel caso in cui realisticamente le lastre fossero esposte alternativamente alla soluzione salina ed all'aria - come avviene nelle opere marittime o in quelle stradali - la corrosione sarebbe automaticamente innescata in corrispondenza dei ferri immersi in una matrice cementizia permeata dal cloruro.

Per quanto riguarda la penetrazione del solfato (Fig. 4), la diffusione del sale all'interno del conglomerato cementizio avviene ovviamente tanto più lentamente quanto minore è il rapporto *a/c* (0,47 nel betoncino e 0,54 nel calcestruzzo); la resistenza offerta alla penetrazione del solfato, grazie ad un basso rapporto *a/c*, può essere, però, completamente annullata per la formazione di fessure provocate dal ritiro plastico.

Tuttavia, nonostante lo spessore di conglomerato senza fibre penetrato dal solfato sia elevato, dopo 90 giorni di esposizione

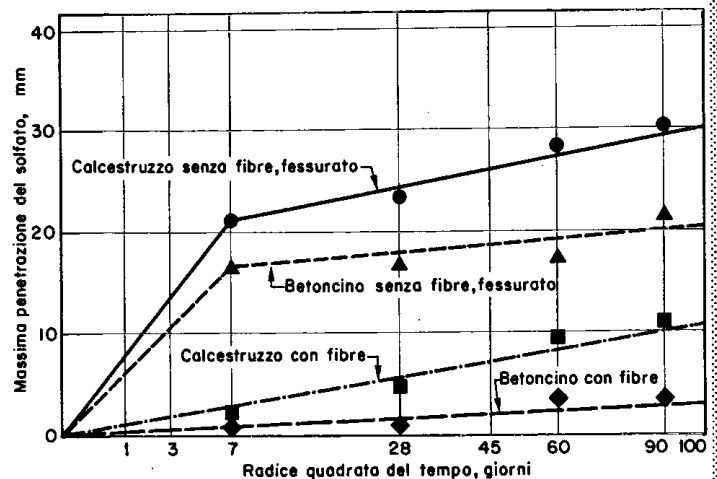


Fig. 4 - Penetrazione del solfato in funzione del tempo per lastre di betoncino e calcestruzzo con e senza fibre.

non sono state registrate variazioni dimensionali significative delle lastre o espulsioni di materiale che facessero pensare ad un'aggressione solfatica in atto con formazione di ettringite. Occorre comunque sottolineare che questo tipo di aggressione è molto lenta ed i suoi effetti si manifestano generalmente dopo 8-9 mesi di esposizione continua del calcestruzzo all'ambiente solfatico.

Quanto esposto appare ancor più evidente dall'esame delle misure del modulo elastico dinamico (Fig. 5) che non ha subito nessuna diminuzione durante l'immersione di quattro lastre per 90 giorni in una soluzione solfatica. Ovviamente, a parità di tipologia del conglomerato (betoncino o calcestruzzo), la lastra fessurata presenta un modulo elastico costantemente inferiore a quello della corrispondente lastra non fessurata per la presenza delle fibre P.A.N.

Nella Fig. 6 sono riportati i moduli elastici dinamici delle lastre di calcestruzzo e betoncino sottoposti alle prove di gelo-disgelo. I conglomerati senza fibre subiscono un degrado già dopo 3 cicli di gelo-disgelo, nonostante la presenza delle microbolle d'aria che notoriamente proteggono la matrice cementizia dagli effetti degradanti dei cicli di gelo-disgelo. Infatti, l'acqua penetrata in corrispondenza delle fessure si trasforma in ghiaccio ed esercita un'azione dirompente nei confronti del conglomerato. Al contrario, i conglomerati con fibre, quindi non fessurati, presentano il ben noto ottimo comportamento al gelo-disgelo dei calcestruzzi aerati.

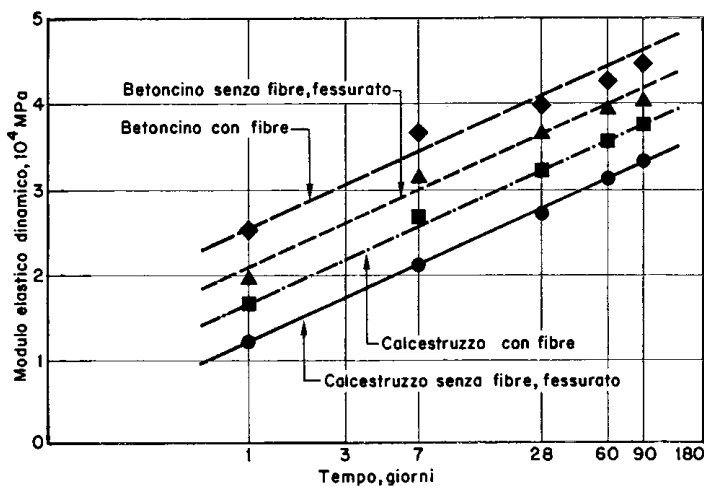


Fig. 5 - Modulo elastico dinamico di betoncini e calcestruzzi immersi in soluzione acquosa di Na_2SO_4 con e senza fibre in funzione del tempo.

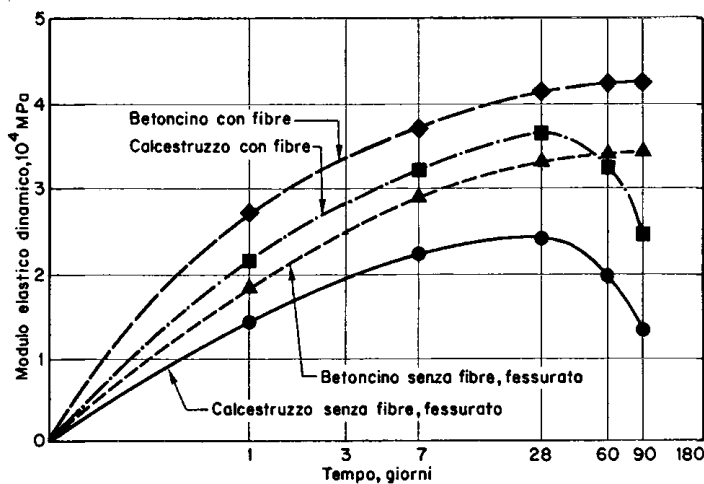


Fig. 6 - Modulo elastico dinamico in funzione del tempo di calcestruzzi e betoncini con e senza fibre sottoposti a cicli di gelo-disgelo: il numero di giorni coincide con il numero di cicli.

4. CONCLUSIONI

Il presente studio ha dimostrato che:

— nel calcestruzzo destinato alle strutture non cassate, ed esposte al rischio della fessurazione da ritiro plastico, l'adozione di un basso rapporto a/c e/o l'introduzione di microbolle d'aria può non essere sufficiente a garantire la durabilità del materiale;

— introducendo nel conglomerato cementizio fibre polimeriche P.A.N. lunghe da 8 mm a 24 mm, si eliminano le fessure che possono insorgere sulla superficie delle strutture esposte alla evaporazione dell'acqua (ritiro plastico);

— la penetrazione di agenti aggressivi (solfato, cloruro e anidride carbonica) in conglomerati cementizi rinforzati con fibre polimeriche e non correttamente stagionati a umido risulta inferiore alla penetrazione che si registra nei corrispondenti conglomerati senza fibre di pari composizione (a/c) non correttamente stagionati a umido;

— l'impiego di fibre polimeriche elimina il degrado promosso dai cicli di gelo-disgelo in calcestruzzi e betoncini non correttamente stagionati a umido, purchè i conglomerati siano stati trattati con un agente aerante.

— in sostanza l'impiego di fibre polimeriche in conglomerati destinati a strutture non cassate ed esposte all'aria consente di produrre calcestruzzi realmente durevoli, anche se non correttamente stagionati, purchè la composizione della matrice cementizia (rapporto a/c e presenza di microbolle d'aria) sia adeguata al tipo di aggressione ambientale;

BIBLIOGRAFIA

- [1] POWERS T.C.: "The Properties of Fresh Concrete", John Wiley and Sons Inc., New York, 1968.
- [2] COLLEPARDI M., MONOSI S. E VALENTE M.: "Progressi nella tecnologia delle malte da restauro a ritiro compensato", Atti delle Giornate AICAP, Napoli, Maggio 1989.
- [3] DOLCH W.L.: "Air Entraining Admixtures", Cap. V, in *Concrete Admixtures Handbook Properties, Science and Technology*, Ed. V.S. Ramachandran, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA, 1984.
- [4] COLLEPARDI M.: "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", III Edizione, Hoepli, Milano, 1991.