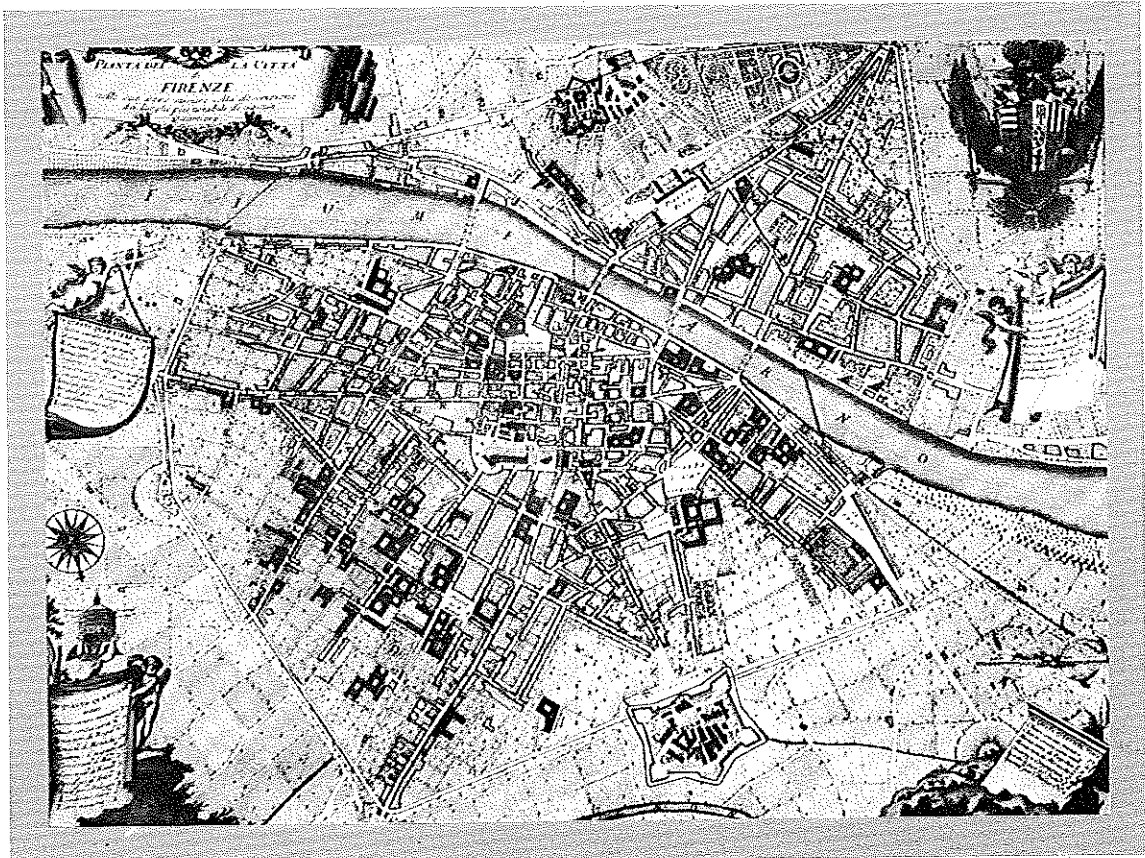




collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia

atti del congresso cte 1984 sulla industrializzazione edilizia

firenze 9-10-11 novembre 1984



a cura della segreteria cte

Lorella Angelini, Vincenzo Maniscalco, della MAC di TREVISO

Mario Collepardi, dell'UNIVERSITA' di ANCONA

TRATTAMENTI TERMICI A BASSE TEMPERATURE (20-40°C) DEL CALCESTRUZZO PER STRUTTURE PREFABBRICATE

Sommario

I tradizionali trattamenti a vapore per le strutture prefabbricate prevedono il riscaldamento del calcestruzzo ad una temperatura generalmente compresa tra 60 e 80°C.

Questo, se da una parte ha il vantaggio di consentire un rapido incremento iniziale delle resistenze meccaniche alle brevissime stagionature, comporta, dall'altra, una penalizzazione di tutte le caratteristiche del calcestruzzo alle lunghe stagionature e quindi del materiale di servizio.

Grazie all'impiego di nuovi superfluidificanti, che consentono di confezionare calcestruzzi fluidi con un rapporto acqua/cemento di 0,30-0,40 è stata verificata la possibilità di eliminare il trattamento a vapore o di ridurre la temperatura del trattamento termico a valori di 20-40°C. D'altra parte, la eliminazione del vapore o la riduzione nella temperatura del trattamento termico consentono di produrre calcestruzzi di alta qualità (per la durabilità, la resistenza meccanica, il modulo elastico, lo scorrimento viscoso) non solo alle brevi stagionature ma anche in servizio

1. Premessa

E' noto che aumentando la temperatura alla quale si stagiona il calcestruzzo, aumenta la resistenza meccanica iniziale ma diminuisce quella alle lunghe stagionature (1) come è schematicamente mostrato in fig. 1. L'influenza della temperatura sulla resistenza meccanica è basata su due distinti effetti della temperatura: a) una temperatura più alta accelera inizialmente l'idratazione dei componenti del cemento Portland ma ne rallenta il processo alle lunghe stagionature (2-5), come è schematicamente illustrato in fig. 2; b) un aumento della temperatura peggiora la qualità legante della pasta cementizia o

perchè questa risulta meno uniforme con zone di alta porosità che vengono a costituire i punti deboli della struttura(6) o perchè i cristalli fibrosi dei silicati idrati, ai quali si deve la rigidità della struttura, risultano meno lunghi (7).

La combinazione dei due suddetti effetti ha come conseguenza che alle brevi stagionature la resistenza meccanica di un calcestruzzo stagionato a più alta temperatura è maggiore di quella del corrispondente conglomerato stagionato a più bassa temperatura, perchè

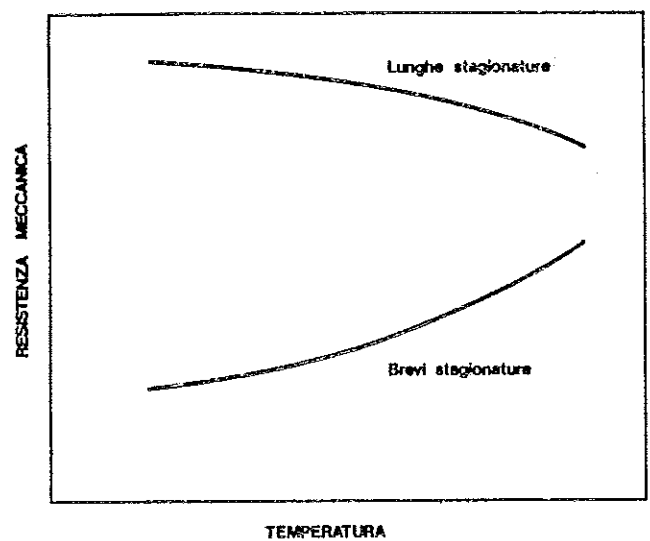


Fig. 1 Influenza della temperatura sulla resistenza meccanica del calcestruzzo alle brevi e lunghe stagionature

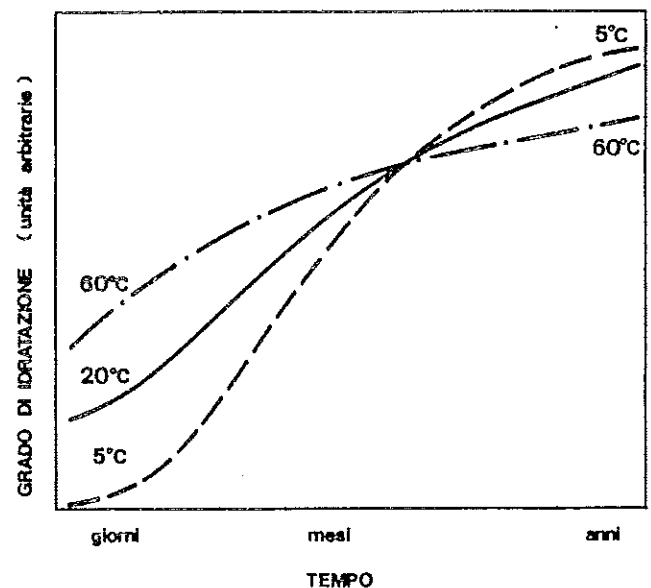


Fig. 2 Influenza della temperatura sul grado di idratazione del cemento

l'effetto a) (maggiore percentuale di cemento idratato) sovrasta l'effetto b) (migliore qualità legante della pasta cementizia). Alle lunghe stagionature, invece, entrambi gli effetti (minore percentuale di cemento idratato e peggiore qualità della pasta cementizia) concorrono ad una diminuzione della resistenza meccanica all'aumentare della temperatura.

Da un punto di vista pratico, l'effetto positivo dell'alta temperatura sulla resistenza meccanica iniziale viene sfruttato in prefabbricazione per accelerare i processi produttivi, generalmente mediante trattamenti termici a 60-80°C, anche se l'innalzamento della temperatura nel processo di produzione comporta, per i motivi sopra menzionati, un peggioramento della resistenza meccanica nelle strutture in servizio.

D'altra parte, nel trattamento a vapore, oltre agli effetti negativi sulla qualità della pasta cementizia derivanti semplicemente dall'idratazione condotta ad alta temperatura, esiste un ulteriore e più significativo peggioramento derivante da un troppo rapido riscaldamento del calcestruzzo dalla temperatura ambiente a quella di regime. L'effetto, particolarmente negativo nei processi che non prevedono un'adeguata stagionatura preliminare a temperatura ambiente prima del trattamento a vapore, è sostanzialmente connesso allo stato tensionale che insorge nel materiale per il diverso coefficiente di dilatazione termica dei componenti del calcestruzzo non ancora indurito. Conseguentemente, stagionature brevi (meno di 3 ore) e riscaldamenti rapidi (maggiori di 30°C/ora), come spesso sono richiesti per esigenze di produzione, provocano l'insorgere di tensioni di origine termica all'interno della pasta cementizia o all'interfacies pasta-aggregato che si tramutano in microfessure all'interno del materiale, tanto più insidiose quanto meno sono rilevabili sulla superficie del manufatto. Alexanderson (8) ha messo in evidenza come il numero e la lunghezza delle microfessure, derivanti da un riscaldamento

rapido del calcestruzzo, aumenti al diminuire del tempo di prestagionatura ed all'aumentare del rapporto acqua/cemento: entrambe le variazioni concorrono, infatti, ad un indebolimento della struttura del materiale nel momento in cui insorgono le tensioni di origine termica.

Gli effetti negativi esercitati dal trattamento a vapore sulla qualità del calcestruzzo alle lunghe stagionature, si esplicano non solo in una minore resistenza meccanica, ma anche in un peggioramento di tutte le altre caratteristiche legate alla microstruttura della pasta cementizia legante. Pertanto, rispetto ad un analogo calcestruzzo stagionato a temperatura ambiente, quello trattato a vapore presenta alle lunghe stagionature (e quindi in servizio) non solo una minore resistenza meccanica, ma anche un minor modulo elastico, una maggiore deformazione viscosa ed una minore durabilità in ambienti aggressivi.

2. L'impiego di additivi riduttori d'acqua in prefabbricazione.

L'impiego di additivi superfluidificanti come riduttori d'acqua, e' soprattutto di quelli più recentemente segnalati come iperfluidificanti (9), consente di confezionare calcestruzzi molto fluidi (slump di 20-22 cm) con un rapporto acqua/cemento così basso (0,3-0,4) da poter raggiungere a 24 ore resistenze meccaniche elevate (dell'ordine dei 30-40 MPa) eliminando il trattamento a vapore o riducendo la temperatura del trattamento termico a valori di 20-40°C. Tutto ciò si tramuta non solo in una semplificazione ed economia del processo produttivo di prefabbricazione, ma anche e soprattutto in un significativo miglioramento delle prestazioni delle strutture in servizio, non solo per l'elevata resistenza meccanica (80-90 MPa a 28 giorni), ma anche per la maggiore stabilità dimensionale derivante dal maggior modulo elastico e dalla minore deformazione viscosa, e per la migliore durabilità derivante da una microstruttura meno porosa, più compatta e soprattutto priva di microfessure interne.

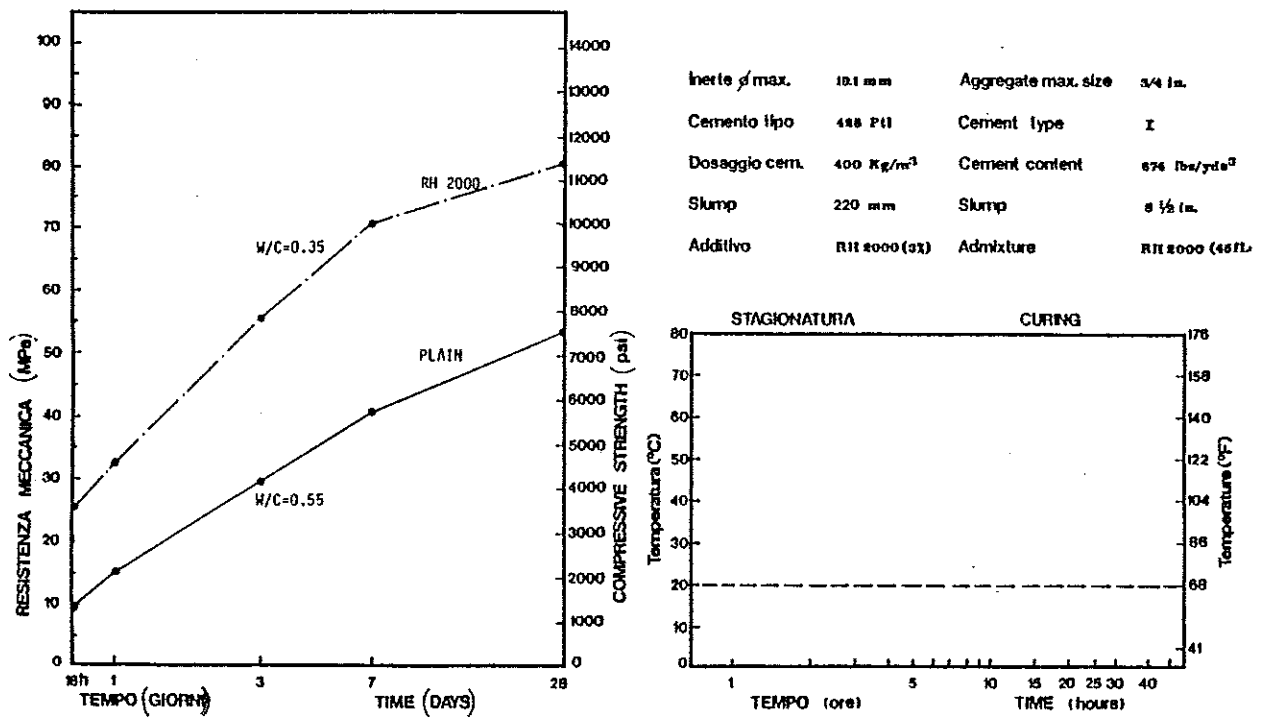


Fig. 3 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo stagionato a 20°C (cemento Portland 425)

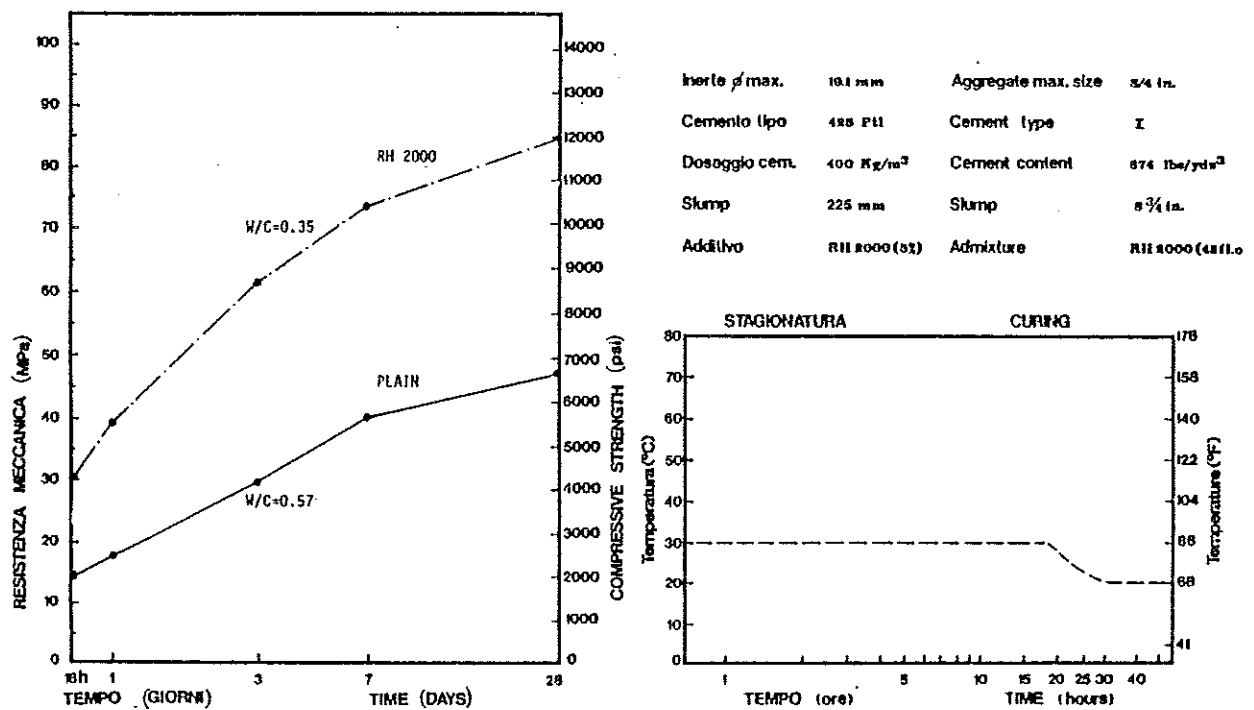


Fig. 4 Caratteristiche e resistenze meccaniche dei calcestruzzi trattati a 30°C (18 ore) e stagionati a 20°C (cemento Portland 425)

L'innalzamento della temperatura da quella ambientale a quella massima di regime del trattamento termico costituisce la fase più delicata del processo perchè, come si è già detto, possono insorgere delle microfessure all'interno del materiale, qualora si superi una certa soglia critica nella velocità di riscaldamento. Orbene, anche nella ipotesi più pessimistica e meno vantaggiosa di dover impiegare l'additivo riduttore d'acqua congiuntamente ad un blando trattamento termico a 30-40°C, è evidente che il dimezzamento della temperatura massima da raggiungere (da 60-80°C a 30-40°C) consente, a parità di tempo, di dimezzare anche la velocità di riscaldamento mantenendola facilmente al di sotto della summenzionata soglia critica.

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati di prove che hanno avuto lo scopo di verificare la possibilità di eliminare il trattamento a vapore o di ridurre la temperatura del trattamento termico mediante l'impiego di additivi iperfluidificanti.

3. Parte sperimentale

3.1 Materiali impiegati

Sono stati impiegati due cementi Portland (uno di tipo 425 e l'altro di tipo 525), ed un inerte naturale con diametro massimo di 19,1 mm costituito dal 40% di sabbia con modulo di finezza 2,73 e dal 60% di ghiaia con modulo di finezza 6,47. Negli impasti additivati è stato impiegato un additivo iperfluidificante dosato a 3 litri per quintale di cemento che consentiva una riduzione nell'acqua di impasto dal 35 al 45%.

3.2 Produzione di calcestruzzi

Per il confezionamento dei calcestruzzi sono stati impiegati dosaggi di cemento pari a 400 kg/m³ ed un rapporto acqua/cemento tale da ottenere calcestruzzi fluidi con slump compreso tra 22 e 25 cm.

Dopo la miscelazione (effettuata a temperature di 5-20-30-40°C) sono stati

confezionati provini cubici (10 cm) sottoposti a vari cicli di maturazione.

Le caratteristiche degli impasti ed i cicli termici sono riportati a destra (rispettivamente in alto ed in basso) delle figure 3-12.

In generale si può osservare che nei calcestruzzi non additivati, a parità di lavorabilità, il rapporto acqua/cemento è risultato tanto maggiore quanto più elevata era stata la temperatura al momento della miscelazione: la maggiore richiesta d'acqua deriva dalla maggiore reattività dei componenti del cemento ed in particolare degli alluminati: così per esempio il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo confezionato con cemento Portland 425 è passato da 0,52 a 0,58 quando la temperatura al momento della miscelazione è stata fatta variare da 5 a 40°C. Ancora più significativa è risultata la differenza per il più reattivo cemento Portland 525: per la stessa variazione di temperatura il rapporto acqua/cemento è passato da 0,52 a 0,66.

Nei calcestruzzi additivati non si è registrato alcun significativo aumento nel rapporto acqua/cemento all'aumentare della temperatura di miscelazione da 5 a 40°C: esso è passato da 0,34 a 0,35 per il cemento 425 e da 0,35 a 0,37 per il cemento 525. Ciò è da mettere in relazione con il benefico effetto ritardante esercitato dall'additivo durante le prime 2-3 ore di idratazione seguito immediatamente da una forte accelerazione della reazione tra acqua e cemento (fig. 13).

3.3 Prove sperimentali

Oltre alla valutazione della resistenza meccanica a compressione su provini cubici (10 cm) stagionati da 18 ore fino a 28 giorni, si è proceduto anche (limitatamente ai provini stagionati per 28 giorni) alla valutazione del modulo elastico statico (su prismi 10x10x20 cm), della deformazione viscosa (su prismi 16x16x64 cm) a 20°C con U.R. del 60% e della durabilità (per immersioni di provini 10x10x20 cm in soluzione acquosa al 10% di MgSO₄).

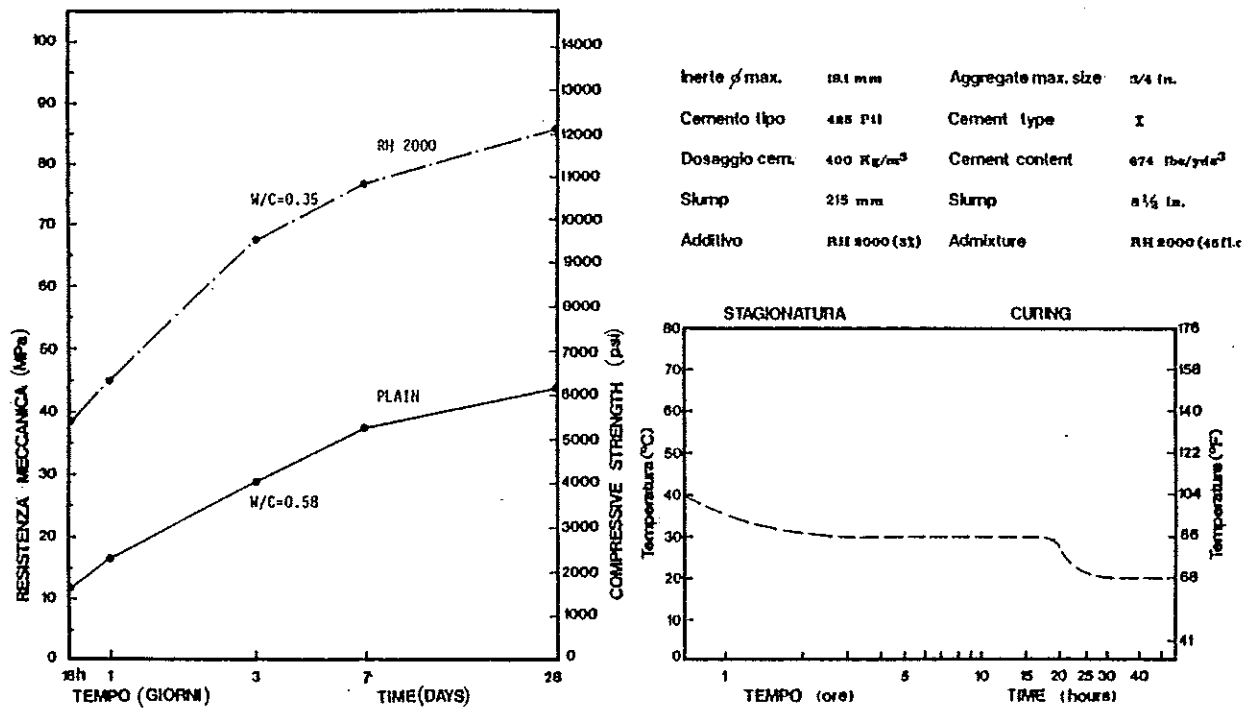


Fig. 5 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo riscaldato a 40°C, trattato a 30°C (18 ore) e stagionato a 20°C (cemento Portland 425)

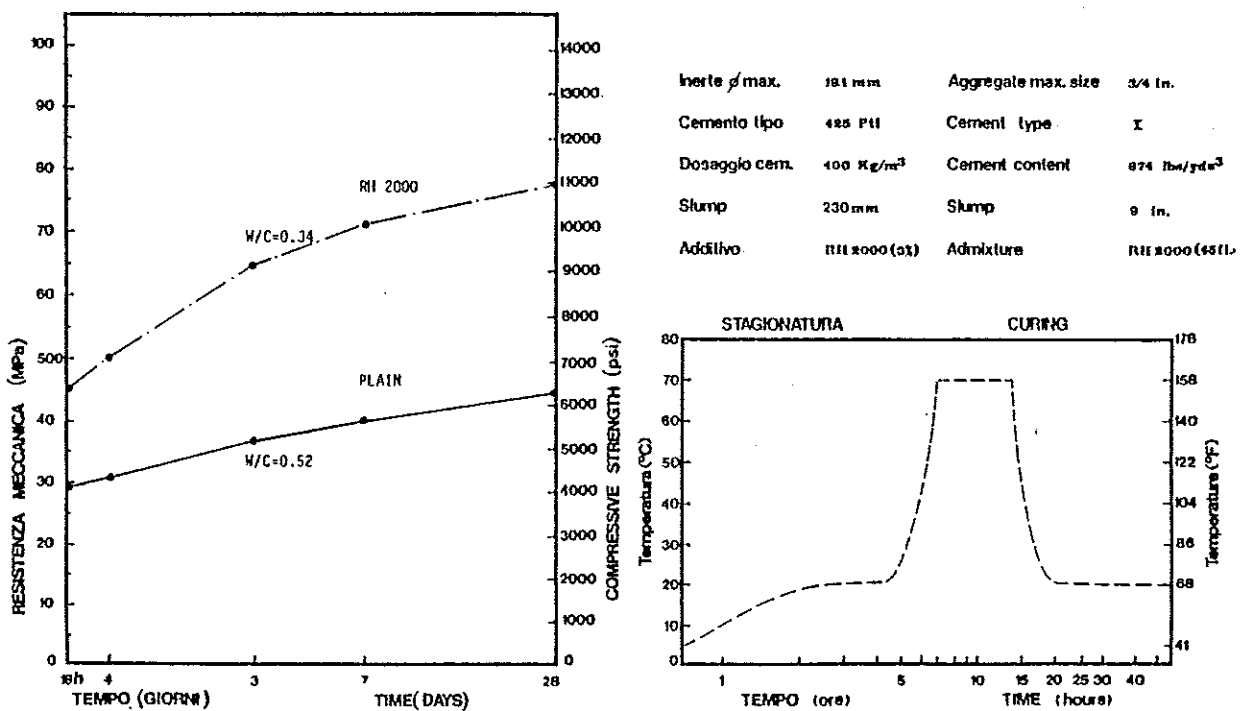


Fig. 6 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo sottoposto a ciclo termico (70°C) tradizionale (cemento Portland 425)

Il modulo elastico statico è stato determinato misurando la deformazione istantanea dei provini sotto l'applicazione di un carico pari a $1/3$ della resistenza meccanica.

La deformazione viscosa è stata determinata registrando l'accorciamento unitario nel tempo dei provini sotto l'applicazione di un carico costante pari a 27 o 16 MPa.

La durabilità è stata valutata registrando l'allungamento relativo nel tempo per effetto dell'attacco solfatico.

4. Risultati e discussione

4.1 Resistenza meccanica: prove di laboratorio

Le figure da 3 a 7 indicano l'andamento della resistenza meccanica dei calcestruzzi confezionati con cementi Portland 425 e stagionati nelle diverse condizioni termiche. Le figure da 8 a 12 mostrano gli analoghi risultati ottenuti per i calcestruzzi confezionati con cemento 525.

In tutti i casi si registra che l'aggiunta di additivo provoca un sensibile incremento nella resistenza meccanica a causa della significativa riduzione nel rapporto acqua/cemento. L'incremento è maggiore laddove maggiore è la riduzione nel rapporto acqua/cemento (fig. 5 e 10) per il diverso effetto della temperatura di miscelazione sulla richiesta d'acqua.

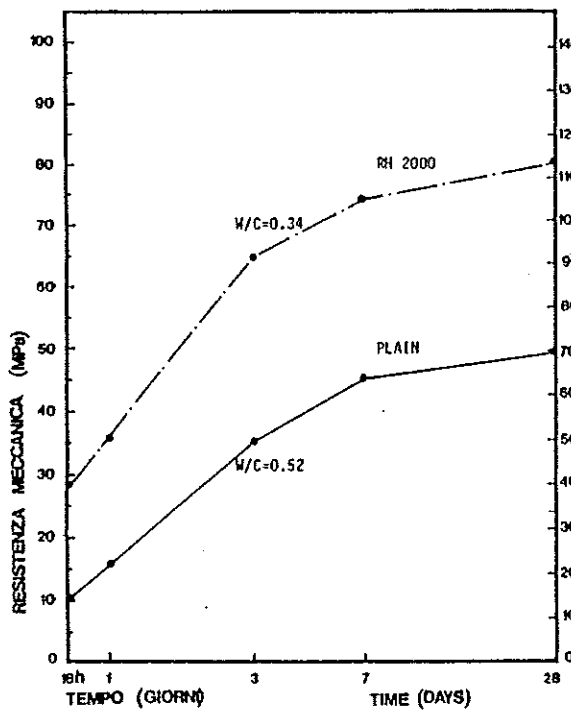
Le figure 3 ed 8 mostrano le resistenze meccaniche dei calcestruzzi stagionati a 20°C con e senza additivo contenenti rispettivamente il cemento 425 e 525. Le resistenze meccaniche risultano raddoppiate a 1 giorno ed incrementate di oltre il 60% a 28 giorni per effetto della presenza dell'additivo.

Le figure 4 e 9 indicano l'andamento delle resistenze meccaniche dei calcestruzzi confezionati rispettivamente con cemento 425 e 525, stagionati a 30°C per 18 ore e quindi maturati a 20°C. L'aggiunta di additivo fa raddoppiare la resistenza alla fine del trattamento termico (18 ore) e provoca un

aumento di circa l'80% a 28 giorni. Rispetto ai calcestruzzi stagionati a 20°C si registra un incremento di 5 MPa a 18 ore per tutti i calcestruzzi ad eccezione di quello contenente cemento 525 senza additivo per il forte aumento nel rapporto acqua/cemento (da 0,57 a 0,62) determinato dall'aumento di temperatura (da 20 a 30°C). Alle lunghe stagionature (28 giorni) i calcestruzzi non additivati e trattati a 30°C per 18 ore presentano una resistenza meccanica inferiore a quella degli analoghi calcestruzzi stagionati sempre a 20°C. Per i calcestruzzi additivati, invece, il trattamento termico a 30°C per 18 ore non provoca alcuna variazione della resistenza a 28 giorni per il cemento 525 (figure 8 e 9) ed un lieve miglioramento (da 81,5 a circa 86 MPa) per il cemento 425.

Le figure 5 e 10 mostrano le resistenze meccaniche dei calcestruzzi contenenti rispettivamente cementi 425 e 525 riscaldati a 40°C con vapore durante il mescolamento, lasciati raffreddare naturalmente in casseri riscaldati a 30°C, e quindi maturati a 20°C dopo 18 ore dalla miscelazione. Rispetto ai corrispondenti calcestruzzi sempre stagionati a 20°C, si registra un ulteriore incremento di resistenza alla fine del ciclo termico (18 ore) di circa 13 MPa ed un lieve miglioramento di oltre 5 MPa a 28 giorni purchè sia presente l'additivo. Nei calcestruzzi non additivati, invece, il riscaldamento a 40°C ed il trattamento a 30°C non provoca alcun incremento nella resistenza alla fine del ciclo (18 ore) ed un decremento di circa 6 MPa alle lunghe stagionature: l'effetto è da ricondurre soprattutto al maggior rapporto acqua/cemento impiegato nei calcestruzzi riscaldati a 40°C.

E' noto che il trattamento termico si impone in prefabbricazione soprattutto durante il periodo invernale, quando, per effetto della bassa temperatura ambientale, l'indurimento del calcestruzzo subisce un rallentamento, soprattutto alle brevi stagionature, così marcato da rendere antieconomico il processo produttivo. Nelle figure 6 e 11 viene mostrato l'andamento delle



Inerte ϕ max.	19.1 mm	Aggregate max. size	3/4 in.
Cemento tipo	425 PII	Cement type	I
Dosaggio cern.	400 Kg/m ³	Cement content	674 lbs/yds ³
Slump	230 mm	Slump	9 in.
Additivo	RH 2000 (3%)	Admixture	RH 2000 (45FL)

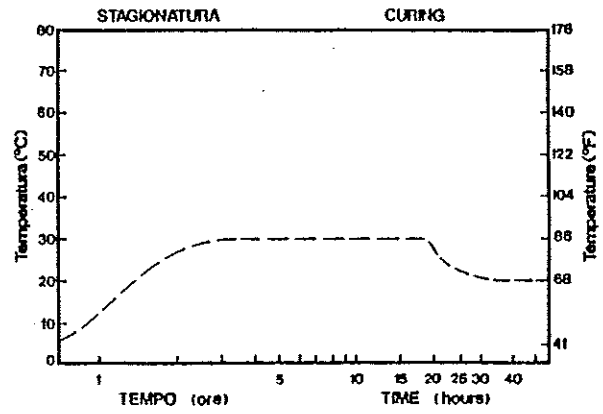
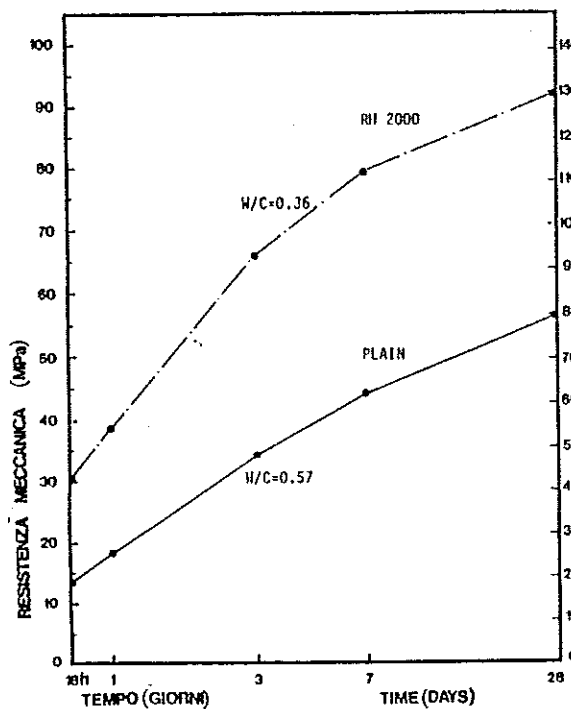


Fig. 7 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo sottoposto a ciclo termico (30°C) blando (cemento Portland 425)



Inerte ϕ max.	19.1 mm	Aggregate max. size	3/4 in.
Cemento tipo	525 PII	Cement type	III
Dosaggio cern.	400 Kg/m ³	Cement content	674 lbs/yds ³
Slump	245 mm	Slump	9 3/4 in.
Additivo	RH 2000 (3%)	Admixture	RH 2000 (45FL)

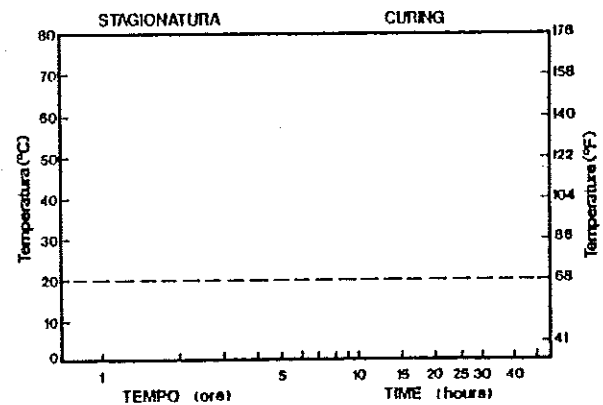


Fig. 8 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo stagionato a 20°C (cemento Portland 525)

resistenze meccaniche dei calcestruzzi, rispettivamente con cemento 425 e 525, miscelati a 5°C, e sottoposti ad un tradizionale ciclo termico con una stagionatura adeguatamente lunga (4 ore) da evitare la formazione di microfessure (paragrafo 1). Durante la stagionatura la temperatura viene portata gradualmente da quella ambientale (5°C) a 20°C in 2 ore e, dopo una sosta a 20°C per altre due ore, il calcestruzzo viene riscaldato in 3 ore per passare da 20 a 70°C. Dopo un trattamento a 70°C per 7 ore la temperatura si porta gradualmente a 20°C alla fine del ciclo termico (18 ore). Rispetto alla stagionatura di 20°C questo trattamento termico fa passare la resistenza meccanica iniziale del calcestruzzo non additivato da 10 a 29 MPa per il cemento 425 e da 13 a 34 MPa per il cemento 525; tuttavia le resistenze meccaniche a 28 giorni risultano diminuite, per effetto delle modifiche apportate dal trattamento termico, di circa 9 MPa per il cemento 425 e di circa 8 MPa per il cemento 525. Nel caso dei calcestruzzi additivati, invece, accanto ad un incremento di circa 20 MPa alla fine del ciclo termico (per entrambi i cementi) si registra un lieve calo della resistenza a 28 giorni (di circa 1,5 MPa per il cemento 425 e di circa 5,3 MPa per il cemento 525).

Ancora più interessante appare il confronto tra il calcestruzzo additivato e stagionato sempre a 20°C (fig. 3 ed 8) e quello senza additivo trattato a 70°C (fig. 6 ed 11): le resistenze meccaniche a 18 ore appaiono leggermente inferiori nei calcestruzzi non trattati a vapore (di circa 4 MPa per entrambi i cementi) ma già a 24 ore la resistenza meccanica del calcestruzzo additivato e non trattato termicamente appare superiore a quella del calcestruzzo senza additivo e trattato a vapore. Alle lunghe stagionature le resistenze meccaniche dei calcestruzzi additivati e non trattati a vapore appaiono sovrastare decisamente quelle dei corrispondenti calcestruzzi senza additivo e trattati a 70°C: 80 contro 55 MPa per il cemento 425 e 93 contro 57 per il cemento 525.

Particolarmente interessante è apparso - per i calcestruzzi da confezionare in climi invernali - l'impiego dell'additivo in combinazione con un "blando" trattamento termico per portare la stagionatura da quella ambientale (5°C) a 30°C e per poi completare la maturazione del calcestruzzo a 20°C alla fine del ciclo termico (18 ore). I risultati sono riportati nelle figure 7 e 12 per i calcestruzzi contenenti rispettivamente cemento 425 e 525. Rispetto al tradizionale ciclo termico a 70°C (fig. 6 ed 11), il trattamento "blando" a 30°C si rivela assolutamente insufficiente per i calcestruzzi non additivati ove si consideri la resistenza meccanica alla fine del ciclo: questa passa da 29 a 10 MPa per il cemento 425 e da 34 a 20 MPa per il cemento 525. Al contrario, i calcestruzzi additivati, pur risultando meno resistenti a 18 ore con un trattamento a 30°C invece che a 70°C, presentano una resistenza meccanica che è all'incirca eguale (per il cemento 425) o superiore (per il cemento 525) a quella ottenuta alla fine del ciclo a 70°C con i calcestruzzi non additivati (rispettivamente 28 e 42 MPa). Inoltre essi presentano una resistenza meccanica a 28 giorni paragonabile a quella dei calcestruzzi additivati e non trattati a vapore (fig. 3 ed 8) e comunque decisamente superiore a quella dei calcestruzzi senza additivo trattati a vapore di 70°C (fig. 6 ed 11).

4.2 Resistenza meccanica: prove di campo

Val la pena di segnalare che, passando dai provini di laboratorio ai manufatti reali, il suddetto ciclo termico a 30°C in presenza dell'additivo non necessariamente implica l'immissione di vapore o un altro trattamento termico artificiale anche nella stagione invernale. Infatti, soprattutto per getti di un certo spessore (maggiore di 10 cm) e purchè i manufatti siano protetti dall'ambiente freddo subito dopo il getto, il calore di idratazione che si sviluppa attraverso la reazione tra l'acqua ed il cemento è sufficiente a portare automaticamente e gradualmente la temperatura del calcestruzzo

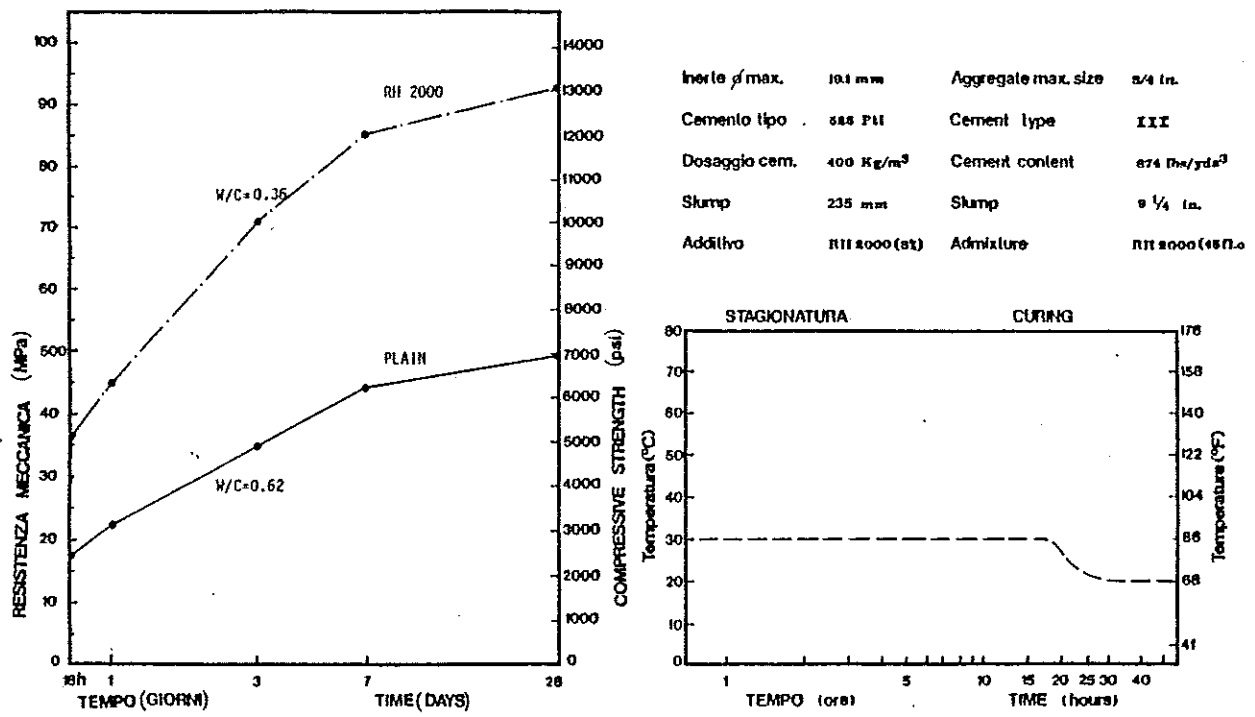


Fig. 9 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo trattato a 20°C (18 ore) e stagionato a 20°C (cemento Portland 525)

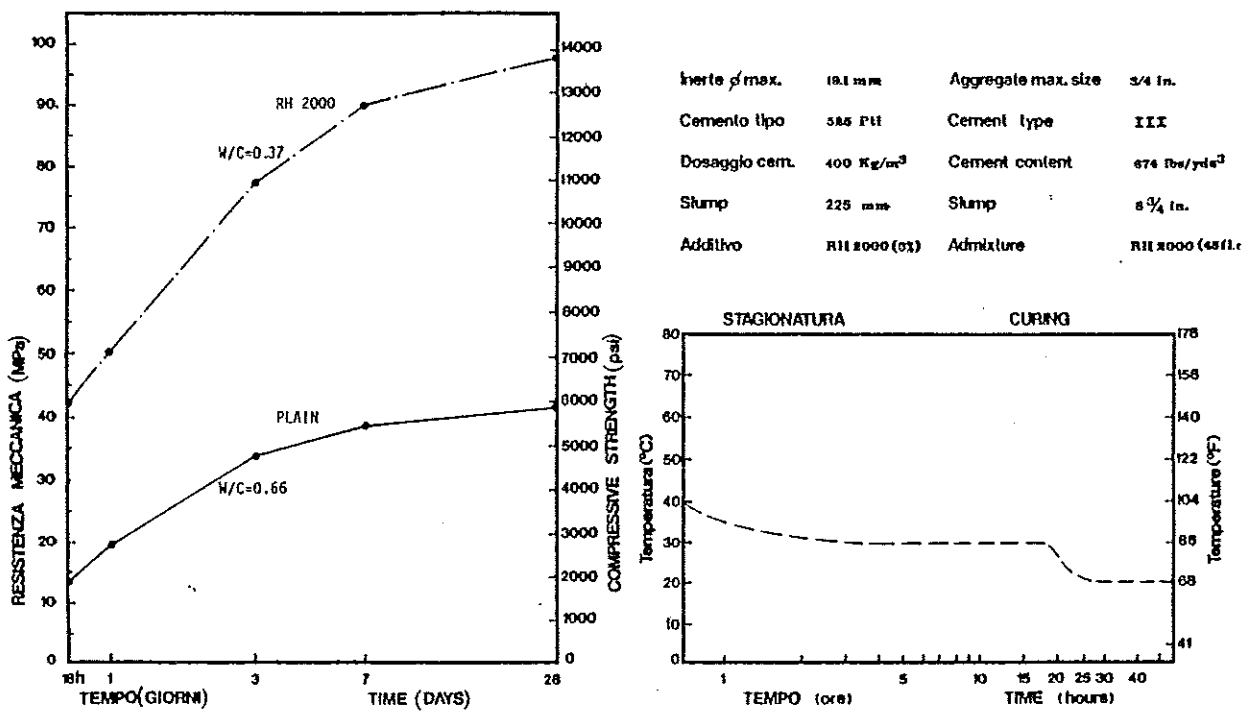


Fig. 10 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo riscaldato a 40°C, trattato a 30°C (18 ore) e stagionato a 30°C (cemento Portland 525)

da quella ambientale a circa 30°C. Nel caso di getti di spessore ridotto (meno di 10 cm) o in ambienti particolarmente freddi (meno di 5°C) è raccomandabile un maggior dosaggio di cemento e/o l'impiego del cemento 525 per incrementare lo sviluppo del calore di idratazione. E' opportuno ricordare, inoltre, che grazie all'effetto disperdente provocato dall'additivo nei confronti dei granuli di cemento, l'idratazione ed il conseguente sviluppo di calore procede (dopo un ritardo iniziale di qualche ora) più rapidamente che in assenza di additivo (fig. 13), cosicché la presenza dell'additivo iperfluidificante contribuisce ad un rapido raggiungimento di elevate resistenze meccaniche non solo per la drastica riduzione nel rapporto acqua/cemento ma anche per un incremento nel calore di idratazione.

Per verificare la validità di questa ipotesi sono stati prodotti presso un impianto di prefabbricazione (Gruppo Nova di Giulianova) alcuni manufatti reali (pannelli e travi a T) in periodo invernale (temperatura circa 6°C) impiegando il calcestruzzo descritto in Tabella 1.

Cemento Portland 525	:	400 kg/m ³
Sabbia frantumata (M.F. = 3,35)	:	1026 kg/m ³
Inerte grosso (diam.max 30 mm)	:	874 kg/m ³
Acqua	:	130 kg/m ³
Rheobuild 2000	:	12 kg/m ³
Slump	:	24 cm

Tabella 1 *Composizione dei calcestruzzi*

Con lo stesso impasto sono stati confezionati alcuni provini cubici (10 cm) lasciati maturare all'aperto accanto al manufatto reale. Ovviamente, a causa della diversa massa, la temperatura del calcestruzzo nei provini non è aumentata considerevolmente rispetto a quella dell'ambiente, mentre quella del calcestruzzo nel manufatto reale si è portata a 20-30°C nel giro di qualche ora. Le resistenze meccaniche sono state rilevate mediante prove sclerometriche, seguite da

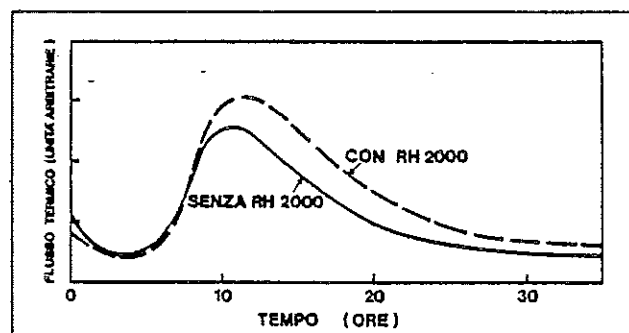


Fig. 13 *Influenza dell'additivo sul grado di idratazione del cemento valutato attraverso lo sviluppo del calore di idratazione*

rottura a compressione per i provini, e mediante prove sclerometriche soltanto sul manufatto reale. La media dei valori, esprimendo i risultati delle prove sclerometriche in resistenza meccanica, è riportata nella Tabella 2.

Tempo	Resistenza meccanica	
	Provini cubici	Manufatto reale
16 ore	3,5	27,0
24 ore	23,7	34,4
48 ore	60,0	65,0

Tabella 2 *Resistenza meccanica (in MPa) del calcestruzzo additivato e non trattato a vapore in periodo invernale (4-7°C)*

Si può osservare che, sebbene la resistenza meccanica iniziale (16 ore) dei provini risultasse assolutamente insoddisfacente, per effetto della bassa temperatura ambientale, (nonostante la riduzione del rapporto acqua/cemento), la resistenza meccanica del manufatto reale - grazie all'effetto combinato della riduzione d'acqua e del maggior calore sviluppato - ha superato il valore richiesto di 25 MPa in sole 16 ore ed in assenza di qualsiasi trattamento termico artificiale. E' degno di nota che, proprio grazie alla eliminazione del vapore (e quindi degli inconvenienti segnalati nel paragrafo 1) ed al basso rapporto acqua/cemento, le prestazioni in servizio di questo manufatto appaiono decisamente superiori a quelle di un

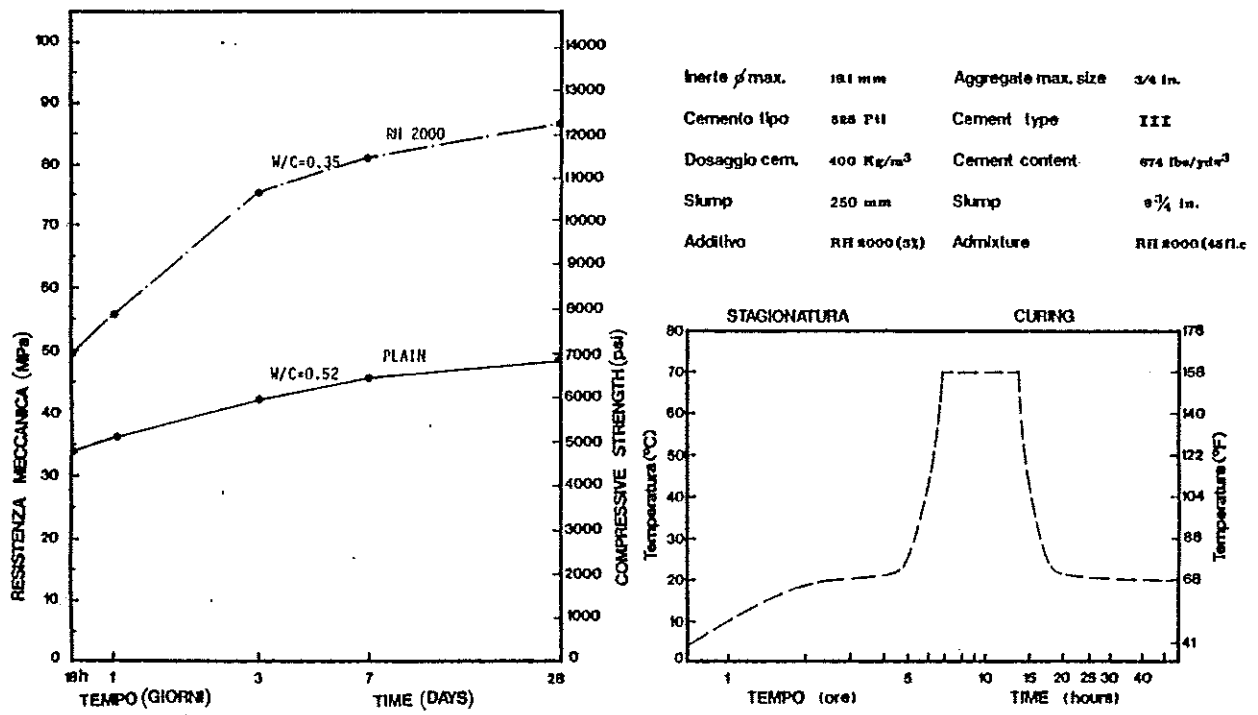


Fig. 11 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo sottoposto a ciclo termico (70°C) tradizionale (cemento Portland 525)

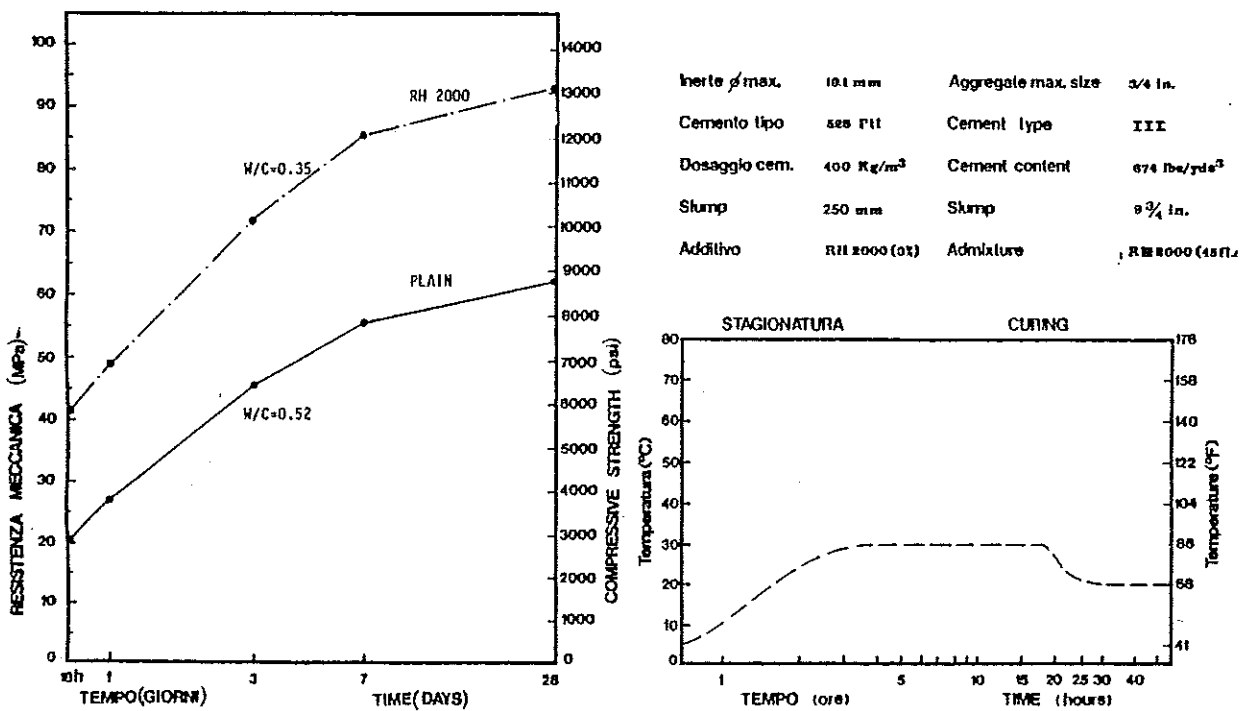


Fig. 12 Caratteristiche e resistenze meccaniche del calcestruzzo sottoposto a ciclo termico (30°C) blando (cemento Portland 525)

corrispondente manufatto prodotto in prefabbricazione mediante un tradizionale trattamento a vapore.

4.3 Modulo elastico

Nella Tabella 3 sono indicati i valori di modulo elastico statico limitatamente ai calcestruzzi contenenti cemento 425 e stagionati per 28 giorni dopo un "blando" ciclo termico di 18 ore (temperatura massima: 20-40°C), oppure dopo un comune trattamento a vapore (temperatura massima 70°C). I cicli termici sono quelli già descritti in dettaglio nelle fig. 3-7 oppure 8-12.

Descrizione del ciclo:	Modulo elastico statico	
	Con additivo	senza additivo
Sempre a 20°C	43400	31900
A 30°C per 18 ore, quindi a 20°C	40400	29600
A 40°C, poi a 30°C fino a 18 ore, quindi a 20°C	39700	29700
A 5°C, poi a 20°C, quindi a 70°C, infine a 20°C	39900	28900
A 5°C, poi a 30°C fino a 18 ore, quindi a 20°C	41400	30200

Tabella 3 Modulo elastico statico (in MPa) a 28 giorni

Si può osservare come indipendentemente dal ciclo termico impiegato il modulo elastico del calcestruzzo additivato risulti mediamente superiore di circa il 37% al corrispondente calcestruzzo privo di additivo. In particolare il modulo elastico del calcestruzzo additivato e stagionato sempre a 20°C risulta superiore del 50% a quello del calcestruzzo privo di additivo e sottoposto al tradizionale trattamento a vapore di 70°C.

Val la pena di segnalare che la correlazione $E = 18000 \sqrt{R_{bk}}$ riportata nella legge 1086 deve ritenersi puramente indicativa

(10) in quanto, a parità di resistenza meccanica, a seconda dell'inerte più o meno rigido impiegato, il modulo elastico del calcestruzzo risulta conseguentemente più o meno elevato (11).

4.4 Deformazione viscosa

Alcuni provini (16x16x64 cm) confezionati con gli stessi calcestruzzi sui quali si è misurato il modulo elastico (paragrafo 4.3), sono stati sottoposti a 28 giorni ad un carico costante che è stato di 27 o di 16 MPa per i calcestruzzi additivati, e soltanto di 16 MPa per quelli non additivati. I valori della deformazione viscosa dopo aver applicato il carico costante per 1 anno sono riportati in Tabella 4.

Il carico di 27 MPa per i calcestruzzi additivati (con una resistenza meccanica a 28

Descrizione del ciclo	Presenza di additivo	Res. a 28 gg (MPa)	Deformaz. viscosa (10^{-6}) a 1 anno con carico di:	
			16 MPa	27 MPa
Sempre a 20°C	SI	81,4	380	650
	NO	53,6	670	-
A 30°C per 18 ore, quindi a 20°C	SI	85,7	310	590
	NO	48,6	660	-
A 40°C, poi a 30°C fino a 18 ore, quindi a 20°C	SI	86,4	320	570
	NO	43,6	690	-
A 5°C, poi a 20°C, quindi a 70°C, infine a 20°C	SI	80,7	370	660
	NO	50,0	710	-
A 5°C, poi a 30°C fino a 18 ore, quindi a 20°C	SI	78,6	370	630
	NO	44,3	660	-

Tabella 4 Deformazione viscosa a 1 anno

giorni mediamente di 82 MPa) e quello di 16 MPa per i calcestruzzi non additivati (con una resistenza meccanica a 28 giorni mediamente di 48 MPa) corrisponde per entrambi ad un rapporto sollecitazione/resistenza di circa $1/3$. Conseguentemente i calcestruzzi additivati e caricati con 27 MPa presentano una deformazione viscosa che è di poco inferiore a quella dei corrispondenti calcestruzzi non additivati ma sollecitati con soli 16 MPa. D'altra parte a parità di carico applicato (16 MPa) il rapporto sollecitazione/resistenza passa da circa $1/3$ per i calcestruzzi non additivati a circa $1/5$ per i calcestruzzi additivati.

Pertanto la deformazione viscosa dei calcestruzzi additivati è sensibilmente inferiore (poco più della metà) a quella dei corrispondenti calcestruzzi non additivati.

Val la pena di segnalare che, contrariamente a quanto si verifica normalmente per i manufatti reali, i calcestruzzi sottoposti ad un trattamento termico a vapore tradizionale (70°C) non hanno manifestato nel presente lavoro, rispetto a quelli non trattati a vapore (20°C), una deformazione viscosa significativamente maggiore; tuttavia, occorre tener conto che la maggiore deformazione viscosa spesso lamentata nei prefabbricati trattati tradizionalmente a vapore è da mettere in relazione soprattutto con il già discusso stato microfessurativo che

si instaura all'interno del materiale come conseguenza di un troppo rapido riscaldamento del calcestruzzo ancora fresco e/o di una troppo breve stagionatura (paragrafo 1). Nel presente lavoro, invece, nel trattamento a vapore tradizionale si è adottata sia un'adeguata prestagionatura (4 ore) sia una lenta velocità di riscaldamento (di poco superiore a 15°/ora) e pertanto le deformazioni viscosi dei calcestruzzi trattati a vapore non sono risultate significativamente superiori a quelle del calcestruzzo non trattato a vapore. Analoghe considerazioni possono essere fatte per il modulo elastico (paragrafo 4.3).

4.5 Durabilità

Alcuni provini (10x10x20 cm) confezionati con gli stessi calcestruzzi impiegati per le prove sul modulo elastico (paragrafo 4.3) e sulla deformazione viscosa (paragrafo 4.4.) sono stati immersi dopo una stagionatura di 28 giorni in una soluzione acquosa aggressiva contenente il 10% in peso di $MgSO_4$; a distanza di tempo è stata registrata la variazione di lunghezza rispetto a quella posseduta dai provini prima dell'immersione in acqua solfatica. I risultati sono riportati in fig. 14. Si può osservare che tutti i provini confezionati con calcestruzzo contenente l'additivo, indipendentemente dal ciclo termico adottato, presentano un allungamento che è compreso tra 0,01 e 0,02% dopo 12 mesi di immersione. Al contrario, i provini di calcestruzzo non contenenti l'additivo, e quindi molto più porosi per il maggior rapporto acqua/cemento, sono più facilmente penetrati dal sale aggressivo che provoca un allungamento molto maggiore (0,10%) in un tempo molto più breve (4-6 mesi) a causa dell'attacco solfatico nei confronti degli alluminati del cemento.

Si può pertanto concludere che l'uso dell'additivo preso in esame consente non solo di raggiungere una elevata resistenza meccanica senza ricorrere ai tradizionali trattamenti a vapore, ma permette anche - grazie al basso rapporto acqua/cemento del

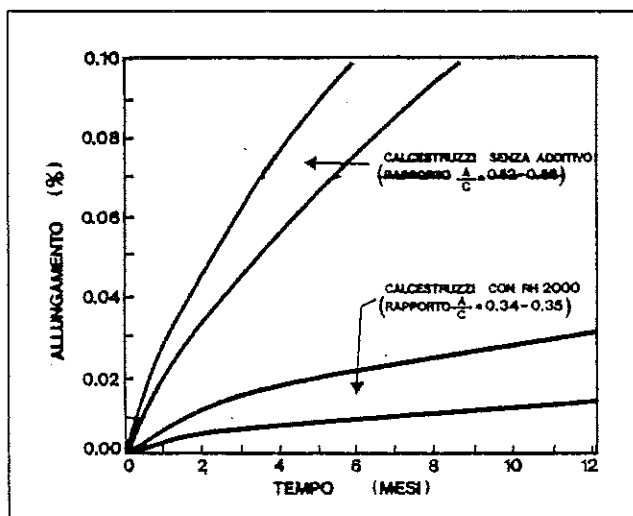


Fig. 14 Allungamento di provini di calcestruzzo per effetto dell'attacco solfatico ($MgSO_4 = 30\%$)

calcestruzzo - di garantire un'eccellente durabilità del manufatto anche in ambienti molto aggressivi.

5. Conclusioni

L'impiego di un additivo iperfluidificante (con conseguente rapporto acqua/cemento nel calcestruzzo di circa 0,35) consente di raggiungere valori relativamente elevati di resistenza meccanica (30-40 MPa) in tempi relativamente brevi (24 ore) senza dover ricorrere ai tradizionali trattamenti a vapore (60-80°C) normalmente impiegati nei cicli produttivi della prefabbricazione o comunque riducendo drasticamente la massima temperatura del trattamento termico (30-40°C). Molto spesso questi livelli di temperatura sono automaticamente raggiunti nel calcestruzzo dei manufatti reali anche nei climi invernali grazie allo sviluppo del calore di idratazione del cemento, purchè siano seguiti alcuni semplici accorgimenti: protezione del calcestruzzo esposto all'ambiente, uso di acqua calda per l'impasto, impiego di cemento 525, ecc.

L'eliminazione del trattamento a vapore, o comunque la riduzione della temperatura del ciclo termico, si traduce non solo in una semplificazione ed economia del processo produttivo, ma anche e soprattutto in un significativo miglioramento della produzione del manufatto in servizio: la resistenza meccanica, il modulo elastico e la durabilità risultano incrementate mentre la deformazione viscosa viene ridotta.

Bibliografia

- (1) M. COLLEPARDI, "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo", pg 81, Ed. Hoepli, Milano, 1980.
- (2) H. MORI e R. MINEGISHI, "Fifth International Congress on the Chemistry of Cements", Vol. II, pg 349, Tokyo, 1968.
- (3) V. ALUNNO ROSSETTI, G. CHIOCCHIO e M. COLLEPARDI, Cem. Concr. Res., 4, 279, 1974.

- (4) R. KONDO, S. GOTO, M. DAIMON e G. HOSAKA, Proc. Jap. Cem. Concr. Ass., 321, 2, 1973.
- (5) G. J. VERBECK e C. W. FOSTER, Proc. Am. Soc. Test. Mater., 50, 1235, 1950.
- (6) G. J. VERBECK e R. H. HELMUTH, "Fifth International Congress on the Chemistry of Cements", Vol. III, pg 1, Tokyo, 1968.
- (7) F. LOCHER e W. RICHARTZ, "Study of the Hydration Mechanism of Cement", Principal Paper in "Sixth International Congress on the Chemistry of Cements", Mosca, 1974.
- (8) J. ALEXANDERSON "Strength losses in heat cured concrete", Swedish Cement and Concrete Research, Institut of Technology, Stockholm, Proceedings n° 43, 1972.
- (9) MODERN ADVANCED CONCRETE, 15, 28, 1984.
- (10) M. COLLEPARDI, M. CORRADI e G. MORICONI, La Prefabbricazione, 4, 195, 1978.
- (11) J. J. SHIDELER, J. Amer. Concr. Inst., 54, 229, 1957.